

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ETİAL 177 ALAŞIMININ DÖKÜMÜNDE MAKRO VE
MİKRO POROZİTE OLUŞUMUNUN
MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yalçın YURTSEVEN

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

OCAK 2009

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ETİAL 177 ALAŞIMININ DÖKÜMÜNDE MAKRO VE
MİKRO POROZİTE OLUŞUMUNUN
MODELLENMESİ**

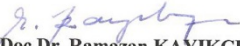
YÜKSEK LİSANS TEZİ

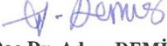
Yalçın YURTSEVEN

Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ

Enstitü Bilim Dalı : METAL EĞİTİMİ

Bu tez 23/01/2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Yrd.Doç.Dr. Ramazan KAYIKCI
Jüri Başkanı


Doç.Dr. Adem DEMİR
Üye


Yrd.Doç.Dr. Neşet AKAR
Üye

TEŞEKKÜR

Öncelikle tez çalışmam süresince yardımlarını benden esirgemeyen tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Ramazan KAYIKCI' ya teşekkürü borç bilirim.

Çalışmalarım sırasında benden yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer arkadaşım Aykan KARAYAZI' ya tez süresince her konuda destek olan Arş. Gör. Murat ÇOLAK'a ve Ömer SAVAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bölümdeki mikroskop imkanını sağladığı için Doç. Dr. Ramazan YILMAZ' a ve deneysel çalışmalarda bize döküm kumu ve reçine sağlayan Daloğlu Döküm ve Yıldız Makine'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak daima her koşulda beni destekleyen aileme özel olarak teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım.

Yalçın YURTSEVEN

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR TARAMASI.....	5
2.1. Alüminyum Metalin Özellikleri.....	5
2.2. Alüminyum Alaşımları.....	6
2.2.1. Alüminyum döküm alaşımları.....	6
2.2.2. Al - Si alaşımları.....	7
2.3. Alüminyum Alaşımlarında Tane İnceltme.....	8
2.4. Tane boyutunun ölçülmesi.....	10
2.5. Alüminyum Dökümlerinde Tane İnceltme Mekanizmaları.....	11
2.6. Alüminyumda Tane inceltmede Borun Etkisi.....	15
2.7. Dökümlerde Besleme Mekanizmaları.....	17
2.7.1. Sıvı besleme.....	19
2.7.2. Kütle besleme.....	19
2.7.3. İnterdendritik besleme.....	19
2.7.4. Zor besleme (Burst feeding).....	20

2.7.5. Katı besleme.....	20
2.8. Tane İnceltmenin Besleme Üzerine Etkisi.....	20
BÖLÜM 3.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	22
3.1. Tane İnceltme Deneylerinin Yapılışı.....	24
3.1.1. Kullanılan alaşımın kimyasal bileşimi.....	24
3.1.2. Ergitme işleminin yapılışı.....	24
3.1.3. Sıvı metalde gaz giderme ve gazlılık ölçümleri.....	25
3.1.4. Tane inceltme işlemlerinin yapılışı.....	27
3.1.5. Yüzeylerin tane ölçümü için hazırlanması.....	29
3.1.6. Tane inceltme test konilerinin değerlendirilmesi.....	30
3.1.7. Bekletme zamanının tane inceltmeye etkisinin incelenmesi.....	30
3.2. Dökümlerin Yapılışı.....	31
3.2.1. Döküm geometrisinin seçimi.....	31
3.2.2. Kalıplama işleminin yapılışı.....	33
3.2.3. Termokapıl yerleştirilmesi ve kalıbın kapatılması.....	35
3.2.4. Alaşımın ergitilmesi ve döküm işlemi.....	35
3.2.5. Numunelerin hazırlanması.....	38
3.2.6. Numunelerin incelenmesi.....	39
3.2.7. Mikro yapı resimlerinin imaj analiz programında değerlendirilmesi.....	40
3.3. Simülasyon (Modelleme).....	42
3.3.1. Döküm- kalıp geometrisinin ve malzeme özelliklerinin simülasyon programına girilmesi.....	43
3.3.2. Simülasyon programında kalıbın doldurulması ve dökümün katılaşması.....	45
BÖLÜM 4.	
SONUÇLAR.....	48
4.1. Tane İnceltme Deney Sonuçları.....	48
4.1.1. Tane yapıları ve boyutları.....	48
4.1.2. Bekletme zamanının tane boyutuna etkisi.....	61
4.2. Döküm Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar ve Değerlendirmesi.....	62
4.2.1. Soğuma eğrileri.....	63

4.2.2. Döküm mikroyapıları.....	65
4.2.3. Porozite ölçüm sonuçları.....	66
4.2.3.1. Tane incelticisiz makro porozite haritası.....	67
4.2.3.2 .Tane incelticili makro porozite haritası.....	69
4.3. Bilgisayar Modellemelerinden Elde Edilen Sonuçlar ve Değerlendirilmesi..	71
BÖLÜM 5.	
TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	77
KAYNAKLAR.....	80
ÖZGEÇMİŞ.....	82

