

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

**ETİAL 160 ALAŞIMININ DÖKÜMÜNDE MAKRO VE  
MİKRO POROZİTE OLUŞUMUNUN  
MODELLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tek. Öğr. Murat ÇOLAK**

**Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ**  
**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ramazan KAYIKCI**

**Haziran 2009**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİAL 160 ALAŞIMININ DÖKÜMÜNDE MAKRO VE  
MİKRO POROZİTE OLUŞUMUNUN  
MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

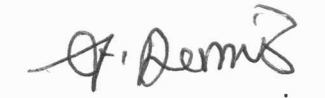
Tek. Öğr. Murat ÇOLAK

Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ

Bu tez 26 / 06 / 2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

  
Doç. Dr. Ramazan KAYIKCI  
Jüri Başkanı

  
Prof. Dr. Fevzi YILMAZ  
Üye

  
Doç. Dr. Adem DEMİR  
Üye

## TEŞEKKÜR

Tez çalıőmasının her aşamasında bana yardımcı olan ve deneylerin büyük bir kısmının yapıldığı döküm laboratuvarının bölümümüze kazandırılmasındaki katkılarından dolayı danışman hocam Doç.Dr. Ramazan KAYIKCI' ya teşekkür ederim.

Deneysel çalıőmalarım süresince yardımlarını benden esirgemeyen Ömer SAVAŐ'a, Yalçın YURTSEVEN'e, Aykan KARAYAZI'ya, Selçuk ŐİRİN'e ayrıca bölümümüze mikroskobun kazandırılmasında katkılarından dolayı Doç.Dr. Ramazan YILMAZ hocama ve bölüm başkanımız Prof.Dr. Fehim FINDIK başta olmak üzere bütün bölüm hocalarıma teşekkür ederim.

Bu yoğun çalışma günlerimde maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen eőime ve aileme sonsuz teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
SUMMARY.....	xiv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR TARAMASI.....	6
2.1. Alüminyum Alaşımının Özellikleri.....	6
2.2.1. Alüminyumun mekanik özellikleri.....	6
2.2.2. Alüminyumun kimyasal özellikleri.....	6
2.2.3. Korozyona karşı mukavemet.....	7
2.2.4. Şekillenebilme kabiliyeti.....	7
2.2.5. Isı ve elektrik özellikleri.....	7
2.2. Alüminyum Döküm Alaşımları.....	8
2.2.1. Al-Cu alaşımları.....	8
2.2.2. Al-Si alaşımları.....	10
2.2.3. Al-Ti alaşımları.....	11
2.3. Alüminyum Ergitme Pratiği.....	11
2.4. Alüminyum Alaşımlarının Hazırlanması.....	15
2.4.1. Curuflaştırıcılar.....	15

2.4.2. Tane küçültücüler.....	15	
2.4.3. Modifiye ediciler.....	16	
2.5. Alüminyum Alaşımlarının Ergime ve Katılaşması.....	17	
2.5.1. Çekirdeklenme.....	19	
2.5.1.1. Homojen çekirdeklenme.....	21	
2.5.1.2. Heterojen çekirdeklenme.....	23	
2.5.2. Büyüme.....	24	
2.5.2.1. Düzlemsel büyüme.....	25	
2.5.2.2. Dentritik büyüme.....	26	
2.5.3. Döküm kalıp içinde katılaşma.....	27	
2.5.4. Katılaşma sonrasında oluşan hacim azalmaları.....	29	
2.6. Alüminyum Alaşımlarında Tane İnceltme.....	31	
2.7. Tane Boyutunun Ölçülmesi.....	33	
2.8. Alüminyum Alaşımlarında Tane İnceltme Mekanizmaları.....	34	
2.9. Alüminyumda Tane İnceltmede Borun Etkisi.....	37	
2.10. Dökümlerde Besleme Mekanizmaları.....	39	
2.10.1. Sıvı besleme.....	40	
2.10.2. Kütle besleme.....	40	
2.10.3. İnterdentritik besleme.....	41	
2.10.4. Zor besleme.....	41	
2.10.5. Katı besleme.....	41	
2.11. Tane İnceltme Besleme Üzerine Etkisi.....	42	
2.12. Döküm Simülasyon Programları.....	43	
2.12.1. Döküm simülasyonlarında tanımlanan parametreler.....	44	
2.12.2. Modellenen döküm yöntemleri.....	46	
2.12.3. Döküm simülasyonlarıyla belirlenebilen özellikler.....	46	
2.12.4. Döküm simülasyon programlarının faydaları.....	47	
<b>BÖLÜM 3.</b>		
<b>DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>		<b>49</b>
3.1. Tane İnceltme Deneylerinin Yapılışı.....	51	
3.1.1. Kullanılan alaşımın kimyasal bileşimi.....	51	
3.1.2. Ergitme işleminin yapılışı.....	51	

3.1.3. Sıvı metalde gaz giderme ve gazlılık ölçümleri.....	52
3.1.4. Tane inceltme işlemlerinin yapılışı.....	54
3.1.5. Yüzeylerin tane ölçümü için hazırlanması.....	55
3.1.6. Tane inceltme test konilerinin değerlendirilmesi.....	56
3.1.7. Bekletme zamanının tane inceltmeye etkisinin incelenmesi...	56
3.2. Dökümlerin Yapılışı.....	56
3.2.1. Döküm geometrisinin seçimi.....	57
3.2.2. Kalıplama işleminin yapılışı.....	58
3.2.3. Termokopul yerleştirilmesi ve kalıbın kapatılması.....	59
3.2.4. Alaşımın ergitilmesi ve döküm işlemi.....	59
3.2.5. Numunelerin hazırlanması.....	61
3.2.6. Numunelerin incelenmesi.....	62
3.2.7. Mikroyapı resimlerinin imaj analizinde değerlendirilmesi.....	62
3.3. Simülasyon.....	64
3.3.1. Kalıp geometrisi ve malzeme özelliklerinin girilmesi.....	64
3.3.2. Kalıbın doldurulması ve dökümün katılması.....	65
BÖLÜM 4.	
DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	67
4.1. Tane İnceltme Deney Sonuçları.....	67
4.1.1. Sıvı metalde gazlılık ölçümleri sonuçları.....	67
4.1.2. Tane yapıları ve boyutları.....	68
4.1.3. Bekletme zamanının tane boyutuna etkisi.....	76
4.2. Döküm Deneylerinde Elde Edilen Sonuçlar ve Değerlendirmesi....	77
4.2.1. Soğuma eğrileri.....	78
4.2.2. Döküm mikroyapıları.....	81
4.2.3. Porozite ölçüm sonuçları.....	82
4.2.3.1. Tane incelticisiz döküm porozite-yoğunluk haritası....	82
4.2.3.2. Tane incelticili döküm porozite-yoğunluk haritası.....	84
4.3. Modelleme Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	87
BÖLÜM 4.	
GENEL SONUÇLAR.....	90

KAYNAKLAR.....	92
ÖZGEÇMİŞ.....	95

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AFS	: American Fondryman Society
ALCAN	: Aliminium Canada
Al5Ti1B	: %94 Alüminyum, %5 Titanyum, %1 Bor
BN	: Bor Nitrür
CFS	: Kritik Katı Oranı
ETİAL	: ETİ Alüminyum
K Tip	: Termokapıl
RPT	: Düşürülmüş Basınç Testi
SiC	: Silisyum Karbür
STL	: Üç Boyutlu Model Dosya Transfer Biçimi



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Al - Cu denge diyagramı.....	9
Şekil 2.2.	Al - Si denge diyagramı.....	11
Şekil 2.3.	Saf bir metal için sıcaklığa karşı hacim serbest enerjisi değişimi..	19
Şekil 2.4.	Sıvıdan katı parçacıkları oluştuğunda arayüzey.....	20
Şekil 2.5.	Sıvı-katı sisteminin toplam serbest enerjisi, katı boyutu ile değişimi.....	21
Şekil 2.6.	(a) Aşırı soğumanın birim zamanda oluşan çekirdek sayısı ve büyüme hızına etkisi, (b) Saf metallerde soğuma hızının aşırı soğuma miktarına etkisi.....	22
Şekil 2.7.	Heterojen çekirdeklenme için gerekli olan kritik yarıçap.....	23
Şekil 2.8.	Düzlemsel büyümenin oluşumu.....	25
Şekil 2.9.	Dentritik büyümenin oluşumu.....	27
Şekil 2.10.	Yönlenmiş katılaşma.....	27
Şekil 2.11.	Kalıp içinde katılaşmada tane biçimlerinin farklı olduğu bölgeler, (a) Hızlı soğuma etkisiyle oluşan küçük ve eşeksensel tanelerin bulunduğu kabuk, (b) Sıcaklık gradyanı etkisiyle oluşan uzun çubuk taneler, (c) Soğumanın her taraftan olması ile ortaya çıkan eşeksensel taneler.....	28
Şekil 2.12.	(a) Katılaşma sırasında hakim değerleri, (b) Çekme ve büzülme olaylarının şematik gösterilişi.....	30
Şekil 2.13.	Katılaşma sırasında çekme boşluğu oluşumu.....	30
Şekil 2.14.	Alaşımelerde katılaşma cephesi.....	31
Şekil 2.15.	(a) Tane inceltilmemiş, (b) Al <sub>5</sub> Ti <sub>1</sub> B bileşiminde 10 ppm bor ilave edilmiş 3004 alaşımının tane yapıları.....	32
Şekil 2.16.	Al-Ti Faz diyagramının alüminyum tarafı.....	34

Şekil 2.17.	(a) Alüminyumun $TiAl_3$ partikülleri üzerinde çekirdeklenecek büyümesi sırasında geçirdiği aşamaların şematik gösterimi, (b) Tane inceltilmemiş ve tane inceltilmiş sıvı alüminyumun soğuma eğrilerinin şematik gösterimi.....	35
Şekil 2.18.	% 99,7 safiyette alüminyumda titanyum ilavesi ile tane inceltme sonuçları.....	37
Şekil 2.19.	A356 alüminyum alaşımında üç farklı master alaşımı ile tane inceltme sonuçları.....	38
Şekil 2.20.	Alüminyum 319 alaşımında tane inceltme sonuçları.....	39
Şekil 2.21.	Katılaştan bir dökümde beş besleme mekanizmasının gösterimi...	40
Şekil 2.22.	Al-%4Cu alaşımında tane inceltici ilavesinin dendrit blokajına etkisi.....	42
Şekil 3.1.	Elektrik direnç ergitme ocağı.....	52
Şekil 3.2.	(a) Sıvı metalin azot gazı ile yıkanması, (b) Gaz giderme işleminin şematik görünüşü.....	53
Şekil 3.3.	RPT gazlılık ölçüm cihazı.....	53
Şekil 3.4.	Koni dökümü.....	54
Şekil 3.5.	Koninin soğutulmasının şematik gösterimi.....	54
Şekil 3.6.	Tane inceltme numunesi.....	55
Şekil 3.7.	Tane inceltme deney numunesinin ölçüleri ve inceleme yüzeyi...	55
Şekil 3.8.	Döküm modeli geometrisi ve ölçüleri.....	57
Şekil 3.9.	Plak model ve açma derece.....	58
Şekil 3.10.	Kalıplamadan bir görüntü.....	58
Şekil 3.11.	Döküme hazır kalıp görüntüsü.....	59
Şekil 3.12.	(a) Ergiyik içinde curufların toplanması, (b) Curuf alma işlemi...	60
Şekil 3.13.	Döküm sonrası kalıp görüntüsü.....	60
Şekil 3.14.	Dökümün kalıptan çıkmış hali.....	61
Şekil 3.15.	Döküm numunesinin incelenmek üzere kesilen bölgesi inceleme yüzeyi.....	61
Şekil 3.16.	Numune üzerinden çekilen resimlerin bölgelere ayrılması.....	62
Şekil 3.17.	İmaj analiz programında porozite tayini, (a) orijinal mikroyapı resmi, (b)imaj analiz programıyla işlenmiş resim.....	63
Şekil 3.18.	Döküm ve kalıp malzemesinin meş edilmesinden alınan görüntü.	65

Şekil 3.19.	FlowCast programında kalıbın doldurulması.....	66
Şekil 3.20.	Simülayondan alınan soğuma görüntüsü.....	66
Şekil 4.1.	Farklı gaz seviyesi oranlarına sahip RPT numuneleri.....	68
Şekil 4.2.	Farklı gaz seviyesi oranlarına sahip RPT numunelerinin kesilip parlatılmış görüntüleri.....	68
Şekil 4.3.	Etial 160 primer alaşımı tane inceltmesiz mikroyapı resmi.....	69
Şekil 4.4.	Al5Ti1B ilavesinden 5 dakika sonra.....	70
Şekil 4.5.	Al5Ti1B ilavesinden 10 dakika sonra.....	70
Şekil 4.6.	Al5Ti1B ilavesinden 15 dakika sonra.....	71
Şekil 4.7.	Al5Ti1B ilavesinden 20 dakika sonra.....	71
Şekil 4.8.	Al5Ti1B ilavesinden 25 dakika sonra.....	72
Şekil 4.9.	Al5Ti1B ilavesinden 30 dakika sonra.....	73
Şekil 4.10.	Al5Ti1B ilavesinden 35 dakika sonra.....	73
Şekil 4.11.	Al5Ti1B ilavesinden 40 dakika sonra.....	74
Şekil 4.12.	Al5Ti1B ilavesinden 45 dakika sonra.....	74
Şekil 4.13.	Al5Ti1B ilavesinden 50 dakika sonra.....	75
Şekil 4.14.	Al5Ti1B ilavesinden 55 dakika sonra.....	75
Şekil 4.15.	Al5Ti1B ilavesinden 60 dakika sonra.....	76
Şekil 4.16.	Etial 160 alaşımına katılan tane incelticinin bekletme zamanına göre tane boyutu değişimi.....	77
Şekil 4.17.	Dökümlerden alınan soğuma eğrileri.....	78
Şekil 4.18.	Simülasyon programından alınan soğuma eğrileri.....	79
Şekil 4.19.	Etial 160 tane incelticisiz döküm soğuma eğrileri.....	80
Şekil 4.20.	Etial 160 tane incelticili döküm soğuma eğrileri.....	80
Şekil 4.21.	Dökümlerden alınan tane yapısı resimleri, (a) Tane inceltici ilave edilmemiş döküm, (b) Tane inceltici ilave edilmiş döküm.....	81
Şekil 4.22.	Tane inceltici ilavesiz Etial 160 alaşımı yolluk tarafındaki numune porozite haritası.....	83
Şekil 4.23.	Tane inceltici ilavesiz Etial 160 alaşımı dış taraftaki numune porozite haritası.....	84
Şekil 4.24.	Tane inceltici ilaveli Etial 160 alaşımı yolluk tarafındaki numune porozite haritası.....	85

Şekil 4.25.	Tane inceltici ilaveli Etial 160 alaşımı dış tarafındaki numune porozite haritası.....	86
Şekil 4.26.	Döküm numunesinde parça mesafesine bağlı porozite miktarı değişimi.....	87
Şekil 4.27.	CFS oranı %34 e göre yapılan simülasyon sonucunun parça merkezinden geçen kesit düzlemindeki görünüşü.....	88
Şekil 4.28.	CFS oranı %52'e göre yapılan simülasyon sonucunun parça merkezinden geçen kesit düzlemindeki görünüşü.....	89

## TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	ASTM E112 Standardına göre tane boyutlarının karşılaştırılması.	34
Tablo 3.1.	Deneysel çalışma aşamaları.....	50
Tablo 3.2.	Primer ETİAL 110 alaşımının kimyasal bileşimi.....	51
Tablo 3.3.	Simülasyonda kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri...	64

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Döküm, Etial 160, tane inceltme, döküm simülasyonu, porozite.

Bu çalışmada ticari bir döküm simülasyon yazılımı kullanılarak kuma dökülen Etial 160 alüminyum döküm alaşımının katılaşması sırasında hacimsel küçülmeye bağlı çekme ile oluşan makro ve mikro porozitenin modellenmesi incelenmiştir.

Etial 160 alaşımı ergitildikten sonra makro ve mikro porozite oluşturmak üzere özel olarak hazırlanan kum kalıplara dökülmüştür. Katılaşan ve soğuyan dökümlerin iç kesitlerinde oluşan makro ve mikro porozite değerleri ölçülerek döküm simülasyon programından aynı şartlarda modellenen dökümlerden ölçülen porozite değerleri ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon modellemeleri için programa girilen değerler ile gerçek dökümler arasında bire birlik sağlanmıştır. Porozite oluşumunun modellenmesi sırasında sıvı-katı bölgesi maşi bölgesinin geçirgenlik sınırını tanımlayabilmek açısından dökümlerde ve modellemelerde hiç tane inceltilmemiş ve çok iyi tane inceltilmiş dökümler kullanılmıştır. Çalışmada, metal ergitme, tane inceltme, kuma döküm, modelleme, metalografi, optik mikroskop, mikro yapı görüntüleme ve görüntü analizi teknikleri kullanılmıştır.

Sonuç olarak çalışmada kullanılan Etial 160 alaşımının dökümünün simülasyon programında modellenmesi ile elde edilen porozite dağılımı ile kuma dökülen gerçek dökümlerden ölçülen porozite dağılımı arasında bire bir benzerlik bulunduğunu gözlenmiştir. Sonuçlar ayrıca dökümlerin bilgisayar modellemelerinde en önemli sınır şartlarından birisi olan ve "kritik katı oranı" olarak tanımlanan maşi bölgesi geçirgenlik sınırının kaba taneli dökümlerde %34 sınırlarında olduğunu, buna karşılık iyi tane inceltilmiş dökümlerde bu değer %52 seviyelerine yükseldiğini göstermiştir.

# **MODELLING OF MICRO AND MACRO POROSITY FORMATION IN CAST ETIAL 160 ALLOY**

## **SUMMARY**

Key Words: Casting, Etial 160, grain refinement, casting simulation, porosity.

In this study, using a commercial casting simulation software and sand cast Etial 160 casting alloy micro and macro porosity which occurs due to the volumetric shrinkage during solidification, have been investigated.

After being melted the Etial 160 alloy was sand cast into moulds which has a special geometrical design to produce micro and macro shrinkage. Following solidification and cooling of reel castings the measured micro and macro porosity values were compared with the porosity values obtained from computer simulation model. The good match between the reel castings and the computer modeling was achieved. During modeling of porosity formation for precise definition of the permeability limits of the mushy zone none grain refined and well grain refined castings were used. In this study, melting, grain refining, sand casting, casting simulation, metallography, optical microscopy, microstructure presentation and image analysis techniques have been employed.

Results showed good similarity between porosity obtained from simulation model of sand cast Etial 160 alloy and the porosity measured from reel castings. Results also showed one of the most important boundary condition in modeling casting the mushy zone permeability, which is defined by so called “critical solid fraction” ratio was as low as 34% in non grain refined alloy but it increased to 52 % in well grain refined alloy.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Döküm; metal veya alaşımların ergitilerek önceden hazırlanmış bir kalıp boşluğuna doldurulması ile parça imalatını kapsamaktadır. Bu yöntem sayesinde bir adımda basit veya karmaşık şekilli parçalar ergitilebilen herhangi bir malzemeden üretilebilir. Döküm yoluyla üretilen parçaların boyutları birkaç mm.den birkaç metreye ve ağırlıkları da birkaç gramdan birkaç tona kadar değişebilmektedir. Dahası döküm iç boşlukları olan veya eğri yüzeylere sahip karmaşık şekilli veya çok büyük kısımlardan oluşabilen parçaların imalatı için oldukça uygundur. Bu belirgin avantajlarının yanı sıra işlenebilirliği güç olan veya deformasyon kabiliyeti düşük olan bazı malzemeler ancak döküm yoluyla şekillendirilebilmektedir. Döküm, seri imalata uygun olup, çok sayıda parça kısa zamanda ve diğer yöntemlere nazaran en düşük maliyetle üretilebilir. Günümüzde, mevcut döküm yöntemlerinin biri veya birden fazlası ile her türlü geometrik şekle sahip parçaların imali mümkündür. Ancak tüm üretim yöntemlerinde olduğu gibi, yüksek kalite ve düşük maliyete, imalat mühendisinin değişik dizayn opsiyonlarını anlaması, değerlendirmesi, en uygun şekillendirme yönteminin seçimi ve bu yöntemin verimli şekilde kullanımı suretiyle ulaşılabilir.

Döküm yönteminin uygulanması esnasında yeterli bilgi ve teknoloji kullanılmadığında veya bunlar yetersiz kaldığında bu avantajlı yönü dezavantaja dönüşebilmektedir. Özellikle karmaşık geometri ve farklı kesit kalınlıklarına sahip döküm parçaların yolluk besleyici tasarımı oldukça zordur ve yoğun mühendislik bilgi ve becerisi gerektirmektedir. Fakat bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmelere bağlı olarak döküm proseslerinin modellenebilmesi, döküm mikro ve makro yapılarının önemli ölçüde tahmin edilebilmesini döküm simülasyon programları sayesinde sağlamaktadır.



Döküm proseslerinin modellenmesi, bilgisayarın kalıp doldurulurken ve doldurma yapıldıktan sonra kalıp içerisinde neler olduğu hakkında hızlı ve doğru tahmin yapabilmesi için gerekli bir matematiksel yöntemdir. Piyasada birçok döküm simülasyon programı mevcuttur, MagmaSoft, SolidCast, ProCast, Pam-Quick Cast, Nova Flow&Solid ve Vulcan Döküm simülasyonu programları bunlar arasında yaygın olarak bilinen programlardır. Bu programlar genellikle sonlu fark veya sonlu elamanlar teknikleri ile hesaplama yaparak verilen döküm geometrisini farklı döküm ve kalıp malzemeleri için kendi veri tabanlarında bulunan veya kullanıcı tarafından da girilebilen malzeme termo-fiziksel özellikler ve sınır şartları ile modelleyebilme yeteneğine sahiptirler.

Döküm simülasyon programları; yeni bir teknoloji olarak döküm kalıplama tasarımını kolay, ekonomik ve doğru yapabilmeye olanak sağlayarak deneme ve yanılma maliyetini ortadan kaldırmaktadır. Bütün tasarım ve analizlerin bilgisayar ortamında yapılması ile model ve kalıp hazırlama ve boşuna hurda malzeme üretmeye gerek kalmaksızın dökümhane ortamında deneme-yanılma yapmayı ve gereksiz sakat-hurda döküm üretmeyi ortadan kaldırmaktadır. Simülasyon kullanarak 3 boyutlu katı model üzerinde, kaç tane ve hangi ebatla besleyicinin gerekli olduğunu ve nereye yerleştirileceği belirlenerek, yolluk-besleyici tasarımı bilgisayar üzerinde yapılabilir. Tasarımı yapılan parçanın simülasyonu yapılarak bilgisayarda döküm, katılaşma ve çekinti oluşumu gibi birçok sonuç görülebilir. Bu sonuçlardan faydalanarak gerekiyorsa tasarımda mümkün olan en iyi ve en ekonomik döküm için revizyon yapılabilir. Ayrıca parça tasarımında optimizasyon sistemi tarafından optimum kalite ve verim elde edilecek şekilde otomatik olarak revizyon yapılabilir. Tüm bunların hepsi çok kısa zamanda yapılarak, model, kalıp ve ilk döküm yapıldığında yüksek oranda başarı ve yüksek oranda verim elde edilir. Böylece tek seferde başarılı üretim ve döküm parça servis süresince daha yüksek kalite ve daha düşük maliyet sağlanabilir.

Döküm simülasyonu programlarında başarılı sonuçlar elde etmek, döküm simülasyonları için hazırlanan veri tabanlarının ve çoğunlukla dökümhane operatörleri ve diğer kullanıcılar tarafından girilen sınır şartlarının mümkün olduğunca doğru ve yaklaşık değerlerinde girilmesine bağlıdır. Kullanılan kalıp ve

döküm alaşımının termofiziksel özellikleri ile döküm-kalıp ve atmosfer arasında gerçekleşen ısı transfer katsayıları döküm simülasyon programına birebir girilmelidir. Fakat günümüzde bu değerlerinin birçoğu halen araştırma konusu olup kesin değerleri veya zamana ve sıcaklığa bağlı olarak değişen değerleri henüz tam olarak bilinmemektedir.

Döküm-kalıp sisteminin termofiziksel özelliklerini; döküm alaşımının ve kalıbın özgül ağırlığı, özgül ısı, ısı iletkenlik katsayıları, alaşımın katılaşması ve faz dönüşümleri sırasında ortaya çıkan ergime gizli ısı gibi enerji değerleri, döküm ve kalıp malzemelerinin ısı genleşme değerleri, alaşımın soğuma eğrisi, alaşımın soğuma eğrisine bağlı olarak değişen hacimsel çekme oranı, alaşımın katılaşması sırasında besleme metalinin akışına karşı gösterdiği direnç (maşi bölgesi geçirgenliği) şeklinde sıralamak mümkündür.

Döküm-kalıp sisteminin termofiziksel özelliklerinden olan maşi bölgesi geçirgenliği dökümlerin katılaşması sırasında oluşan hacimsel çekmenin besleyicilerden gelen sıvı metal ile beslenebilmesi sırasında yarı katı hale gelmiş döküm kesitlerinden ne derece akabileceği konusunda bir ölçüt olarak kullanılmaktadır. Üzerinden besleme yapılan bir döküm kesitinin belirli bir yüzdesi katı dendrit örgüsü ile bloke edildiğinde dendritler arası bölgelerden sıvı akıntıları gerçekleşebilmekte ve hacimsel olarak beslenmesi gereken ve çoğunlukla negatif basınç altında bulunan bölgelere emilmektedir. Ancak bu tür bir sıvı akışı dendrit örgüsünün artarak belirli bir seviyeye gelmesi ile duracak ve sıvı akışı tamamen bloke edilecektir. Bloke olan bölgenin soğuk kısmında (besleyiciler uzak olan tarafında) hala beslenmesi gereken bir sıcak nokta kalmış ise artık o bölge beslenemeyecek ve muhtemelen o bölgede yetersiz beslemeye bağlı olarak porozite oluşacaktır.

Döküm parçaların katılaşmasında besleme üzerinde en önemli etkenlerden birisi olan bu durum kritik katı oranı olarak da ifade edilebilir. Kritik katı oranı bir katı-sıvı (maşi) aralığında büyüyen dendritlerin belirli bir hacme ulaşması ile sıvı akışını bloke ederek beslemenin durmasına neden olduğu noktadır. Bu değer olması gereken değerden önce kapatırsa simülasyondan elde edilen sonuçlar yüksek porozite gösterecek, buna karşılık program kritik katı oranı değeri olması gerekenden daha

geç kapatırsa bu kez simülasyondan elde edilen sonuçlar gerçek dökümden elde edilen sonuçlara göre daha az porozite gösterecek ve simülasyon ile gerçek dökümler arasındaki tutarlılık azalacaktır. Kritik katı oranı tane büyüklüğüne duyarlı olduğundan tane inceltme işlemi ile bu oranın ne derece yükseltilebileceği tam olarak bilinmemektedir.

Alüminyum esaslı döküm alaşımlarında katılaşma genellikle dendritik alfa yapısı ile başladığından katı-sıvı ara bölgesinin geçirgenliği sabit olmayıp özellikle tane büyüklüğü ve soğuma hızına bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Sıvı alüminyum alaşımlarına genellikle ergitme potasında katılan tane incelticiler ergiyik içerisinde heterojen çekirdeklenme merkezleri oluşturarak yapının daha ince taneli olmasında rol oynamaktadır. Yapılan araştırmalar tane inceltme işleminin alüminyum alaşımlarında akışkanlığı arttığı, daha iyi besleme sağladığı, daha gözeneksiz bir yapı oluşturduğu, mekanik özellikleri iyileştirdiği, yorulma direncini, sızdırmazlık direncini artırdığı ve daha iyi beslenebilmesinden dolayı bu dökümlerde tane inceltmesiz kaba taneli dökümlere göre daha az makro ve mikroporozite oluştuğunu göstermektedir. Simülasyon programları ile döküm modellemesi yapılacak alüminyum alaşımları için maşi bölgesi geçirgenliğini tanımlamak üzere sınır değeri olarak bir değer girilmesi gerekmektedir. Buna karşılık, alüminyum alaşımlarının maşi bölgesi geçirgenlik değerleri için bu programların veri tabanlarında tanımlanmış net değerler bulunmamaktadır. Bu yüzden bu değerler genellikle kullanıcılar tarafından tahmini olarak girilmekte ve genellikle uyumsuz ve tekrarlanamayan sonuçlar üretmektedir. Bir alüminyum alaşımının maşi bölgesi geçirgenlik değeri ancak gerçek bir dökümden alınan sonuçlar ile o döküm için farklı maşi bölgesi geçirgenlik değerleri uygulanan çok sayıda simülasyondan alınan sonuçların karşılaştırılması ile bulunabilir.

Bu çalışmada, Etial 160 alaşımının kuma döküm koşullarında maşi bölgesi geçirgenlik değerleri hem simülasyon ile modellenmiş hem de gerçek dökümlerden elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. ETİAL160 alüminyum döküm alaşımı ile kum kalıplara yapılan dökümlerde tane boyutunun besleme etkinliği üzerine etkileri incelenmiştir. Döküm deneylerinde ETİAL160 alaşımı döküm kesitlerinde farklı tane büyüklükleri oluşturacak şekilde tane inceltme işlemine tabi tutularak dökülmüştür.

Katılaşan dökümler kesilerek tane inceltmeye bağlı olarak oluşan makro porozite dağılımını incelenmiş ve bu yolla her bir dökümün besleme etkinliği tanımlanmıştır. Çalışmanın amacı, kaba taneli ve ince taneli dökümler yaparak döküm tane boyutunun maşi bölgesi geçirgenliğini ne derecede etkilediğinin incelenmesidir. Dökümlerden elde edilen sonuçlar simülasyon programı ile modellenen dökümlerden elde edilen verilerle karşılaştırılmış ve Etial 160 alaşımının dökümünde simülasyon programına girilmesi gereken sınır değerlerinin gerçeğe en yakın şekilde girilebilmesini sağlamıştır.

Çalışma modelleme içeren deneysel ağırlıklı bir çalışmadır. Bölüm 2’de konu ile ilgili literatür çalışması özetlenmiştir. Bölüm 3’te deneysel metot ve çalışmalar verildikten sonra Bölüm 4’te sonuçlar sunulmuş ve bu sonuçların irdelenmesi yapılmıştır. Bölüm 5’te bu çalışmadan çıkarılan genel sonuçlar sıralandıktan sonra ileri çalışmalar için tavsiyeler sıralanmıştır.

## **BÖLÜM 2. LİTERATÜR TARAMASI**

### **2.1. Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri**

#### **2.1.1. Alüminyumun mekanik özellikleri**

Mekanik özellikler büyük ölçüde saflık derecesine bağlıdır. Yüksek saflıktaki alüminyum teknik saflıktaki metale nazaran çok daha yumuşak ve plastiktir. Mekanik mukavemeti ise çok daha düşüktür. %99,25 Al' lu bir metalin elastisite modülü 7000 MPa iken çok saf alüminyum elastisite modülü 6700 MPa dır.

Dövülmüş ve tavllanmış %99,2'lik alüminyumun Brinell sertliği 24 civarındayken bu değer %99,9'luk alüminyumun ki 15 seviyelerindedir. %99,996 saflıktaki soğuk haddelenmiş alüminyum %75'lik bir inceledikten sonra takriben 27, yumuşatılmış halde 12 – 15 Brinell sertliğe sahiptir [1].

#### **2.1.2. Alüminyumun kimyasal özellikleri**

Alüminyum yüksek bir kimyasal aktiviteye sahiptir. Oksijen, halojenler, kükürt ve karbon ile bileşiklerinin teşekkül enerjisi çok yüksektir. Elektromotor kuvvet serisinde en kuvvetli elektronegatif elementlere dahildir. Alüminyum havada ince fakat çok sıkı bir alüminyum oksit kabuğu ile kaplanır. Elektron mikroskobu ile yapılan araştırmalar bu örtünün çok sık ve gözeneksiz olduğunu göstermektedir. Bu örtü, metali oksitlenmenin devam etmesine karşı korur. Yüksek bir korozyon mukavemeti kazandırır. Metalik parlak alüminyum yüzeyindeki koruyucu oksit tabakası takriben 0,2 mm kalınlığındadır. Alüminyum havada, ergime noktasının hemen altına kadar ısıtılırsa oksitlenme devam eder. Alüminyum ergime noktası üzerindeki sıcaklıklarda daha hızlı oksitlenir. İnce taneli metal havada ısıtılınca çok kuvvetli yanar. Alüminyumda Mg, Ca, Na, Si ve Cu' ın mevcudiyeti oksidasyon

eğilimini kuvvetlendirir. Bilhassa Al - Mg alaşımları ısıtılınca kolayca oksitlenir ve yüzeylerde gevrek bir oksidasyon tabakası meydana gelir.

Alüminyum oksijen ile reaksiyonu kuvvetli bir ekzotermiktir ve birçok metalin oksitlenmesinde çok daha fazla ısı verir. 100°C' nin üzerindeki sıcaklıklar da alüminyum, Cl ile 161,4 kcal/g.mol kıymetinde ısı vererek AlCl<sub>2</sub> teşkil eder. Alüminyum H ile reaksiyona girmektedir. H' in ergimiş alüminyumda çözünürlüğü 1000°C de her bir cm<sup>3</sup> Al için 0,2 cm<sup>3</sup> değerine ulaşmaktadır [1].

### 2.1.3. Korozyona karşı mukavemet

Alüminyum alaşımları korozyona karşı oldukça dayanıklıdır. Alüminyum saflaştıkça korozyon direnci ve iletkenliği artar, ayrıca dayanımı soğuk işlemle önemli ölçüde artırılabilir. Ayrıca birçok kimyasal maddelere dayanıklı olduklarından petrol ve kimya endüstrisinde kullanılmaya elverişlidir [1, 2].

### 2.1.4. Şekillenebilme kabiliyeti

Alüminyumun, sıcak ve soğuk işlenebilme özelliği vardır. Alaşımların gayet iyi halde özellikleri olup bu yolda 6,09x10<sup>-3</sup> mm. kalınlığına kadar inceltilebilirler. Alüminyuma soğuk şekil verme sırasındaki pekleşme içerdiği katkı elemanlarına göre kesiti daraldıkça, gerçek gerilmeler de oldukça yavaş artmaktadır [2].

### 2.1.5. Isı ve elektrik özellikleri

Alüminyum alaşımları elektriği gayet iyi iletirler. Pistonlar, silindir kafaları, çeşitli mutfak eşyaları, kalorifer radyatörleri gibi ısının hızlı iletilmesi istenen yerlerde geniş uygulama alanları bulmuşlardır. Ticari alüminyum elektrik iletkenliği 57 siemens civarındadır. Bu; hacimce bakırın iletkenliğinin %60' ıdır. Ağırlıkça kıyas yapıldığında alüminyumun bakırdan daha iyi olduğu ortaya çıkar [1].

Alüminyum ısı iletkenliği artan saflık derecesi ile büyür. Bu, 20 °C de %99.489 Al' lu bir metal için 0.5 cal / cm.s. ve %99.70 Al' lu bir metal için 0.531 cal / cm.s. dir.

Elektrolitik olarak rafine edilmiş % 99.90' lık alüminyum ısı iletkenliği 190°C 'de 0.82 cal /cm.s. ye ulaşır. Alüminyumun elektriksel özelliği de diğer özellikler gibi alüminyumun saflığına bağlıdır.