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 - Si denge diyagramı.....	8
Şekil 2.2a.-Tane inceltilmemiş.....	9
b.-Al5Ti1B bileşiminde 10 ppm bor ilave edilmiş 3004 alaşımının tane yapıları.....	9
Şekil 2.3. Al-Ti Faz diyagramının alüminyum tarafı.....	12
Şekil 2.4a. Alüminyumun TiAl ₃ partikülleri üzerinde çekirdeklenecek büyümesi sırasında geçirdiği aşamaların şematik gösterimi [3].....	13
b. Tane inceltilmemiş ve tane inceltilmiş sıvı alüminyumun soğuma eğrilerinin şematik gösterimi.....	13
Şekil 2.5. % 99,7 safiyette alüminyumda titanyum ilavesi ile tane inceltme sonuçları..	15
Şekil 2.6. A356 alüminyum alaşımında üç farklı mastır alaşımı ile tane inceltme sonuçları.....	16
Şekil 2.7. Alüminyum 319 alaşımında tane inceltme sonuçları.....	17
Şekil 2.8. Katılaştıran bir dökümde beş besleme mekanizmasının şematik gösterimi.....	18
Şekil 2.9. Al-%4Cu alaşımında tane inceltici ilavesinin dendrit blokajına etkisi.....	21
Şekil 3.1. Elektrik direnç ergitme ocağı.....	25
Şekil 3.2. SiC potalar.....	25
Şekil 3.3a. Sıvı metalin azot gazı ile yıkanması.....	26
b. gaz giderme işleminin şematik görünüşü.....	26
Şekil 3.4. RPT gazlılık ölçüm cihazı.....	27
Şekil 3.5. Koni dökümü.....	28
Şekil 3.6. Koninin soğutulması.....	28
Şekil 3.7. Tane inceltme numunesinin boyutları.....	28
Şekil 3.8. Kesilmiş tane inceltme külçesi.....	29
Şekil 3.9. Kullanılan modeller.....	32
Şekil 3.10. Sanal ortamdaki parça tasarımı.....	32
Şekil 3.11. Model ve Açma Derece.....	33
Şekil 3.12. Karıştırma mikserinde kumun hazırlanması.....	34
Şekil 3.13. Kumun CO ₂ gazı ile Serleştirilmesi.....	34

Şekil 3.14. Kapatılmış kalıbın görünüşü.....	35
Şekil 3.15. Ocağın Yüklenmesi.....	36
Şekil 3.16. Sıvı Metale Curuflaştırıcı toz.....	36
Şekil 3.17. Curuf Alma.....	36
Şekil 3.18. Dökülmüş bir kalıbın görünüşü.....	37
Şekil 3.19. Kalıbın Bozulması.....	38
Şekil 3.20. Numunenin döküm parçadan kesilerek çıkarılmasını gösteren model.....	39
Şekil 3.21. Fotoğrafların çekildiği bölgeler.....	40
Şekil 3.22. Bilgisayar ortamındaki yüklenmiş fotoğraf görüntüsü.....	41
Şekil 3.23. Porozitlerin renklendirildiği görüntü resmi.....	42
Şekil 3.24. Etial 177 alaşımı için girilen soğuma eğrisi.....	44
Şekil 3.25. Mesh görüntüsü.....	45
Şekil 3.26. FlowCast programında kalıbın doldurulması.....	46
Şekil 3.27. Simülayondan alınan soğuma görüntüsü.....	47
Şekil 4.1a. Al5Ti1B ilavesiz döküm mikro yapısı (ölçüsüz).....	50
b. Al5Ti1B ilavesiz döküm mikro yapısı (ölçülü).....	50
Şekil 4.2a. Al5Ti1B ilavesinden 5 dakika sonra (ölçüsüz).....	51
b. Al5Ti1B ilavesinden 5 dakika sonra (ölçülü).....	51
Şekil 4.3a. Al5Ti1B ilavesinden 10 dakika sonra (ölçüsüz).....	52
b. Al5Ti1B ilavesinden 10 dakika sonra (ölçülü).....	52
Şekil 4.4a. Al5Ti1B ilavesinden 15 dakika sonra (ölçüsüz).....	53
b. Al5Ti1B ilavesinden 15 dakika sonra (ölçülü).....	53
Şekil 4.5a. Al5Ti1B ilavesinden 20 dakika sonra (ölçüsüz).....	54
b. Al5Ti1B ilavesinden 20 dakika sonra (ölçülü).....	54
Şekil 4.6a. Al5Ti1B ilavesinden 25 dakika sonra (ölçüsüz).....	55
b. Al5Ti1B ilavesinden 25 dakika sonra (ölçülü).....	55
Şekil 4.7a. Al5Ti1B ilavesinden 30 dakika sonra (ölçüsüz).....	56
b. Al5Ti1B ilavesinden 30 dakika sonra (ölçülü).....	56
Şekil 4.8a. Al5Ti1B ilavesinden 35 dakika sonra (ölçüsüz).....	57
b. Al5Ti1B ilavesinden 35 dakika sonra (ölçülü).....	57
Şekil 4.9a. Al5Ti1B ilavesinden 40 dakika sonra (ölçüsüz).....	58
b. Al5Ti1B ilavesinden 40 dakika sonra (ölçülü).....	58
Şekil 4.10a. Al5Ti1B ilavesinden 45 dakika sonra (ölçüsüz).....	59

b. Al5Ti1B ilavesinden 45 dakika sonra (ölçülü).....	59
Şekil 4.11a. Al5Ti1B ilavesinden 50 dakika sonra (ölçüsüz).....	60
b. Al5Ti1B ilavesinden 50 dakika sonra (ölçülü).....	60
Şekil 4.12. Tane incelticinin zamanla malzemenin tane büyüklüğüne etkisi.....	61
Şekil 4.13. Döküm parçanın kalıptan çıkmış hali.....	62
Şekil 4.14. Dökümlerden alınan soğuma eğrileri.....	64
Şekil 4.15. Simülasyon modellemelerinden alınan soğuma eğrileri.....	65
Şekil 4.16a. Tane inceltilmemiş mikroyapı.....	66
b. Tane inceltilmiş mikroyapı.....	66
Şekil 4.17a. Tipik makroyapı görüntüsü.....	67
b. Renklendirilmiş makroyapı görüntüsü.....	67
Şekil 4.18. Tane incelticisiz makro porozite haritası.....	68
Şekil 4.19. Tane incelticisiz makro porozite haritası.....	69
Şekil 4.20. Tane incelticisiz makro porozite haritası.....	70
Şekil 4.21. Tane incelticisiz makro porozite haritası.....	70
Şekil 4.22. CFS oranı %35 e göre yapılan simülasyon sonucunun parça merkezinden geçen kesit düzlemindeki görünüşü (0,8 %80 ve altı yoğunluğu göstermektedir - 1 %100 yoğunluğu göstermektedir.).....	72
Şekil 4.23. CFS oranı %40 e göre yapılan simülasyon sonucunun parça merkezinden geçen kesit düzlemindeki görünüşü (0,8 %80 ve altı yoğunluğu göstermektedir - 1 %100 yoğunluğu göstermektedir.).....	73
Şekil 4.24. CFS oranı %45 e göre yapılan simülasyon sonucunun parça merkezinden geçen kesit düzlemindeki görünüşü (0,8 %80 ve altı yoğunluğu göstermektedir - 1 %100 yoğunluğu göstermektedir.).....	74
Şekil 4.25. CFS oranı %50 e göre yapılan simülasyon sonucunun parça merkezinden geçen kesit düzlemindeki görünüşü (0,8 %80 ve altı yoğunluğu göstermektedir - 1 %100 yoğunluğu göstermektedir.).....	75
Şekil 4.26. CFS oranı %55 e göre yapılan simülasyon sonucunun parça merkezinden geçen kesit düzlemindeki görünüşü (0,8 %80 ve altı yoğunluğu göstermektedir - 1 %100 yoğunluğu göstermektedir.).....	76

TABLÖLÄR LİSTESİ

Tablo 2.1. ASTM E112 Standardına göre tane boyutlarının karşılaştırılması.....	11
Tablo 3.1. Deneysel çalışma aşamaları.....	23
Tablo 3.2. Primer ETİAL 177 alaşımının kimyasal bileşimi.....	24
Tablo 3.3. PAULTON dağlama çözeltilsinin yüzde bileşimi.....	29
Tablo 3.4. Simülasyonda kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri.....	43

ÖZET

Anahtar kelimeler: Etial177, alüminyum alaşımları, porozite, beslenebilirlik, katılma, döküm

Bu çalışmada ticari bir döküm simülasyon yazılımı kullanılarak kuma dökülen Etial177 alüminyum döküm alaşımının katılma sırasında hacimsel küçülmeye bağlı çekme ile oluşan makro ve mikroporozitenin modellenmesi incelenmiştir.

Primer Etial177 alaşımı eritildikten sonra makro ve mikroporozite oluşturmak üzere özel olarak tasarlanan kum kalıplara dökülmüştür. Katılma 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 soğuma eğrileri gerçek dökümlerin soğuması sırasında ölçülen zaman-sıcaklık değerleri ile tanımlanmış ve böylece gerçek dökümler ile modellenen dökümler arasında bire birlik sağlanmıştır. Porozite oluşumunun modellenmesi sırasında sıvı-katı bölgesinin (maşi bölgesi) geçirgenlik sınırını tanımlayabilmek açısından dökümlerde ve modellemelerde hiç tane inceltmemiş ve çok iyi tane inceltmiş dökümler kullanılmıştır.

İncelemede, metal eritme, tane inceltme, kuma döküm, döküm simülasyonu, metalografi, optik mikroskop, mikro yapı görüntüleme ve görüntü analizi teknikleri kullanılmıştır.

Sonuçlar, bu çalışmada kullanılan Etial177 alaşımının dökümünün simülasyon programında modellenmesi ile elde edilen porozite dağılımı ile kuma dökülen gerçek dökümlerden ölçülen porozite dağılımı arasında bire bir benzerlik bulunduğunu göstermiştir. Sonuçlar ayrıca dökümlerin bilgisayar modellemelerinde en önemli sınır şartlarından birisi olan ve "kritik katı oranı" olarak tanımlanan maşi bölgesi geçirgenlik sınırının kaba taneli dökümlerde %35 sınırlarında olduğunu, buna karşılık iyi tane inceltmiş dökümlerde bu değer %50-55 seviyelerine yükseldiğini göstermiştir.

MODELLING OF MICRO AND MACRO POROSITY FORMATION IN CAST ETIAL 177 ALLOY

SUMMARY

Key Words: Etial177, porosity, feeding ability, solidification, casting.

In this study, using a commercial casting simulation software and sand cast Etial 177 casting alloy micro and macro porosity which occurs due to the volumetric shrinkage during solidification, have been investigated.

After being melted the Etial 177 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 cooling curve of the alloy in the computer model was defined using the time-temperature data measured from the sand castings so that a 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.

During 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 177 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 35% in non grain refined alloy but it increased to 50-55 % in well grain refined alloy.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmeler her alanda olduğu gibi metalürji ve malzeme bilimi alanlarında da bu teknolojilerin kullanımını yaygınlaştırmaktadır. Son yıllarda metal dökümlerinde soğuma ve katılaşmayı üç boyutlu olarak modelleyebilen, yapısal fazların oluşumu yanında hacimsel ve boyutsal değişimleri de hesaplayarak döküm iç yapılarında olası kusurların yerlerini ve boyutlarını tahmin edebilen simülasyon programları geliştirilmiştir. Simülasyon programlarının genellikle Windows tabanlı programlar oluşu ve normal kişisel bilgisayarlara kurulum imkanı olması bu tür programların gerek döküm sektörü tarafından gerekse eğitim amaçlı ortamlarda kolayca kullanılabilmelerine olanak sağlamaktadır.

Günümüzde bilinen başlıca ticari döküm simülasyon yazılımları Magma Soft, SolidCast, Nova Solid, ProCast ve Vulcan isimleri ile sektörde yer almışlardır. 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 termofiziksel özellikler ve sınır şartları ile modelleyebilme yeteneğine sahiptirler. Bir döküm simülasyon programı ile modellenebilen başlıca döküm özellikleri şunlardır,

- Döküm ve kalıpta sıcaklığın zamana göre dağılımı,
- Döküm kesitlerinin katılaşma zamanının tespiti,
- Döküm kesitlerinde soğuma sırasında oluşan sıcak noktaların yeri ve modülse büyüklüğü,
- Döküm kesitlerinde oluşan makro ve mikro porozitenin yeri ve yüzdesel dağılımı,
- Döküm kesitlerinde oluşan sıcak yırtılma riskleri,
- Döküm ve kalıp kesitlerinde soğuma sırasında oluşan gerilmeler ve deformasyonlar,

Yukarıda sayılan özelliklerin etkili ve doğru kullanılması ile döküm simülasyonu kullanıcılara zaman ve maliyet açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Örneğin

henüz döküm yapmadan verilen bir kalıplama tasarımı ile eldeki dökümün sağlam veya kusurlu sonuçlanabileceği hakkında bilgiye sahip olunabilmektedir. Model-kalıp-metal gibi yüksek maliyetli deneme yanılma pratiklerine girmeden henüz CAD tasarımı aşamasında bile bir döküm parçanın kalıplama yöntemini seçebilmekte ve ilk dökümde doğru sonuçlar alabilmeyi sağlamaktadır.