Alüminyumun elektriksel iletkenliği yükselen saflık derecesi ile artar. Alüminyumda mevcut safsızlıklar elektrik iletkenliğini değişik ölçülerde etkilerler. Bilhassa Cr, V ve Mn' in etkisi zararlıdır. Bu metallerden birinin %0.25 - 3.30 nispetinde mevcut olması halinde, her % 0.01'i saf alüminyum elektrik iletkenliği takriben % 1.0-1.2 oranında azalır. Fe ve Si' un etkisi çok daha zayıftır. Takriben %1,5 Fe ve Si' un mevcudiyetinde iletkenlik % 5'e düşer. Şayet alüminyumda %1,5 Cu varsa iletkenlik %20 oranında azalır. Cd, Co ve Ni alüminyumun iletkenliğini çok az miktarda etkiler. Elektrik iletkenliği sadece kimyasal bileşime bağlı değildir. Aynı zamanda ısı işlem durumu ve Fe/Si oranı ile ilgilidir [1].

## **2.2. Alüminyum Döküm Alaşımları**

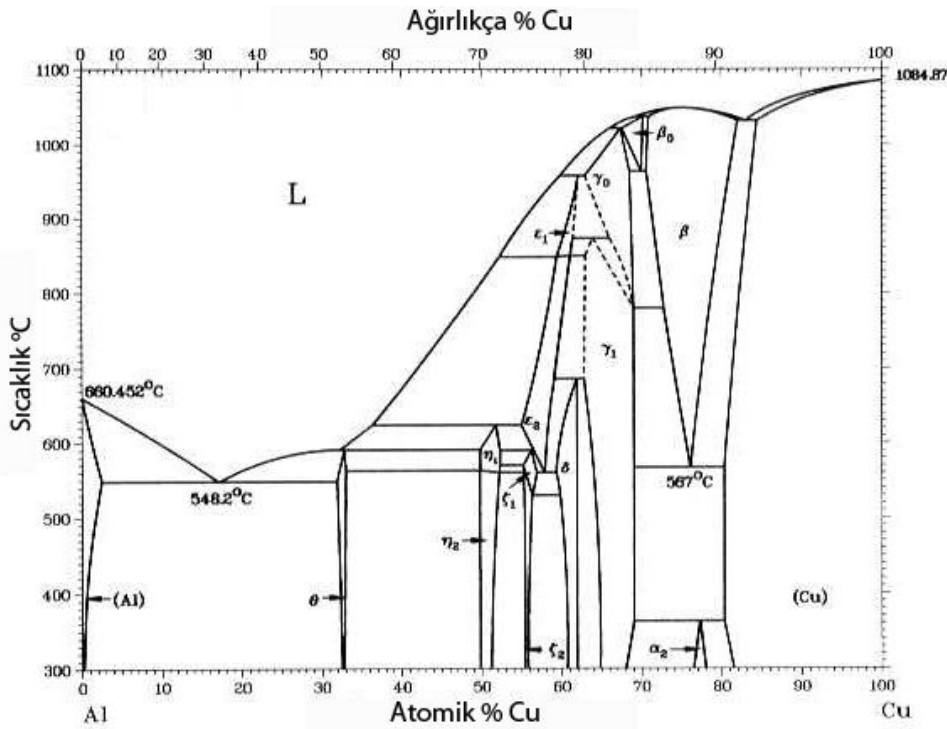
Döküm alaşımları başlıca iki kısımda mütalaa edilebilir. Birinci kısımda ıslah edilen özellikler yalnız alaşımlandırma neticesi elde edilmiştir. İkinci grupta ise, özelliklerin daha fazla ıslah edilmesi için ısı işlemler tatbik edilmiştir. Dökümlerde kullanılan alaşımlandırıcı metaller genellikle bakır, silisyum, magnezyum, çinko ve demirdir. Bu elementlerin uygun miktarlarda ilave edilmesi ile alüminyumun mukavemeti ve sertliği büyük ölçüde artırılabilir. Bununla beraber süreklilik azalır. Alüminyum alaşımlarının dökümü yalnız kum kalıplarında değil fakat metal kalıplarında da yapılabilir. Buna ilaveten alaşımlardan bazıları püskürtme döküm makinelerinde dökülür. Metal kalıplarda istihsal edilen dökümlerin yüzeyleri, kum kalıplarda edilene nazaran daha düzgün ve boyut toleransları daha azdır. Bunun neticesi olarak da döküm parçasını işleme veya nihai şekilendirme maliyetlerinde önemli miktarda tasarruf sağlanmış olur [2,3].

### **2.2.1. Al - Cu alaşımları**

Al' un yanında alaşım elementi olarak kullanılan en eski element bakırdır. Al' un endüstride ilk kullanıldığı yıllarda döküm alaşımı olarak % 8 Cu içeren Al - Cu

alaşımı kullanılıyordu. Ticari saflıktaki alüminyuma Cu ilavesi ile yapılan bu kum kalıba döküm alaşımı olarak uzun yıllar dökülebilirliğinin zorluğuna rağmen kullanılmıştır. Daha sonraları bakırın miktarı %1,5 civarına indirildi ve silisyum ilave edildi. Bu şekilde kolay dökülebilir, iyi akışkanlığa sahip ve ısıl işleme sertleşebilen bir alaşım geliştirilmiş oldu ve de geniş kullanım sahası buldu [2].

Bakır, alaşım elementi olarak % 3-12 oranında kullanılır. Alaşımlara sertlik kazandıran başlıca elementtir. Isıl işleme tabi tutulmuş veya tutulmamış halde iken alaşımın kopma mukavemetini artırır. Dövme alaşımlarında % 3 - 5 arasında kullanılır. % 5' den fazla kullanılırsa mekanik işleme güçlüğü ortaya çıkar, ayrıca elektrik iletkenliğini ve korozyon direncini düşürür.



Şekil 2.1. Al - Cu denge diyagramı [4]

Al - % 4,7 Cu - % 0,3 Mg alaşımına az oranda gümüş ilavesi yaşlanma sertleşmesini çok artırır. Döküm alaşımlarında %12' ye kadar kullanılır, %10' dan fazla Cu bulunan alaşım gevrek yapıdadır. %12 Cu' lu bir alaşımın çekme mukavemeti 9,1 kg/mm<sup>2</sup> den 14 kg/mm<sup>2</sup> ye çıkar. Bakırın, alüminyum içinde katı fazlı çözünürlüğü artan sıcaklıkla beraber artar. Böylece çökelme sertleşmesi mümkün olur. Çökelme



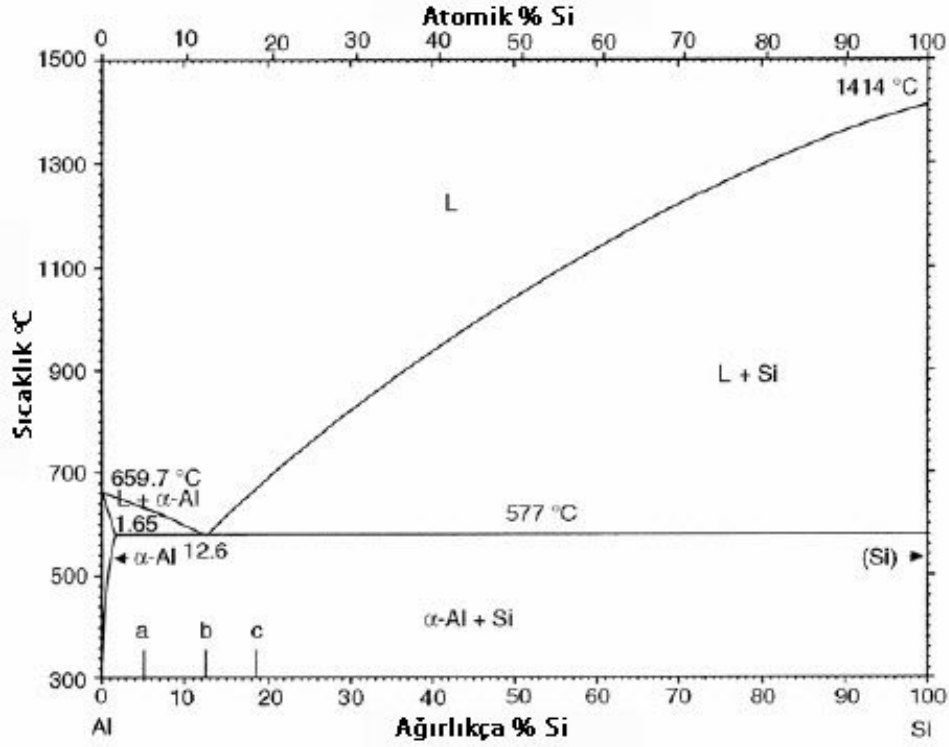
için gerekli zaman, alaşımın birleşimine ve sıcaklığına bağlıdır. Çökelmenin mekanik özelliklere yapacağı etki, çökelen faz miktarına, boyutlarına ve dağılımına bağlıdır.

Oda sıcaklığında % 0,5 olan bakırın çözünürlüğü 548 °C' de % 5,65'e ulaşmaktadır. Bu çözünürlük sınırları içinde Al' la katı eriyik yapan bakır %54 oranında bulunduğu zaman CuAl<sub>2</sub> (Bakır alüminat) şeklinde bir ara kimyasal bileşik yapar [1].

Hızlı su verme ile yarı kararlı olan B fazı oluşur. Bu faz içinde bakır şeklinde CuAl<sub>2</sub> kalır. CuAl<sub>2</sub> çok sert ve kırılğan bir bileşiktir, malzemenin gevrekleşmesine yol açtığı için, döküm tekniği bakımından ötektik bileşime yakın olması gereken Al - Cu alaşımlarının pratikte kullanılmasını engeller. Ötektik sıcaklığının altında bakır alüminyum kafesindeki çözünürlüğü azaldığından çökeltme sertleşmesi için gerekli ön koşullardan biri yerine gelmiş olur. Böylece malzemeyi gevrekleştirmeden dayanım artışı sağlayan çökeltme sertleşmesi uygulanır. Ortamda Mg varlığı çökelmeyi hızlandırır. Çökeltme tamamlanmış durumdaki Al - Cu alaşımlarının korozyon direnci düşüktür. Al - Cu alaşımları vida, cıvata, uçak konstrüksiyon, perçin, yüksek sıcaklıklarda çalışan dövme silindir kafa ve pistonları v.s. gibi yerlerde kullanılırlar [1].

### 2.2.2. Al - Si alaşımları

Silisyum, sıvı alüminyumun akışkanlığını artırır. Özellikle Cu, Ni ve Mg ile karıştırıldığında yaşlanma ile sertleştirilebilir alaşımlar yapar. Fakat bu alaşımların çekme mukavemetleri çok yüksek değildir ve 13,6-15,4 kg/mm<sup>2</sup> arasında değişmektedir. Mukavemet artışı silisyum artışı ile orantılıdır. Silisyum ilavesi ile akışkanlık, kaynak kabiliyeti artar. Tane küçültme ve modifikasyon işlemleri ile iyi işlenebilme sağlanır. Ayrıca sıcak yırtılma da düşürülür. Mekanik özellikler, alaşımın bileşiminden çok silisyum içeren fazın şekli ve dağılımına bağlıdır. Küçük ve yuvarlak primer faz ( veya ötektik yapı ) yüksek mukavemet ve süneklik verir. İğne şeklindeki silisyumlu faz çekme mukavemetini artırmakla beraber süneklik, darbe ve yorulma mukavemetini düşürür [2].



Şekil 2.2 Al - Si denge diyagramı[4]

### 2.2.3. Al - Ti alaşımları

Tane küçültücü etkisi vardır. Mekanik özelliklerin artmasını sağlar. Kum ve metal kalıba dökülecek alaşımlarda % 0,05-0,02 arasında bulunması istenir. Alüminyum içinde en çok %20 seviyesinde bulunabilir. En iyi etkisi bor ile kullanıldığı zaman görülür. Titanyum çekme mukavemetini ve sünekliği artırırken, ısı iletkenliğinin düşmesinde rol oynar [1].

### 2.3. Alüminyumun Ergitme Pratiği

Alüminyum, en basit ve en yaygın şekli ile pota ocaklarında eritilmektedir. Bu ocaklarda kullanılan potalar genellikle dökme demir, grafit veya karbon ile bağlanmış silisyum karbürden yapılmaktadır. Bunların içinde en fazla kullanılan dökme demirden imal edilen potalardır, aynı zamanda eritilmiş metali tutmak amacı ile tutma ocaklarında da kullanılırlar. Isı geçirgenliği ve mekanik dayanımları fazla olmasına karşılık eritilen alüminyum alaşımının pota malzemesinden demir kapması ihtimali vardır. Bunu önlemek için potayı refrakter bir malzeme ile kaplamalı ve

haftada bir potayı çevirmek sureti ile yakıcının karşısına gelen bölgeyi değiştirmelidir. Refrakter malzemedan yapılan potaların ısı geçirgenliği daha fazladır fakat silisyum karbürden yapılmış olanlarda magnezyumu yüksek olan bir alüminyum alaşımı eritildiğinde alaşımın pota malzemesinden silisyum kapması ve mekanik özellikleri bozması ihtimali vardır. Ayrıca bu tip potalar yükleme ve döküme taşınma esnasında bir çarpma sonucu kırılabilmektedir.

Her iki tip pota kullanımı için de fazla yükseltgeyici yanma atmosferi zararlıdır. Bir yakıt yeteri kadar hava ile karışmış olarak yakıldığı takdirde yanma atmosferi nötrdür, gerekenden fazla hava ile yakıldığında ise yükseltgeyici olmaktadır.

Pota ocakları potanın kullanım şekline göre; kaldırmalı, sabit ve eğilebilen olmak üzere 3 ayrı çeşit de olabilir. Kaldırmalı ocaklarda pota, metal eridikten sonra kısıkaç yardımı ile ocaktan çıkarılmakta ve döküme götürülmektedir.

Sabit ocaklarda pota ocak içerisinde sabittir ve ergimiş metal el potalarıyla daldırma suretiyle alınmaktadır. Eğilebilen ocaklardan ise metal ocağın tümünün eğilmesi ile pota ağzından el potalarına akıtılmak sureti ile alınır. Bu tip ocaklardan el potalarına metalin akıtılması esnasında metalin hava ile teması neticesinde oluşan alüminyum oksitleri dökümde kalıntılar halinde görülmektedir.

Alüminyum reverber ve elektrik ocaklarında da eritilebilmektedir. Elektrik ocaklarında eritmeye başlanabilmesi için pota içinde ikincil bobin vazifesi görece erimiş metal bulunması ve bunun bir başka ocaktan alınması zorunluluğu vardır. Her iki tip ocağın da ilk kuruluş ve çalışma masrafları pota ocağına nazaran fazladır, ayrıca metal işlemleri açısından pota ocaklarının diğerlerine nazaran kolaylık yönünden avantajı vardır.

Alüminyum ocaktan alındıktan sonra dökümden önce metal işlemleri adını verdiğimiz bir takım işlemlere tabi tutulur. Bunların başında eritkenleme (cüruf yapıcı madde ilavesi) gelmektedir. Eritken ilavesi metal banyosunun hava ile temasını kesme, eriyiği temizleme, cüruf giderimi ve gazlardan arıtma gibi işlemlerin gerçekleşmesini sağlaması bakımından gereklidir. Alüminyum

eritildiğinde metal banyosunun üstü kalın bir alüminyum oksit tabakası ile kaplanır. İki oksit tabakasının bir özelliği de herhangi bir sebeple bozulduğunda derhal kendini yenilemesi ve erimiş metalin havaya açık olan yüzeyini yeniden oluşan oksitler ile kapamasıdır. Metal yüzeyi tamamen örtüldüğünde oksitlenme durmaktadır. Ancak %1 ve daha fazla Mg içeren alüminyum alaşımlarında oksitlenmeyi artırır ve erimiş alaşımdaki yüzdesi istenilenin altına düşer. %10 Mg alaşımlarına eritken ilavesi gereklidir. Örtücü niteliği olan eritkenlerin ilavesinden sonra metal banyosu karıştırılmalıdır.

Temizleyici eritkenler eriyik içindeki oksitleri birleştirmek suretiyle yüzeyde toplar. Bu iş için ilaveden sonra metali 5 – 10 dakika kadar dinlendirmelidir. Ancak külçe alüminyum veya döküm artıklarının eritilmesinde bu ilaveye gerek yoktur. Eritken ilavesi 100 Kg. metale 1 Kg. eritken olmak üzere yapılır. Eritken olarak alüminyum ve  $ZnCl_2$  kullanılmaktadır.

Döküm kalitesinin iyi olması gaz giderme işleminin yapılmasına bağlıdır. Çok az miktarda olduğu takdirde dökümde bulunan gaz boşlukları, çekme boşluklarının konsantrasyonunu azaltması bakımından yararlıdır. Çekme boşlukları birbirleri ile birleşebilen bir nitelik taşırlar, parçanın kullanımı sırasında bu birleşme neticesinde büyüyen boşluklar kırılmaya yol açabilirler. Az miktarda bulunacak gaz boşlukları bu birleşmeye mani olmaktadır. Ancak gaz boşluklarının fazla olması kesin olarak istenmeyen bir durumdur.

Su buharı alüminyum alaşımlarının gaz açığa çıkartmalarına sebebiyet verir, bu yüzden kaçınılmalıdır. Ayrıca açığa çıkan hidrojen gazı metal içinde çözülebilmektedir. H, çalkalama veya  $C_2Cl_6$  ilavesi ile metalden alınabilir. Bu bileşik toz halinde alüminyum levhaya sarılı olarak metal banyosunun dibine daldırılır. Reaksiyon neticesinde açığa çıkan klorin gaz giderme işlemini gerçekleştirir. Çalkalama yolu ile gaz giderme işleminde genellikle nitrojen, klorin veya bunların karışımı ( %90  $N_2$  + %10  $Cl_2$  veya %80  $N_2$  + % 20  $Cl_2$  karışımları halinde ) grafitten yapılmış bir tüp veya refrakter malzeme ile kaplanmış demir bir çubuk yolu ile metal banyosu içine gönderilir ve çalkalanma işlemini oluşturur.

Bu işlem 150 – 200 kg metal için dakikada 0.011 - 0.021 m<sup>3</sup> gaz karışımı gönderilecek şekilde 10 - 20 dakika kadar sürer. Çalkalanma 680 °C civarında yapılmalıdır. İşlem sonunda yüzeydeki cüruf temizlenir ve derhal döküme geçilir. Dökümde ince tane büyüklüğü elde edebilmek için çeşitli metotlar vardır, bunlardan bir tanesi de metale çeşitli katkı maddeleri ilavesidir. Boron ( % 0.001 - %0.05 ), Titanyum (% 0.02 - % 0.05 ) veya Sodyum ( % 0.05 ) tane küçültücü olarak metale dökümden az önce ilave edilebilir.

Külçe alüminyum veya döküm artıkları kapalı ve rutubetsiz bir yerde depolanmalıdır. Depo için kullanılacak yerde sıcaklık değişimlerinin de fazla olmamasına dikkat edilmelidir. Külçe veya artık metali eritmek için ocağa atmadan önce bir ön ısıtmaya tabi tutmak patlamaları önlemek için gereklidir. Erimiş alüminyum el potaları ile ocak içinden daldırma sureti ile alınırken metal banyosu çok karıştırılmamalı, el potasının dibinde bir önceki dökümden kalmış olan katılaşmış alüminyum mutlaka temizlenmiş olmalıdır.

Erیمیş metal gerek döküm potalarına alınırken gerekse metal işlemleri uygulanırken ve döküme taşınırken potanın fazla çalkalanmaması metal banyosunun hava ile temas eden yüzeyini mümkün olan en az miktarda tutması bakımından önemlidir. Bunun neticesinde metal banyosunda fazla oksitlenme olmayacağı için dökümün kalitesi de iyi olacaktır. Aşağıda iyi bir döküm elde etmek için eritme esnasında dikkat edilmesi gerekli hususlar belirtilmiştir;

- Eritmeye kompozisyonu bilinen ve temiz malzemeler ile başlamalıdır.
- Eritme işlemi temiz sonuçlandırılmalı ve banyo sıcaklığı döküm anına kadar düşük tutulmalıdır.
- Ortamda su buharı ve hidrojen taşıyan gazlardan kaçınılmalıdır.
- Metal banyosu gerekenden fazla karıştırılmamalıdır.
- Uygun eritken ilavesi ve çalkalama pratiği seçilmelidir.
- Yüzeydeki cüruf tabakası dökümden hemen önce temizlenmelidir, daha önceki işlemler sırasında temizlemeye gerek yoktur.
- Erimiş metali dökerken türbilanstan ve kesikli dökümden kaçınılmalıdır [5-7].

## 2.4. Alüminyum Alaşımlarının Hazırlanması

Alüminyum sıvı halde iken serbest atomlar sebebiyle atmosferik oksijen ile etkileşimi sonucu,  $Al_2O_3$  ve metal oksitler şeklinde curuf oluşmaktadır. Oluşan bu metal oksitler döküm yapıncaya kadar metalle atmosferin etkileşimini önler ve döküm yapılmadan önce temizlenir. Yüzeydeki oksit tabakasının kalınlığı, oksitlenmiş ve korozyona uğramış hurdaların kullanılması, fırındaki sıvı metalin aşırı türbülansı, Mg elementinin varlığı ve ortamın sıcaklığı ile artmaktadır. Alüminyum alaşımlarının üretilmesi sırasında temiz ve homojen sıvı metal eldesi için, dökümden önce sıvı metale birtakım ilaveler yapılmaktadır. Bunlar sırasıyla;

- Curuflaştırıcılar
- Tane küçültücüler ve
- Yapıyı modifiye edici ilaveler [7].

### 2.4.1. Curuflaştırıcılar

Metalin fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla ilave edilen curuflaştırıcıların kullanımının ana nedenleri; metalin ergimesi sırasında oluşan kayıpları, sıvı metal tarafından gazların absorblanmasını önlemek ve metaldeki istenmeyen impuritelere gidermektir. Curuflaştırıcı olarak çeşitli gaz ve katı ilaveler kullanılmaktadır. Bunlar;

- Sıvı metali korumak için kullanılan ilaveler,
- Sıvı metali temizlemek için kullanılan ilaveler,
- Curufa karışan metali kazanmak için kullanılan ilaveler ve
- Gaz gidermek için kullanılan ilavelerdir [7].

### 2.4.2. Tane küçültücüler

Metallerin mekanik özellikleri, tane boyutu ve mikroyapı morfolojisinden etkilenmektedir. Alüminyum alaşımlarında tane boyutunu küçültmek amacıyla, aşılaiıcı olarak  $K_2TiF_6$  ve  $KBF_4$  tuzlarından oluşan karışım, döküm öncesinde sıvı

metale doğrudan katılır. Al-Ti ve Al-Ti-B gibi alaşımlardan bir tanesi ile oluşturulan aşılaiıcılar (  $Al_3Ti$ ,  $AlB_2$ ,  $TiB_2$  gibi ) ilave edilir. Alüminyum alaşımlarında tane küçültücü olarak kullanılan ilaveler;

- Alüminyum - Titanyum ( Al - Ti ); % 5-10 içerir.
- Alüminyum - Bor ( Al - B );
- Alüminyum - Titanyum - Bor (Al-Ti-B); % 5 Ti ve % 0,1 - 2,5 B içerir [7].

### 2.4.3. Modifiye ediciler

Alüminyum alaşımları içerisinde yapıyı modifiye edici elementler daha çok Al - Si alaşımlarında kullanılır. Ötektik altı Al - Si alaşımlarında kum döküm yöntemi ile üretilen parçalarda Si oldukça kaba ikiz levhalar halinde kristalleşir. Bu tür yapılar alaşımların mekanik özelliklerini düşürücü rol oynar. Bu kaba yapıyı değiştirmek amacı ile ötektik altı Al - Si alaşımlarına modifiye edici olarak Na ilavesi yapılmaktadır. Na uygulamalarda genellikle sodyum tuzları şeklinde kullanılmaktadır.

Al - Si alaşımlarının modifiye edici olarak 1970'li yıllardan sonra Sr elementi kullanılmaktadır ve Sr' la sağlanan modifiye olmuş yapı kararlılığını korumaktadır. Sr modifiye edici olarak Al - Sr alaşımı şeklinde ilave edilir ( Al - % 10 Sr şeklinde ) ve sıvı metalde % 0.005 - 0.01 Sr bulunmaktadır.

Ötektik üstü Al - Si alaşımları % 12' den çok Si içerirler ve düşük termal genişleme, yüksek aşınma direnci gibi üstün özelliklere sahiptirler. Ötektik üstü Al - Si alaşımlarının katılaşması sırasında Si kristalleri oluşur ve bu kristallerin kabalaşması önlenmezse alaşımların mekanik özelliklerinde önemli ölçüde düşmelere neden olur. Ötektik üstü Al - Si alaşımlarının modifikasyonunda daha çok fosfor kullanılmaktadır. P elementi alüminyum içerisinde çözünmez ve AlP bileşimini oluşturur. AlP kristalleri şekil ve boyut bakımından Si kristallerine benzerler. Al - Si alaşımlarına P ilavesi şu şekillerde yapılmaktadır. Bunlar;

- P - Cu alaşımları şeklinde,
- Kırmızı fosfor halinde,

- $P_5Cl_2$  şeklinde,
- Al - Si ve  $MgP_2$  ön alaşımları şeklinde ilave edilmektedir.

Alüminyum alaşımlarında oluşan inklüzyonları temizlemek amacı ile sıvı metali süzmek, cüruf ile sıvı metali yıkamak ve mekanik temizlemek yöntemlerine başvurmak başlıca yöntemlerdir. Alüminyum alaşımlarında gaz problemlerinin çözümünde Cl gazı kimyasal aktivitesine bağlı olarak en çok kullanılan gazdır. Mekanik olarak düşük basınçlı kabarcıklar şeklinde H ve diğer metalik olmayan kalıntıları süpürmekte ve metal olmayan kalıntıları yüzeye çıkarmaktadır. Alternatif olarak azot gazda kullanılmaktadır, fakat daha uzun sürülere ihtiyaç duyulur ve etkisi Cl kadar verimli değildir [7].

## 2.5. Alüminyum Alaşımlarının Ergime ve Katılaşması

Hemen hemen tüm metal ve alaşımları, bazı seramik ve polimer malzemeler üretimlerinin bir aşamasında sıvıdır. Sıvı, katılaşma sıcaklığının altına soğutulduğunda katılaşır. Malzeme katılaşmış durumda iken veya ısıl işlem ve mekanik işlemler uygulanmış halde kullanılabilir. Katılaşma süreci içerisinde ortaya çıkan yapı, mekanik özellikleri etkiler ve istenilen özellikleri elde etmek için başka işlemlere de ihtiyaç duyulabilir. Özellikle, tane boyutu ve şekli katılaşma ile kontrol edilebilir [8]. Dolayısıyla özellikle döküm malzemelerin özelliklerinin kontrol edilebilmesi için katılaşma olayının (kristalleşme) iyi bilinmesi gerekir. Bir sıvı metalin katılaşması birincil kristalleşme (katılaşma) ve bu sırada oluşan katılaşma içyapısı ( döküm içyapısı ) birincil içyapı olarak adlandırılır. Döküm parçalarda birincil içyapı parça ömrü boyunca hiç değişmeyeceğinden katılaşma olayının çok iyi kontrol edilmesi zorunludur [9].

Sıfır Kelvin sıcaklıkta metal atomları kristal kafesleri içerisinde buldukları yerde hareketsiz olarak dururlar. Isı verilmesiyle gittikçe artan oranlarda buldukları noktalarda salınımlarında ortalama konumlarını değiştirmeyecek şekilde salınmaya başlar. İki atom birbirinden denge durumuna göre belli ölçülerde uzaklaşacak olursa bunları birbirine yaklaştıran çekim kuvveti artma gösterir. Buna karşılık atomların birbirine yaklaşması durumunda şiddetli bir



şekilde itme kuvveti ortaya çıkar. Artan salınım uzaklığı ile atomların uzaklığı denge durumundakine göre gittikçe büyür ve kafes sistemi genişler. Verilen ısı hareket enerjisine dönüşür ve bu da hem sıcaklığın yükselmesine ve hem de hacimsel büyümeye yol açar.

Ergime sıcaklığına ulaşılması ile sıcaklık bir süre yükselme göstermez. Ergimenin başlamasıyla birlikte, verilen ısı daha çok atomların düzenli kafes yapısı durumundan, düzensiz olan sıvı fazdaki durumuna; yani salınım yerine belirgin olmayan bir atom hareketinin görüldüğü duruma geçmesine neden olur. Ergime esnasında harcanan ısıya ergime ısısı denir. Bu ısı malzeme içerisinde bir sıcaklık yükselmesine yol açmadığından buna ayrıca dönüşüm ısısı ya da gizli ısı denilmektedir. Bir eksen üzerinde özgül hacim, sıcaklığa bağlı olarak incelenecek olursa, ergime sıcaklığında malzemenin hacminde şiddetli bir büyümenin varlığı dikkati çeker. Ergime ve katılaşma durumunda, dönüşüm sıcaklıklarında sıcaklık - zaman eğrileri ( ısı eğrileri ) dönüşüm ısısı nedeniyle duraklama gösterir.

Katılaşmada ergimenin tersi bir davranış gözlenir. Katılaşma sıcaklığına ulaşılmasıyla birlikte atomlar yeniden eski konumlarına ve salınan düzenli kafes yapılarına geri dönerler. Bu arada açığa çıkan dönüşüm ısısı katılaşma ısısı adını alır ve bu ısı ergime için harcanan ısıya eşittir. Burada da ısı eğride yine duraklama görülür.

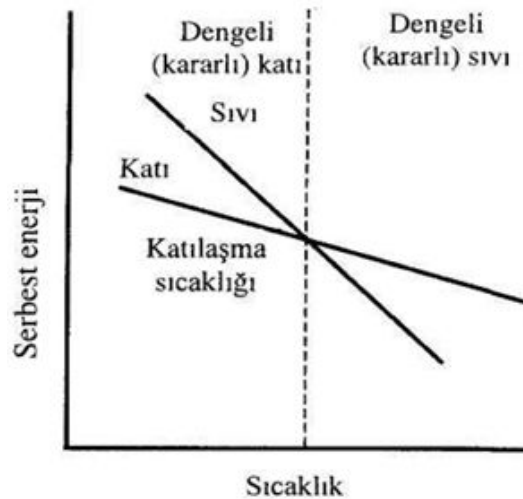
Katılaşma, tane çekirdekleri, çekirdekçik adı verilen çok küçük taneciklerden başlar. Tane büyümesi bu çekirdekler etrafında gerçekleşir. Sıvı metal içerisinde istenmeden önceden var olan ya da istenerek sıvıya katılan yabancı atom ve moleküller çekirdekçik görevi üstlenebilirler. Buna örnek olarak kendiliğinden çelik bünyesinde bulunan alümina (  $Al_2O_3$  ) ve aşılama amacıyla ergiyiğe istenerek katılan Ti ve Ce elementleri gösterilebilir. Çok saf olan ergiyiklerde bile çekirdekçik oluşumu vardır. Soğutma esnasında sıcaklık, katılaşma noktasına ne kadar yaklaşırsa ve atomların ergiyik içerisindeki hareket hızları ne kadar azalırsa, buna bağlı olarak bazı atomlar hemen kristal kafesi oluşturmak üzere grup halinde bir araya gelirler. Ancak bu atomların

durumlarını koruyabilmeleri ve tane çekirdeklerine dönüşebilmeleri için sıvı ortamdan ısının çekilmesi ve ortamla çevre arasında sıcaklık gradyanının bulunması gerekir. Tanelerin büyümesi sırasında yapıda bulunan ve kafese kabul edilmeyen kirletici elemanlar (inklüzyonlar) tane sınırlarına itilirler ve burada tane sınırı yapısını oluştururlar. Taneler birbirlerine temas edecek duruma gelinceye kadar büyürler. Oluşan tane sınırları oldukça düzensizdir. Tanelerin özellikleri üzerinde, tane sınırlarından çok onların atom dizilişleri rol oynar [9].

### 2.5.1. Çekirdeklenme

Katılaşma sırasında atomik diziliş, en düzenli kısa mesafeli düzenden uzun mesafeli düzene veya kristal yapıya kadar değişir. Katılaşma iki aşamadan meydana gelir. Bunlar; çekirdeklenme ve büyümedir. Çekirdeklenme, küçük katı parçacıklarının sıvıdan embriyolaşması ile olur. Çekirdek kararlı olmadan önce minimum kritik çapa gelmelidir. Katının büyümesi, atomların sıvıdan oluşan çekirdeklere geçmeleri ile olur ve bu şekildeki büyüme sıvı bitene kadar devam eder.

Sıvı, katılaşma sıcaklığının altına soğutulduğu zaman bir malzemenin katılaşması beklenir. Çünkü katının kristal yapısı ile ilgili enerjisi; sıvının enerjisinden daha azdır. Sıcaklık katılaşma noktasından daha da aşağıya düştüğünde, giderek büyüyen enerji farkı katıyı daha dengeli (kararlı) hale getirir (Şekil 2.3). Katı ve sıvının arasındaki bu enerji farkı serbest hacim enerjisidir ( $\Delta F_v$ ).



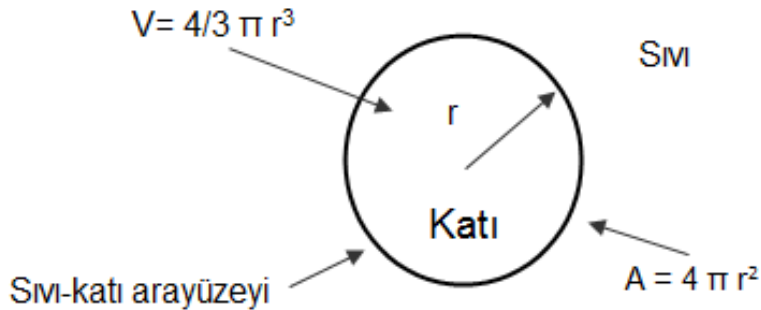
Şekil 2.3. Saf bir metal için, sıcaklığa karşı hacim serbest enerji değişimi [8]

Buna karşın, katının oluşması için katı ile sıvıyı ayıran bir ara yüzeyin oluşturulması gerekmektedir (Şekil 2.4). Yüzey serbest enerjisi, ara yüzey enerjisi  $\sigma$  ile birleşmiştir. Geniş yüzeyler, yüzey serbest enerjisini arttırır; büyük bir yüzey alanı daha büyük yüzey enerjisi demektir.

Sıvı, katılaşma noktasına soğutulduğunda, sıvı içerisindeki atomlar kümeleşerek katı malzemeye benzeyen küçük bir bölge oluştururlar. Bu küçük katı parçacıkları "embriyo" olarak adlandırılır. Embriyo oluştuğunda, toplam serbest enerji değişimi, hacim serbest enerjisinde azalma ve yüzey serbest enerjisinde ise bir artış gösterir. Böylece toplam serbest enerji,

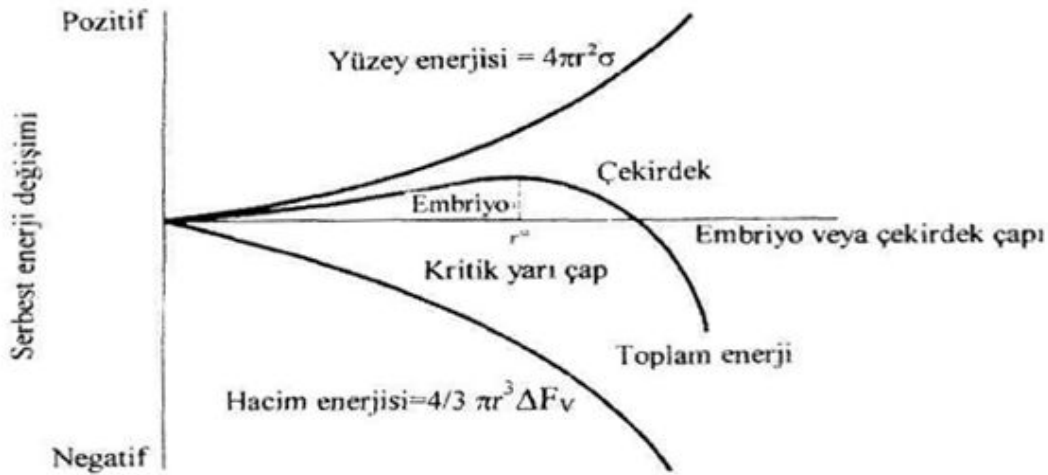
$$\Delta F = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta F_v + 4 \pi r^2 \sigma \quad \text{olur.} \quad (2.1)$$

Burada  $\frac{4}{3} \pi r^3$ , yarıçapı  $r$  olan küresel embriyonun hacmidir.  $4 \pi r^2$  küresel embriyonun yüzey alanıdır,  $\sigma$  serbest yüzey enerjisi ve  $F_v$  negatif değişen hacim serbest enerjisidir.