Ancak bütün bu avantajların sağlanabilmesi 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. Bu değerlerin yanlış girilmesi simülasyon ile alınan sonuçların gerçek dökümde oluşan sonuçlardan farklı olmasına yol açacağından modelleme ile hedeflenen faydaların dezavantaja dönüşmesine yol açacaktır.

Bir döküm simülasyonu için eldeki yazılıma girilmesi gereken sınır şartları iki ana gruba ayrılır. Bunlar; kullanılan kalıp ve döküm alaşımının termofiziksel özellikleri ve döküm-kalıp ve atmosfer arasında gerçekleşen ısı transfer katsayılarıdır. Bu gün döküm modellemeleri için kullanılan sınır şartları değerlerinin birçoğu halen araştırma konusu olup kesin değerleri veya zamana ve sıcaklığa bağlı olarak değişen değerleri henüz tam olarak bilinmemektedir. Döküm-kalıp sisteminin termofiziksel özellikleri genel olarak aşağıdaki maddeleri kapsamaktadır;

- Döküm alaşımının ve kalıp malzemesinin özgül ağırlığı, özgül ısı değeri, ısı iletkenlik katsayıları,
- Döküm alaşımının katılaşması ve faz dönüşümleri sırasında ortaya çıkan enerji değerleri (örn. Ergime gizli ısısı),
- Döküm ve kalıp malzemelerinin ısıl genleşme değerleri,
- Döküm alaşımının soğuma eğrisi,
- Döküm alaşımının soğuma eğrisine bağlı olarak değişen hacimsel çekme oranı,
- Döküm alaşımının katılaşması sırasında besleme metalinin akışına karşı gösterdiği direnç (maşi bölgesi geçirgenliği),

Yukarıda sıralanan sınır şartlarından sonuncusu olan maşı 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 porozite kusurları ortaya çıkacaktır.

Bir döküm modellemesinde yukarıda fiziksel olarak tanımlanan maşı bölgesi geçirgenliğinin sayısal olarak tanımlanması gerekmektedir. Başka bir deyişle verilen bir döküm alaşımı için katı-sıvı ara bölgesinin hangi katılaşma oranında tamamen kapanması gerektiği bilgisayar modelinde tanımlanmalıdır. Aksi halde program katı – sıvı ara bölgesini olması gerekenden önce kapatırsa simülasyondan elde edilen sonuçlar yüksek porozite gösterecek buna karşılık program katı-sıvı ara bölgesini olması gerekenden daha geç kapatırsa bu kez simülasyondan elde edilen sonuçlar gerçek dökümden ölçülene göre daha az porozite tahmin edecektir. Böylece her iki durumda da modelleme ile gerçek dökümler arasındaki tutarlılık ve birebirlik azalacaktır.

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. Yapılan araştırmalar tane inceltme uygulanmış küçük taneli alüminyum dökümlerinin tane inceltilmemiş kaba taneli alüminyum dökümlerine göre daha iyi beslenebildiğini ve bu dökümlerde diğerlerine göre daha az makro ve mikroporozite oluştuğunu göstermektedir. Nu var ki, simülasyon programları ile döküm modellemesi yapılacak alüminyum alaşımları için maşı bölgesi geçirgenliğini tanımlamak üzere sınır değeri olarak bir değer girilmesi gerekmektedir. Bu karşılık alüminyum alaşımlarının maşı

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 maşı bölgesi geçirgenlik değeri ancak gerçek bir dökümden alınan sonuçlar ile o döküm için farklı maşı bölgesi geçirgenlik değerleri uygulanan çok sayıda simülasyondan alınan sonuçların karşılaştırılması ile bulabilir.

Bu çalışmada Etial 177 alaşımının kuma döküm koşullarında maşı bölgesi geçirgenlik değerleri hem simülasyon ile modellenmiş hem de gerçek dökümler ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın amacı kaba taneli ve ince taneli dökümler yaparak döküm tane boyutunun maşı bölgesi geçirgenliğini ne derecede etkilediğinin incelenmesidir. Dökümlerden elde edilen sonuçlar simülasyon programı ile modellenen dökümlerden elde edilen verilerle karşılaştırılmış ve Etial 177 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.

Bu çalışmada kuma dökülen Etial 177 alüminyum döküm alaşımının katılaşması sırasında hacimsel küçülmeye bağlı çekme ile oluşan makro ve mikroporozitenin modellenmesi ticari bir döküm simülasyon yazılımı kullanılarak incelenmiştir.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Alüminyum Metalin Özellikleri

Alüminyum, demir – çelikten sonra dünyada en çok kullanılan metaldir. alüminyum metal üretimi ve tüketimindeki yüksek artış hızının nedenleri; alüminyumun özelliklerindedir ki bunlar düşük yoğunlu, yüksek ısısal ve elektriksel iletkenlik, ışık ve isi yansıtıcılığı, sıcak ve soğuk şekillendirilebilme kolaylığı, değişik dayanım olanakları, yeniden kullanılabilme gibi belirgin özelliklerdir. Alüminyumun uçak ve otomotiv sanayinde önemli rol oynaması “stratejik” bir metal sayılmasına neden olmuştur. Alüminyum ve alaşımları bütün imalat sanayinin hem her dalında, tarım, inşaat, kimya, gıda, ulaştırma, elektrik ve elektronik sektörlerinde giderek artan oranlarda kullanılmaktadır.

Alüminyum iyi bir isi ve elektrik iletkenidir; kolayca dökülür ve islenebilir; korozyona dayanıklıdır. Sıcak ve soğuk şekillendirilebilme, dekoratiflik özelliklerinden dolayı makine imalat, metal sanayi, inşaat, kimya, gıda sanayi, ulaştırma, elektrik – elektronik sanayi uzay sanayi ve diğer birçok ortamlarda kullanılmaktadır.

Kimyasal özellikleri

Atom numarası: 13

Atom ağırlığı: 27

Özgül ağırlığı: kati halde 2,7 gram/cm³ , sıvı halde (700 °C) 2,37 gram/cm³ tür.

Ergime sıcaklığı: 660 °C

Kaynama sıcaklığı: 2500 °C

Kısaca bu deneylerde kullanılan ETİAL 177 alaşımı için ise;

Alüminyum Külçe Etial-177

Etinorm : ETIAL-177

Özgül Ağırlık: 2,68(gr/cm³)

Ergime Aralığı: 40 (°C)

Isısal İletkenlik: 159 (W/m.K)

Korozyon Dayanımı: İyi

Dökülebilirlik: İyi

İşlenebilme: Orta

Anodik Oksidasyon: Sadece Yüzey Korumada

Genel Özellikleri: Otomotiv sanayinde, basınçlı sızdırmazlık ve jant yapımında kullanılır.

2.2. Alüminyum Alaşımları

Diğer metallerin alüminyuma ilave edilmesi mukavemet ve sertliğin artmasına imkan verir. Bu hususta, ticari evsftaki alüminyumda mevcut küçük miktarlardaki gayri safiyetlerin dahi alüminyumun mukavemetini (saf metale kıyasla) % 50' ye kadar arttırmaya yeterli olduğunu kaydetmeye değer. Alüminyum alaşımlarının istihsalinde en fazla kullanılan metaller bakır, silisyum, manganez, magnezyum ve çinkodur. Bu metaller, nihai alaşımda arzu edilen bileşimi elde etmek için tek tek veya birleşik halde alüminyuma ilave edilebilirler.

2.2.1. 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 ısıl 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 (kokil'lerde) 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 şekillendirme maliyetlerinde önemli miktarda tasarruf sağlanmış olur.

2.2.2. Al - Si alaşımları

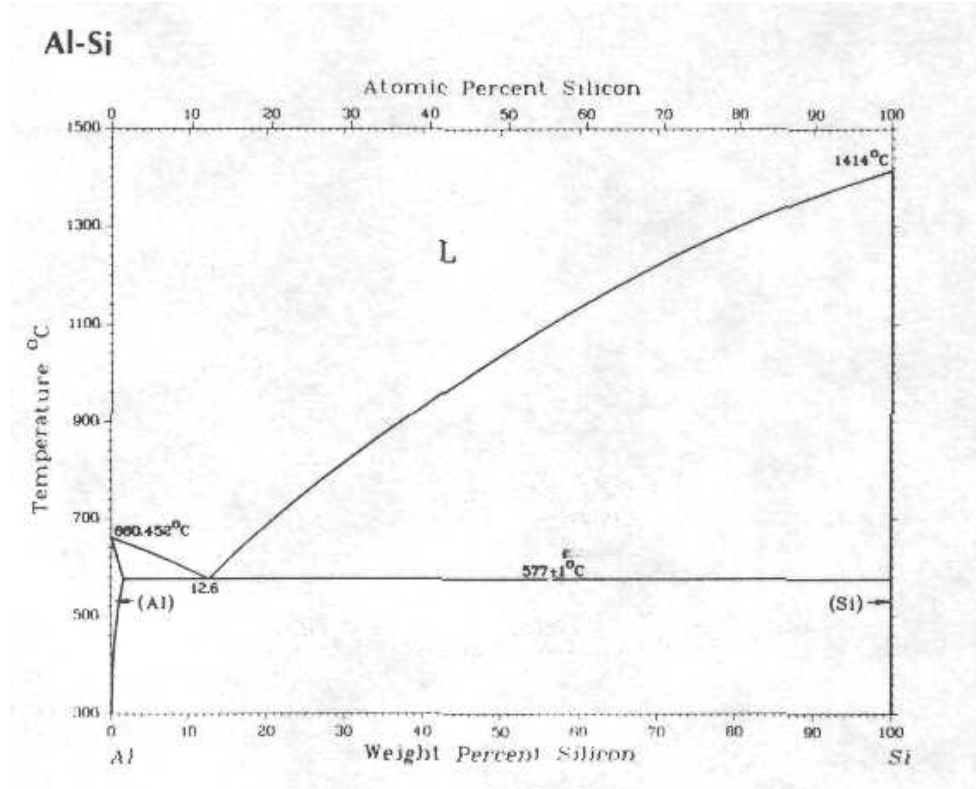
Al'da Cu' dan sonra en önemli alaşım elementi silisyumdur. Silisyum, sıvı alüminyumun akışkanlığını artırır. Özellikle Cu, Ni ve Mg ile karıştırıldığında yaşlanma ile sertleştirilebilir alaşımlar yapar. Fakat bu alaşımların çekme mukavemetleri çok yüksek değildir ve 13,6 - 15,4 kg/mm² arasında değişmektedir. Mukavemet artışı silisyum artışı ile orantılıdır.

Silisyum ilavesi ile akışkanlık, kaynak kabiliyeti artar fakat korozyon direnci azalır. Tane küçültme ve modifikasyon işlemleri ile iyi işlenebilme sağlanır. Ayrıca sıcak yırtılmada 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.

% 5 silisyumlu alaşım özellikle ince ve karmaşık şekilli parçalar için kullanılır. Korozyon direnci yüksek olan bu malzemenin işlenebilme kabiliyeti azdır. Silisyum oranı % 5'den fazla ise iri köşeli olan Si kristallerinin oluşumunu önlemek ve kristallerin yuvarlak şekil olmasını sağlamak için sıvı metalin sodyumla modifiye edilmesi gerekir. Silisyum bulunduran dövme alaşımları suni yaşlanmadan sonra mukavemet artışı gösterirler. Yüksek silisyumlu alaşımlarda % 1,5'a kadar Fe bulunabilir. Demir artışı kırılgan ve iri kristalli bir yapı meydana getirir. Al - Si alaşımlarının ısı işleme düşüktür, bu özellik içten yanmalı motor pistonları gibi bazı parçalarda avantaj sağlar.