Şekil 2.4 Sıvıdan katı parçacıkları oluştuğunda arayüzey [8]

Serbest enerjideki değişiklik, embriyonun boyutuna bağlıdır (Şekil 2.5). Embriyo çok küçükse, embriyonun daha fazla büyümesi serbest enerjinin yükselmesine neden olabilecektir.



Şekil 2.5 Sıvı-katı sisteminin toplam serbest enerjisi, katının boyutu ile değişimi [8]

Büyüme yerine embriyo tekrar erir ve serbest enerjinin azalmasına neden olur. Bu yüzden metal sıvı kalır. Sıvı, denge katılaşma sıcaklığının altında bulunduğu için alt soğumuş olacaktır. Gerçek sıvı sıcaklığı ile denge katılaşma sıcaklığı arasındaki fark aşırı soğumadır. Sıcaklık, denge katılaşma sıcaklığının altında olduğu halde çekirdeklenme henüz oluşmamıştır ve büyüme başlayamaz. Eğer, embriyo kritik çekirdek yarıçapından ( $r^*$ ) büyükse, embriyonun boyutu arttığında toplam enerji azalır. Oluşan katı kararlıdır ve çekirdeklenme oluşmuştur. Artık çekirdek olarak adlandırılan katı parçasının büyümesi başlar. Çekirdeklenme, ancak yeterli sayıdaki atom kendiliğinden katı üretmek için kümeleştiğinde ve bu katının çapı kritik çaptan büyük olduğunda oluşur. Bu durumda, kritik yarıçap, toplam serbest enerji değişim eğrisi üzerinde maksimum noktaya karşılık gelir [8].

### 2.5.1.1. Homojen çekirdeklenme

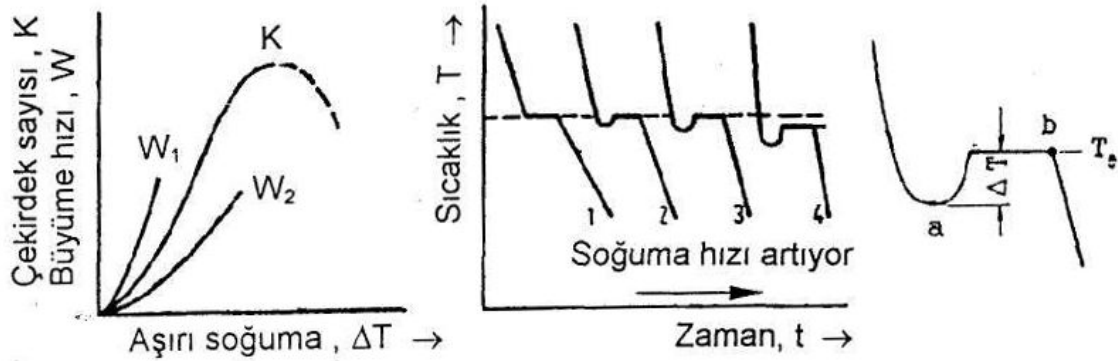
Sıvının sıcaklığı denge katılaşma sıcaklığının daha da altına soğutulduğunda, büyük bir ihtimalle atomlar kümeleşerek, kritik yarıçaptan ( $r^*$ ) daha büyük bir embriyo oluşturacaktır. Buna ilaveten büyük alt soğuma, embriyonun kritik boyutunu geçmesini sağlayacak kadar büyük olduğunda homojen çekirdeklenme olur [8].

İçinde çekirdek görevi yapabilecek parçacıklar (karbür, nitrür, oksit ve diğer katı bileşikler gibi) bulunmayan ideal ve homojen bir eriyikte kararlı çekirdeklenmeye

ilişkin aktivasyon enerjisi, eriyiğin kendi enerji içeriğinden karşılanmalıdır. Bu nedenle homojen çekirdek oluşumu (öz çekirdeklenme) için bir  $\Delta T$  ısıl aşırı soğuması gereklidir. Yani eriyik katılaşmaya  $T_e$  erime sıcaklığında değil, daha düşük bir  $T = T_e - \Delta T$  sıcaklığında başlar. Artan aşırı soğuma ( $\Delta T$ ) ile birim zamanda oluşan çekirdek sayısı ( $K$ ) yükselir (Şekil 2.6.a). Ancak sıcaklığın çok düşmesi halinde atomların hareketleri güçleştiği için,  $K$  değerinde düşme görülür.

Birincil içyapının tane büyüklüğü, birim zamanda oluşan çekirdek sayısı  $K$  ve kristallerin büyüme hızı  $W$ ' ye bağlıdır.  $K$  ne kadar büyük ise, birincil taneler o kadar ince olarak oluşur. Kristal büyüme hızının ( $W$ ) çok büyük olması halinde ise ilk oluşan az sayıda çekirdek büyüyerek tüm içyapıyı kaplayacağından daha kaba taneler elde edilir.

Şekil 2.6 a'da  $W_2$  olarak gösterilen büyüme hızına sahip malzemenin içyapısı  $W_1$ ' inki oranla daha küçük tanelidir [9].



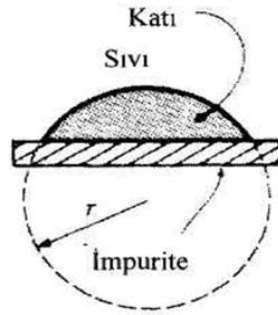
Şekil 2.6. (a) Aşırı soğumanın ( $\Delta T$ ), birim zamanda oluşan çekirdek sayısı ( $K$ ) ve büyüme hızına etkisi, (b) Saf metallerde soğuma hızının aşırı soğuma miktarına etkisi [9]

Teknikte kullanılan döküm alaşımlarında aşırı soğumanın kontrolü ile içyapıdaki tane büyüklüğü büyük ölçüde ayarlanabilir. Hızlı soğuma sırasında (örneğin kokil kalıba döküm) aşırı soğuma miktarı ve dolayısıyla çekirdek sayısı artar. Daha yavaş soğuyan kum kalıba dökümde ise durum bunun tam tersidir. Ayrıca bir parçanın farklı bölgelerinde farklı soğuma koşullarının bulunması, aynı parça içinde farklı özelliklere sahip içyapılarının ortaya çıkmasına neden olacaktır. Şekil 2.6 b' de saf metal eriyiklerinde soğuma hızının aşırı soğumaya ( $\Delta T$ ) olan etkisini

özetlemektir. Eğrinin (a) noktası çekirdek oluşumunun, yani kristalleşmenin başlangıcını temsil etmektedir. Açığa çıkan kristalleşme ısı nedeniyle sıcaklık, erime sıcaklığına kadar artar. Daha sonra  $T_e$  sıcaklığı sabit kalarak katılaşma devam eder ve (b) noktasında sona erer. Çok hızlı bir soğutma sırasında uzaklaştırılan ısı, kristalleşme ısısından daha büyük olabilir. Bu durumda eriyik daha düşük bir sıcaklıkta katılaşır [9].

### 2.5.1.2. Heterojen çekirdeklenme

Alışılmamış laboratuvar deneyleri dışında, sıvı metal içinde homojen çekirdeklenme asla olmaz. Sıvı ile temas halinde bulunan kalıp duvarları, yabancı maddeler (impüriteleri) veya katı parçacıkları, çekirdeklenme için uygun yüzey sağlayabilirler [8].



Şekil 2.7. Heterojen çekirdeklenme için gerekli olan kritik yarıçap [8]

Heterojen çekirdeklenmenin oluşması için çekirdekleyici maddenin sıvı metalle ıslanması gerekir. Aynı zamanda sıvı, çekirdekleyicinin üzerinde kolaylıkla katılaşmalıdır. Ayrıca çekirdeklenmenin çekirdekleyici madde üzerinde meydana gelmesinin nedeni, bu durumda kararlı bir çekirdek oluşturmak için yüzey enerjisinin, homojen çekirdeklenmeden daha düşük olmasıdır. Heterojen çekirdeklenmede yüzey enerjisi daha düşük olduğundan, kararlı bir çekirdek oluşturmak için gerekli toplam serbest enerji değişimi ve çekirdeğin kritik yarıçapı daha düşük olacaktır. Dolayısıyla çok daha küçük alt soğumalar yeterli olacaktır. Sıvı katı arasındaki çok küçük toplam yüzey alanı artışı ile kritik yarıçaptan daha büyük olan kavis yarıçapına ulaşılmaktadır. Bir katı parçası üretmek için sadece birkaç atom birlikte kümeleşmek zorundadır ki, bu istenilen kavisin yarıçapıdır. Kritik

boyuta ulaşmak için, istenilen alt soğuma daha azdır ve böylece çekirdeklenme daha kolay oluşur. İmpüriteler üzerindeki çekirdeklenme, heterojen çekirdeklenme olarak bilinir. Bütün mühendislik metalleri ve alaşımlar, katılaşma esnasında heterojen şekilde çekirdeklenir. Heterojen çekirdeklenmede kristalleşmenin başlayabileceği yabancı yüzeylere örnek vermek gerekirse;

- Eriyiğin içinde bulunduğu kabın duvarları (örneğin dökümde kalıp duvarları),
- Erime sıcaklığı yüksek olan ve eriyik içinde katı halde bulunan bileşikler (karbürler, nitrürler, oksitler) veya alaşımın diğer bileşenleri,
- Aynı veya yabancı türden çekirdeklerin katılaşmadan hemen önce eriyiğe katılmasıyla aşılama [8,9].

### 2.5.2. Büyüme

Katılaşan metalde katı çekirdekler oluştuktan sonra bu çekirdek büyüyerek bir kristal haline gelecektir. Her katılaşan kristalde atomlar esas olarak düzenli bir şekilde dizilmekte, fakat her kristalin yönelmesi farklı olmaktadır. Metalin katılaşması bittikten sonra, farklı yönelimdeki kristaller birbirine bitişerek yönelmenin birkaç atom boyunca değiştiği tane sınırlarını oluştururlar. Katılaşmış metaldeki kristaller taneler, taneler arasındaki yüzeylerde tane sınırlarıdır [9].

Önce katı çekirdek oluşur. Sıvı içerisindeki atomların katı çekirdek yüzeyine difüz ederek tutunmasıyla büyüme meydana gelir. Saf metallerde, katılaşma sırasında büyüme, ısının sıvı-katı sisteminden nasıl uzaklaştırıldığına bağlıdır. İki tip ısı uzaklaştırma vardır. Bunlar, sıvının özgül (spesifik) ısı ve ergime veya gizli ısıdır. Özgül ısı malzeme birim ağırlığının sıcaklığını 1°C değiştirmek için gerekli olan ısıdır. İlk önce özgül ısı, sıvı katılaşma sıcaklığına soğuyana kadar çevredeki atmosfere radyasyonla veya kuşatan kalıba iletilmekle uzaklaştırılmalıdır. Ergime veya gizli ısı, düzensiz sıvı yapının daha kararlı kristal yapıya dönüşüm enerjisidir. Bu ısı, katılaşma tamamlanmadan önce sıvı-katı ara yüzeyinden uzaklaştırılmalıdır. Bu yolla uzaklaştırılan gizli ergime ısı büyüme mekanizmasını ve son yapıyı belirler [8,9].

### 2.5.2.1. Düzlemsel büyüme

Bütün kristal büyüme tekniklerinde ısı akışındaki amaç bir denge şekli teşekkül etmiş sıvı katı ara yüzeyinde bir sıcaklık gradyanı meydana getirmek ve sonradan bu gradyanlı sıvı katı ara yüzeyi istenilen bir hızda hareket edecek tarzda değiştirmek veya hareket ettirmektir.

Birçok metalin sıvı eriyiklerinin katılaştırılmasında, büyüme esnasında ara yüzeyde denge olduğu kabul edilir. Yani katılaştırma esnasında katı ve sıvı içinde büyük konsantrasyon gradyanları oluşabilir. Fakat ara yüzeyden geçişte atomların aktarılmasına karşı sadece ihmal edilebilir bir direnç mevcuttur [9].

İyi aşılınmış sıvının denge (kararlı) durumunda, yavaşça soğuduğu kabul edilsin. Sıvı metalin sıcaklığı, katılama sıcaklığından daha yüksektir. Diğer bir deyişle katının sıcaklığı katılama sıcaklığında veya altındadır. Katılamanın devam etmesi için gizli ergime ısısının sıvı-katı ara yüzeyinden kondüksiyonla çevreye doğru uzaklaştırılmasını gerektirmektedir. Herhangi küçük bir şişkinlik, katılama sıcaklığının üzerindeki sıvı metal tarafından çevrilen ara yüzeyde büyümeye başlar (Şekil 2.8). Bu şişkinliğin büyümesi, geride kalan ara yüzeyle, aynı hizaya gelinceye kadar olur. "Düzlemsel büyüme" olarak bilinen bu büyüme mekanizması, düzgün katı-sıvı arayüzeyinin sıvıya doğru ilerlemesiyle olur [8].



Şekil 2.8. Düzlemsel büyümenin oluşumu [8]



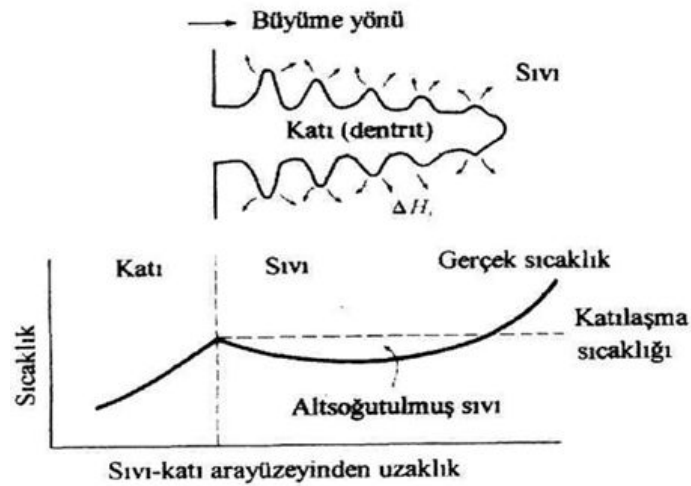
### 2.5.2.2. Dentritik büyüme

Hücrel katılaşmadan dentritik katılaşmaya geçiş, hücrelerin yan yüzlerinin kararsız hale gelerek yanlara doğru çıkıntılar meydana getirmesiyle olur. Aşamalarda katılaşma ile sıvı içine doğru itilen çözünen madde, hücreler arasında birikir ve hücre aralarını çözünen maddece zenginleşmesine sebep olur. Bu konsantrasyonca farklılıkta yapısal aşırı soğumaya, dolayısıyla ara yüzeylerin kararsız hale gelmesine, ara yüzeylerde katı çıkıntılarının (ikinci kolların) meydana gelmesini yani dentritik katılaşmaya sebep olur. Yüksek katılaştırma hızı çözünen maddelerin hücre ve dentritler arasında yanlara yayılmalarına fazla zaman vermediğinden hücre ve dentritler arasındaki mesafeler küçük olur [8,9].

Çekirdeklenme zayıf olduğunda, katı oluşmadan önce, sıvı katılaşma sıcaklığının altında bir sıcaklığa soğur (Şekil 2.9). Bu şartlar altında, dentrit olarak bilinen ve ara yüzeyde oluşan küçük katı şişkinlik, büyümeye devam ederken, ergime ısısı alt soğuyan sıvıya iletilir. Sıvının sıcaklığı katılaşma sıcaklığına doğru yükselir. Gizli ergime ısısının dağılım hızına bağlı olarak, birincil dal üzerinde ikincil ve üçüncül dentrit kolları oluşabilir. Dentritik büyüme, alt soğuyan sıvının katılaşma sıcaklığına ulaşmasına (veya ısınmasına) kadar devam eder. Geriye kalan sıvı düzlemsel büyüme ile katılaşır. Düzlemsel ve dentritik büyüme arasındaki farklılık, farklı gizli ısılarla sahip sıvı gölcükleri nedeniyle ortaya çıkar. Düzlemsel büyümede sıvının içinde bulunduğu kap veya kalıp ısıyı emer (absorbe eder). Dentritik büyümede ise alt soğutulmuş sıvı ısıyı absorbe eder. Saf metallerde dentritik büyüme, normal olarak toplam büyümenin yalnız küçük bir kısmını temsil eder.

$$\text{Kısmi dentritik büyüme} = f = c\Delta T / \Delta H_f \quad (2.2)$$

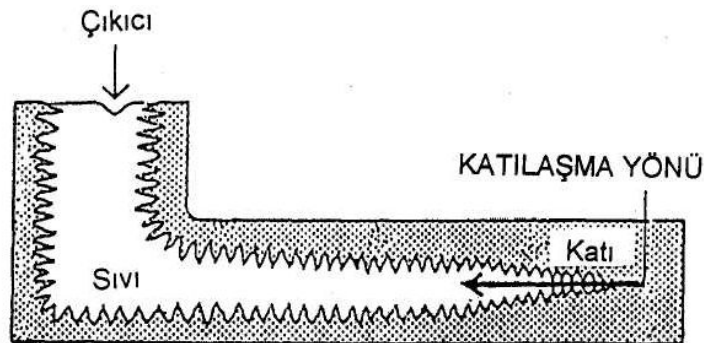
Burada; C sıvının özgül ısısıdır. Pay, alt soğutulmuş sıvının emebileceği ısıyı ve paydadaki ergime ısısı katılaşma sırasında bırakılmak zorunda olan toplam ısıyı temsil eder.  $\Delta T$  alt soğuma miktarı artarken daha fazla dentritik büyüme meydana gelir [8].



Şekil 2.9 Dendritik büyümenin oluşumu [8]

### 2.5.3 Döküm kalıp içinde katılma

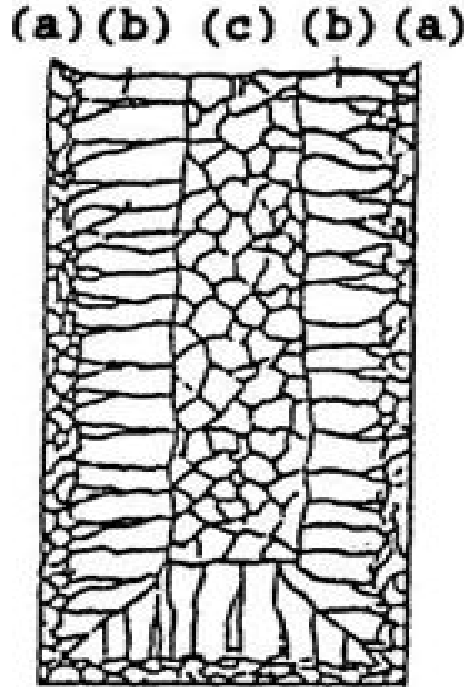
Kalıp içine doldurulan sıvı metalin tümü birdenbire katılmaz. Katılmanın hangi bölge veya bölgelerde başlayıp, nasıl ilerleyeceği çekme boşluklarının oluşumunu belirler. Katılma, öncelikle soğumanın hızlı olduğu ince kesitlerde başlar ve bu sırada oluşan hacim azalmaları nedeniyle o ana kadar katılmamış olan kalın kesitlerdeki sıvı bu bölgeleri besler. İyi tasarlanmış bir kalıpta, katılma kalın kesitlerin ince kesitleri beslemesiyle kademeli olarak ilerlemeli ve en son katılan bölgelerin dışa açık olan yolluk ve çıkıcılarda kalması sağlanmalıdır. Böylece çekme boşluğu veya diğer kusurların parça içinde oluşması önlenir. Yani metal döküldükten sonra, en soğuk metalin kalıbın en uzak bölgesinde, en sıcak metalin ise yolluk ve çıkıcılarda bulunması amaçlanmalıdır. Döküm kalıplar için çok önemli olan bu tasarım prensibi katılmanın yönlendirilmesi olarak adlandırılır [9].



Şekil 2.10. Yönlenmiş katılma [9]

Bu kuralın gerçekleştirilmesinin mümkün olmadığı durumlarda, katılaşmanın istenen bölgelerde başlaması için soğutma plakalarından, çekme oluşabilecek yerlerin sıvı metal ile beslenebilmesi için çıkıcı ve besleyicilerden yararlanır. Katılaşmada en sorunlu bölgelerden biri de köşelerdir. Birleşme noktasındaki kesit, genellikle birleşen kesitlerden büyük olduğundan, bu bölgeler en son olarak katılaşır ve iç kısımlarında çekme boşlukları oluşabilir (Şekil 2.11). Dolayısıyla bu bölgelerde ya kesit inceltmeli, ya da soğutma plakaları yardımıyla buralarda soğuma hızlandırılarak katılaşmanın köşelerden bağlaması ve kollara doğru devam etmesi sağlanmalıdır [9].

Döküm malzemelerinin içyapısı da, katılaşmadaki soğuma koşulları ile belirlenir. Burada üç ayrı bölge söz konusudur. Kalıp cidarlarında ani soğuma (chill) etkisi ile kalıpta önce küçük ve eşeksenli tanelerden oluşan bir kabuk, bunu izleyen bölgede sıcaklık gradyanının etkisiyle uzun çubuksu taneler, orta kısımda ise soğuma her taraftan olduğundan, tekrar eşeksenli taneler görülür (Şekil 2.11) [9].



Şekil 2.11 Kalıp içinde katılaşmada tane biçimlerinin farklı olduğu bölgeler, (a) Hızlı soğuma etkisiyle oluşan küçük ve eşeksenli tanelerin bulunduğu kabuk, (b) Sıcaklık gradyanı etkisiyle oluşan uzun çubuk taneler, (c) Soğumanın her taraftan olması ile ortaya çıkan eşeksenli taneler [9]

#### 2.5.4. Katılaşma sonrası oluşan hacim azalmaları

Katılaşma ve soğuma sırasında bazı özel durumların dışında metallerde daima hacim azalmaları söz konusudur. Bu hacim azalmaları üç safhada oluşurlar;

- Sıvının Kendini Çekmesi: Döküm sıcaklığından itibaren katılaşmanın başlayacağı sıcaklığa kadar soğuma sırasındaki hacim azalmasıdır.
- Katılaşma Çekmesi: Sıvı / katı dönüşümü sırasında atomların yeniden düzenlenmesi ile ortaya çıkan hacim azalmasıdır.
- Katının Büzülmesi: Katılaşmış parçanın oda sıcaklığına kadar soğuması sırasındaki hacim azalmasıdır.

Sıvının kendini çekmesi ve katılaşma çekmesi nedeniyle döküm boşlukları, gözenekler, sıcak yırtılmalar ve iç gerilmeler ortaya çıkabilir. Katının büzülmesi ise boyut değışimlerine, çarpılmalara, çatlaklara ve iç gerilmelere neden olabilir.

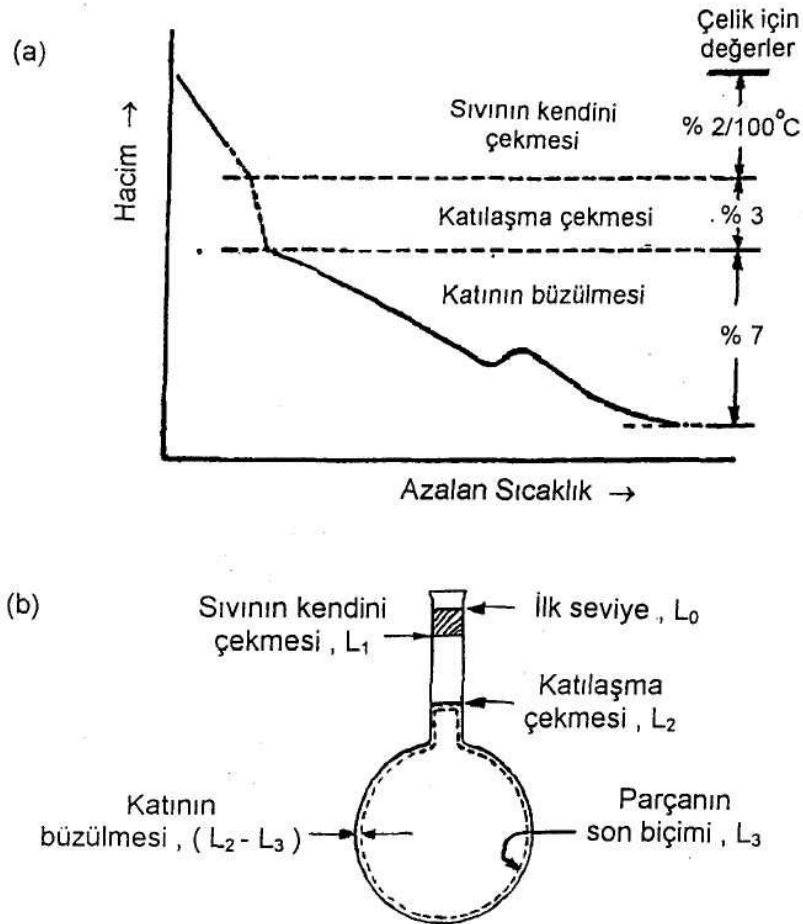
Kalıp içine dökülmüş metalin katılaşması, önce ısının hızla uzaklaştırıldığı cidarlarda katı bir kabuğun oluşumu ile başlar ve bu kabuğun kalınlaşması ile devam eder. En son katılaşan bölgede ise hacim azalmaları nedeniyle bir çekme boşluğu oluşur. Hacim azalması az ve son katılaşma bölgesi iç, kısımda ise, boşluk yerine sıcak yırtılma veya iç gerilmeler meydana gelebilir.

Alaşımlarda ise sıvı/katı dönüşümü  $T_{li}$  ile  $T_{so}$  arasındaki sıcaklık aralığında gerçekleştiğinden, katılaşma cephesinde sıvı ve katı fazların birlikte görüldüğü bir katılaşma aralığı ( $\Delta x$ ) söz konusudur. Kristal büyümesi dentritik ise katılaşan dentrit kolları arasında küçük sıvı metal havuzcukları hapis olacak ve daha sonra bu bölgelerde katılaşma sırasında mikro gözenekler ortaya çıkacaktır [9].

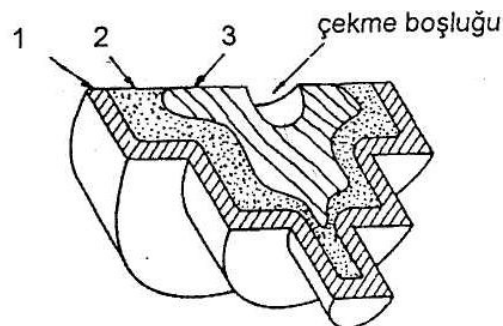
Mikro gözeneklerin miktarı, katılaşma cephesinin genişlemesiyle artar. Sıvı ile katının birlikte bulunduğı bu bölgenin dar olması için:

- Katılaşma aralığı dar olmalıdır. Dolayısıyla döküm malzemesi olarak örneğın ötektik bileşimdeki alaşımlar tercih edilir.

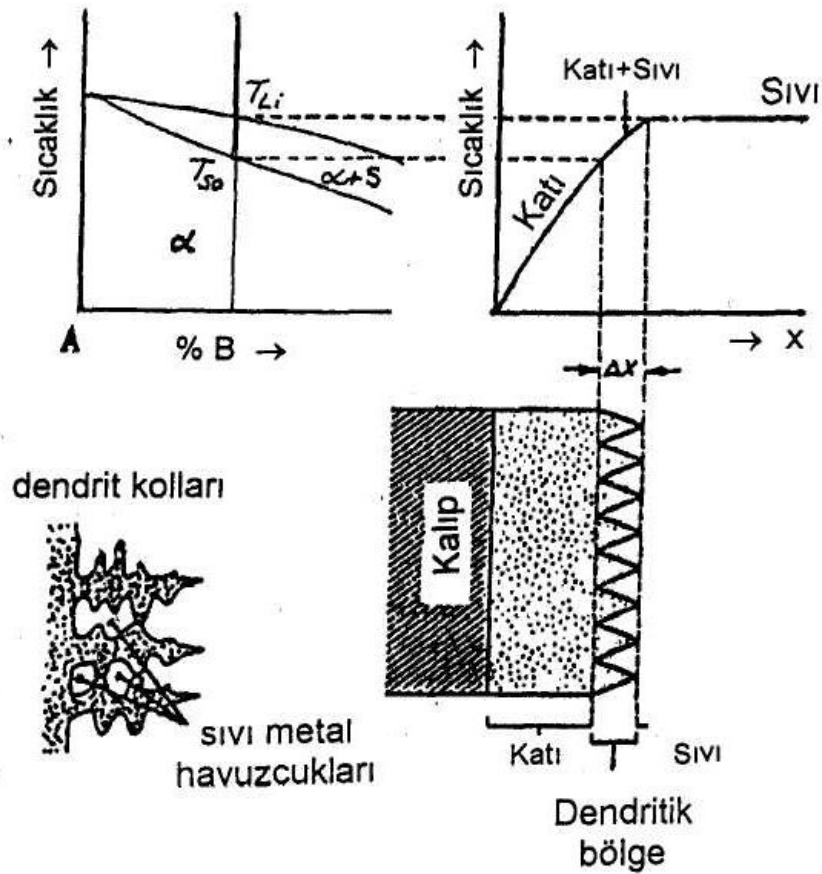
- Isı uzaklaştırılması yavaş, yani sıcaklık gradyanı dik ise katılaşma cephesinin genişliği azalır. Bu gradyan döküm sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, ısıl iletkenlik gibi değişik faktörlerle kontrol edilebilir [9].



Şekil 2.12. (a) Katılaşma sırasında hacim değişimleri, (b) Çekme ve büzülme olaylarının şematik gösterilişi [9]



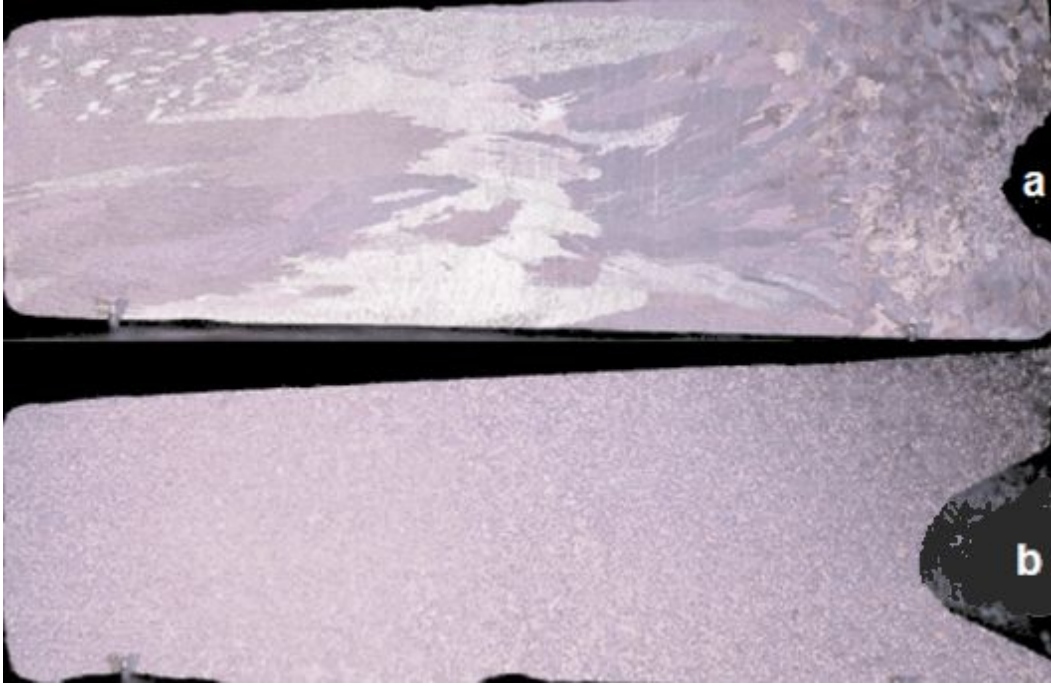
Şekil 2.13. Katılaşma sırasında çekme boşluğu oluşumu [9]



Şekil 2.14 Alaşımlarda katılaşma cephesi [9]

## 2.6. Alüminyum Alaşımlarında Tane İnceltme

Alüminyumda tane inceltme uygulamaları uzun yıllardır bilinmektedir. Sıvı metale bir miktar titanyum ilavesi tane yapısında önemli ölçüde küçülme sağlamak ve alaşımın dökülebilirliğini artırmaktadır. Tane inceltici olarak kabul gören titanyum (Ti) ve bor (B) elementleri az miktarda birlikte alüminyuma ilave edildiğinde hızlı bir şekilde ve önemli derecede tane inceltme etkisi göstermektedir. Bu etki her hangi bir şekilde Ti ve B ilave edilmemiş ve bir miktar Ti ve B ilave edilmiş iki alüminyum külçenin kesilmesi ve yüzeylerinin parlatılmasından sonra uygun şekilde dağlanması ile ortaya çıkan tane yapısı basitçe ve net olarak gösterebilmektedir. Ti ve B ilavesi ile bir alüminyum alaşımının tane yapısında ortaya çıkan değişime bir örnek Şekil 2.15’de görülmektedir.



Şekil 2.15. (a) Tane inceltilmemiş, (b) Al5Ti1B bileşiminde 10 ppm bor ilave edilmiş 3004 alaşımının tane yapıları [10].

Tane inceltme özellikle, ikinci faz partiküllerin dağılımını değiştirdiğinden döküm parçaların mekanik özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu durum Şekil 2.15’de gösterilen tane inceltilmemiş ve tane inceltilmiş yapıların karşılaştırılması ile daha net görülebilir. Şekil 2.15a’da görülen tane inceltilmemiş yapıda uzun kanat şeklinde alüminyum tanelerinin oluştuğu görülmektedir. Sıvı metalde bulunan veya katılaşma sırasında oluşan gevrek intermetalik bileşikler ve porozite bu iri tanelerin aralarına dizilerek bu tanelere dik gelen uzama kabiliyetini zayıflatacaktır. Şekil 2.15b’deki yapı ise tane inceltilmiş bir yapı olup küçük, düzeli ve eşksenli bir tane yapısına sahiptir. Bu yüzden mekanik özellikler izotropiktir ve alaşım daha mukavemetlidir.

Alüminyum döküm alaşımlarında tane inceltme işlemi porozite miktarını azaltmakta ve porozite boyutunu küçültmektedir. Aynı zamanda besleme kabiliyetini arttırmakta olduğundan alüminyum alaşımları çoğunlukla tane inceltme işlemine tabi tutulmaktadır [10].

## 2.7. Tane Boyutunun Ölçülmesi

Bir alüminyum dökümde tane boyutu ölçme işlemi genellikle önce numune alma ile başlar. Numunenin bir yüzeyinin zımpara ile düzeltilmesi ve parlatılması gerekir. Bazen numune yüzeyi bir frezede düzlenebilir. Eğer frezede düzeltme işlemi hafif talaş kaldırılarak ve keskin bir çakı ile yapılmışsa numune parlatmaya gerek kalmaksızın direkt olarak dağlanabilir.