Yaklaşık % 11,7 noktasındaki ötektik alaşımın iç yapısı % 90'a kadar a katı çözeltisi ile % 10'a kadar arı silisyumdan meydana gelir. Böylece sünek alüminyum - silisyum katı çözeltisi, gevrek silisyuma nazaran çok daha etkin olarak alaşımın özelliklerini belirler. Bu durum ince taneellik ve kalıbı iyi doldurma özellikleri ile birlikte Al - Si ötektik alaşımlarının döküm malzemesi olarak pratikte kullanılmasını sağlar.

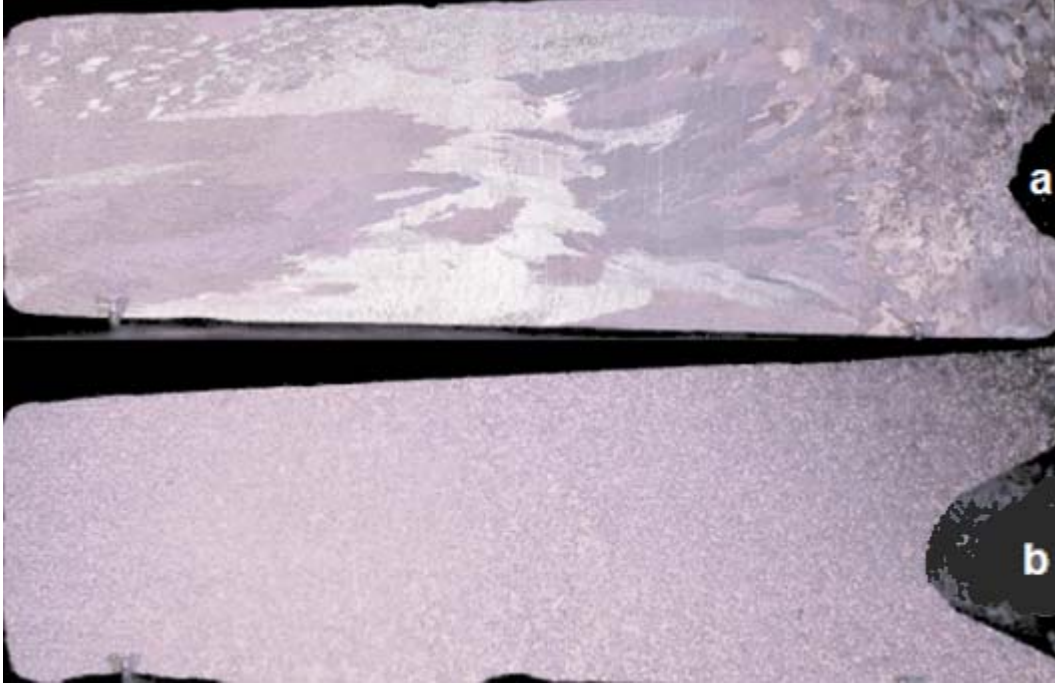


Şekil 2.1. Al - Si denge diyagramı

2.3. 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 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2a. Tane inceltilmemiş, b. Al5Ti1B bileşiminde 10 ppm bor ilave edilmiş 3004 alaşımının tane yapıları[1].

Tane inceltme özellikle, ikinci faz partiküllerin dağılımını değiştirdiğinden döküm parçaların mekanik özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu durum Şekil 2.1a da gösterilen tane inceltilmemiş ve tane inceltilmiş yapıların karşılaştırılması ile daha net görülebilir. Şekil 2.2a 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 [1]. Şekil 2.2b 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 işlemim porozite miktarını azaltmakta ve porozite boyutunu küçültmektedir. Aynı zamanda besleme kabiliyetini arttırmakta olduğundan alüminyum alaşımları çoğunlukla tane inceltme işlemine tabi tutulmaktadır.

2.4. 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 (HNO₃) , %5 hidroflorik asit (HF) ve %5H₂O 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 cm² ye düşen tane sayısı

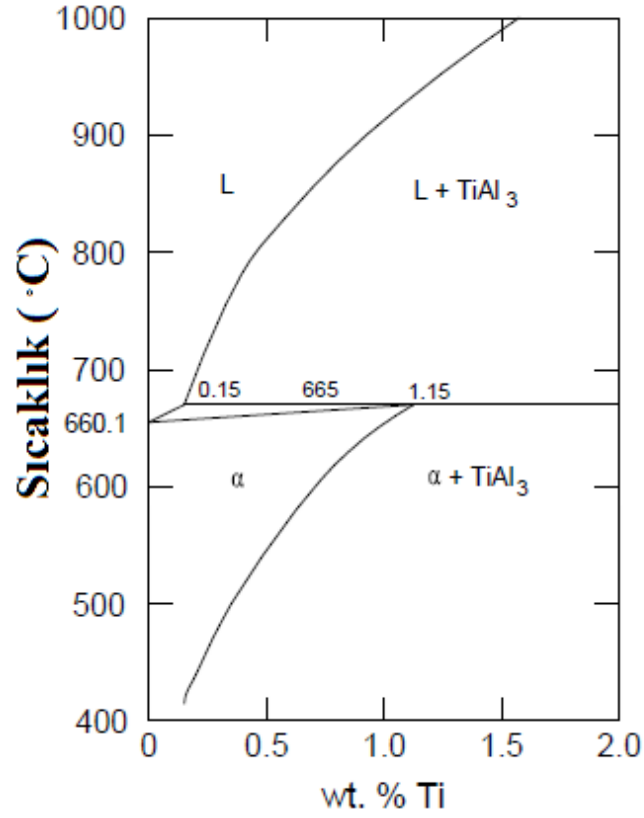
Bu yöntemlere göre tane boyutu sınıflandırılması Tablo 2.2'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bununla birlikte tane boyutu ölçümünde en kolay yöntem ortalama kesişim mesafesinin ölçülmesidir. Bu yöntemde parlatılmış ve dağlanmış numune üzerinde çizilen bir doğrunun kaç adet taneyi kestiği sayılarak ortalama tane boyutu bulunmaktadır.

Tablo 2.1. ASTM E112 Standardına göre tane boyutlarının karşılaştırılması.

Ortalama Tane Boyutu		Ortalama Tane	ASTM Tane	Cm ² 'ye Düşen
mm	µm	Çapı µm	No.	Tane Sayısı
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

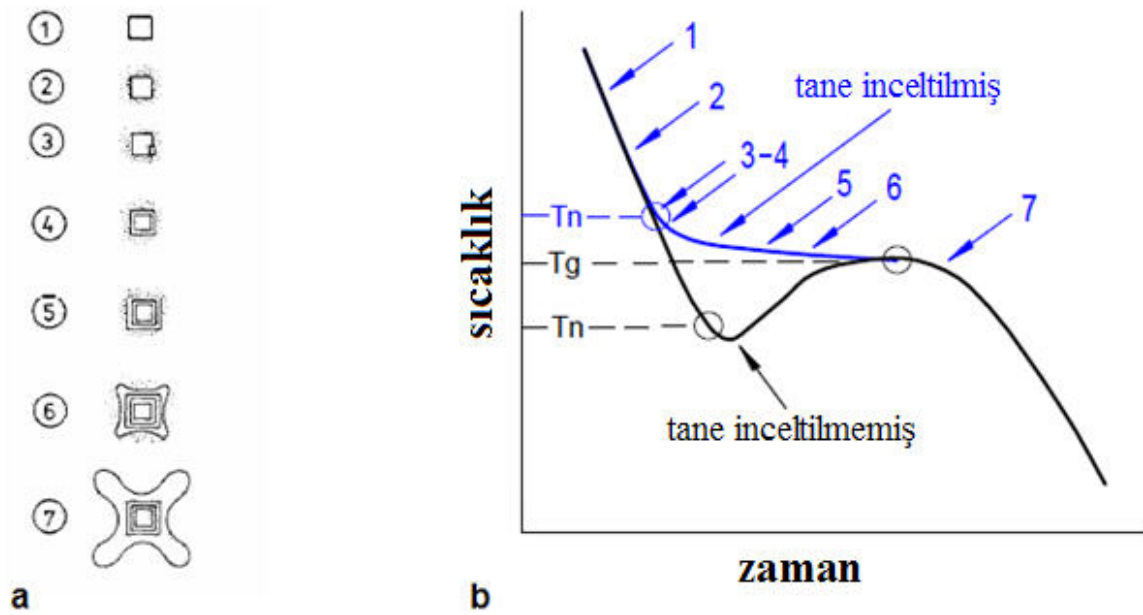
2.5. Alüminyum Dökümlerinde Tane İnceltme Mekanizmaları

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 $TiAl_3$ bileşiği oluşturarak bu bileşiklerin sıvı alüminyumda heterojen çekirdeklenme noktaları oluşturduğu şeklindedir. Al-Ti Faz diyagramının alüminyumca zengin tarafı Şekil 2.3'de verilmiştir. Faz diyagramından gibi Ti ilavesinin alüminyumun ergime derecesini 660 °C dan 665 °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 $TiAl_3$ bileşiklerinin oluşmasıdır.



Şekil 2.3. Al-Ti Faz diyagramının alüminyum tarafı [2]

Backerud [3] katı TiAl₃ partikülleri üzerinde alüminyumun çekirdeklenerek büyümesini Şekil 2.4a'da gösterilen şema ile açıklamıştır. Sigworth ve Kuhn [1] bu şemayı Şekil 2.4b'de gösterilen başka bir şematik soğuma eğrisi ile ilişkilendirerek açıklamışlardır.



Şekil 2.4a. Alüminyumun TiAl₃ partikülleri üzerinde çekirdeklenerek büyümesi sırasında geçirdiği aşamaların şematik gösterimi [3] b. Tane inceltilmemiş ve tane inceltilmiş sıvı alüminyumun soğuma eğrilerinin şematik gösterimi [1]

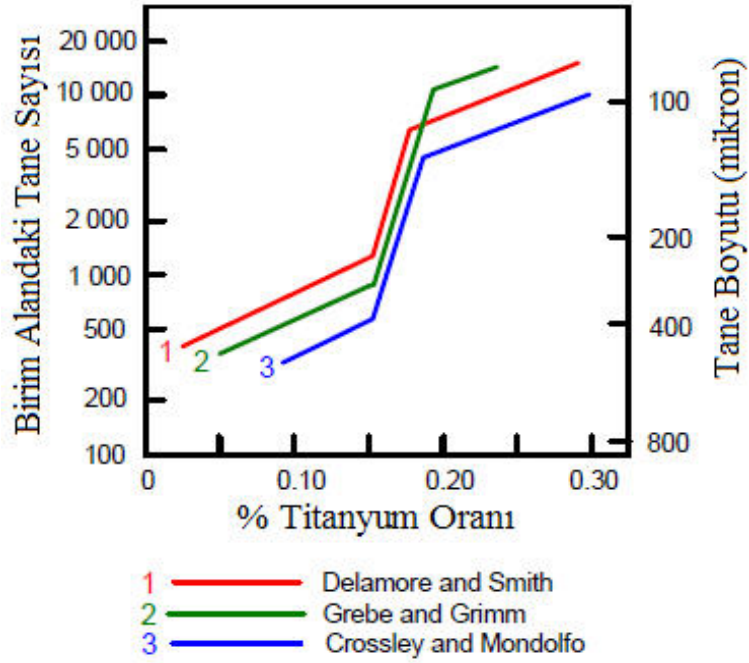
Tane inceltici olarak ilave edilen titanyum içeren mastır alaşımı içerisinde çok sayıda TiAl₃ intermetalik bileşiği bulunmaktadır. Dökümden birkaç dakika önce tane inceltici mastır alaşımı ilave edildiğinde milyonlarca mikroskobik TiAl₃ partikül sıvı metal içersine dağılmaktadır. Bunlardan bir tanesinin Şekil 2.3a'da şematik olarak 1 ile gösterilen parçacık olduğunu varsayabiliriz. TiAl₃ sıvı alüminyum ile temas ettikten sonra çözünmeye başlar. Bunun sonucu partikül çevresinde partikül ile temas eden alüminyum titanyumca zenginleşmeye başlayacaktır. Bu olay Şekil 2.4a da 2 no lu skeç ile temsil edilmektedir. Bu anda Şekil 2.3 de verilen faz diyagramından görüleceği gibi ilk önce partikül etrafında titanyumca zengin sıvı ana metale göre daha yüksek likidüs sıcaklığına sahip olması nedeni ile katılaşmaya başlayacaktır. Böylece Şekil 2.4a 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 2.4b 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 [4] 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 (% 0,01Ti) 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 bekletme 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 [5] tarafından bir araya getirilen üç farklı çalışmadan alınan sonuçlar Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Şekil 2,5'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