Bakır oranı düşük alüminyum numuneler dağlanmadan hemen önce parlatılmış numune kaynar derecede sıcak bir suda bir süre bekletilerek ısıtılır. Bu aşamadan sonra numune oda sıcaklığındaki Poulton dağlama ajanı içersine bir süre daldırılarak veya dağlayıcı emdirilmiş bir parça pamuk veya bez ile ovalanarak dağlama işlemi gerçekleştirilir. Poulton dağlama ajanı %60 hidroklorik asit (HCl), %30 nitrik asit (HNO<sub>3</sub>), %5 hidroflorik asit (HF) ve %5H<sub>2</sub>O bileşimine sahiptir[14]. Bakır içeren alüminyum alaşımlarında tane yapısını ortaya çıkarmak daha zordur. Bu tür alaşımlar için genellikle iyi sonuç veren bir uygulama numunenin oda sıcaklığında %10 hidroflorik asit (HF) çözeltisi ile dağlanmasıdır.

Dağlanmış numunelerin üzerinden tane boyutu ölçümüne ilişkin birden fazla yöntem mevcuttur. Bu yöntemler ASTM E112 de tanımlanmıştır. Buna göre tane boyutu bu yöntemlerden herhangi biri ile ölçülebilir. Bu yöntemler şunlardır;

- ortalama kesişim mesafesi
- hesaplanmış ortalama tane çapı
- ASTM tane boyutu numarası
- birim cm<sup>2</sup> ye düşen tane sayısı

Bu yöntemlere göre tane boyutu sınıflandırılması Tablo 2.1’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bununla birlikte tane boyutu ölçümünde en kolay yöntem ortalama kesişim mesafesinin ölçülmesidir. Bu yöntemde parlatılmış ve dağlanmış numune üzerinde çizilen bir doğrunun kaç adet taneyi kestiği sayılarak ortalama tane boyutu bulunmaktadır.

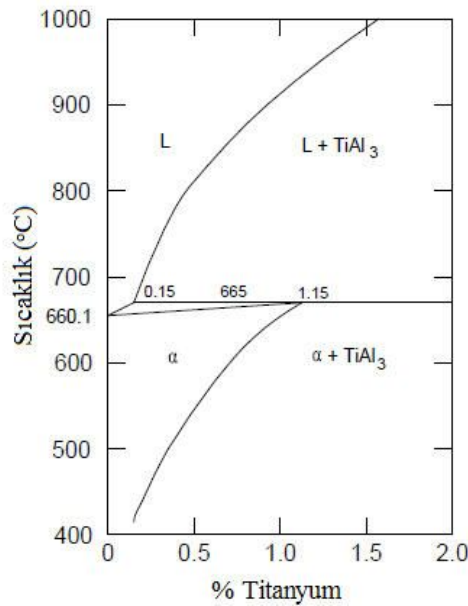


Tablo 2.1 ASTM E112 Standardına göre tane boyutlarının karşılaştırılması.

Ortalama Tane Boyutu		Ortalama TaneÇapı $\mu\text{m}$	ASTM Tane No.	$\text{cm}^2$ 'ye Düşen Tane Sayısı
mm	$\mu\text{m}$			
0,2	200	252	14,5	12200
0,4	400	504	12,5	3200
0,8	800	1008	10,5	724
1,2	1200	1512	9,5	362
2,0	2000	2520	8	128

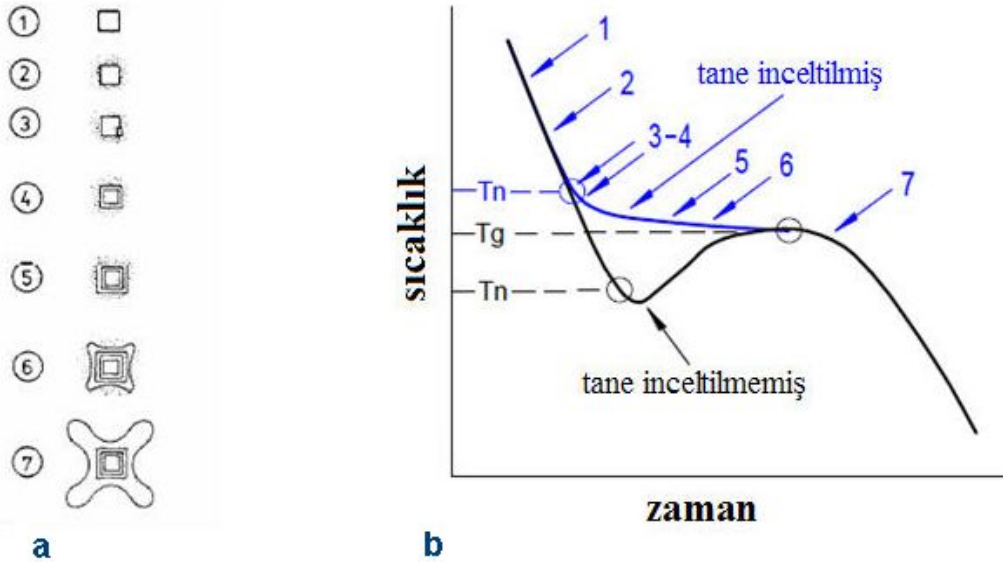
## 2.8. Alüminyum Dökümlerinde Tane İnceltme Mekanizmaları

Alüminyum dökümlerinde titanyum ilavesinin tane inceltme etkisi oluşturduğu 1930 lu yıllardan bu güne bilinmektedir. Titanyumun bu etkiyi nasıl gösterdiği konusunda en yaygın görüş ise titanyumun alüminyum ile  $\text{TiAl}_3$  bileşiği oluşturarak bu bileşiklerin sıvı alüminyumda heterojen çekirdeklenme noktaları oluşturduğu şeklindedir. Şekil 2.16'de Al-Ti Faz diyagramının alüminyumca zengin tarafı verilmiştir. Faz diyagramından gibi Ti ilavesinin alüminyumun ergime derecesini  $660\text{ }^\circ\text{C}$ 'dan  $665\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye yükselttiği görülmektedir. Diğer bir nokta ise alüminyum içerisinde Ti oranı %0,15'i geçtiği anda sıvı içerisinde heterojen çekirdeklenme altlıklarını oluşturduğu var sayılan katı  $\text{TiAl}_3$  bileşiklerinin oluşmasıdır.



Şekil 2.16. Al-Ti Faz diyagramının alüminyum tarafı [11]

Backerud [12] katı  $TiAl_3$  partikülleri üzerinde alüminyumun çekirdeklenecek büyümesini Şekil 2.17a'da gösterilen şema ile açıklamıştır. Sigworth ve Kuhn [10] bu şemayı Şekil 2.17b'de gösterilen başka bir şematik soğuma eğrisi ile ilişkilendirerek açıklamışlardır.



Şekil 2.17. (a) Alüminyumun  $TiAl_3$  partikülleri üzerinde çekirdeklenecek büyümesi sırasında geçirdiği aşamaların şematik gösterimi [12], (b) Tane inceltilmemiş ve tane inceltilmiş sıvı alüminyumun soğuma eğrilerinin gösterimi [10].

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 içersine dağılmaktadır. Bunlardan bir tanesinin Şekil 2.17. (a)'da şematik olarak 1 ile gösterilen parçacık olduğunu varsayabiliriz.  $TiAl_3$  sıvı alüminyum ile temas ettikten sonra çözülmeye başlar. Bunun sonucu partikül çevresinde partikül ile temas eden alüminyum titanyumca zenginleşmeye başlayacaktır. Bu olay Şekil 2.17. (a) da 2 no lu skeç ile temsil edilmektedir. Bu anda Şekil 2.16.'da 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 2.17. (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

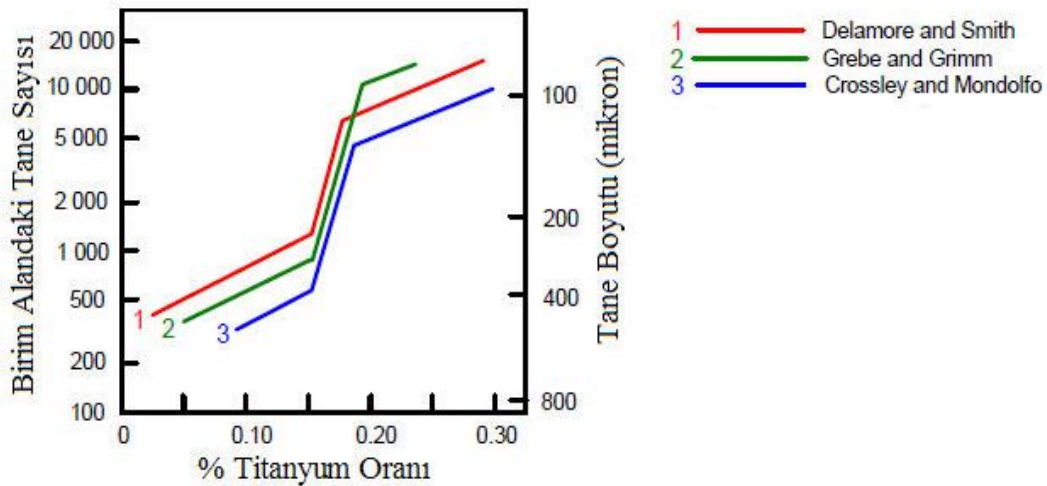
duracaktır. Metal soğumaya devam ederken bu kez çekirdekler etrafında dendritik büyüme başlayacak ve 6-7 de gösterildiği gibi devam edecektir.

Şekil 2.17. (b)'de ayrıca  $TiAl_3$  partiküllerinin tane inceltme etkisini soğuma eğrisine yansıtması açısından da önemlidir. Tane inceltici ilave edilmemiş bir dökümün soğuma eğrisi incelendiğinde çekirdekleşmenin kendiliğinden oluşabilmesi için sıvının  $T_g$  (büyüme) sıcaklığı altında bir  $T_n$  sıcaklığına kadar birkaç derecelik alt soğuma gerçekleştirmesi gerekmektedir. Buna karşılık mavi çizgi ile görüntülenen 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 bir alüminyum dökümünde etkili bir tane inceltme gerçekleşip gerçekleşmediği kolayca anlaşılabilir.

Titanyumun alüminyumda tane inceltme etkisini teid eden diğer bir faktör ise bazı araştırmacıların [13] Al tane merkezlerinde titanyumca zengin bölgelerin varlığını göstermiş olmasıdır. Bununla birlikte titanyum ile tane inceltmede dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli nokta titanyumun alüminyum içerisinde çözünübelmesidir. Genellikle dökümhane uygulamalarında Ti ilave oranı 100 ppm (% 0,01 Ti) oranı civarındadır. Bu oranda Ti ticari saflıkta bir alüminyuma ilave edildiğinde  $TiAl_3$  kümeleşmeleri faz diyagramında da görülebileceği gibi belirli bir süre içerisinde tamamen çözünerek tane inceltme etkisini kaybedecektir. Bu olay uzun bekleme süreleri ile dökülen tane inceltici ilave edilmiş alüminyum alaşımlarında tane inceltme etkisinin zamanla azalarak yok olmasına neden olmaktadır.

Tane inceltici Ti içeren master alaşımlarının tane inceltme etkilerinin zayıflama süreleri bir çok faktöre bağlıdır. Bunlardan en önemlisi mastır alaşımı içerisinde bulunan  $TiAl_3$  partiküllerinin boyut dağılımıdır. Daha büyük boyuta sahip  $TiAl_3$  partikülleri içeren mastır alaşımlarında tane incelticilerde etki geç başlamakta ve geç bitmektedir. Bu durum göz önünde bulundurularak günümüz modern dökümhane uygulamalarında benimsenen yaklaşıma göre ilave Ti oranının genel alüminyuma oranı en az % 0,15 olacak şekilde yapılmasıdır. Aksi takdirde master alaşımı çok hızlı bir şekilde tane inceltme etkisini kaybedecektir.

Bu konuda Cole ve arkadaşları [14] tarafından bir araya getirilen üç farklı çalışmadan alınan sonuçlar Şekil 2.18. 'te gösterilmiştir. Şekil 2.18'te verilen deneysel sonuçlardan % 0,15 ten daha az oranlarda Ti ilavesi ile düzgün bir tane inceltmenin mümkün olmadığı görülmektedir. Tutarlı bir tane inceltme yapılabilmesi için Ti oranının mutlaka % 0,15'in üzerinde bir değerde olması gerekmektedir. Bu değer aynı zamanda alüminyum içinde çözünebilen maksimum titanyum sınırıdır.



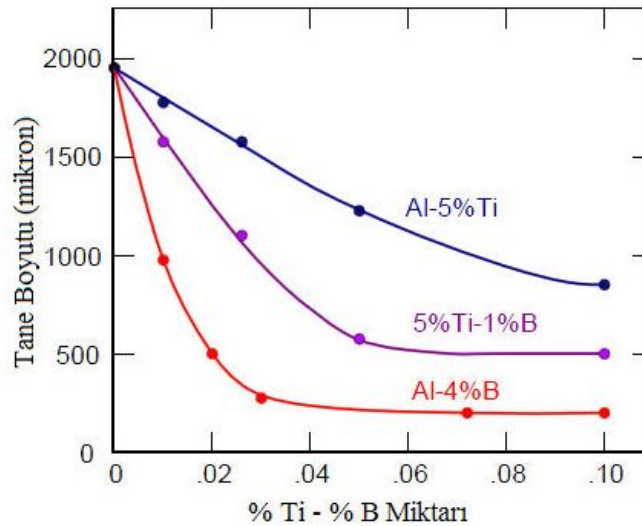
Şekil 2.18. % 99,7 safiyette alüminyumda titanyum ilavesi ile tane inceltme sonuçları [14]

## 2.9. Alüminyumda Tane inceltmede Borun Etkisi

Lu, Wang ve Kung[15] tarafından ötektik altı bir Al-Si alaşımı olan A356 alaşımında üç farklı tane inceltici mastır alaşımı ile yapılan tane inceltme çalışmasına ait bir sonuç Şekil 2.19'de verilmiştir. Bunlar Al-%5Ti, Al-%5Ti-%1B ve Al-%4B alaşımalarıdır. Şekil 2.19'den net bir şekilde borun tane inceltici olarak titanyumdan daha etkili olduğu görülmektedir. Benzer bir çalışmada Sigworth ve Guzowski [16] AlB<sub>2</sub> partikül içeren Al-B mastır alaşımalarının çok daha mükemmel tane inceltme etkisi gösterdiğini rapor etmişlerdir.

Sigworth[10], titanyum ve borun tane inceltme etkisi hakkında yapılan çalışmalarını aşağıdaki şekilde özetlemiştir.

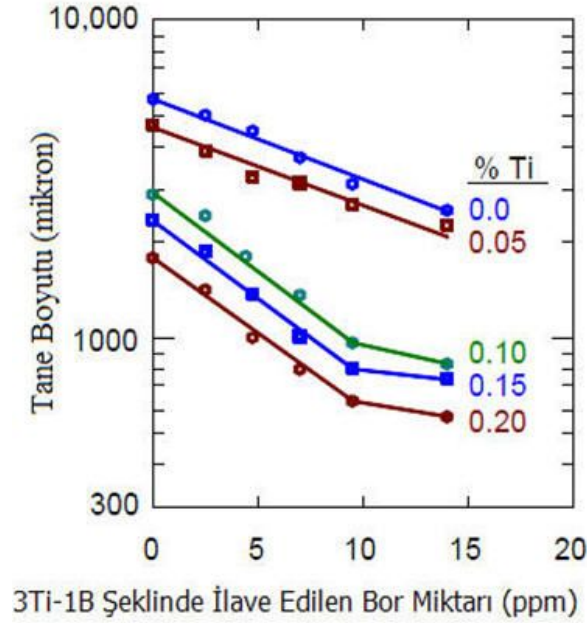
- $TiAl_3$  zayıf bir çekirdekleyicidir. Aynı zamanda  $TiAl_3$  kristalleri alüminyum içinde yüksek oranda çözünürlüğe sahiptir. Bu iki nedenle sadece titanyumla inceltme yapıldığında çok ince tane elde etmek için oldukça fazla miktarda titanyum ilavesi gerekmektedir.
- $TiB_2$  partikülleri mükemmel çekirdekleyicilerdir.  $TiB_2$  sıvı alüminyumda neredeyse hiç çözünmemektedir. Bu nedenle  $TiB_2$  partikülleri düşük ilave oranlarında bile mükemmel tane inceltme sağlamaktadır.  $TiB_2$  partiküllerinin sıvı Al içinde katı kalmaları daha uzun bekletme süreleri için inceltme etkisinin devam etmesini sağlamaktadır.
- $AlB_2$  alüminyumda en mükemmel çekirdeklenme yeteneği olan bileşiktir. Ancak alüminyumda hızlı bir şekilde çözünüyor olması tane inceltme etkisini zayıflatmaktadır. Alüminyumda serbest kalan bor titanyum ve stronsiyum ile reaksiyona girerek bileşikler oluşturmakta ve uzun dönemde bekletme fırınlarında topaklanmalara neden olmaktadır. Bu yüzden çekirdeklenme potansiyeli olmasına rağmen  $AlB_2$  tane inceltici olarak kullanılamaz.



Şekil 2.19. A356 alüminyum alaşımında üç farklı master alaşımı ile tane inceltme sonuçları [15]

Pasciak ve Sigworth[17] tarafından Al 319 alaşımı ile yapılan tane inceltme çalışmalarından alınan bir sonuç Şekil 2.20'da gösterilmiştir. Buna göre tane inceltici

olarak bor miktarı artırılrsa bile titanyum ilave etmeksizin etkili bir tane inceltme yapmanın mümkün olmadığı görülmektedir.



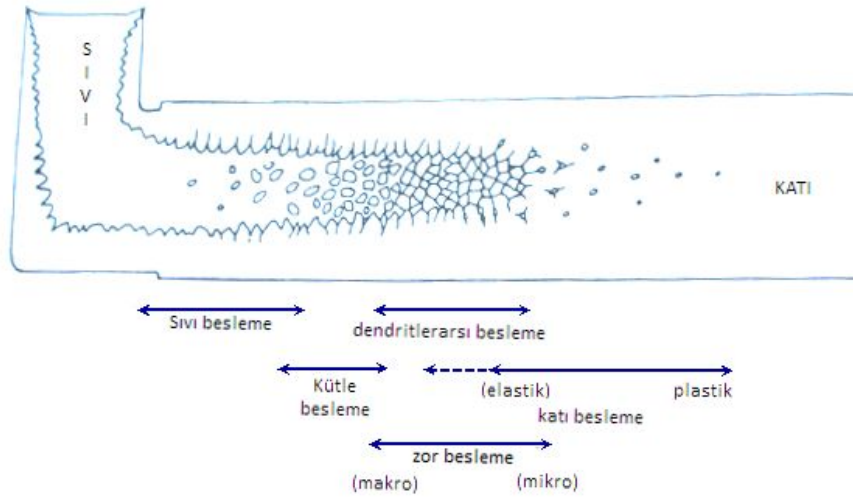
Şekil 2.20. Alüminyum 319 alaşımında tane inceltme sonuçları [17]

## 2.10. Dökümlerde Besleme Mekanizmaları

Birkaç metal ve alaşım hariç metal ve alaşımların neredeyse tamamı katılaşma sırasında negatif hacim değişimine uğramaktadır. Bakır ve alüminyum temelli alaşımlarda termal iletkenliğin yüksek olması düşük termal gradyana neden olmakta ve özellikle geniş sıvı-katı aralığına sahip alaşımlarda katı bir kabuk oluşumu gecikmektedir. Bu gibi alaşımlarda döküm neredeyse katılaşmanın sonuna kadar sıvı ve sıvı içersinde oluşmuş olan katı dendritlerin bir arada bulunduğu yarı katı (maşi) durumunda soğumaktadır. Bu gibi alaşımlarda porozite veya yüzey çökmesi gibi kusurlardan arındırılmış bir döküm istenmesi halinde sıvını beslenmesi tamamen bu yarı katı ortamda dendritler arasından sağlanmak zorundadır [18,19].

Belirli bir sıcaklık gradyanı ile katılaşan saf alüminyum katı – sıvı arayüzeyi düzlemsel bir şekilde ilerleyerek katılaşmaktadır. Bu gibi bir katılaşmada katı-sıvı ara yüzündeki sıvı direkt sıvı ile beslenebilir. Buna karşılık alüminyuma alaşım elementi ilave edildiğinde bir katılaşma belirli bir aralıkta gerçekleşmekte ve katı-

sıvı ara yüzeyi dendritik karakteristiğe bürünmektedir. Dendritik karakterli katı-sıvı genişlemekte ve neredeyse bazen dökümün tamamını kaplayabilmektedir[20]. Geniş katılaşma aralığına sahip alaşımlarda sıkça görülen karakteristik besleme mekanizmaları Campbell[21] tarafından açıklanmıştır. Buna göre Şekil 2.21’de şematik olarak gösterilen katılaşan bir dökümde beş besleme mekanizması aşağıda Campbell’den alınarak özetlenmiştir.



Şekil 2.2.1 Katılaşan bir dökümde beş besleme mekanizmasının şematik gösterimi [21]

### 2.10.1. Sıvı besleme

Sıvı besleme en açık ve en kolay olan besleme mekanizmasıdır ve genellikle diğer besleme mekanizmaları sıvı beslemeyi takip eder. Bu mekanizması kabuk yaparak katılaşan veya ötektik katılaşan ortamlarda tek besleme mekanizmasıdır. Sıvı besleme mekanizması iyi araştırılmış ve diğer besleme mekanizmalarına göre en iyi anlaşılmuş bir besleme mekanizmasıdır [22].

### 2.10.2. Kütle besleme

Kütle besleme terimi sıvı ile birlikte bir miktar katı kütlenin de besleme sıvısı ile birlikte hareket ederek interdendritik bölgede besleme yapmasıdır. Çekirdeklenme sıcaklığının altına düşmesi ile sıvı içerisinde katı dendritler çekirdeklenerek büyümeye başladığı sırada etrafından akan sıvı ile birlikte beslenen bölgeye hareket eder.

### 2.10.3. İnterdendritik besleme

Katı kristaller genellikle dendritik formda büyümeye devam ederken sıvı ile birlikte besleme bölgesine hareket etmeye devam ederler. Bu iki fazlı akış bulamaç (slurry) olarak tanımlanabilir ve katı dendritlerin iyice büyümesi ile besleme kanalını katı ve sağlam bir ağ ile tamamen kapatmasına kadar besleme aktivitesine katkıda bulunurlar. Dendrit blokajı tabir edilen kritik bir katı oranına erişildiğinde dendritler bir birine tutunarak rijit bir ağ oluşturur. Bu noktaya ulaşıldığına dendrit blokajı daha fazla kütle beslemeye izin vermez. Bunun yerine sıvı katılma çekmesini hala telafi edebilmek için dendrit örgüsü aralarından sızarak besleme aktivitesine bir süre daha devam eder. Düşük katı oranlarında dendrit örgüsünün geçirgenliği henüz yüksek olduğundan sıvı sızıntısına tamamen karşı koyamaz.

### 2.10.4. Zor besleme

Katı oranı giderek artarken dendrit örgüsü de giderek güçlenmektedir, ancak geçirgenlikte azalmaktadır. Bu noktada dendrit örgüsü daha fazla artan besleme sıvısı basıncına ve zorlamasına dayanamamakta ve sıvı dendrit örgüsünü kırarak zorlamalı olarak bir süre daha besleme bölgesine sızmaya devam etmektedir. Campbell[21] bu noktada kritik katı oranının %68 civarında olduğunu bildirmiştir. Ancak, alaşımın türü ve alaşım içinde bulunan katkı elementleri ve döküm şartları bu oran üzerinde önemli etkilere sahiptir.

### 2.10.5. Katı besleme

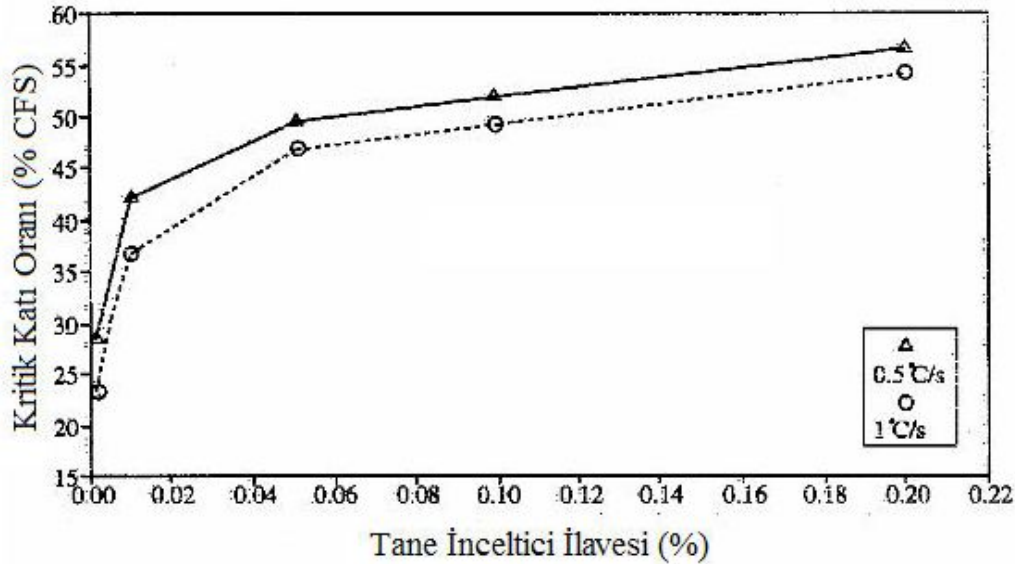
Büyüyen katı oranı ile birlikte dendrit örgüsü arasından sıvı geçirgenliği giderek azalırken dendritler üzerindeki gerilmede giderek artmaktadır. Artan gerilme ile bazen dendrit örgüsü dağılmakta ve katı dendrit parçaları bir miktar sıvı beraberinde besleme bölgesine taşınabilmektedir. Katı besleme terimi besleme işleminin henüz katılmış ve yeterince güçlenmemiş katının deformasyonu ile oluşan bir beslemedir. Bununla birlikte besleme işleminin katı besleme mekanizmasına gerek duyulmadan diğer besleme mekanizmalarından birisi ile gerçekleşmesi daha istenen bir durumdur. Hatasız bir dökümün üretilebilmesi için katılma sırasında yeterli miktarda sıvı



metalın sağlanabilmesi zorunludur. Eğer besleme metali yetersiz kalırsa dökümde makro ve mikroporozite, yüzey çökmesi gibi bir çok kusur oluşabilir.

### 2.11. Tane İnceltmenin Besleme Üzerine Etkisi

Tane inceltmiş dökümlerde maşı bölgesi boyunca beslenebilirliğin arttığı bilinmektedir [19]. Chai, yavaş hızda dönerek soğuyan silindirik bir dökümün içine yerleştirdiği kanat ile katılaşma sürecinde büyüyen dendritlerin kanata uyguladığı yükteki değişimi ölçmüştür. Al-%4 Cu alaşımı ile yapılan bu ölçümlerin sonuçları Şekil 2.22’da gösterilmiştir. Şekilden görüldüğu gibi tane inceltici ilavesine bağlı olarak dendrit blokajı (dendrite coherency) gecikmektedir. Tane inceltilmemiş bir dökümde dendrit blokajı yaklaşık %25 katı oranı seviyesinde iken %0,20 oranında tane inceltici ilave edilmiş dökümde bu oran %50 seviyesine çıkmaktadır. Şekil 2.22’da ayrıca soğuma hızının da dendrit blokajı üzerinde bir miktar etkisinin olduğu görülmektedir. Soğuma hızı 0,5 °C/s’ den 1 °C/s ye çıktığında dendrit blokajı bir miktar erken başlamaktadır.



Şekil 2.22. Al-%4Cu alaşımında tane inceltici ilavesinin dendrit blokajına etkisi [18]

## 2.12. Döküm Simülasyon Programları

Döküm; üretilmek istenen nihai şeklin sıvı metale doğrudan verilebilmesi sayesinde çok eskilerden beri kullanılan üretim yöntemlerinden biridir. Üretim yöntemleri arasında, esnekliği, ucuzluğu ve çeşitliliği gibi birçok özelliğinin yanı sıra sıvı metalle istenen nihai şeklin elde edilmesini mümkün kılmasından dolayı çok avantajlı bir üretim yöntemidir. Ne var ki yeterli bilgi ve teknoloji kullanılmadığında veya yetersiz kaldığında bu avantajlı yönü dezavantaja dönüşebilmektedir. Özellikle karmaşık geometri ve farklı kesit kalınlıklarına sahip döküm parçaların yolluk besleyici tasarımı oldukça zordur ve yoğun mühendislik bilgi ve becerisi gerektirmektedir. Fakat bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmelere bağlı olarak döküm proseslerinin modellenmesi, döküm mikro ve makro yapılarının önemli ölçüde tahmin edilebilmesini döküm simülasyon programları sayesinde sağlamaktadır. Döküm proseslerinin modellenmesi, bilgisayarın kalıp doldurulurken ve doldurma yapıldıktan sonra kalıp içerisinde neler olduğu hakkında hızlı ve doğru tahmin yapabilmesi için gerekli bir matematiksel yöntemdir. Piyasada birçok döküm simülasyonu programı mevcuttur, MagmaSoft, SolidCast, ProCast, Pam-Quick Cast, Nova Flow&Solid ve Vulcan Döküm simülasyonu programları bunlar arasında yaygın olarak bilinen programlardır [23-29].

Döküm simülasyon programları; yeni bir teknoloji olarak döküm kalıplama tasarımını kolay, ekonomik ve doğru yapabilmeye olanak sağlayarak deneme ve yanılma maliyetini ortadan kaldırmaktadır. Bütün tasarım ve analizlerin bilgisayar ortamında yapılması ile model ve kalıp hazırlama ve boşuna hurda malzeme üretmeye gerek kalmaksızın dökümhane ortamında deneme-yanılma yapmayı ve gereksiz sakat-hurda döküm üretmeyi ortadan kaldırmaktadır. Simülasyon kullanarak 3 boyutlu katı model üzerinde, kaç tane ve hangi ebatla besleyicinin gerekli olduğunu ve nereye yerleştirileceği belirlenerek, yolluk-besleyici tasarımı bilgisayar üzerinde yapılabilir. Tasarımı yapılan parçanın simülasyonu yapılarak bilgisayarda döküm, katılma ve çekinti oluşumu gibi birçok sonuç görülebilir. Bu sonuçlardan faydalanarak gerekiyorsa tasarımda mümkün olan en iyi ve en ekonomik döküm için revizyon yapılabilir. Ayrıca parça tasarımında optimizasyon sistem tarafından optimum kalite ve verim elde edilecek şekilde otomatik olarak yapılabilir. Tüm

bunların hepsi çok kısa zamanda yapılabilir. Yani model, kalıp ve ilk döküm yapıldığında yüksek oranda başarı ve yüksek oranda verim elde edilir. Böylece müşterilere; gecikmesiz teslimat, tek seferde başarılı üretim ve döküm parça servis süresince daha yüksek kalite ve daha düşük maliyet sağlanabilir [23-25].

Döküm simülasyon programları; dökümle ilgili kişiler için yüksek kaliteli döküm parçaları üretmek konusunda başarının anahtarı durumundadır. Günümüz yoğun rekabet ortamında, döküm üreticileri kaliteyi arttırmak, maliyeti düşürmek ve teslimat gecikmelerini önlemek zorundadır. Bu sebeplerden dolayı özellikle yüksek kaliteli parça üreten dökümhanelerde simülasyon programlarının kullanımı her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Literatürde döküm simülasyon programlarıyla tasarımı yapılarak çok iyi sonuçlar alınmış birçok çalışma mevcuttur [23-34].

Döküm proses modellemesini yapmak için gerekli işlem basamaklarını sıralamak gerekirse sırasıyla;

- Malzeme ve özelliklerinin seçimi
- Döküm ve kalıp modeli oluşturma
- Modelin meşlenmesi ve simülasyon
- Sonuçların değerlendirilmesi şeklindedir.

Sonuçları inceledikten sonra isteğe bağlı olarak veya gerekiyorsa revizyon ve tekrar simülasyon yapılabilir. Simülasyon tekrarlanabilen bir işlem olduğundan istediğimiz parametreyi değiştirerek simülasyona devam edebiliriz ve optimum tasarımı kısa zamanda masrafsızca belirleyebiliriz [23-25].

### **2.12.1. Döküm simülasyonlarında tanımlanan parametreler**

Döküm simülasyon programlarında neredeyse bütün alışımların dökümü modellenilebilir ve dökümhane ortamındaki herşey birebir programda tanımlanabilir. Başarılı sonuçlar elde edilmesindeki en önemli etken gerçek dökümhane şartlarının simülasyon programında tam ve doğru olarak girilmesine bağlıdır. Çünkü döküm ve katılma işlemi bu parametrelerden etkilenmektedir ve bunların modelleme

esnasında eksik girilmesi yanlış sonuçlar verebilir. Döküm Simülasyon programlarında sınır şartları olarak tanımlanan bazı önemli parametreleri maddeler halinde incelenecek olursa [24-29];

1. Kullanılacak derece boyutları ve döküm boşluğunun koordinatları,
2. Dökülecek alaşım malzemesi ve özelliklerinin seçimi,
3. Yolluk sistemi kesiti ve akış parametreleri,
4. Kalıp Malzemesi içinde ısı akışını kontrol eden özellikler,
5. Kalıp malzemesi seçimi, kum, kokil vb.,
6. Döküm yöntemi seçimi, gravite, alçak basınç, yüksek basınç, hassas dökümvb.,
7. Kalıplamada kullanılan soğutucular, yalıtım ve ekzotermik gömlekleri,
8. Kokil kalıplarda soğutma ve ısıtma kanalları,
9. Kaplamalar; ısı iletim katsayıları ve kalınlıklarıyla birlikte,
10. Kokil kalıplarda çevrim sayısı ve ön ısıtma değerleri,
11. Yolluk ve meme bağlantılarının yerleri,
12. Filtreler ve akış ölçerler,
13. Döküm sıcaklığı,
14. Termokopullar ve bağlandıkları yerler,
15. Cüruf Partikülleri,
16. Isı transfer katsayıları

şeklinde olduğu görülmektedir. Bunların arasında malzeme ve özellikleri seçimi oldukça kapsamlıdır ve genellikle aşağıdaki maddeleri kapsar. Bunlar;

- a) Kalıp Malzemesi içinde ısı akışını kontrol eden özellikler
  - Isıl iletkenlik katsayıları
  - Özgül ısı değerleri
  - Yoğunluk (özümlü ağırlık) değerleri
  - Başlangıç sıcaklığı (döküş sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, kalıp öntav sıcaklığı)
- b) Döküm Alaşımaları;
  - Katılma aralığı (liküdü ve solidüs sıcaklıkları)
  - Ergime gizli ısı

- Katılma eğrisi
- Hacimsel değişim (çekinti) eğrisi değerleri de program tarafından bizlere verilebildiği gibi isteğe bağlı olarak manuel olarak değiştirilmesi mümkündür.

c) Isı Transfer Katsayıları Malzemeler Arası Isı Akışını Kontrol Eder

- Kalıp kaplamaları
- Hava boşlukları (air-gap)
- Soğutma kanalları (su soğutma, hava soğutma vb.)
- Yayılm, ışınlm değerleri[24-29]

### 2.12.2. Modellenen döküm yöntemleri

Döküm simülasyon programları yardımıyla neredeyse dökülebilen tüm alaşımların aşağıda sıralanan döküm yöntemleriyle modellenmesi mümkündür.

- 1- Kum kalıba döküm
- 2- Kabuk kalıba döküm
- 3- Kokil kalıba döküm
- 4- Alçak basınçlı döküm
- 5- Hassas döküm
- 6- Yarı-katı döküm
- 7- Devirmeli döküm (tilt pour)
- 8- Disamatik ve sinto kalıplama dökümleri
- 9- Stropor döküm

### 2.12.3 Döküm simülasyonlarıyla belirlenebilen özellikler

Modelleme sonucu döküm parça üzerinde neredeyse istenilen bütün özellikler belirlenebilir. Bunları sıralayacak olursak;

- 1- Kalıp dolumu esnasında sıvı metalin hızı, basıncı, yönü, türbilanslar, soğuk birleşme bölgeleri vb.,
- 2- Döküm parçanın katılma süresi,

- 3- Döküm parça üzerinde oluşan sıcak noktalar, beslenmesi gereken noktalar ve modülleri,
- 4- Besleyici yeri ve boyutları,
- 5- Parça üzerinde oluşan çekinti (makro porozite),
- 6- Niyama ve FCC gibi kriterlere göre mikroporozite tahmini,
- 7- Döküm parça kesitleri üzerinde soğuma süresince sıcaklık-zaman analizleri,
- 8- Döküm paça kesitleri üzerinde katılaşma zamanı analizi,
- 9- Döküm parçanın herhangi bir bölgesindeki sertlik ve çekme mukavemeti değerleri,
- 10- Döküm mikroyapısı,
- 11- Döküm parça üzerinde oluşan gerilme (stres) analizi,
- 12- Sıcak yırtılma riski taşıyan bölgeler,
- 13- Segregasyon analizi,
- 14- Yönlenmiş katılaşma analizi,
- 15- Doldurma ve Katılaşma esnasındaki sıcaklık dağılımı,
- 16- Herhangi bir zamandaki sıvı faz, katı faz, kritik katı oranları,
- 17- Döküm parçada oluşan kritik katı oranına ve katıya bağlı sıcak nokta oluşumları,
- 18- Döküm parça hacim ve ağırlıkları,

olarak sıralanabilir ve bunlar aynı zamanda hareketli görüntü formatlı video olarak oluşturulabilir. Görüntü sayısı, görüntü hızı ve gösterilecek veri aralığı kontrol edilebilir. Bu videolar Windows'un standard AVI formatında kaydedilerek, bilgisayarlarda fazladan bir yazılım ya da donanım ihtiyacı duymadan izlenebilir [24-29].

#### **2.12.4. Döküm simülasyon programlarının faydaları**

Döküm simülasyon programlarının kullanım faydalarını genel olarak özetlemek gerekirse;

1. Döküm parça tasarımını; deneme yanılma yönteminde olduğu gibi, modeller, kalıplar hazırlamaya ve gereksiz hurda malzeme üretmeye gerek kalmadan bilgisayarda yapmaya olanak sağlaması,

2. Tasarım aşamasında, kaç tane ve hangi ebatta besleyicinin gerekli olduğunu ve nereye yerleştirilmesi gerektiğinin belirlenmesi,
3. Döküm için en uygun yolluk sisteminin seçilmesi,
4. Tasarımı yapılan parçanın simülasyonu yapılarak bilgisayarda döküm, katılaşma ve çekinti oluşumu gibi birçok sonucun görüntülenmesi,
5. Simülasyon sonucu elde edilen sonuçlardan faydalanarak gerekiyorsa tasarımda mümkün olan en iyi ve en ekonomik döküm için revizyon yapılabilmesi,
6. Döküm parça tasarım süresinin kısılması ve tek seferde başarılı üretim,
7. Yüksek kaliteli ve düşük maliyetli parçalar üretmek,
8. Teslimat gecikmelerini önleyerek müşteri ilişkilerini iyileştirmek ve pazar payını geliştirmek,
9. Teknik personelin eğitimi (tasarım aşamasında muhtemel hataları bilgisayar üzerinde deneyerek gördüğünden her bir parçada yeni bir şeyler öğrenmektedir),
10. Döküm hatalarını henüz tasarım aşamasında görebilmek [24-29].

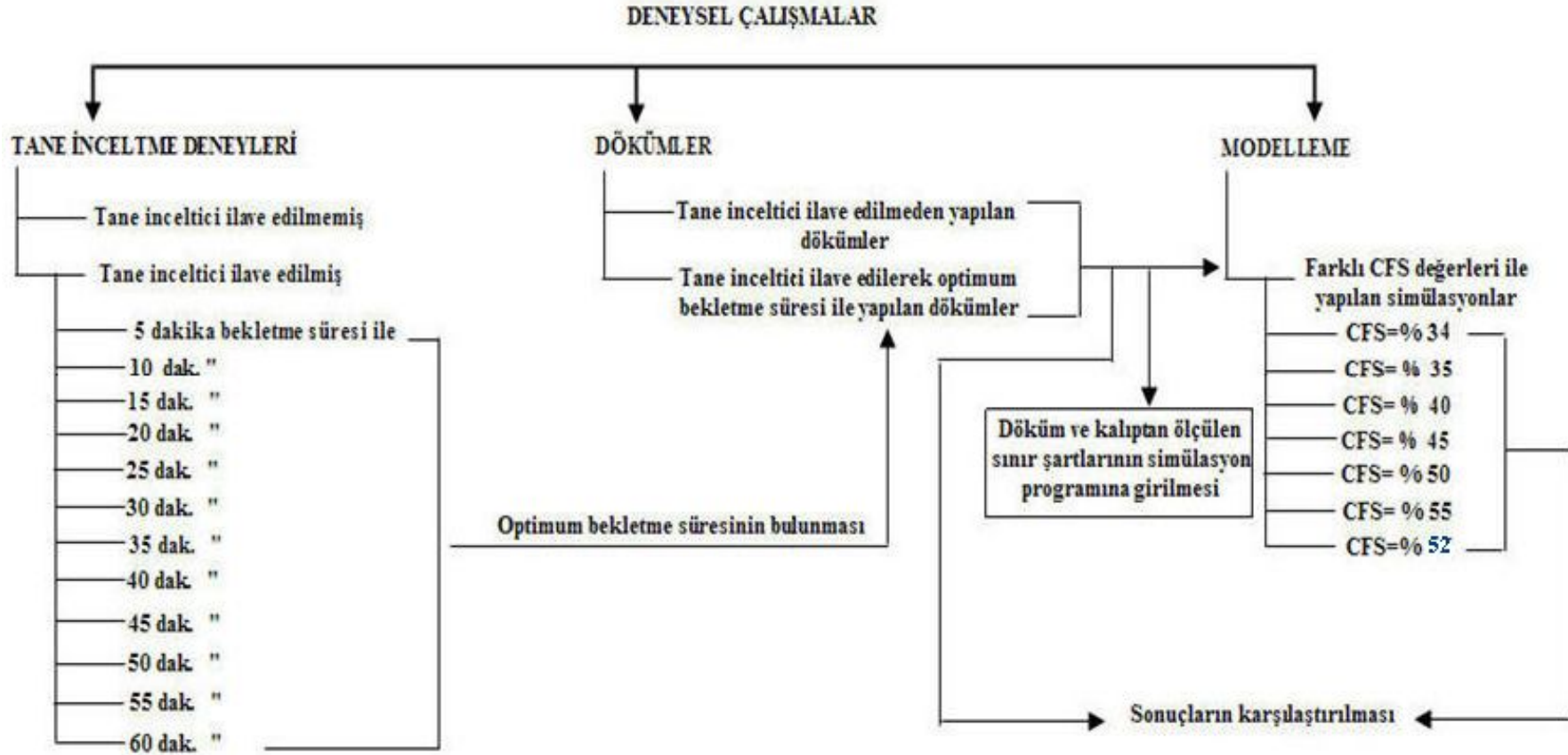
### **BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

Bu tez çalışması kapsamında yapılan çalışmaları tane inceltme deneyleri, döküm işlemleri ve modelleme işlemleri olarak üç ana başlık altında değerlendirmek mümkündür. Tane inceltme deneyleri kapsamında; Etial 160 alaşımına katılan tane incelticinin etkisinin zamanla değişimi ve tane inceltici mastır alaşımının etkisinin optimum bekletme süresi tespit edilmiştir. Döküm işlemlerinde ise sıvı metalin katılaşma esnasında katı-sıvı aralığından (maşi bölgesi) sıvı beslemeye gösterdiği direnç yani kritik katı oranı değerinin ölçülmesi amaçlanmıştır. Bunun için kum kalıplara tane inceltici ilavesi yapılmadan ve tane inceltici mastır alaşımını ilave edildikten sonra tezin tane inceltme deneylerinde belirlenen optimum zamanda dökümler yapılmıştır. Döküm deneylerinde elde edilen bazı verilerin ışığı altında modelleme çalışmalarının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Döküm simülasyon çalışmalarında hedeflenen amaç ise bu çalışmalarda kullanılan döküm simülasyon yazılımında bir modelleme parametresi olarak önemli bir unsur olan kritik katı oranı (CFS) değerinin dökümlerin tane boyutuna göre nasıl değişim gösterdiğinin tespit ve bu değerlerin tayin edilmesidir. Gerçek döküm sonuçlarına göre simülasyon programında farklı kritik katı oranı değerlerine göre yapılan denemeler yapılarak inceltici ilavesiz ve inceltici ilaveli dökümlerin kritik katı oranı değerleri belirlenmiştir.

Deneysel çalışmaların aşamaları genel bir akış çizelgesi ile Tablo 3.1'de gösterilmiştir. Yukarıda özetlenen deneysel çalışmalar aşağıdaki alt bölümlerde ayrıntılı biçimde verilmiştir.



Tablo 3.1. Deneysel çalışma aşamaları



### 3.1. Tane İnceltme Deneylerinin Yapılışı

Bu kısımda deneylerde kullanılan döküm alaşımının kimyasal bileşimi, ergitme işlemleri, tane inceltme işlemleri ve deney parametreleri ayrıntılı olarak verilmektedir.

#### 3.1.1. Kullanılan alaşımın kimyasal bileşimi

Deney numunelerinin ve tane inceltme konilerinin dökümünde kullanılan Etial 160 alaşımı birincil (premier) külçeler halinde Eti Alüminyum Seydişehir Fabrikalarından satın alınmıştır. Tane incetici ilavesiz ve tane incetici ilave edildikten sonraki dökümlerin kimyasal analizleri Spectromax X spektral analiz cihazı ile belirlenmiştir. Tablo 3.2’de ölçülen analiz değerleri verilmektedir.

Tablo 3.2. Primer Etial 160 alaşımının kimyasal bileşimi

	Al	Fe	Si	Ti	Zn	Cu	B
Primer Alaşım	86,68	0,99	8,48	0,017	0,006	3,68	0,01-0,01**
Al5Ti1B ilaveli Primer Alaşım	86,92	0,88	8,36	0,187	0,005	3,59	0,01-0,2**
Al5Ti1B mastır alaşımı*	Kalan	0,3	0,2	4,5-5,5	0,03	---	0,8-1,2

\* Bu değerler deneylerde kullanılan mastır alaşımının katalog değerleridir.

\*\* Spektrometrede B elementi değerleri belirlenmemektedir. Verilen değerler alaşım içerisinde beklenen B değerleridir.

#### 3.1.2. Ergitme işleminin yapılışı

Ergitme işlemi 2 kW gücünde, azami 1000°C sıcaklığa çıkabilen, 8 kg. ergitme kapasitesine sahip elektrik direnç ocağı içerisindeki SiC potada gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1’de gösterilen elektrik direnç ocağı, K tip termokapıl ve elektronik kontaktör termostat donanımı ile sıcaklığı kontrol edilebilmektedir. Ocak astarı kalsiyum oksit türü plakalar ile yapılmıştır ve yüksek termal ızalasyon özelliğine sahiptir.

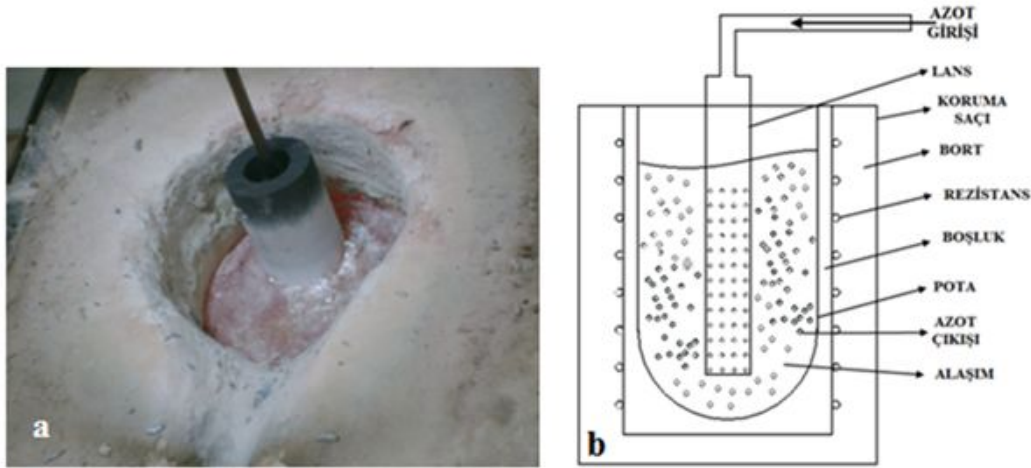


Şekil 3.1. Elektrik direnç ertitme ocağı

Etial160 primer külçeden yeterli miktarda kesilerek ocağa yüklenen alaşımın sıcaklığı 750 °C'ye çıkartılarak üzerine curuf yapıcı örtü tozu ilave edilmiştir. Kullanılan örtü tozu ticari bir toz flaks olup içerisinde farklı oranlarda sodyum ve kalsiyum tuzları bulunmaktadır. Bu flaksın alüminyuma ilave edilmesindeki amaç sıvı metal içerisinde bulunması muhtemel bazı katışık maddelerin kolayca curuf haline getirilerek metal içersinden uzaklaştırılmasıdır. Örtü tozunun ilavesinden 10 dakika sonra sıvı metal üzerinde biriken curuf ve oksitler bir temizleme laması ile sıyrılarak kabaca temizlenmiştir.

### 3.1.3. Sıvı metalde gaz giderme ve gazlılık ölçümleri

Sıvı metal içerisinde çözünmüş halde bulunan hidrojen gazının temizlenmesi amacıyla sıvı alaşımı azot gazı ile yıkama işlemi gerçekleştirildi. Şekil 3.2a'da gösterilen azotla yıkama işlemi için dış yüzeyleri bor nitrür (BN) kaplı üzerinde çok sayıda ince delikleri bulunan grafit bir lans sıvı alüminyum içerisine yaklaşık 700 °C de daldırıldı. Böylece çok sayıda küçük gaz baloncuğunun sıvı içerisinden geçirilerek metal içerisinde çözünmüş bulunan hidrojen atomları bu baloncuklar içerisine difüz ederek baloncuklarla beraber atmosfere atılmaktadır. Şekil 3.2b'de azot gazı ile sıvı metalde gaz giderme işlemi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.2. (a) Sıvı metalin azot gazı ile yıkanması, (b) Gaz giderme işleminin şematik görünüşü

Azotla yıkama işleminin ardından sıvı metalin gazlılık durumunu test etmek amacıyla RPT (Düşürülmüş Basınç Testi –Reduced Pressure Test) gaz ölçüm testi uygulandı. Şekil 3.3’te bu çalışmada kullanılan RPT cihazının fotoğrafı verilmiştir. RPT testi prensip olarak yaklaşık 70 gram ağırlığında bir sıvı metalin metal bir kroze içinde -1 atmosferlik (yaklaşık  $-760 \text{ Hg/cm}^2$ ) basınç altında katılaştırılmasını ve sıvı metal içerisinde çözülmüş hidrojenin katılaşma sırasında gaz kabarcıkları haline geçmesini esas almaktadır. Test numunesinde çok gaz boşluğu çıkarsa sıvı alaşımında yüksek oranda hidrojen çözüldüğü, buna karşılık numunede az sayıda gaz boşluğu var ise sıvı metalde o derece az çözülmüş hidrojen bulunduğu kabul edilmektedir. Çalışma kapsamında yapılan dökümlerde gazlılık oranının yüksek çıktığı durumlarda azotla yıkama işleminin süresini arttırılarak gaz seviyesinin kabul edilebilir seviyelere kadar düşmesi sağlanmıştır.



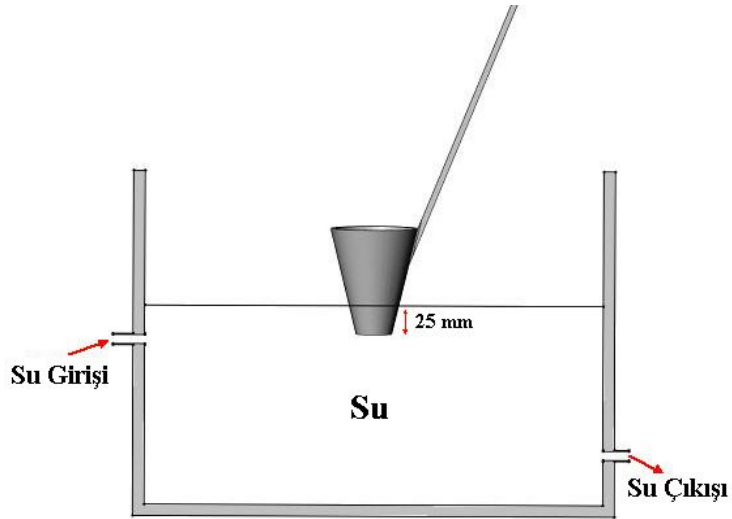
Şekil 3.3. RPT gazlılık ölçüm cihazı

### 3.1.4. Tane inceltme işlemlerinin yapılışı

Döküme hazır sıvı alaşım tane inceltici ilavesi yapılmadan önceki döküm tane yapısını görebilmek amacıyla standart ALCAN[35] tane inceltme potası içerisinde numune alınarak Şekil 3.4’de dökümü ve Şekil 3.5’de şematik görünümü verilen sabit su yüksekliğine sahip bir kaptaki soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4. Koni dökümü



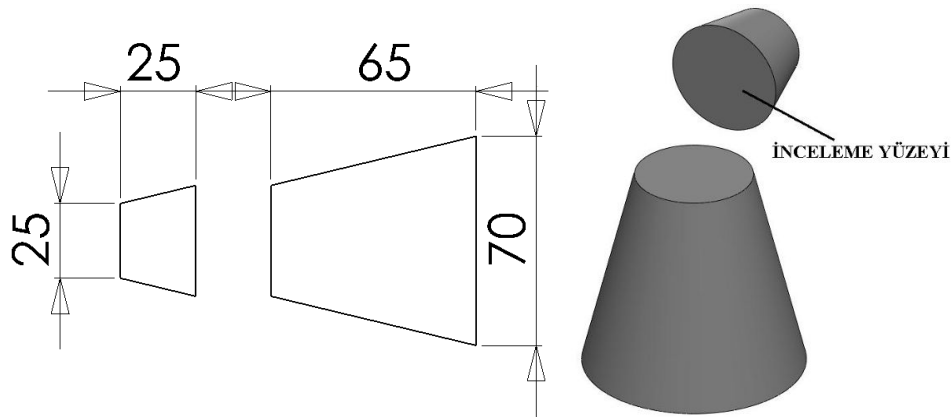
Şekil 3.5. Koninin soğutulmasının şematik gösterimi

Bu işlemten sonra ergiyik alaşıma ağırlıkça % 0,2 Ti ilave edecek şekilde önceden tartılmış Al5Ti1B mastır alaşımı daldırıldı. Tane inceltici ilavesini takiben 5'er dakikalık düzenli aralıklar ile tane inceltme deney kalıbı içerisinde sıvı alaşım alınarak

aynı şekilde soğutuldu. Katılaşma ve soğuma süresince soğutma kabı içerisinde bekletilen konik alaşım külçesinin kesilmemiş halinin fotoğraf görüntüsü Şekil 3.6'da verilmektedir. Şekil 3.7'de tane inceltme deney numunesinin kesilme ölçüleri ve numunenin inceleme yüzeyinin şematik görünüşü verilmiştir.



Şekil 3.6. Tane inceltme numunesi



Şekil 3.7. Tane inceltme deney numunesinin ölçüleri ve inceleme yüzeyi

### 3.1.5. Yüzeylerin tane ölçümü için hazırlanması

Her bir numune kesildikten sonra incelenecek yüzeyi metalografik açıdan hazır hale getirmek için kaba ve ince zımparalamanın ardından alümina süspansiyonu emdirilmiş keçede parlatma işlemleri gerçekleştirildi. Parlatılan yüzeyler yıkayıp kurutulduktan sonra dağlama işlemi için numuneler önce 80°C sıcaklıkta suda bir süre bekletilerek ısıtıldı ve soğutulmadan Paulton çözeltisi (%60 HCL, %30 HNO<sub>3</sub>, %5HF, %5H<sub>2</sub>O) ile dağlandı [36].

### 3.1.6. Tane inceltme test konilerinin değerlendirilmesi

Parlatıldıktan sonra dağlanarak mikroyapı ve tane boyutu ölçümlerine hazır hale gelen numuneler NIKON SMZ 800 stereoskopa bağlı Clemex dijital kamera yardımıyla görüntüsü alındı. Böylece her bir görüntüleme karesinde yaklaşık 1,5 mm<sup>2</sup>'lik bir alanın değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Bu boyuta bir alan yaklaşık 30-40 tane içermekte dolayısıyla her bir kare mikro yapı fotoğrafından bu sayıda tanenin boyutları ölçülebilmektedir. Clemex Vision Lite görüntüleme yazılımı sayesinde ölçülmesi istenen tane üzerinde bir uçtan diğer uca düz bir çizgi çekilmesi yeterli olmaktadır. Program önceden kalibre edilmek koşuluyla çekilen bu çizgilerin boylarını otomatik olarak ölçmekte ve ortalamaları hesaplamaktadır. Bu şekilde her bir koni yüzeyini tamamen kapsayacak şekilde görüntü alınarak tane ölçümü ve ortalama tane boyutu hesaplaması yapılmıştır.

### 3.1.7. Bekletme zamanının tane inceltmeye etkisinin incelenmesi

Tane inceltmesiz külçeden ve tane inceltici ilavesini takiben 5'er dakikalık periyotlarla alınan tane inceltme test külçelerinden ölçülen ortalama tane boyutları değerlendirilerek en küçük ortalama tane boyutunu veren bekletme süreleri bulunmuştur. Bu bekletme süresi kullanılan ETİAL 160 primer alaşımı ve AL5TiB tane inceltici mastır alaşım için optimum bekletme süresi olarak kabul edilmiştir. Bölüm 3.2'de ayrıntılı şekilde verilen tane inceltmeli döküm deneyleri bu optimum bekletme süresi baz alınarak gerçekleştirilmiştir.

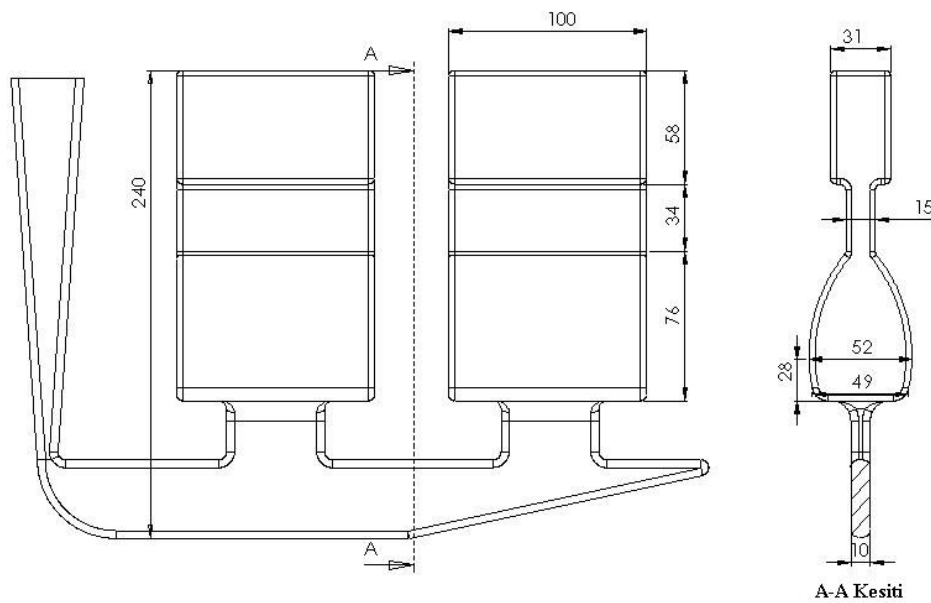
## 3.2. Dökümlerin Yapılışı

Döküm deneylerinin amacı; sıvı metalin katılaşma esnasında katı-sıvı aralığından (maşi bölgesi) sıvı beslemeye gösterdiği direnç yani kritik katı oranı değerinin ölçülmesi amaçlanmıştır. Bunun için kum kalıplara tane inceltici ilavesi yapılmadan ve tane inceltici mastır alaşımını ilave edildikten sonra tezin tane inceltme deneylerinde belirlenen optimum zamanda dökümler yapılarak incelenmiştir. Döküm deneylerinin anlatıldığı bu kısımda döküm geometrisinin seçimi, kalıplama işlemleri,

döküm numunelerin kesilmesi, incelenmesi ve imaj analiz programında değerlendirilmesi ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

### 3.2.1. Döküm geometrisinin seçimi

Döküm deneylerinde kullanılan modelin geometrisinin seçiminde, Şekil 3.8’de görüldüğü gibi, uçların daha kalın ve orta kısımları ince bir model kullanılmıştır. Böylece kritik katı oranının etkisinin daha belirgin şekilde ortaya çıkması amaçlanmıştır. Dökümün üst kısmında alt kısmı besleyebilecek sıvı metal bulunmasına rağmen ortadaki ince kesimde kritik katı oranı seviyesinde bir katılaşma gerçekleştiğinde besleme yolu kapanacak ve sıvı metalin alt kısma geçişi sonlanacaktır. Böylece parçanın alt kısımlarında hata oluşumu amaçlanmıştır. Seçilen döküm geometrilerinde yapılan tane inceltmemiş (kaba taneli) ve iyi derecede tane inceltmiş (ince taneli) döküm deneylerinde döküm parça içinde kalan sıcak noktanın ne derece beslenebildiği ölçülebilecektir. Beslenebilirlik ölçütü olarak dökümlerin sıcak noktalarında oluşan mikro ve makro porozitelerin yüzde oranları ve dağılımları esas alınmıştır. Bu nedenle seçilecek geometri öyle bir geometri olmalıdır ki döküm kesitlerinde en azından bir miktar yetersiz beslemeye bağlı porozite oluşumu gerçekleşsin. Buna karşılık oluşan tüm çekme kusurlarının iç kesitlerde oluşması ölçme ve değerlendirme kolaylığı açısından gereklidir.



Şekil 3.8. Döküm modeli geometrisi ve ölçüleri



### 3.2.2. Kalıplama işleminin yapılışı

Şekil 3.8’de gösterilen geometri çift taraflı bir kalıplama plakasına işlenerek kalıplama modeli oluşturulmuştur. Şekil 3.9’de ahşaptan yapılmış plak model görülmektedir.

Kalıp; %3,5 oranında sodyum silikat reçine eklenmiş silis kumunun kum karıştırıcısında karıştırılarak model plakası ve çıkma derece yardımı ile şekli verildikten sonra CO<sub>2</sub> gazı ile sertleştirilmesiyle elde edilmiştir. Şekil 3.10’da kalıplanmadan bir görüntü verilmiştir.



Şekil 3.9. Plak model ve açma derece



Şekil 3.10. Kalıplanmadan bir görüntü

### 3.2.3. Termokopul yerleştirilmesi ve kalıbın kapatılması

Dökümün soğuması ve katılaşması sırasında zaman – sıcaklık verileri elde etmek ve bu verilerle oluşturulacak soğuma eğrilerinin simülasyon programında kullanılmasını sağlamak açısından kalıp boşluğunda belirlenen noktalara iki adet K tipi termokopul yerleştirilmiştir. Termokopul uçları özel kabloları ile Agilent HP34970A entegreli veri toplama ve anahtar birimine bağlanarak birer saniye aralıklarla veri toplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Yüzeyi boyanan kalıplar kapatılarak, termokopul bağlantıları yapıldıktan sonra döküm öncesi kalıp nemini almak için yüzeyleri şalama yardımıyla ısıtılmıştır. Şekil 3.11’de döküme hazır kalıp görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.11. Döküme hazır kalıp görünüşü

### 3.2.4. Alaşımın ergitilmesi ve döküm işlemi

Yeteri miktarda tartılarak ocağa yüklenen Etial 160 alaşımı tamamen ergimesi için ocak sıcaklığı 750 °C’ye yükseltilmiştir. Sıvı metalin çözünmüş hidrojen gazından arındırılması amacı ile yaklaşık 750°C’ de potaya daldırılan grafit sabit lans yardımı ile sıvı azot ile yıkama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemden sonra sıvı metal üzeri bir ticari toz flaks ile kaplanarak metalin sıcaklığının pota içersinde 700 °C ye düşmesi beklendi ve bu sıcaklıkta sıvı metalin yüzeyinden sıyırma yöntemi ile cüruf tabakası temizlenerek hazırlanan kalıba döküm gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.12’de yapılan işlemlere ait fotoğraf görüntüleri verilmektedir.



Şekil 3.12.(a) Ergiyik içinde curufların toplanması, (b) Curuf alma işlemi

Döküm işlemi tane inceltme ilavesi yapılmadan ve tane inceltme ilavesi yapıldıktan sonra iki farklı kalıba yapılmıştır. İlk olarak ergiyik ilave yapılmadan alaşımın sıcaklığı pota içinde  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye geldiğinde döküm yapılmıştır.

Alaşımın sıcaklığı tane inceltmeli döküm için tekrar  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkartılıp bu sıcaklıkta sıvı metale ağırlıkça % 0,2 Al5Ti1B mastır alaşımı ilave edilmiştir. Bir önceki bölümde tanımlanan koni şeklindeki tane inceltme deneylerinden alınan sonuçlar minimum tane boyutunun yaklaşık 25 dakikalık bekleme süresiyle elde edildiğini gösterdiğinden dökümler ilaveden 25 dakika sonra yapılmıştır. Şekil 3.13'de döküm sonrası kalıp görüntüsü ve Şekil 3.14'de de döküm numenin resmi görülmektedir. Daha sonra döküm parçaları uygun biçimde kesilerek üzerinde gerekli incelemelerin yapılabilmesi için numuneler alınmıştır.



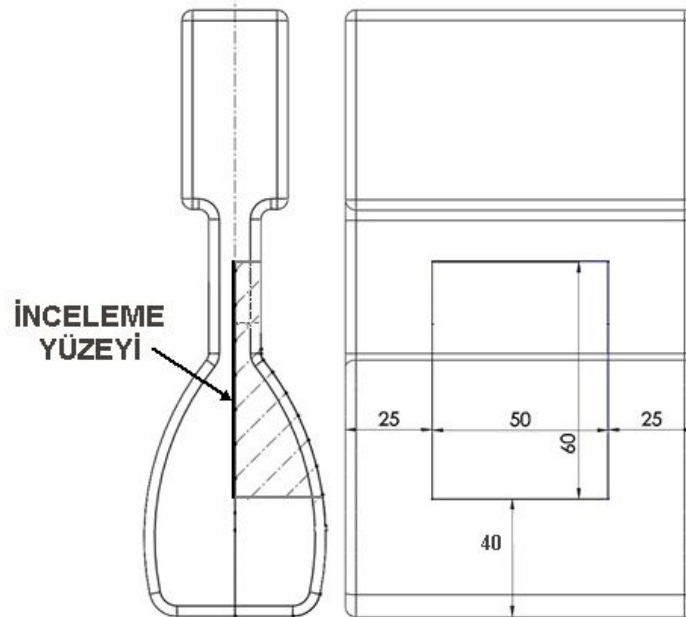
Şekil 3.13. Dökümü sonrası kalıp görüntüsü



Şekil 3.14. Dökümün kalıptan çıkmış hali

### 3.2.5. Numunelerin hazırlanması

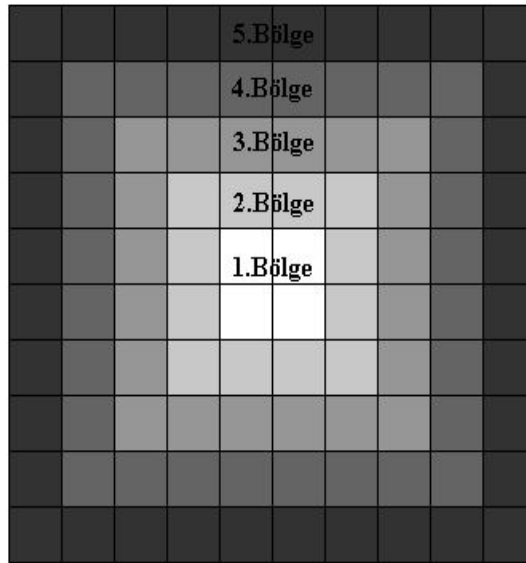
Döküm işlemleri tamamlandıktan sonra döküm numuneler hata oluşması muhtemel yerlerden kesilerek tane inceltmeye bağlı olarak oluşan makro porozite dağılımı incelenmiş ve bu yolla her bir dökümün besleme etkinliği tanımlanmıştır. Şekil 3.15’de incelenmek üzere kesilen numunenin yeri, ölçüleri ve inceleme yüzeyi görülmektedir.



Şekil 3.15. Döküm numunesinin incelenmek üzere kesilen bölgesi inceleme yüzeyi

### 3.2.6. Numunelerin incelenmesi

Numuneler, metalografik incelemeye hazır hale getirmek için kaba ve ince zımparalamanın ardından alümina süspansiyonu emdirilmiş keçede parlatılmıştır. Mikroskobik incelemeler ve porozite oranları ölçümleri Nikon SMZ800 ışık mikroskobunda ve buna bağlı çalışan bir Clemex dijital kamera ile alınan görüntüler Clemex Vision Lite görüntü analiz programında işlenerek gerçekleştirilmiştir. Döküm numunenin bütün yüzeyini tarayacak şekilde 100 adet resim çekilerek, her bir numune kesildikten sonra incelenecek yüzeyi çekilen resimlerin her birinin porozite oranları belirlenmiştir. Bütün mikroyapı resimleri bulunduğu yere göre bölgelere ayrılarak, her bir resim için hesaplanan porozite oranlarından o bölgeye ait porozite ortalaması belirlenmiştir. Kesilen numuneden çekilen resimler ve bunların bölgelere ayrılması Şekil 3.16’da şematik olarak görülmektedir.



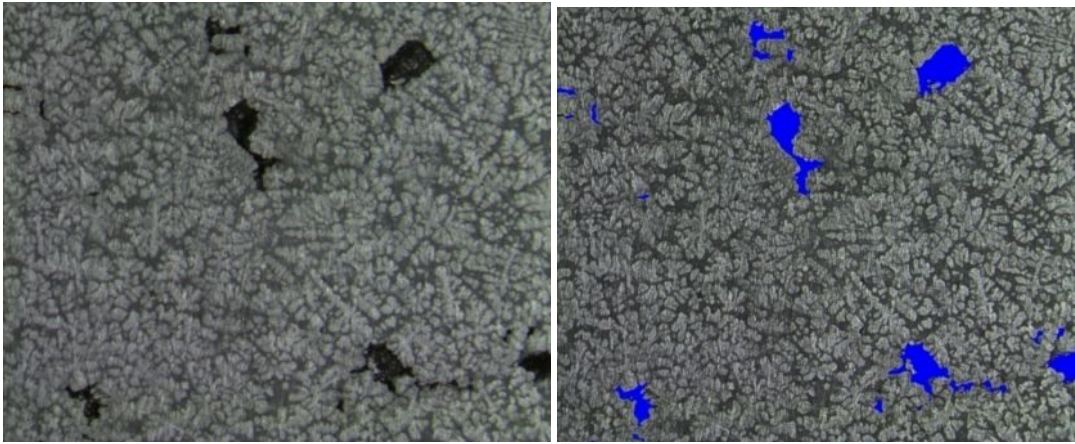
Şekil 3.16. Numune üzerinde çekilen resimlerin bölgelere ayrılması

### 3.2.7. Mikro yapı resimlerinin imaj analizde değerlendirilmesi

İmaj analiz olarak adlandırılan sistemlerin temel prensibi bir mikroskop, mikroskoba bağlı bir kamera ve bu kamera aracılığı ile hazırlanan numunelerden alınan görüntünün bilgisayara aktarılması ve bilgisayarda bir program ile kullanıcı tanımlı, yarı otomatik ya da otomatik olarak analizlerin yapılması esasına dayanmaktadır.



İmaj analiz programı; malzememizin makro veya mikroyapı resimlerinin analizleri için geliştirilmiş ve özellikle metalürji kalite kontrolünde ve laboratuvarlarında, araştırma ve ölçüm yapmamızı sağlayan bir analiz sistemidir. Yazılımın analiz yapma esası; mevcut resimdeki renk farklılıklarına dayanmaktadır. Resimdeki renk farklılıklarına göre her bir kontrasttaki rengi farklı birer faz ya da bölge olarak algılayıp bize bu farklılara göre sonuçlar verir. Şekil 3.17’de Clemex imaj analiz programı yardımıyla porozite oranının belirlenmesine örnek bir görüntü verilmiştir. Şekil 3.17.a’ daki mikroyapı resminde siyah olarak görülen porozite bölgeleri Şekil 3.17.b’de mavi olarak işaretlenmiştir. Programın renk farklılığına göre algılaması porozite olarak belirlediğimiz bölgeyi algılayarak toplam alandaki kapladığı yüzde miktarı olarak sonuç bulunmuştur.



Şekil 3.17. İmaj analiz programında porozite tayini, (a) orijinal mikroyapı resmi, (b) imaj analiz programıyla işlenmiş resim.

Şekil 3.16’da görüldüğü gibi 1. bölgede 4, 2. Bölgede 12, 3. Bölgede 20, 4 bölgede 28, 5. bölgede 36 resim bulunmaktadır. Bölgenin makro porozite oranını belirlemek için bölgedeki her bir resmin porozite oranı Şekil 3.17 deki gibi bulunarak ve bölgedeki toplam mikroyapı resmine göre ortalamaları alınmıştır. Simülasyon programında sonuçlar % yoğunluk olarak verildiğinden gerçek dökümlerde de % porozite %100 yoğunluktan çıkarılarak kalan sayı % yoğunluk olarak ilgili bölgeye yazılmıştır. Bu şekilde numunelerin porozite haritaları yoğunluk haritalarına dönüştürülerek simülasyon programından alınan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

### 3.3 Simülasyon (Modelleme)

Bu tez çalışması kapsamında döküm modellemesi için SolidCast döküm simülasyon programı kullanılmıştır. Program sonlu farklar (Finite Difference) metodu ile ısı transfer ve faz dönüşüm hesaplamalarını üç boyutlu döküm ve kalıp kesitlerinde yaparak bir döküm parçanın katılaşmasını modelleyebilmektedir.

Çalışmada fiziksel olarak gerçek döküm şartlarında yapılan dökümlerin simülasyon ortamında sayısal olarak birebir modellenbilmesini sağlamak simülasyon kullanımının en temel amacıdır. Böylece gerçek dökümlerde ortaya çıkan yetersiz beslemeye bağlı porozite kusurlarının simülasyon programında CFS olarak tanımlanan maşi bölgesi geçirgenlik değeri; tane inceltici ilavesiz kaba taneli döküm ve tane inceltici ilaveli ince taneli döküm için simülasyon programındaki gerçek karşılığı bulunabilecektir.

#### 3.3.1. Kalıp geometrisi ve malzeme özelliklerinin programa girilmesi

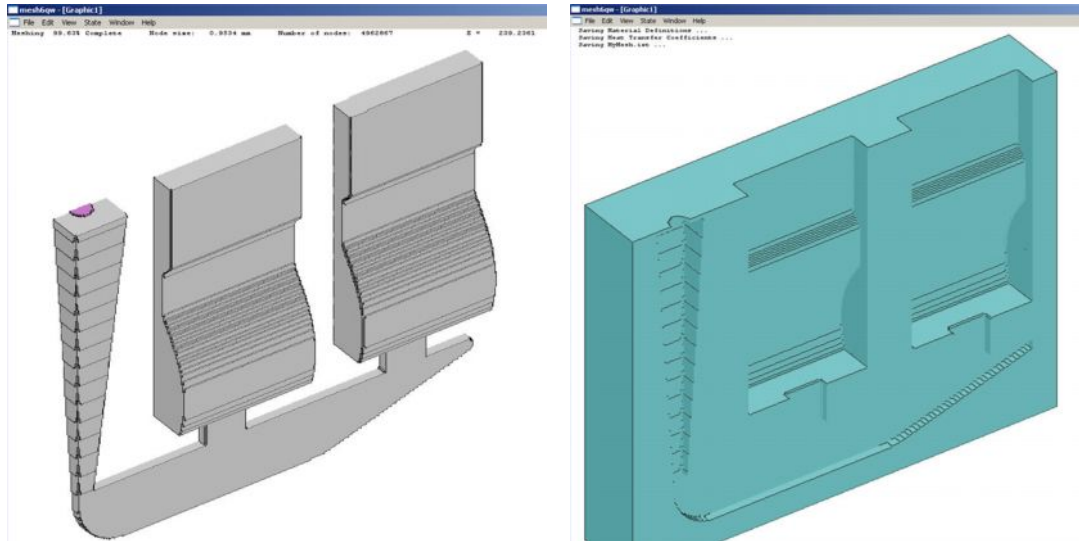
Modelin döküm geometrisi SolidWorks programında katı model olarak oluşturulduktan sonra STL formatına çevrilerek döküm simülasyon programına aktarıldı. Bu aşamadan sonra döküm alaşımı ve kalıp malzemesinin türü ve termo fiziksel özelliklerinin tanımlanması yapıldı. Döküm alaşımının termo fiziksel değerleri simülasyon programının veri tabanında Etial 160 alaşımına karşılık gelen A 380 alaşımı için verilen değer Tablo 3.3’de gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Simülasyonda kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri

Malzeme	Isıl iletkenlik (W/m.K)	Özgül ısı (J/kg.K)	Yoğunluk kg/m <sup>3</sup>	Döküm Sıcaklığı (°C)	Katılaşma Sıcaklığı (°C)	Katılaşma Aralığı (°C)	Ergime Gizli Isısı J/kg.
ETİAL 160	96,17	962,3	2711	700	476	124	388175,1

Simülasyon programının kütüphanesinde birçok alaşımın termofiziksel özellikleri standart olarak yüklü olduğu gibi bizde istediğimiz özelliği manuel olarak değiştirebiliriz. Ayrıca döküm alaşımının soğuma eğrisi, yüzde hacimsel çekme oranı ve CFS değeri gibi parametreler çok değişkenlik gösterebilmektedir. Alaşımın soğuma eğrisi deneyler kapsamında yapılan dökümlere yerleştirilen temokopullar yardımıyla ölçülen zaman-sıcaklık verilerinden yararlanılarak çizilmiş ve programa girilmiştir. Alaşımın çekme oranı standart değerler kapsamına % 7 olarak alınmıştır. Diğer önemli bir sınır şartı CFS değeri ise farklı değerlerde alınarak dökümlere uygulana tane inceltme işleminin besleme üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Malzeme özellikleri tanımlanarak programa aktarılan katı model geometrisinin meş edilerek girilen sınır şartlarının her bir meş elemanı için simülasyon programında çözümlenmesi sağlanmıştır. Şekil 3.18’de döküm katı modelinin meş edilmiş hali gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi daha az bilgisayar hafızasını kullanmak ve daha hızlı çözüme ulaşmak için döküm modelinin simetri düzleminde kesilmiş bir yarısı meş edilmiştir.



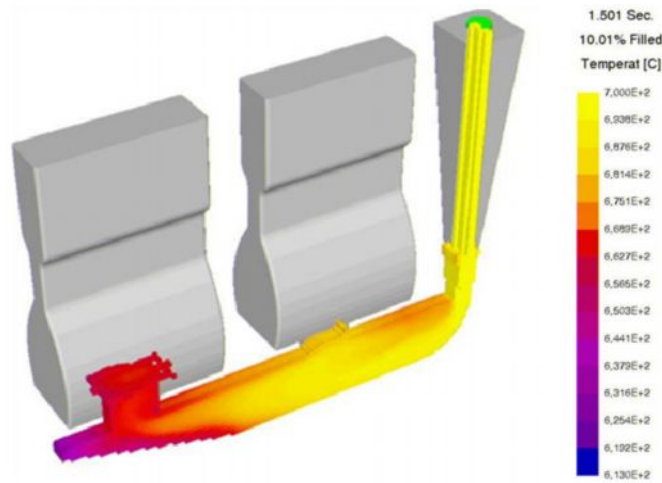
Şekil 3.18. Döküm ve kalıp malzemesinin meş edilmesinden alınan görüntü.

### 3.3.2. Kalıbın doldurulması ve dökümün katılaşması

SolidCast simülasyon programında kalıp doldurma işlemi için ayrı bir yazılım olan FlowCast modülü kullanılmaktadır. FlowCast akışkanlar dinamiği kıstaslarına göre

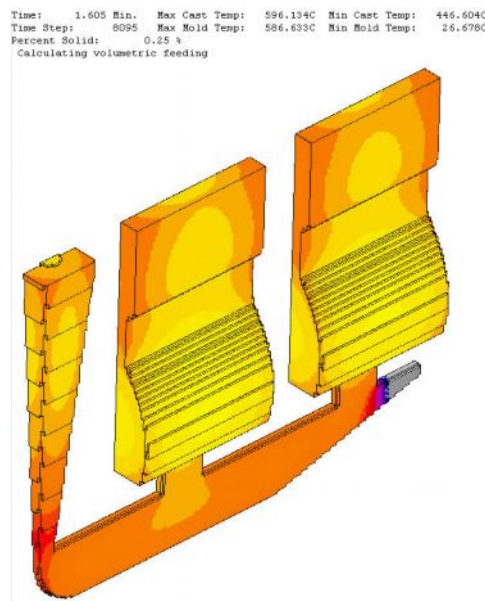


sıvı metali kalıp boşluğuna doldururken türbülans, eksik doldurma, soğuk birleşme ve basınç vb. gibi faktörleri de hesaplamaktadır. Şekil 3.19’da simülasyon programında kalıbın doldurulmasını gösteren bir görüntü verilmiştir.



Şekil 3.19. FlowCast programında kalıbın doldurulması

SolidCast programı dökümü soğutmaya kalıp doldurulduktan sonra geçer ve tüm döküm kesitleri katılaşıncaya kadar soğutma işlemine devam eder. Program katılma tamamlandığı anda otomatik olarak sonlanır ve döküm parça üzerinde simülasyon sonrası analizlere geçilir. Dökümün soğumasına ait bir görüntü Şekil 3.20’da verilmiştir.



Şekil 3.20. Simülasyondan alınan soğuma görüntüsü

## **BÖLÜM 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ**

Deneysel sonuçlar ve değerlendirilmesi; çalışmanın deneysel çalışmalar kısmında olduğu gibi üç bölüm altında incelenecektir. İlk olarak tane inceltme deney sonuçları ve mikroyapı resimleri verilerek, tane incelticinin etkisinin zamanla değişimi değerlendirilip tane inceltme işlemi için optimum zaman belirlenecektir. İkinci kısımda tane inceltici ilaveli ve tane inceltici ilavesiz olarak yapılan döküm numunelerinin sonuçlarına yer verilerek porozite haritaları incelenecektir. Son olarak yapılan döküm simülasyon programı ile yapılan modelleme sonuçları verilerek bu sonuçlarla gerçek dökümlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılıp alaşımın ilavesiz ve tane inceltici ilaveli kritik katı oranı değerleri belirlenecektir.

### **4.1. Tane İnceltme Deney Sonuçları**

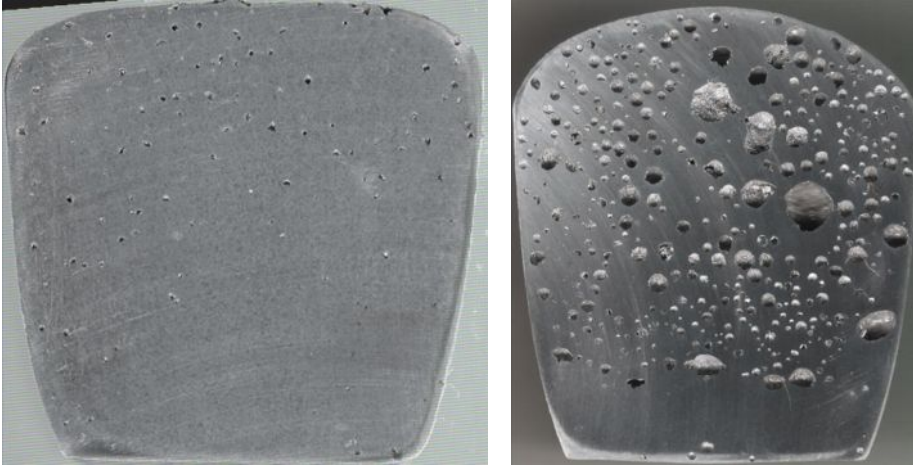
#### **4.1.1. Sıvı metalde gazlılık ölçümleri sonuçları**

Döküm işleminden önce ergitilen sıvı metalin içersindeki çözünmüş halde bulunan hidrojen gazının temizlenmesi amacıyla sıvı alaşımı azot gazı ile yıkama işleminin nasıl yapıldığı deneysel çalışmalar bölümünde anlatılmıştı. Gaz giderme işleminin ne kadar başarılı olduğu ve sıvı metalin kalitesini tespit etmek için RPT numuneleri alındı. Şekil 4.1 de farklı gaz oranlarına sahip RPT numuneleri görülmektedir. Şekildeki numuneleri incelediğimizde sıvı metal kalitesi iyi olmayan içerisinde gaz miktarı fazla olan numune basıncın etkisiyle kek gibi kabarmış bir görüntü vermektedir. Yüzeyinde kabarıklık olmayıp bir miktar içeri doğru çekme yapan numune sıvı metalin kalitesinin dökülebilir seviyede olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 4.1 Farklı gaz seviyesi oranlarına sahip RPT numuneleri.

Şekil 4.2.de de farklı sıvı metal kalitesine sahip alaşımlardan alınan numunelerin kesilerek parlatılmış görüntüleri mevcuttur. Şekilde de görüldüğü gibi gaz miktarı fazla olan numunede katılaşma esnasındaki basınç etkisiyle gaz boşlukları iyice belirginleşmiştir.

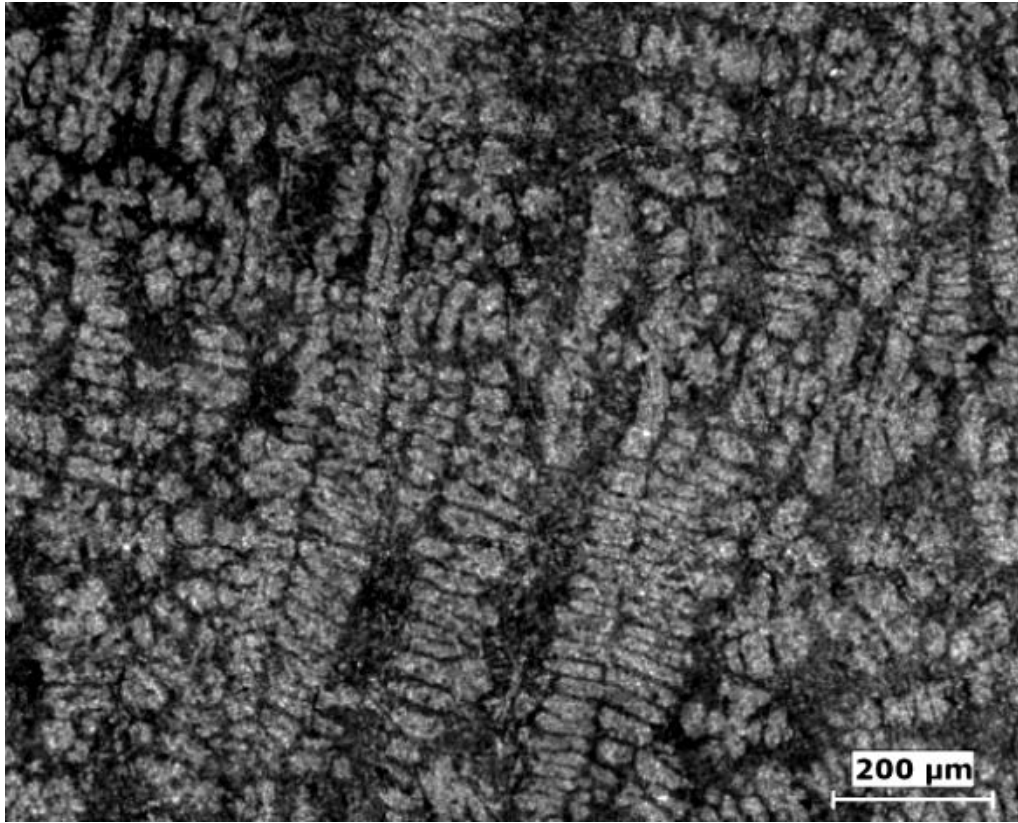


Şekil 4.2 Farklı gaz seviyesi oranlarına sahip RPT numunelerinin kesilip parlatılmış görüntüleri.

#### 4.1.2. Tane yapıları ve boyutları

Deneysel çalışmalarda anlatıldığı gibi koni şeklinde dökülen standart ALCAN tane inceltme numunelerini belirtilen yerlerden kesilip, metalografik işlemler sonrası incelenerek ortalama tane boyutu dağılımı her bir numune için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Tane inceltici ilave edilmemiş ve Al5Ti1B tane inceltici ilavesi yapıldıktan 5 dakika sonra alınan ilk numunelerden alınan mikro yapı resimleri sırası ile Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Şekil 4.3'den görüldüğü gibi primer alfa alüminyum kristalleri oldukça dallanmış dendritik bir yapıya sahiptir. Dendritlerin boyları en küçük büyütme merceği ile alınan görüntüde bile neredeyse tek bir görüntüleme karesine sığmayacak şekilde bir kaç mm uzunluğa kadar çıkabilmektedir.

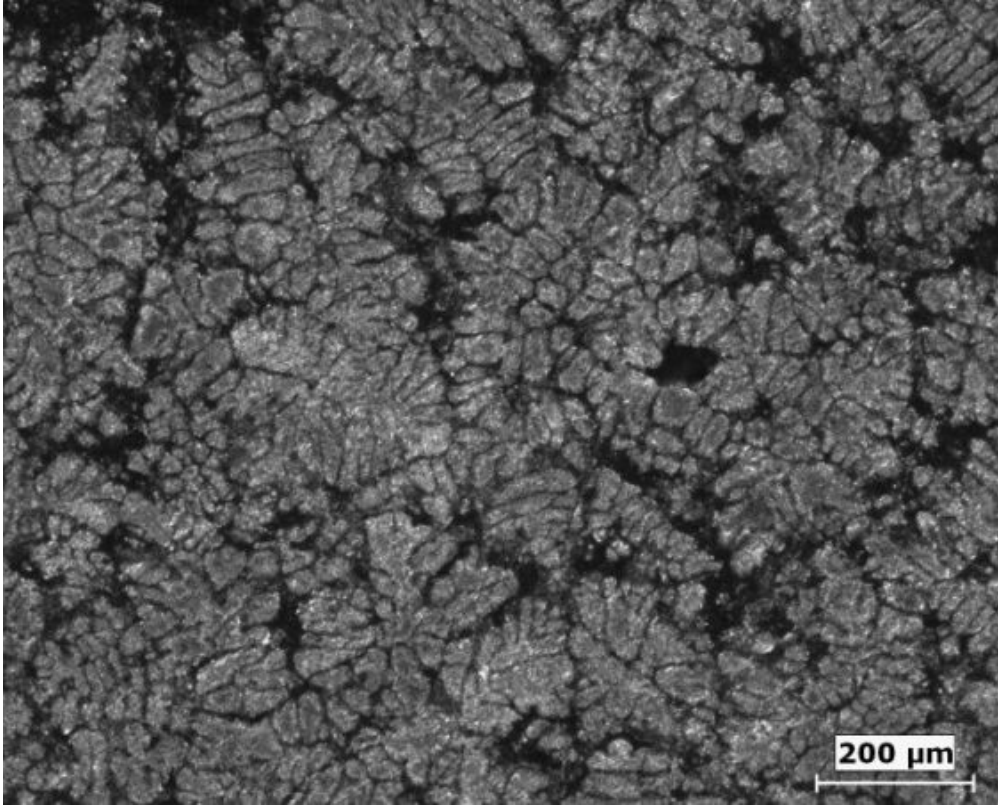


Şekil 4.3 Etial 160 primer alaşımı tane inceltmesiz mikro yapı resmi

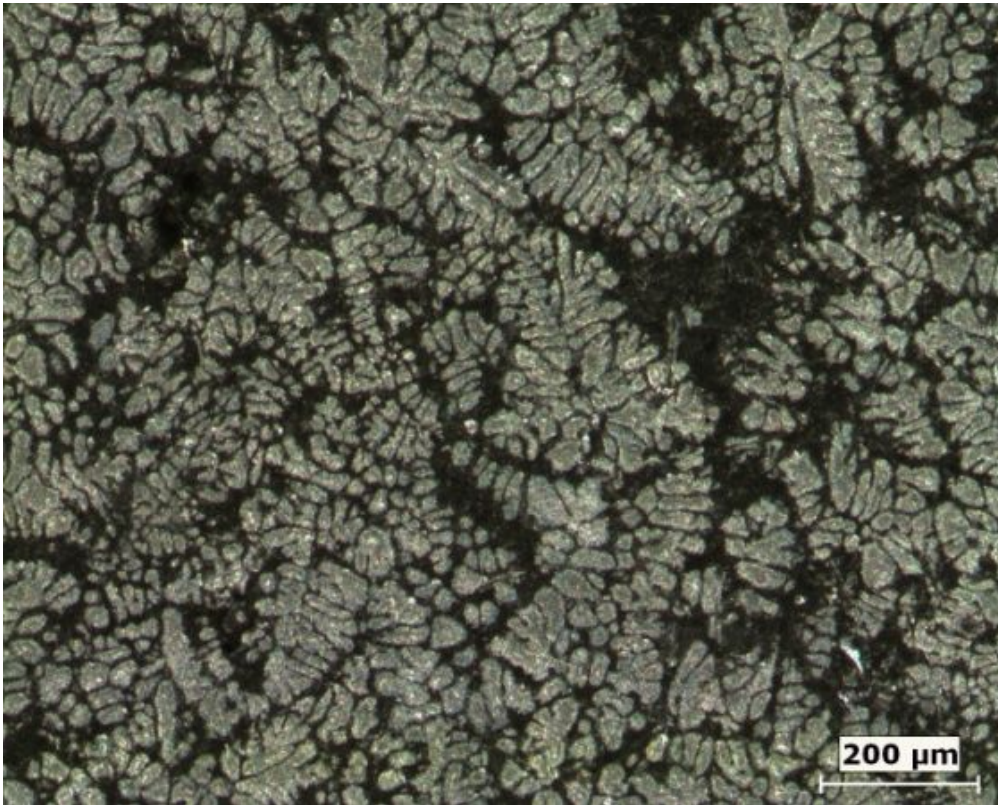
Şekil 4.4'de ise alfa alüminyum tanelerinin ortalama 300-350  $\mu\text{m}$  civarında bir boyuta sahip oldukları görülmektedir. Bu durum Al5Ti1B tane inceltici ilavesi yapıldıktan sonra 5 dakika gibi kısa sürede sıvı içerisinde çözünerek kısmen de olsa tane inceltme etkisi gösterdiğini teyit etmektedir.

Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de sırası ile 10, 15 ve 20 dakikalık bekletme süreleriyle alınan tane inceltme numunelerine ait tane yapıları ve tane boyutları gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi bekletme süresi arttıkça ortalama tane boyutu değerleri küçülmeye devam etmektedir.



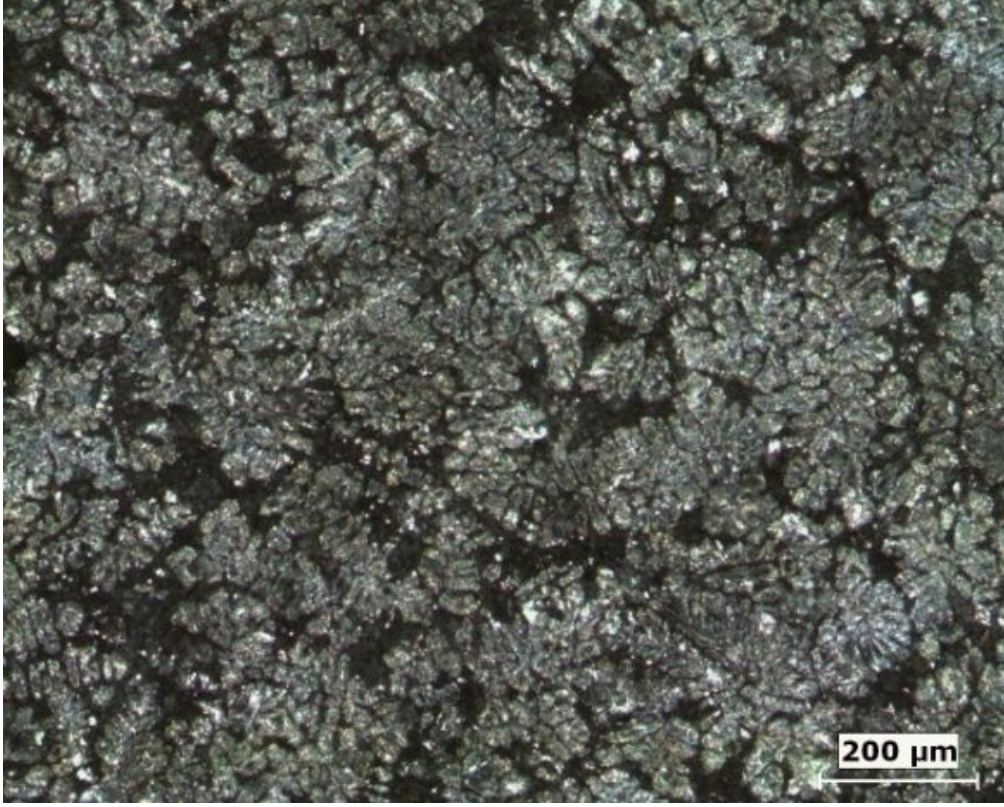


Şekil 4.4. Al5Ti1B ilavesinden 5 dakika sonra

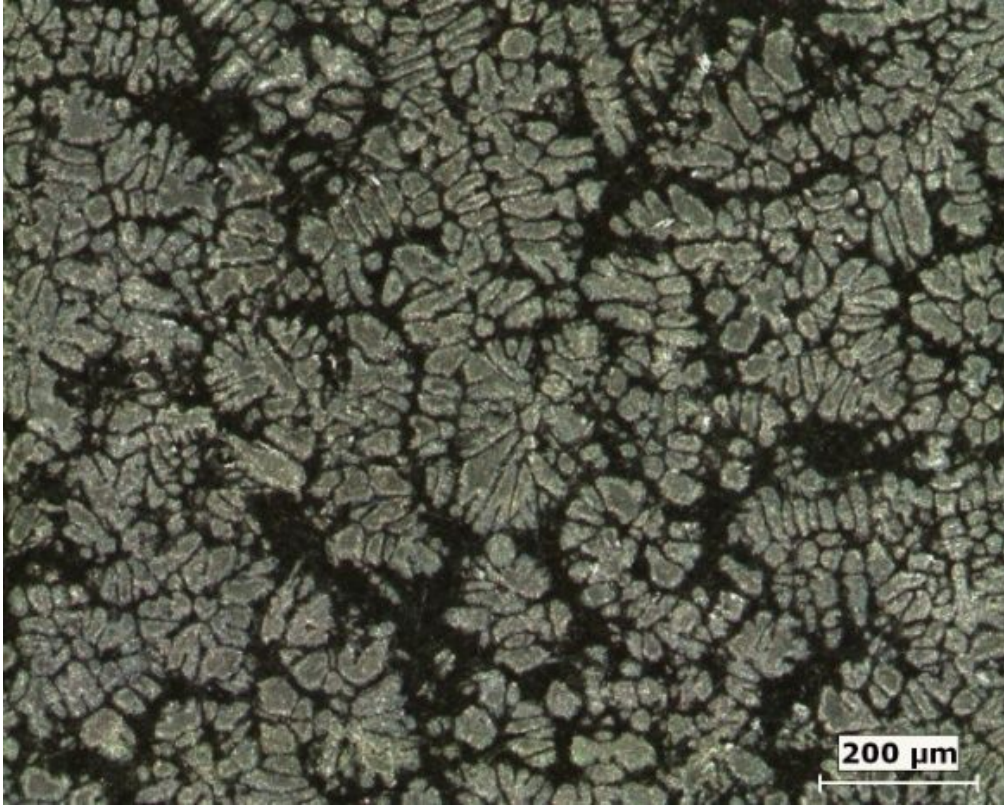


Şekil 4.5. Al5Ti1B ilavesinden 10 dakika sonra



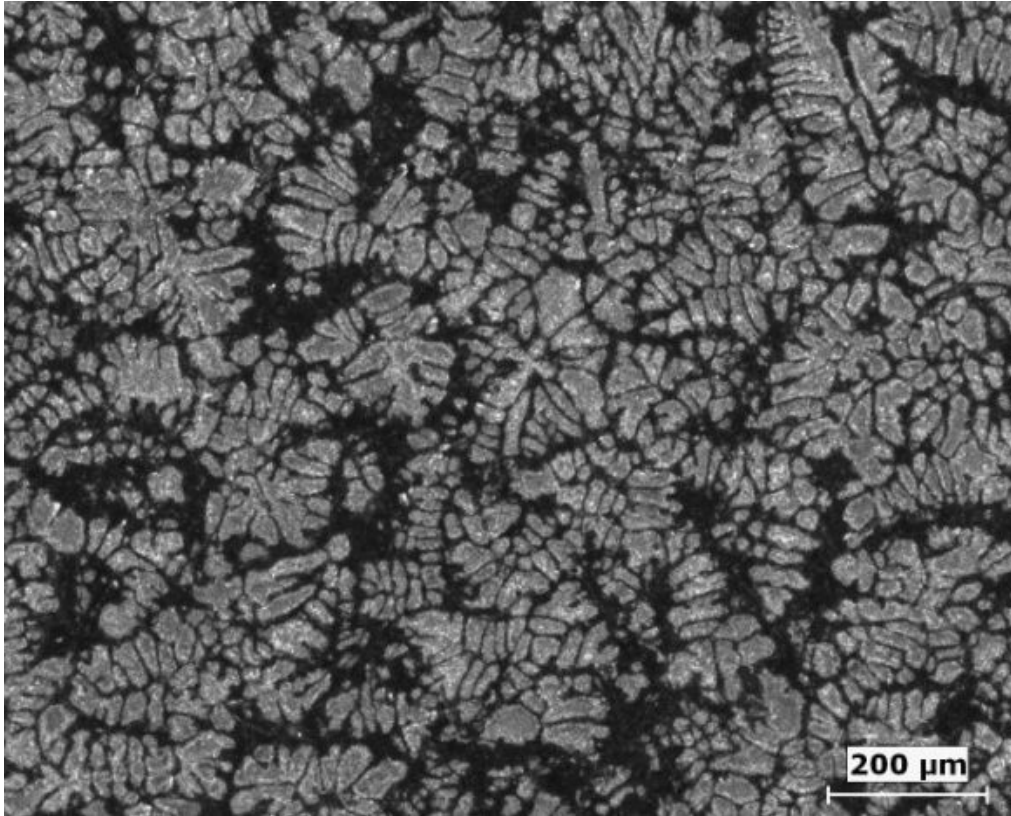


Şekil 4.6. Al5Ti1B ilavesinden 15 dakika sonra



Şekil 4.7. Al5Ti1B ilavesinden 20 dakika sonra

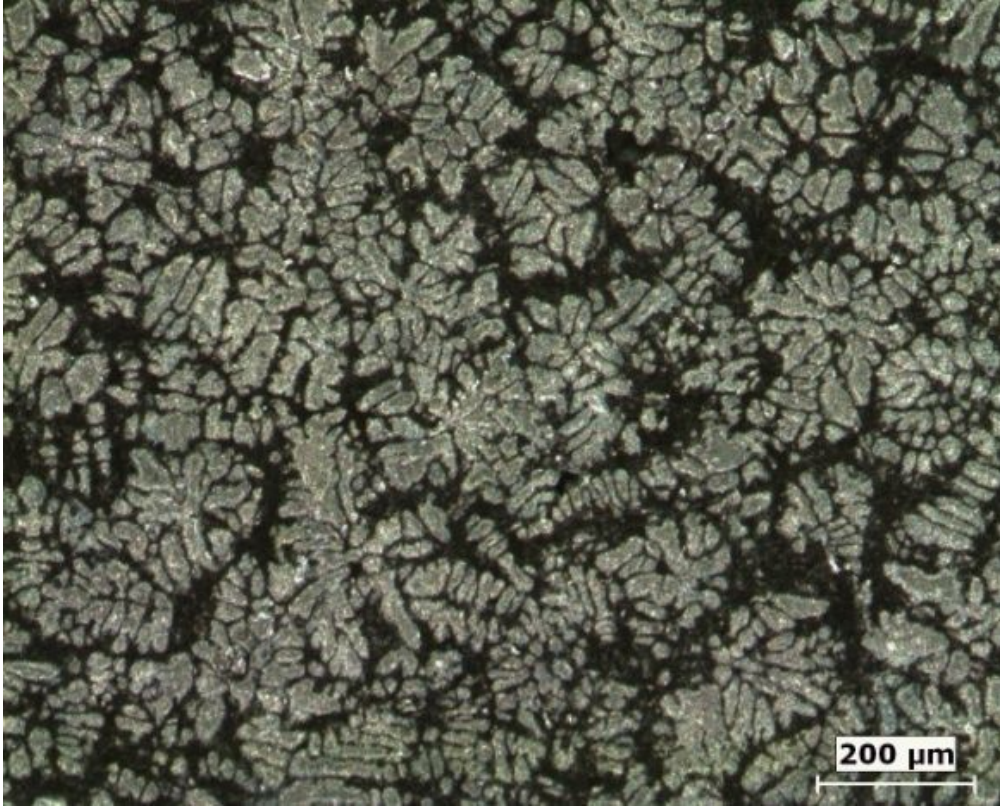
Al5Ti1B ilavesinden 25 dakika sonra alınan numunenin mikroyapı resminden de görüldüğü gibi bu süre tane inceltici ilavesinin en iyi etkiyi gösterdiği süre olarak tespit edilmiştir. Tane boyutunun bu zamana kadar zaman artışıyla birlikte gittikçe azaldığı ve minimum 150  $\mu\text{m}$  seviyelerine kadar düştüğü tespit edilmiştir. Yapılan ölçümlerde ortalama tane boyutunun 180-210 $\mu\text{m}$  seviyelerinde bulunmuştur.



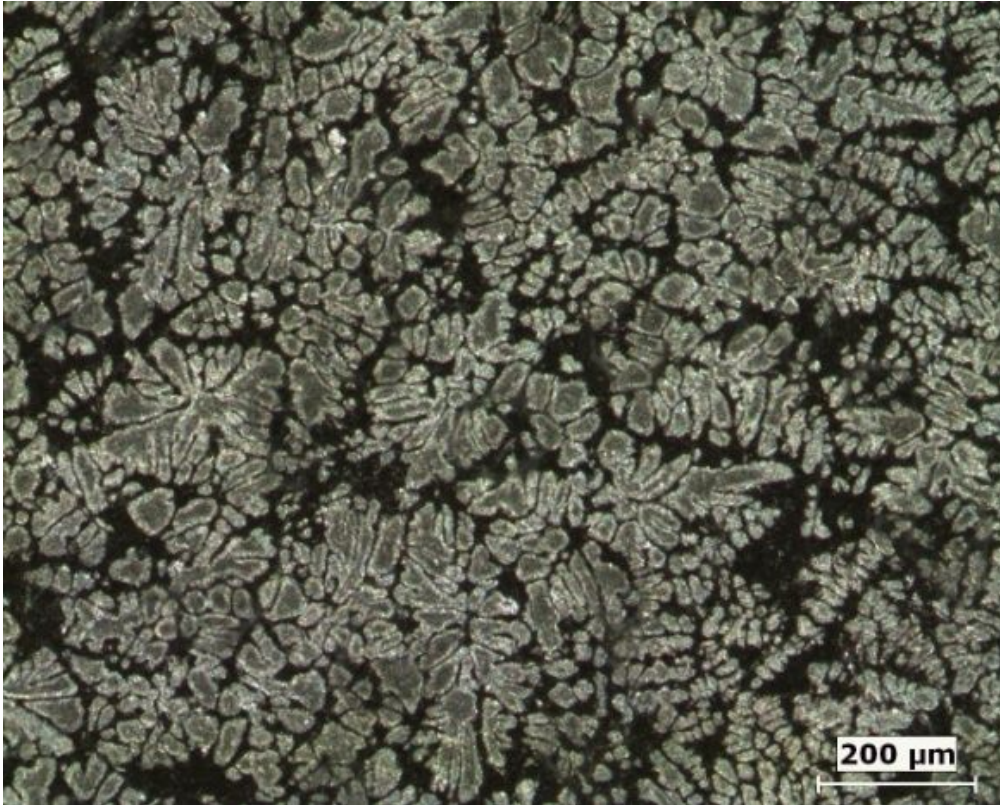
Şekil 4.8. Al5Ti1B ilavesinden 25 dakika sonra

Bekletme süresi 25 dakikayı geçtiğinde tane inceltme etkisi zayıflamaya başlamaktadır. Şekil 4.9 ile Şekil 4.15 arasında sırası ile 30, 35, 40, 45, 50, 55 ve 60 dakikalık bekletme süreleriyle alınan tane inceltme numunelerine ait tane yapıları gösterilmiştir. Tane inceltici ilavesinden 60 dakika sonra ortalama tane boyutu 300-350  $\mu\text{m}$  seviyelerine kadar çıkmaktadır. Bekletme süresinin uzamasıyla tane boyutunun artmasının sebebi olarak; Al5Ti1B ilavesiyle alaşım içerisinde oluşan ve çekirdeklenme etkisi sağlayan  $\text{TiB}_2$  ve  $\text{TiAl}_3$  gibi intermetalik bileşiklerin zamanla çözünmeye başlaması veya kümeleşerek boyutlarını büyümesi ve heterojen çekirdeklenme noktalarının azalması ile ilişkilendirilmektedir.



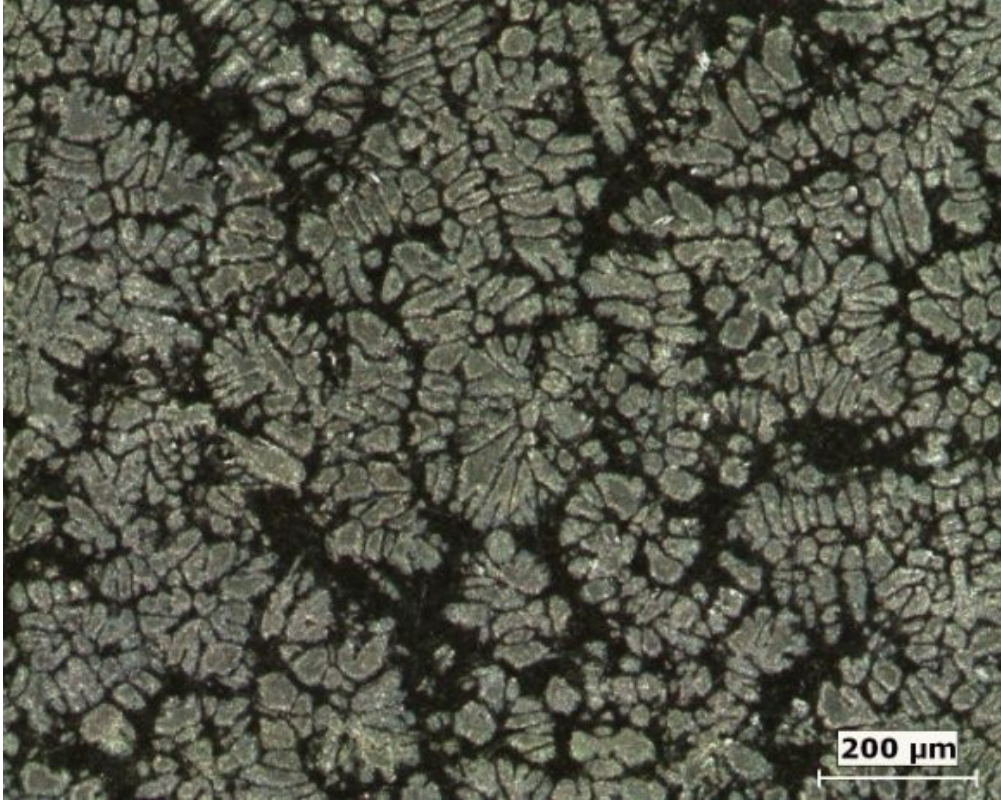


Şekil 4.9. Al5Ti1B ilavesinden 30 dakika sonra

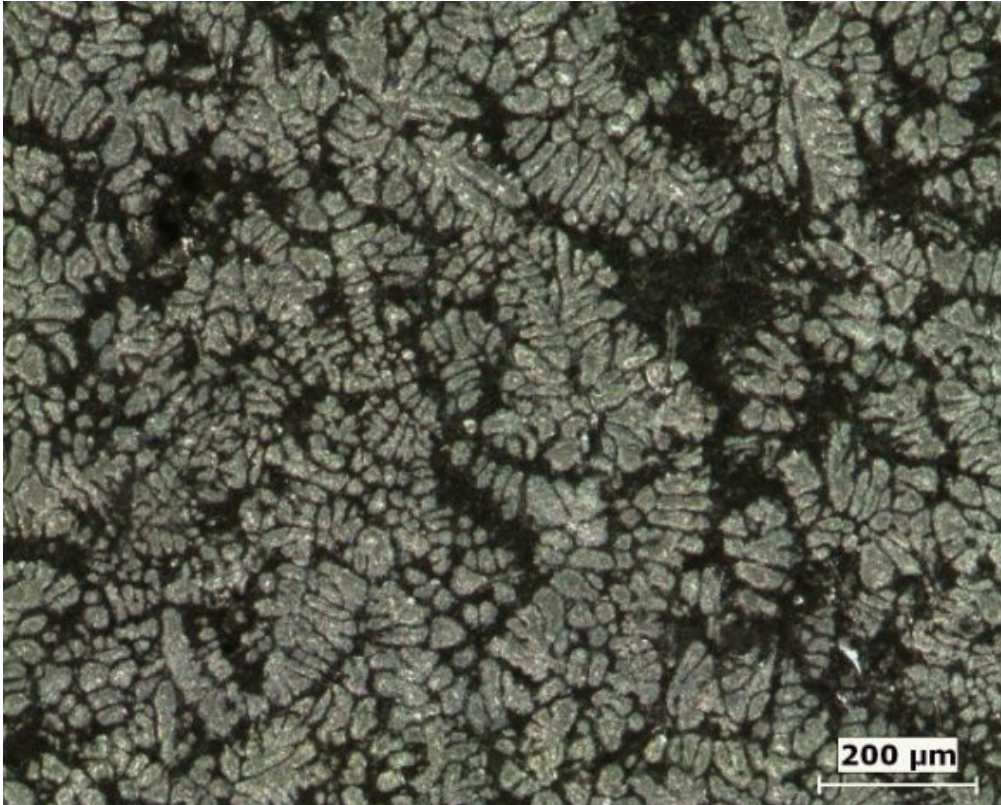


Şekil 4.10. Al5Ti1B ilavesinden 35 dakika sonra



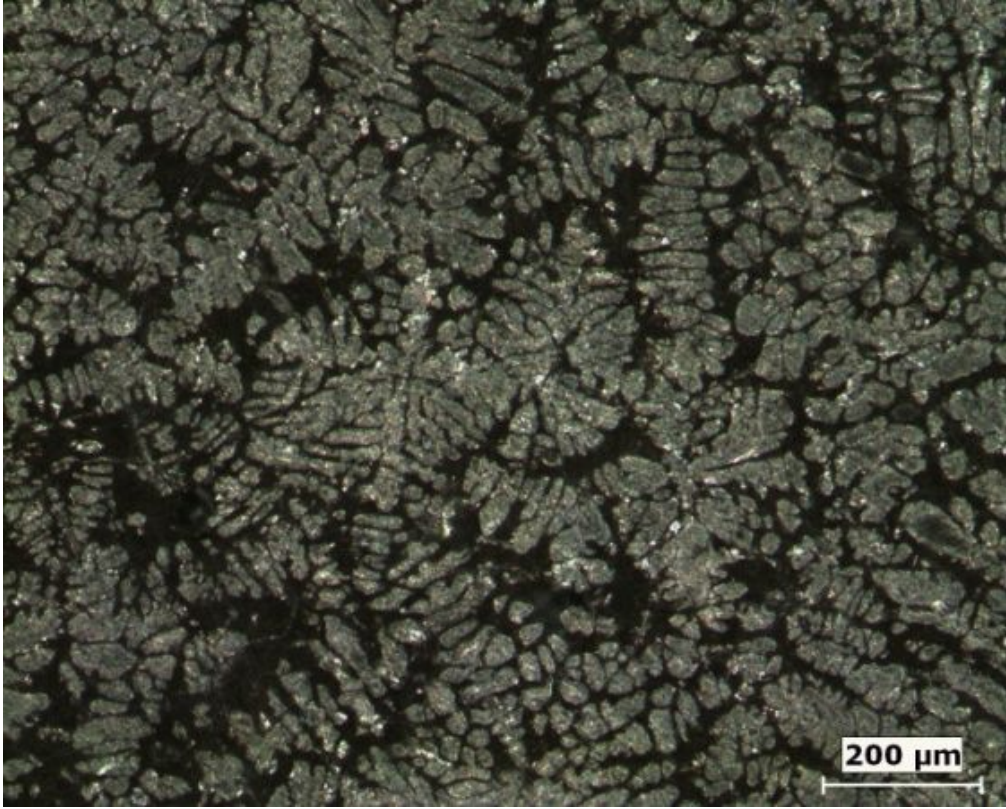


Şekil 4.11. Al5Ti1B ilavesinden 40 dakika sonra

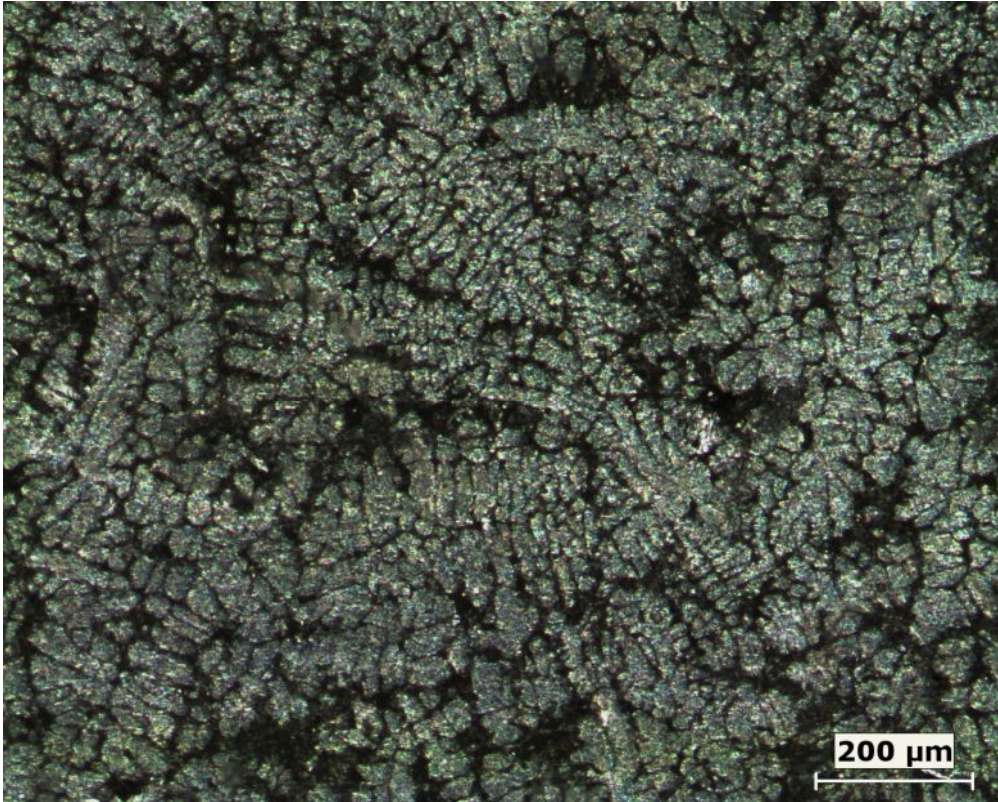


Şekil 4.12. Al5Ti1B ilavesinden 45 dakika sonra

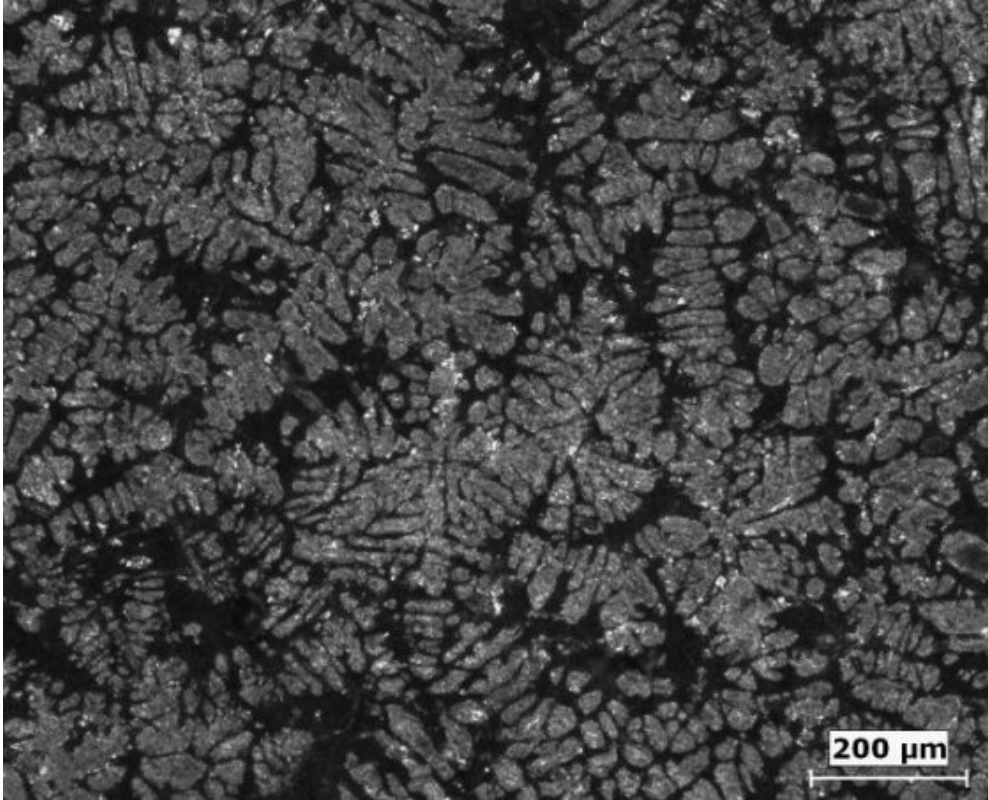




Şekil 4.13. Al5Ti1B ilavesinden 50 dakika sonra



Şekil 4.14. Al5Ti1B ilavesinden 55 dakika sonra

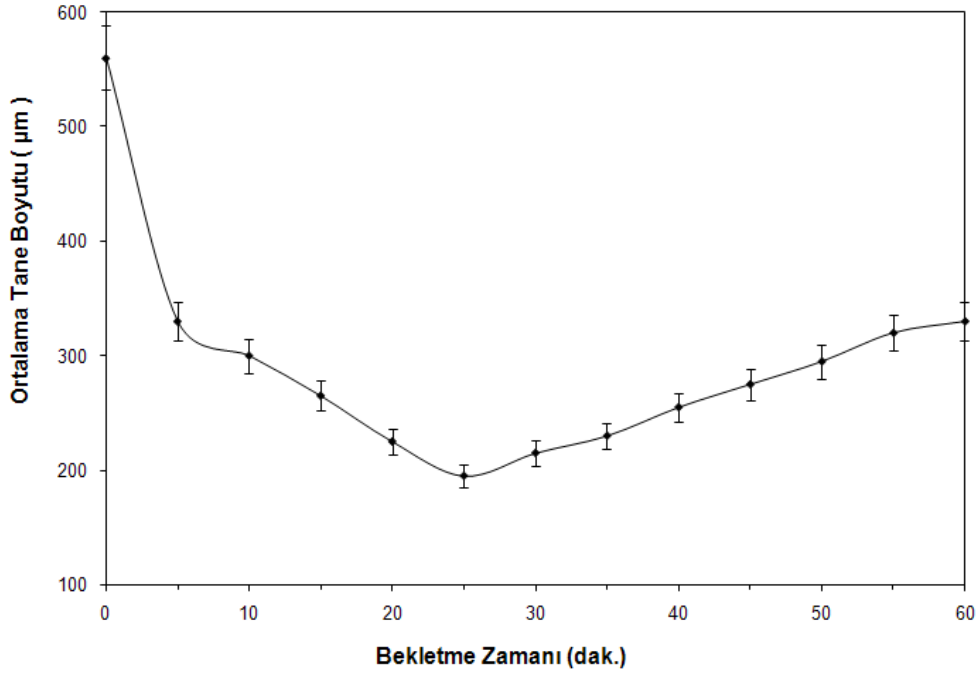


Şekil 4.15. Al5Ti1B ilavesinden 60 dakika sonra

#### 4.1.3. Bekletme zamanının tane boyutuna etkisi

ETİAL 160 alaşımına tane incetici ilave edilmeden ve ilave edildikten sonra düzenli olarak beş dakikada bir yapılan dökümlerden alınan numunelerin mikroyapı incelemeleri yapılarak ve Clemex Görüntü Analiz programı yardımıyla yapıda oluşan dentritlerin boyları ölçülmüştür. Şekil 4.16.de ETİAL 160 primer alaşımına tane inceltici ilavesinin bekletme zamanıyla oluşan tane boyutu değişimi görülmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi bekletme zamanı ETİAL 160 primer alaşımının tane boyutunu önemli derecede etkilemektedir. İnceltici ilave edilmeden önce ortalama tane boyutu 560μm seviyelerindeyken, ilaveden sonra çok kısa süre içerisinde tane boyutunun hızla düşerek 5 dakika sonra alınan numuneden 330 μm seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir. Tane inceltmenin tane boyutuna etkisinin 25 dakikaya kadar zaman artışıyla olumlu yönde geliştiği ve 25 dakika sonra alınan numunelerden ölçülen ortalama tane boyutunun 195 μm seviyelerinde olduğu görülmektedir. 25 dakika seviyeleri tane inceltme etkisinde kritik bir zamandır ve bu zamandan sonra etki zaman artışıyla paralel olarak olumsuz yönde değişmektedir. Tane boyutu

vermektedir. Bekletme süresinin 25 dakikaya kadar zaman artmasıyla tane boyutunu azaltırken 25. dakikadan sonra olumsuz yönde etki ettiği görülmektedir. 60 dakika sonunda ortalama tane boyutu tekrar 5 dakikada olduğu gibi 330  $\mu\text{m}$  seviyelerine çıkmaktadır.



Şekil 4.16. Etial 160 alaşımına katılan tane incelticinin bekletme zamanına göre tane boyutu değişimi

#### 4.2. Döküm Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar ve Değerlendirmesi

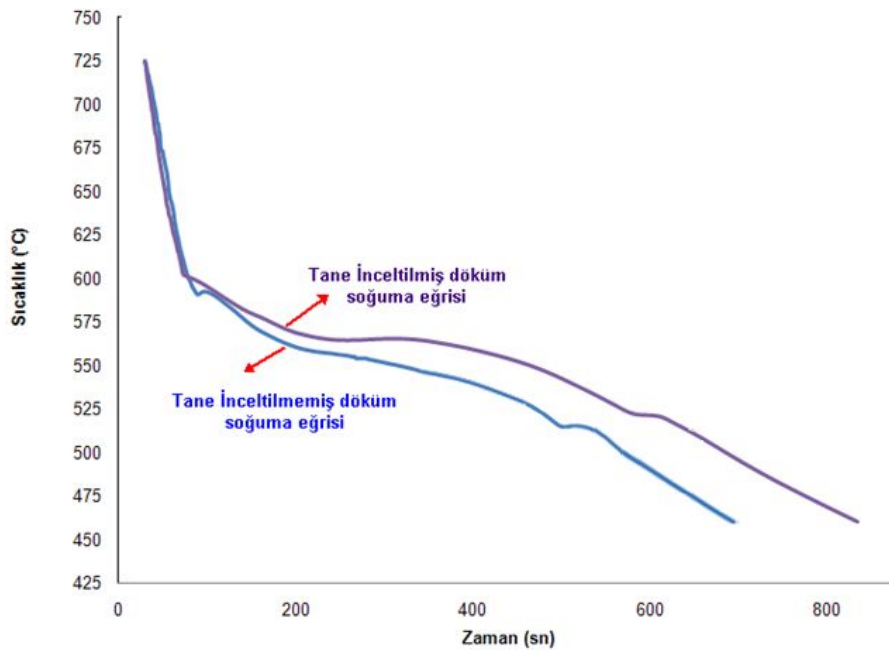
Bu kısımda çalışma kapsamında yapılan döküm deneylerinden elde edilen sonuçlar verilecektir. Tane inceltici ilavesiz olarak ve ilaveli şekilde dökümü yapılan kalıplardan alınan K Tipi termokopullarla elde edilen zaman-sıcaklık grafikleri, döküm parça mikroyapı resimleri, döküm parçaların porozite durumları incelenecektir. Daha sonra her iki döküm için de porozite haritaları çıkarılacaktır. Ayrıca döküm geometrisinde yolluğa bağlı iki ayrı döküm parça mevcuttur. Bunun sebebini; aynı döküm şartlarından iki numune ve iki sonuç üreterek sonuçların daha tekrarlanabilir olmasını sağlamak, farklı soğuma hızları oluşturarak soğuma hızının diğer ölçülen faktörler üzerine etkisinin olup olmadığını incelemek şeklinde açıklayabiliriz. Yolluğa daha yakın olan döküm parça diğer döküm parça ile yolluk arasında kısmen izole olmuş bir şekilde soğuyacağından yolluğa uzak olan döküme göre daha yavaş bir soğuma hızı ile soğumaktadır.



#### 4.2.1. Soğuma eğrileri

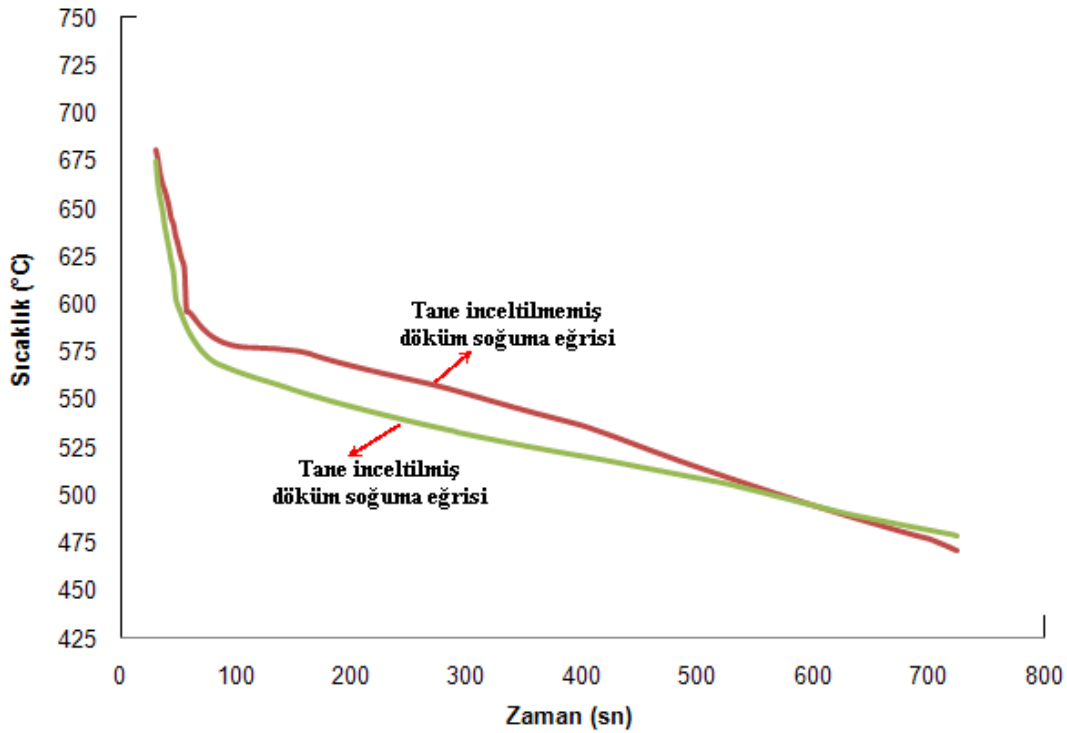
Döküm kalıpların her bir döküm ve her bir numunenin sıcaklık zaman grafiklerini almak için kalıplara K tip termokopullar bağlanmıştır. Sıvı metalin kalıba dolmasından katılaşmanın tamamlanmasına kadar geçen sürede data logger tarafından her saniyede bir alınan veriler kaydedilip, bilgisayara aktarılan verilerden grafik programları yardımıyla soğuma eğrileri oluşturulmuştur. Şekil 4.17’de Etial 160 alaşımına tane inceltici ilavesiz ve tane inceltici ilave edilerek yapılan iki ayrı dökümden alınan sıcaklık zaman grafikleri verilmiştir.

Şekil 4.17’de Etial 160 alaşımının soğuma eğrilerinden görüldüğü gibi sıvı metal yaklaşık 600°C’de alfa alüminyumun çekirdeklenmesi ile katılaşmaya başlamaktadır. Burada dikkat çeken nokta ise tane inceltilmiş alaşımda alfa alüminyumun tane inceltilmemiş olan alaşıma göre yaklaşık 8°C daha yukardan çekirdeklenmiş olmasıdır. Bu durum Al5Ti1B tane inceltici ilavesinin dökümde etkili bir tane inceltme etkisi gösterdiğini teyit etmektedir. Alfa alüminyum fazının katılaşmasından hemen sonra alaşım yaklaşık 520 °C’de bir ötektik katılaşma göstermektedir. Bunu takip eden aşamada zamana bağlı olarak alaşım tekrar soğumaya devam ederek katılaşma tamamlamaktadır.

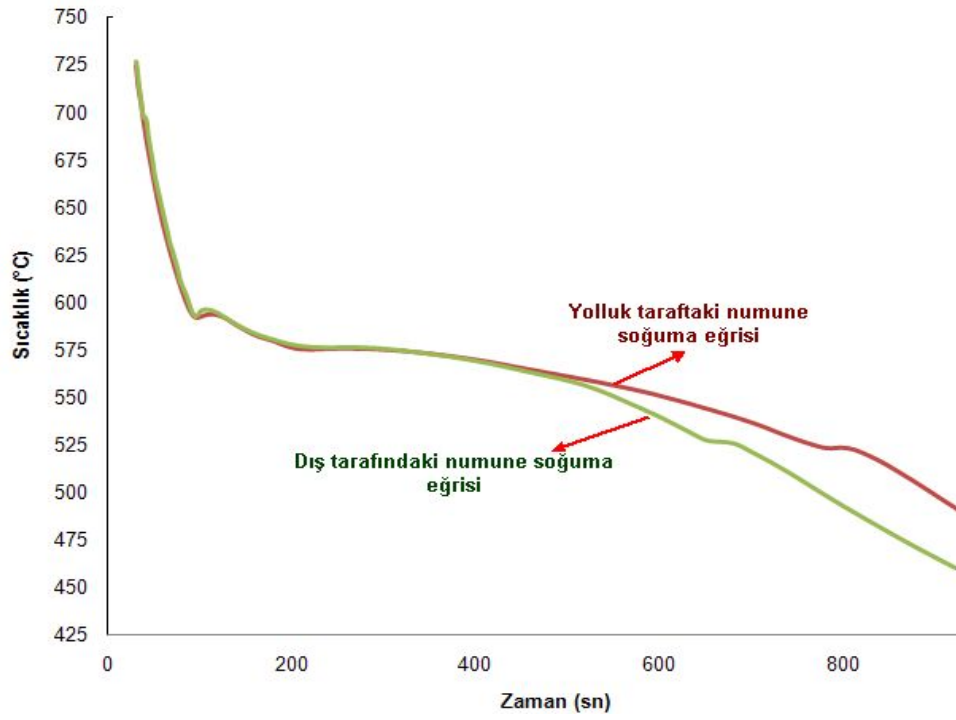


Şekil 4.17. Dökümlerden alınan soğuma eğrileri

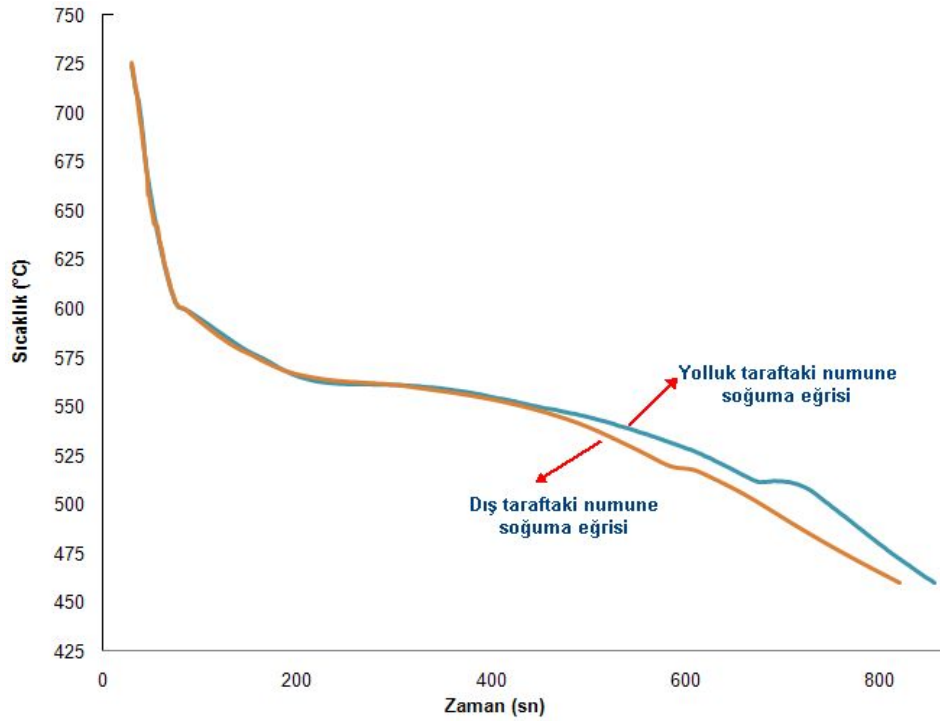
Gerçek dökümlerde termokopul tellerinin bağlı olduğu yerlere simülasyon programında da benzer şekilde aynı noktalara gelen meş noktalarına sanal olarak termokopul yerleştirilerek simülasyon süresince veriler alınmıştır. Elde edilen bu verilerde aynı şekilde soğuma eğrilerinin çizilmesinde kullanılmıştır. Şekil 4.18’te bir simülasyondan elde edilen tipik soğuma eğrileri gösterilmiştir. Simülasyon programından elde edilen zaman sıcaklık verileri ile gerçek dökümden elde edilen veriler arasında benzerlik olduğu şekilde de görülmektedir. Bu durum bu çalışmada modelleme için simülasyon programına girilen verilerin ve sınır şartlarının gerçeğe oldukça yakın olduğunu göstermektedir. Simülasyon programından tane incelticisiz ve tane incelticili döküm numunelerinden alınan soğuma eğrileri görülmektedir. Programa tane inceltme özelliği CFS değerlerin değiştirilerek aktarılmaktadır. Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de tane inceltirilmiş ve tane inceltirilmemiş dökümlerin yolluk ve dış taraftaki numunelerden alınan soğuma eğrileri verilmiştir. Soğuma eğrilerinden de görüleceği gibi yolluğa yakın taraftaki numune daha geç katılaşmaktadır. Bu durum hem gerçek dökümlerden alınan verilerle oluşturulan soğuma eğrilerinden hem de simülasyon programından alınan verilerle doğrulanmıştır.



Şekil 4.18. Simülasyon programından alınan soğuma eğrileri



Şekil 4.19. Etial 160 tane incelticisiz döküm soğuma eğrileri

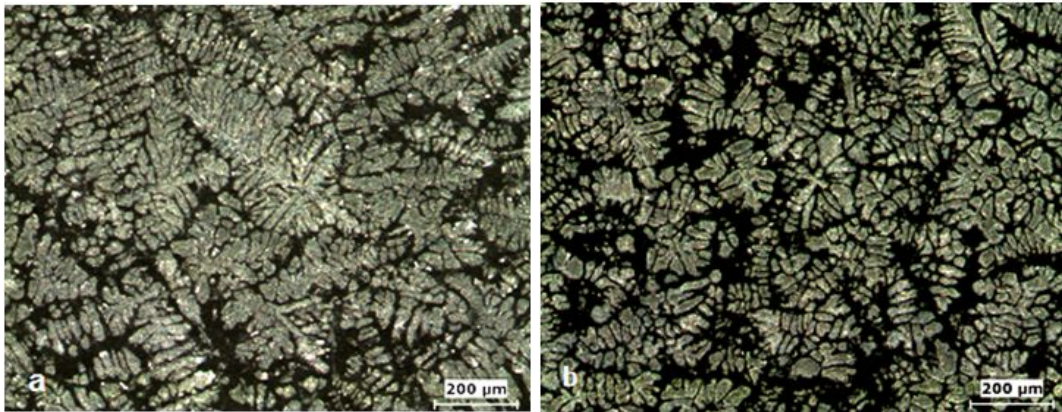


Şekil 4.20. Etial 160 tane inceltici ilaveli döküm soğuma eğrileri

#### 4.2.2. Döküm mikroyapıları

ETİAL 160 alaşımından tane inceltici ilave edilmeden ve tane inceltici ilave edilmiş olarak yapılmış dökümlerin aynı bölgelerinden alınan tane yapısı görüntüleri sırasıyla Şekil 4.21 (a) ve (b) de gösterilmiştir. Tane yapıları karşılaştırıldığında Şekil 4.21.a.'da verilen tane inceltmesiz mikro yapıda tanelerin oldukça kaba, kanat şekilli dendritik bir yapıya sahip oldukları ve tane genişliklerinin ortalama 500  $\mu\text{m}$  civarında olduğu görülmektedir. Buna karşılık Şekil 4.21.b'deki tane inceltici olarak Al5Ti1B mastır alaşımı ilave edilmiş yapıda ise tanelerin daha yuvarlak (küresel) bir yapıda oldukları görülmektedir. Bu dökümlerde ortalama tane boyutu yaklaşık 200  $\mu\text{m}$  civarında ölçülmüştür. Bu durum, deneylerde kullanılan ETİAL 160 alaşımına Al5Ti1B mastır alaşımı ilavesinin ve 25 dakikalık bekletme süresinin etkili bir tane inceltme gerçekleştirdiğini göstermektedir.

Bu çalışmada hedeflenen ölçütlerden ilki, her iki dökümde önemli derecede tane boyutu farkı elde etmektir. Bu şekilde kaba ve ince taneli dökümlerden her birinin maşi bölgesinde sıvı geçirgenliğine karşı ne şekilde direnç gösterdikleri ölçülebilir. Eğer farklı oranlarda direnç gösteriyor iseler döküm kesitlerinde farklı oranlarda porozite üreteceklerdir. Böylece nihai hedef olan gerçek döküm kesitlerindeki porozite oranları ile modellenen döküm kesitlerindeki porozite oranları karşılaştırılabilir. Döküm ve modellemelerden alınan porozitelerin bire bir benzerlik gösterdiği durumlarda o modelleme için girilen sınır şartları doğru kabul edilebilir.



Şekil 4.21. (a) Tane inceltici ilave edilmemiş döküm, (b) Tane inceltici ilave edilmiş dökümlerden alınan tane yapısı resimleri



### 4.2.3. Porozite ölçüm sonuçları

Al5Ti1B mastır alaşımı ilavesi ile tane inceltilmiş ve tane inceltilmemiş dökümlerin deneysel çalışmalarda gösterildiği yerlerden makro ve mikro porozite ölçümleri yapılarak döküm parçalara ait genel bir porozite haritası çıkartılmıştır. Porozite ölçümünde amaç gerçek dökümlerden ölçülen porozite oranı ile modellenen dökümlerden elde edilen porozitenin birbirine eşleştirilmesidir. Bu eşleştirmeyi sağlamak üzere maşi bölgesi geçirgenlik limitini belirleyen kritik katı oranı değerinin tane boyutu ile nasıl bir ilişki gösterdiği araştırılmaktadır. Bu yüzden porozite haritası çıkarılırken simülasyon programı ile modellenen dökümlerin porozite haritası ile uyumlu olması için yüzde porozite oranları yerine yüzde yoğunluk oranlarının kullanılması tercih edilmiştir. Buna göre örneğin porozite haritasında % 90 ile markalanmış bir bölgenin yoğunluğu %90, porozite oranı ise %10 dur.

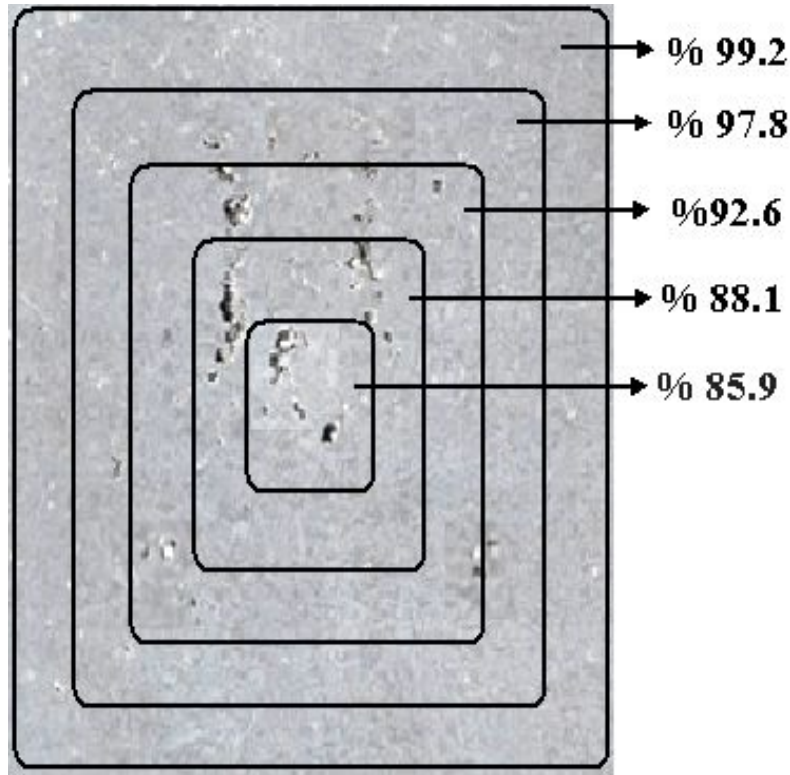
Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'deki porozite haritalarından da görüleceği gibi çoğunlukla şekilsiz ve girinti-çıkıntı görüntüsü veren bir porozite dağılımı mevcuttur. Buradan porozite oluşumunun gaz porozitesi şeklinde oluşmadığı yetersiz beslemeye bağlı çekinti porozitesi şeklinde oluştuğu anlaşılmaktadır. Gaz porozitesinin olmaması veya minimum seviyede kalması döküm metalinde yeterli derecede gaz giderme işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğinin bir göstergesidir. Daha da önemlisi simülasyondan elde edilen porozite haritasında da gaz etkisinin hesaba katılmadığı göz önüne alındığında gerçek dökümler ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılmasının daha anlamlı olduğu burada görülmektedir.

#### 4.3.3.1. Tane incelticisiz döküm porozite-yoğunluk haritası

Tane inceltilmemiş dökümlerin merkez kesit düzlemi üzerinde deneysel çalışmalarda gösterilen bölgeden ve belirtilen ölçülerde kesilmiş numuneler üzerinden mikroskopta çekilmiş çok sayıda mikroyapı görüntüleri üzerinden görüntü analiz programı ile % porozite ölçümleri yapılarak her bir bölgenin ortalama % porozite değeri hesaplanmıştır. Daha sonra her bir bölgenin % porozite değeri %100 yoğunluk değerinden çıkarılarak % malzeme yoğunluğu hesaplanmış ve sonuçlar bu şekilde gösterilmiştir. Şekil 4.22'de tane inceltilmemiş dökümün yolluğa yakın tarafının



porozite haritası ve Şekil 4.23’de görülen dış taraftaki numune porozite haritaları karşılaştırıldığında, yolluk tarafındaki dökümün iç kısımlarında dış kısımdaki döküme göre az bir miktar daha düşük yoğunluk değeri gösterdiği görülmektedir. Bunun en olası nedeni yolluğa yakın dökümün yolluk ile dıştaki parça arasında kalması nedeni ile daha düşük bir soğuma hızı ile soğumasıdır. Düşük soğuma hızından kaynaklanan daha geniş katı-sıvı aralığı (maşi) bölgesi bu dökümde dış taraftaki parçaya göre besleme etkinliğini bir miktar daha azaltmış olabilir.

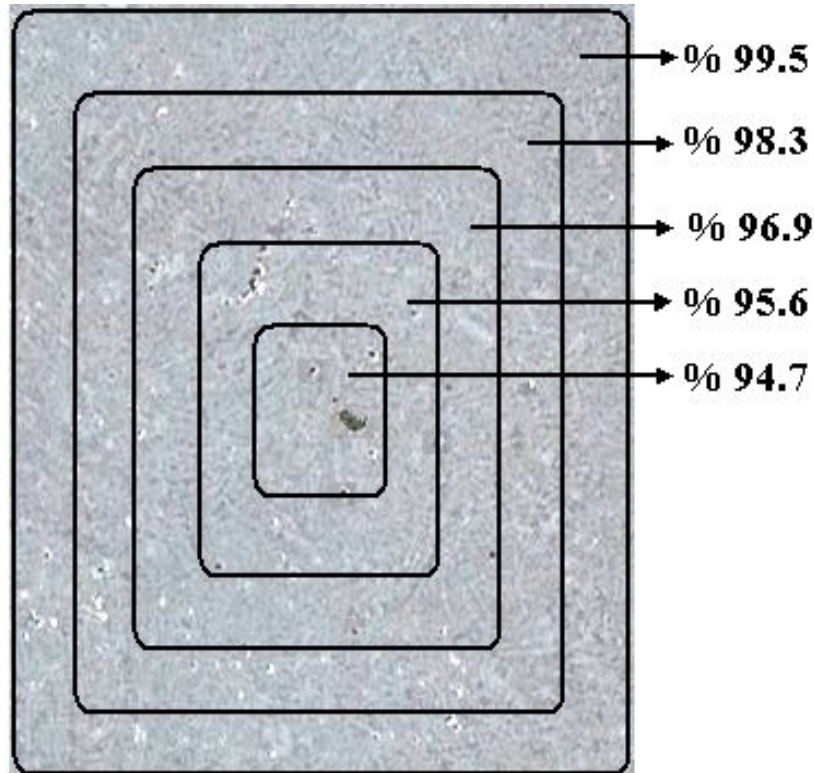


Şekil 4.23. Tane inceltici ilavesiz Etial 160 alaşımı dış taraftaki numune porozite haritası

#### 4.3.3.2 Tane incelticili döküm porozite-yoğunluk haritası

Tane inceltirilmiş dökümler üzerinden ölçülen % porozite değeri %100 yoğunluk değerinden çıkarılarak % malzeme yoğunluğu hesaplanmış ve sonuçlar bu şekilde Şekil 4.24 ve 4.25’de yoğunluk haritaları olarak gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde tane inceltirilmemiş dökümlere nazaran iç bölgede daha düşük porozite ve daha yüksek yoğunluk değerlerine sahiptir. Şekil 4.24’de tane inceltirilmiş dökümün yolluk tarafındaki numunesi sıcak noktası olarak tanımlanan iç kısımdaki yoğunluk değeri %4-5 porozite değerine karşılık gelen %95-96 değerlerindedir. Bu

yoğunluk değeri bir önceki şekilde gösterilen tane inceltilmemiş dökümler ile karşılaştırıldığında %10-11 oranında daha yüksektir. Bu durumda tane inceltilmiş bir ETİAL160 alaşımının tane inceltilmemiş olana göre çok daha iyi beslenebildiği rahatlıkla söylenebilir. İç (merkezi) kısımlarda oluşan bu derece fark en dış bölgede fazla belirgin değildir. Çünkü bu bölgelerdeki % porozite oranları zaten normal bir kum dökümde görülen yaklaşık %0,5 değerine yakın değerlerdedir.

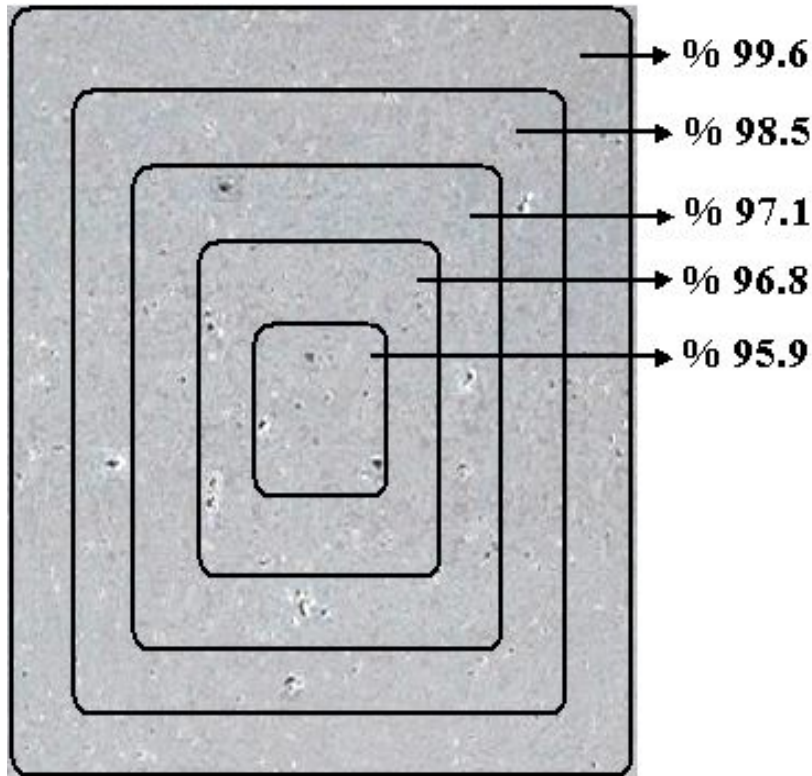


Şekil 4.24. Tane inceltici ilaveli Etial 160 alaşımı yolluk tarafındaki numune porozite haritası

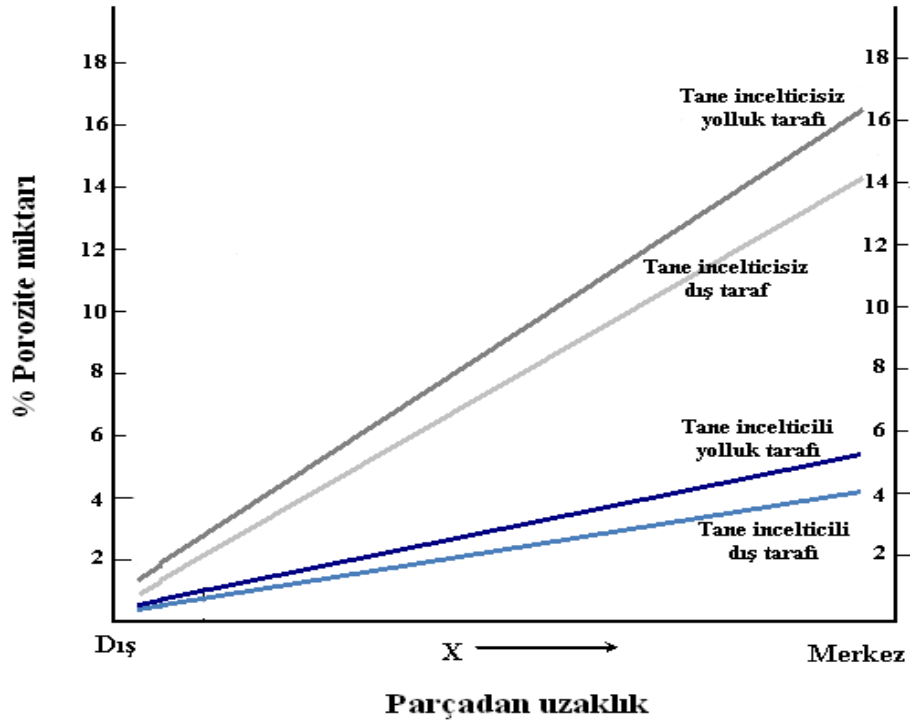
Şekil 4.25’de tane inceltilmiş dökümün dış taraftaki numunesinin porozite haritası verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi porozite oranları tane inceltme sonucu düşmüştür. İç bölgelerde porozite oranı % 4-5 oranlarında olduğu tespit edilmiştir. Dış taraftaki numunelerin hızlı katılaşması sonucu tane inceltilmemiş numunelerde de olduğu gibi yolluk tarafındaki numunelere nazaran daha az porozite oluşmaktadır.

Bu karşılaştırmalardan açıkça görüldüğü gibi tane inceltme işlemi Etial 160 alaşımının besleme özelliğini iyileştirmiştir. Bunun en temel nedeni katı sıvı aralığında (maşi bölgesi) dendirit örgüsünün tane inceltilmiş dökümlerde besleme yolunu daha geç bloke ederek besleyicinin daha fazla besleme yapabilmesine olanak

sağlaması olarak görülmektedir. Tane inceltici etkisiyle besleme yolu oluşan katı dentrit parçalarının boyutunun kaba taneli yapıya göre daha uzun süre açık kalmasından dolayı besleme etkinleşmektedir. Porozite haritalarının bir arada ve daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 4.26'da parça mesafesine bağlı porozite miktarı değişimi grafiği verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi tane inceltici ilavesiyle porozite miktarında kayda değer bir azalma olmaktadır. Ayrıca tane incelticili ve tane incelticisiz olarak yapılan her iki dökümde de dış taraftaki döküm numunelerin yolluk tarafındaki numunelere nazaran daha az porozite içermesi katılaşmanın daha kısa sürede tamamlanmasıyla bölgesel olarak daha küçük taneli yapı oluşmasından kaynaklanması, tane boyutunun ve kritik katı oranı değerinin besleme üzerindeki etkisini teyit etmektedir.



Şekil 4.25. Tane inceltici ilaveli Etial 160 alaşımı dış tarafındaki numune porozite haritası



Şekil 4.26. Döküm numunesinde parça mesafesine bağlı porozite miktarı değişimi.

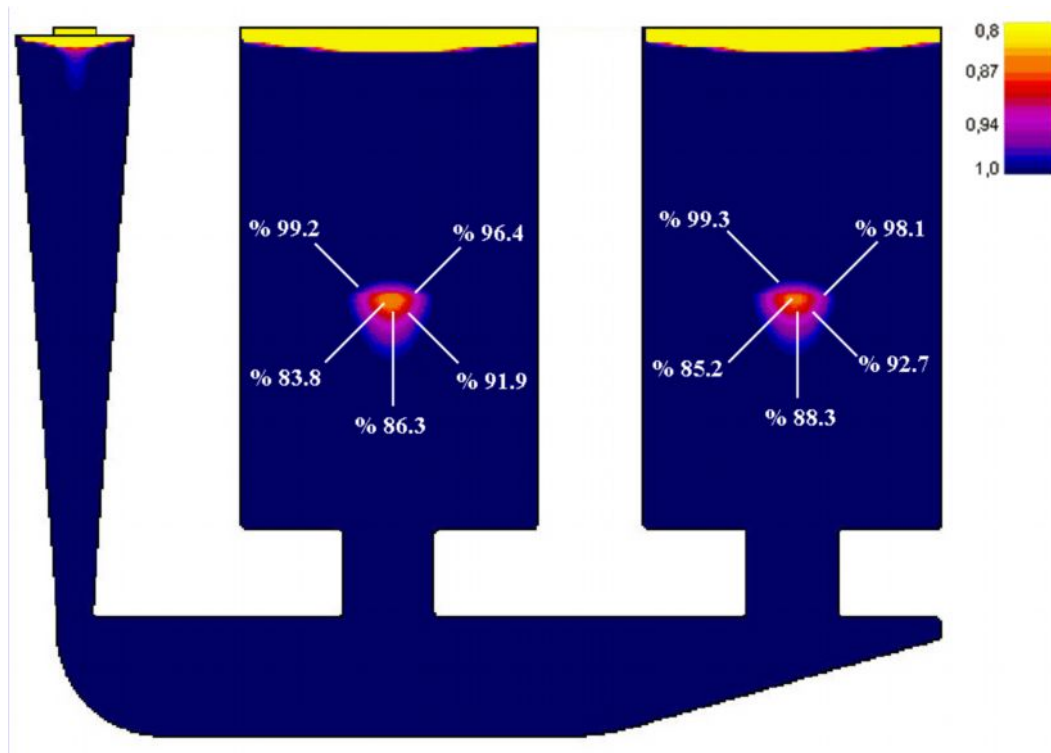
### 4.3. Modelleme Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında yapılan modellemeler SolidCAST döküm simülasyon programıyla yapılmıştır. Program üç boyutlu döküm-kalıp geometrisini kübik meşler yardımıyla verilen sınır şartlarına göre sonlu fark yöntemi ile çözümleyen bir yazılımdır. Yazılım soğuma modellemesini ısı transfer formülleri yardımıyla gerçekleştirmektedir. Döküm alaşımının soğuma ve soğuma sırasında oluşan sıcaklığa bağlı hacim değişimi ile ilgili sınır şartları gerçek dökümden alınan veriler doğrultusunda programa girilmiştir. Yapılan modellemelerde Etial 160 alaşımı ve kullanılan döküm geometrisi için programa girilen sınır şartları sabit tutulmuş ve sadece CFS değeri değiştirilerek denemeler yapılmıştır. Tane inceltmenin kritik katkı oranı üzerindeki etkisini görebilmek ve hem tane inceltmemiş hem de iyi derecede tane inceltmiş bir dökümde CFS oranının hangi değerlerde olacağı araştırılmak üzere farklı CFS oranları kullanılmıştır.

Modellemelerde CFS oranı % 30 alınarak başlanan simülasyon denemeleri öncelikle %5' lik artışlarla % 55'e kadar değişen oranlarda CFS değeri kullanılarak devam

edilmiştir. Bu CFS değerlerine göre simülasyon programından elde edilen porozite-yoğunluk değerleri gerçek dökümlerden ölçülen porozite-yoğunluk değerleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan denemelerde simülasyon sonuçları ile döküm sonuçlarını eşleştirmek için ayrıca ara değerlerde de çalışmalar yapılmıştır. Gerçek dökümden ölçülen porozite yoğunluk değeri ile modellenen dökümden elde edilen porozite-yoğunluk oranı çakıştığına o modelleme için kullanılan % CFS oranı o döküm şartları için geçerli CFS oranı olarak kabul edilmiştir.

Döküm sonuçları ve modelleme denemeleri sonucu yapılan karşılaştırmalarda tane inceltilmemiş dökümlerin CFS değerinin %34 CFS değerine göre yapılan simülasyon sonucuyla eşleştiği tespit edilmiştir. Şekil 4.27’de simülasyon programından alınan yoğunluk haritası değerleri verilmiştir.

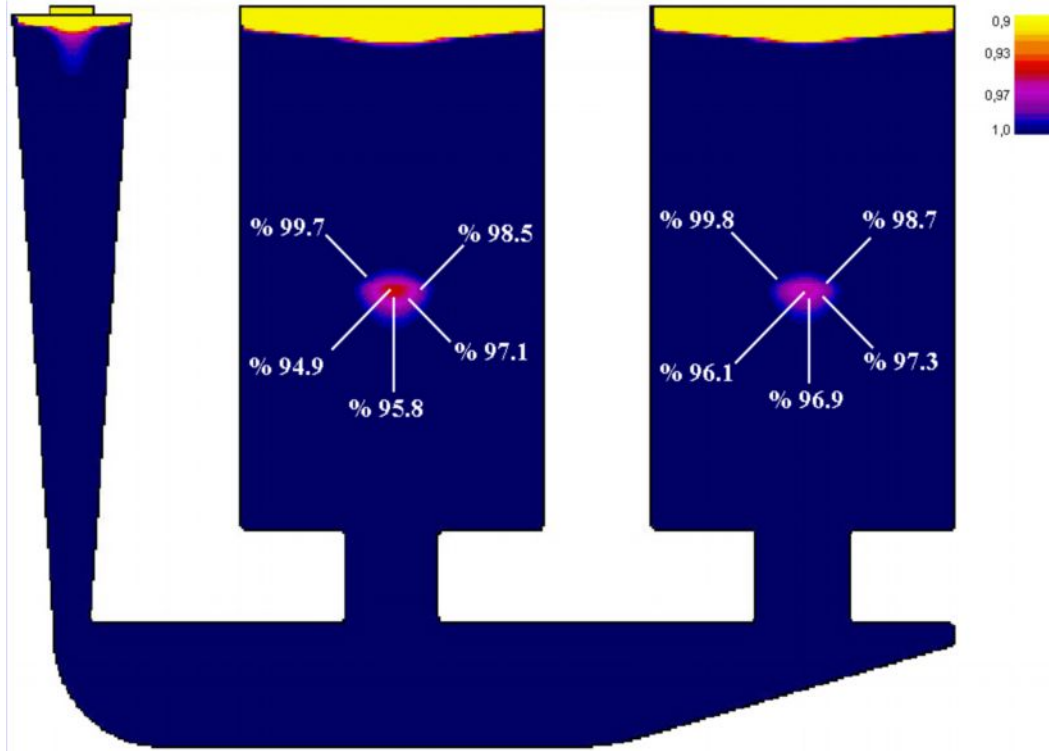


Şekil 4.27 CFS oranı %34 e göre yapılan simülasyon sonucunun parça merkezinden geçen kesit düzlemindeki görünüşü (0,8 %80 ve altı yoğunluğu göstermektedir - 1 %100 yoğunluğu göstermektedir.)

Şekil 4.28’de tane inceltici ilaveli olarak döküm sonuçlarıyla eşleştirilen %52 CFS oranına göre yapılan simülasyonunu yoğunluk haritası verilmiştir. Gerçek döküm sonuçlarının verildiği Şekil 4.24 ve Şekil 4.25’deki sonuçlarla karşılaştırıldığında



sonuçların çok benzer olduğu görülmektedir. Şekil 4.27’de tane inceltmesiz dökümlerin porozite-yoğunluk değerine karşılık gelen %34 CFS oranı kullanılırken Şekil 4.28’de iyi tane inceltilmiş dökümün porozite-yoğunluk değerine karşılık gelen %52 CFS oranı kullanılmıştır. Etial 160 alaşımına tane inceltici ilavesinin kritik katı oranı değerinde % 18’lik bir fark görülmektedir ki bu fark çok ciddi bir değerdir.



Şekil 4.28 CFS oranı %52 e göre yapılan simülasyon sonucunun parça merkezinden geçen kesit düzlemindeki görünüşü (0,8 %80 ve altı yoğunluğu göstermektedir - 1 %100 yoğunluğu göstermektedir.)

Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de görülen modelleme sonuçları bu çalışmadaki gibi kuma dökülen bir Etial 160 alaşımında tane inceltmiş bir dökümde tane inceltilmemiş olana göre %18 oranında daha uzun süre bir besleme sağlanabildiğini göstermektedir. Bu sonuçlar belirtilen koşullarda yapılmış olan dökümlerden ölçülen porozite-yoğunluk değerleri ile de birebir uyumludur. Buna göre bundan sonraki çalışmalarda hem döküm öncesi tane inceltme işlemlerinde hem de simülasyon uygulamalarında bu çalışmadan elde edilen sonuçların kullanılması kusursuz döküm ve daha doğru modelleme yapabilme açısından önemlidir.



## BÖLÜM 5. GENEL SONUÇLAR

1. Etial 160 alaşımına %0,2 oranında Ti etki edecek şekilde katılan Al5Ti1B tane inceltici mastır alaşımı ilavesiyle ALCAN standart tane inceltme deneyleri 5'er dakikalık aralıklarla yapılmıştır. ETİAL160 alaşımına ilave edilen Al5Ti1B tane incelticinin bekletme zamanına göre etkisinin incelendiği bu çalışmada; bekletme zamanının önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir.

2. ETİAL 160 primer alaşımına tane inceltici ilavesinde 25 dakika sonra alınan numuneden ölçülen tane boyutu 195 µm dir. Tane inceltilmemiş döküm numunesinde tane boyutu 560 µm ve bu değer ilaveden sonra 25. Dakikaya kadar azalarak optimum 195 µm değerine ulaştıktan sonra daha fazla süre tutulan numunelerden yapılan ölçümlerden tane boyutunun daha da arttığı görülmüştür. Tane inceltici ilavesinden 60 dakika sonra alınan numuneden yapılan ölçümlerde tane boyutunun 320 µm seviyelerinde olduğu gözlenmiştir.

3. Tane inceltici ilavesinde bekletme zamanında optimum süreden sonra tane boyutunun tekrar büyümesinin sebebi olarak; tane inceltici ilavesiyle alaşım içerisinde oluşan TiB<sub>2</sub> ve TiAl<sub>3</sub> gibi intermetalik bileşiklerin zamanla çözünmeye başlaması ve bunların birbiriyle birleşerek büyümesi olarak görülmektedir.

4. Etial 160 alaşımı tamamen beslenmesi mümkün olmayacak, içinde sıcak nokta oluşturarak tane boyutunun u sıcak noktanın beslenebilme derecesi üzerindeki etkilerini araştırmak üzere tasarlanan geometriye sahip kum kalıplara tane inceltici ilave edilmeden ve ilave edildikten 25 dakika sonra döküldü. Yapılmış olan dökümlerden, zaman-sıcaklık verileri (soğuma eğrileri), tane boyutu ve % porozite ve yoğunluk ölçümleri yapıldı.

5. Döküm kesitlerinden alınan ortalama tane boyutu ölçümleri tane incelticinin kum dökümde de iyi bir inceltme etkisi oluşturduğunu göstermiştir. ETİAL160 alüminyum döküm alaşımı ile kuma yapılan dökümlerde Al5Ti1B tane inceltici ilave edildiğinde ortalama tane boyutu 500 µm seviyesinden 200 µm seviyesine düşmüştür.

6. Tane inceltmiş dökümlerde tane inceltilmemiş olanlara göre ortalama %10 oranında daha az porozite ve daha yüksek malzeme yoğunluğu değeri ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre tane inceltmiş dökümlerin inceltilmemiş olanlara göre daha iyi beslenebildiği söylenebilir.

7. Gerçek dökümlerden ölçülen porozite ve yoğunluk değerleri ile simülasyon programı ile modellenen dökümlerden elde edilen değerler arasında mükemmel bir uyum gözlenmiştir bu da simülasyon programına girilen malzeme özellikleri ve sınır şartları değerlerinin doğru seçildiğini göstermektedir.

8. Gerçek dökümler ile modelleme değerlerinin karşılaştırılması tane inceltmesiz dökümlerde kritik katı oranı (CFS) değerinin %34 civarından iyi tane inceltmiş dökümlerde %52 civarına yükseldiğini göstermiştir.

9. Bu çalışmadan alınan sonuçlar ışığında ileriki çalışmalar için aşağıdaki tavsiyeler yapılabilir.

a- Bu çalışmada kullanılan Al5Ti1B tane inceltici mastır alaşımı ile en iyi inceltme için elde edilen bekletme süresi 25 dakika dökümhane uygulamaları için uzunca bir süredir. Bu yüzden alüminyum içinde daha hızlı çözünebilme yeteneği olan başka bileşimlerde veya başka firmalardan temin edilmiş AlTiB türü mastır alaşımları kullanımı ile yeni çalışmalar yapılmalıdır.

b- Bu tür tane inceltme ve besleme yeteneğine yönelik deneysel çalışmalarda birden fazla farklı soğuma hızları kullanılarak soğuma hızının da bu faktörler üzerindeki etkileri incelenmelidir. Örneğin hem kum kalıp hem de kokil kalıptaki tipik soğuma hızları ile yeni tane inceltme ve besleme etkinliği deneyleri yapılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] KARAKIŞLAK, M., Alüminyum Alaşımaları ve Isıl İşlemleri, MMLT, İTÜ, Metalurji Fakültesi, İstanbul, 1992.
- [2] AHLATÇI, H., Al-Cu-Mg-Si Alaşımalarının Deformasyonu ve Yaşlandırılması, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisans Bitirme Tezi, 1994.
- [3] GÜRLEYİK, Y., Alüminyum ve Alaşımaları, Makine ve Mühendis, 402, (sf:16 -32), Temmuz 1993.
- [4] Metals Handbook; Vol. 3, Alloy Phase Diagrams, Ed. ASM International Handbook Committee, 743-770, Metals Park, OH, ASM International, 1989.
- [5] Metals Handbook; Vol. 8, Metallography Structures and Phase diagrams, Ed. ASM International Handbook Committee, 743-770, Metals Park, OH, ASM International, 1989.
- [6] YILMAZ, F., ŞEN, U., Alaşımaların Yapı ve Özellikleri, (sf: 54 – 77), Sakarya Üniversitesi Yayınevi, Sakarya, 1999.
- [7] ÜNAL, T., Alüminyumun Eritilmesi, TÜBİTAK Bilgi Profili No:46.
- [8] SMİTH, W. F., Çeviri, ERDOĞAN, M., Mühendislik Alaşımalarının Yapı ve Özellikleri Cilt 2, Nobel Yayın Dağıtım,(sf: 339 – 392), Ankara, 2001.
- [9] ARAN, A., Metal Döküm Teknolojisi, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1999.
- [10] SIGWORTH, G. K., KUHN, T. A., Refinement of Aluminium casting Alloys, AFS Transactions, Vol.115, pp.1-12, 2007.
- [11] SIGWORTH, G. K., The Grain Refining of Aluminum and Phase Relationships in the Al-Ti-B System, Metallurgical Transactions, Vol. 15A, pp. 277-282, 1984.
- [12] BACKERUD, L., How Does a Good Grain Refiner Work?, Light Metal Age, pp. 6-12, 1983.
- [13] EASTON, M. A., STJOHN, D. H., The Partitioning of Titanium During Solidification of Aluminum Alloys, Mater. Sci.Technol., Vol. 16(9), pp. 993-1000, 2000.

- [14] COLE, G.S., CISSÉ, J., KERR, H.W., BOLLING, G.F., Grain Refinement in Aluminum and Aluminum Alloys, AFS Trans, Vol.80, pp. 211-218, 1972.
- [15] LU, H. T., WANG, L. C., KUNG, S. K., Grain Refining in A356 Alloys, J. Chinese Foundrymen's Association, Vol. 29, pp. 10-18, 1981.
- [16] SIGWORTH, G.K., GUZOWSKI, M. M., Grain refining of Hypo-eutectic Al-Si Alloys, AFS Transactions, Vol 93, pp. 907-12, 1985.
- [17] PASCIAK, K., SIGWORTH, G.K., Role of Alloy Composition in Grain Refining of 319 Alloy, AFS Transactions, Vol. 109, pp. 567-577, 2001.
- [18] Guocai, C., Dendrite Coherency During Equiaxed Solidification in Aluminum Alloys, Chemical Communications, Stockholm University, 83 pages, 1994.
- [19] Metals Handbook, Vol.15. casting, Ed. ASM International Handbook Committee, 743-770, Metals Park, OH, ASM International, 1989.
- [20] DASH, M., MAKHLOUF, M., Effect of key alloying elements on the feeding characteristics of aluminum–silicon casting alloys, Journal of Light Metals, 1 pp. 251–265, 2001.
- [21] CAMPBELL, J., Casting, Heinemann Ltd, Oxford, 1991.
- [22] CAMPBELL, J., Feeding mechanisms in casting, AFS Cast Metals, Research Journal 5, pp.1–8, 1969.
- [23] ARDA, İ., KAYIKCI, R., Döküm simülasyonu nedir? Ne değildir?, Metal Dünyası, Mart 2006.
- [24] [http://www.dokumsimulasyonu.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=8&Itemid=6](http://www.dokumsimulasyonu.com/index.php?option=com_content&view=article&id=8&Itemid=6), (Nisan 2009)
- [25] <http://www.finitesolutions.com/default.aspx>, (Nisan 2009 )
- [26] [http://www.magmasoft.de/ms/product\\_en\\_proceses/index.php](http://www.magmasoft.de/ms/product_en_proceses/index.php), (Mart 2009)
- [27] <http://www.novacast.se/index2.asp?siteid=6&pageid=215>, ( Nisan 2009 )
- [28] <http://www.esi-group.com/products/casting/procast>, (Nisan 2009 )
- [29] <http://www.quantech.es/QuantechATZ/Home.html> , (Nisan 2009 )
- [30] KAYIKCI, R., Büyük kütleli bir çelik parçanın dökümünde klasik ve bilgisayar destekli mühendislik yöntemlerinin karşılaştırılması, Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, Cilt 23, No 2, 2008.

- [31] KAYIKCI, R., AKAR, N., Farklı kesit kalınlıklarına sahip büyük hacimli bir çelik dökümün simülasyon teknikleri ile tasarlanması, Politeknik Dergisi, 10-4, s.219-227, 2007.
- [32] STEFANESCU, D.M., Computer simulation of shrinkage related defects in metal castings – review, International Journal of Cast Metals Research, vol 18, no 3, 129-145, 2005.
- [33] HSU, F.Y., JOLLY, M.R., CAMPBELL, J., Vortex-gate design for gravity casting, International Journal of Cast Metals Research, Vol 19, No 1, 38-46, 2006.
- [34] ERTÜRK, S.Ö., Döküm Simülasyonları, Lisans Bitirme Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2007.
- [35] Aluminium Association Standard Test Procedure for Aluminium Grain Refiners, TP-1, The Aluminium Association, Washington, D.C, 1990.
- [36] SIGWORTH, G. K., KUHN, T. A., Grain Refinement of Aluminum Casting Alloys, American Foundry Society, Schaumburg, IL USA, 07-067(02), 2007.

## ÖZGEÇMİŞ

Murat olak, 16.03.1981 de Adapazarı'nda doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Adapazarı'nda tamamladı. 1999 yılında Sakarya Fatih Anadolu Meslek Lisesi, Elektronik Bölümünden mezun oldu. 2000 yılında başladığı Z.K.Ü. Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi bölümünü 2004 yılında bitirdi. 2005 yılında Şırnak'ta yedek subay olarak askerliğini tamamladı. 2006 - 2007 yıllarında önce Körfez Döküm Sanayi ve daha sonra Tuğ Döküm Sanayi ve Tic. Ltd. Şti.nde vardiya amiri olarak çalıştı. 2007 yılı Şubat ayından itibaren Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Halen evli ve iki çocuk babasıdır.