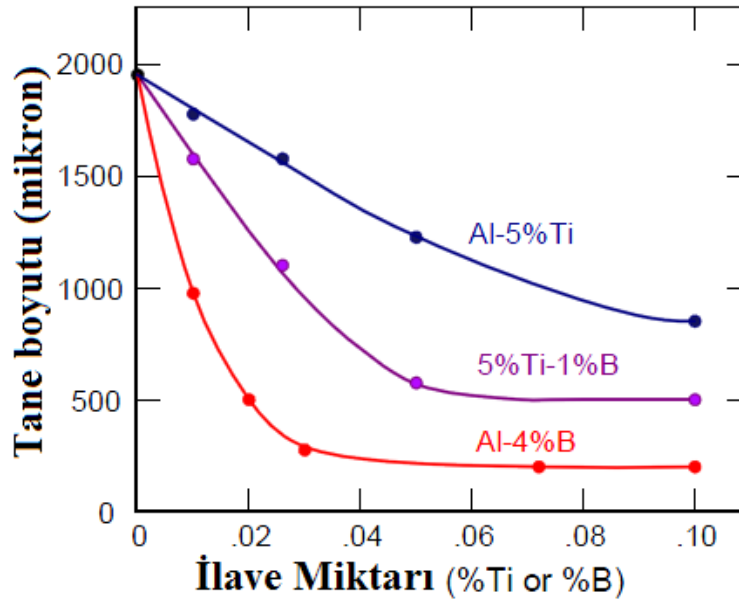
değerde olması gerekmektedir. Bu değer aynı zamanda alüminyum içinde çözünebilen maksimum titanyum sınırırır.



Şekil 2.5. % 99,7 safiyette alüminyumda titanyum ilavesi ile tane inceltme sonuçları[5]

2.6. Alüminyumda Tane inceltmede Borun Etkisi

Lu, Wang ve Kung[6] 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 2.6'da verilmiştir. Bunlar Al-%5Ti, Al-%5Ti-%1B ve Al-%4B alaşımlarıdır. Şekil 2.6'dan net bir şekilde borun tane inceltici olarak titanyumdan daha etkili olduğu görülmektedir. Benzer bir çalışmada Sigworth ve Guzowski [7] AlB₂ partikül içeren Al-B mastır alaşımının çok daha mükemmel tane inceltme etkisi gösterdiğini rapor etmişlerdir.



Şekil 2.6. A356 alüminyum alaşımında üç farklı mastır alaşımı ile tane inceltme sonuçları[6]

Sigworth[1], titanyum ve borun tane inceltme etkisi hakkında yapılan çalışmaları aşağıdaki şekilde özetlemiştir.

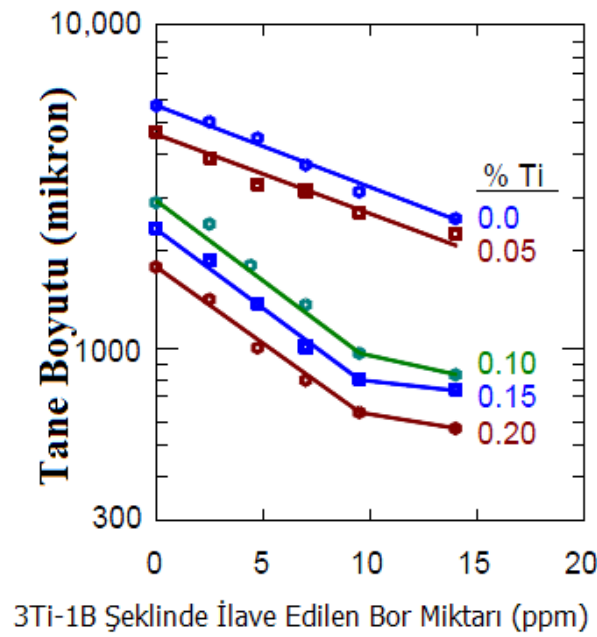
1. $TiAl_3$ zayıf bir çekirdekleyicidir. Aynı zamanda $TiAl_3$ kristalleri alüminyum içinde yüksek oranda çözünürlüğe sahiptir. Bu iki nedenle sadece titanyumla inceltme yapıldığında çok ince tane elde etmek için oldukça fazla miktarda titanyum ilavesi gerekmektedir.

2. 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.

3. 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 çekirdekleme potansiyeli olmasına rağmen AlB_2 tane inceltici olarak kullanılamaz.

Pasciak ve Sigworth[8] tarafından Al 319 alaşımı ile yapılan tane inceltme çalışmalarından alınan bir sonuç Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Buna göre tane inceltici olarak bor miktarı artırılrsa bile titanyum ilave etmeksizin etkili bir tane inceltme yapmanın mümkün olmadığı görülmektedir.

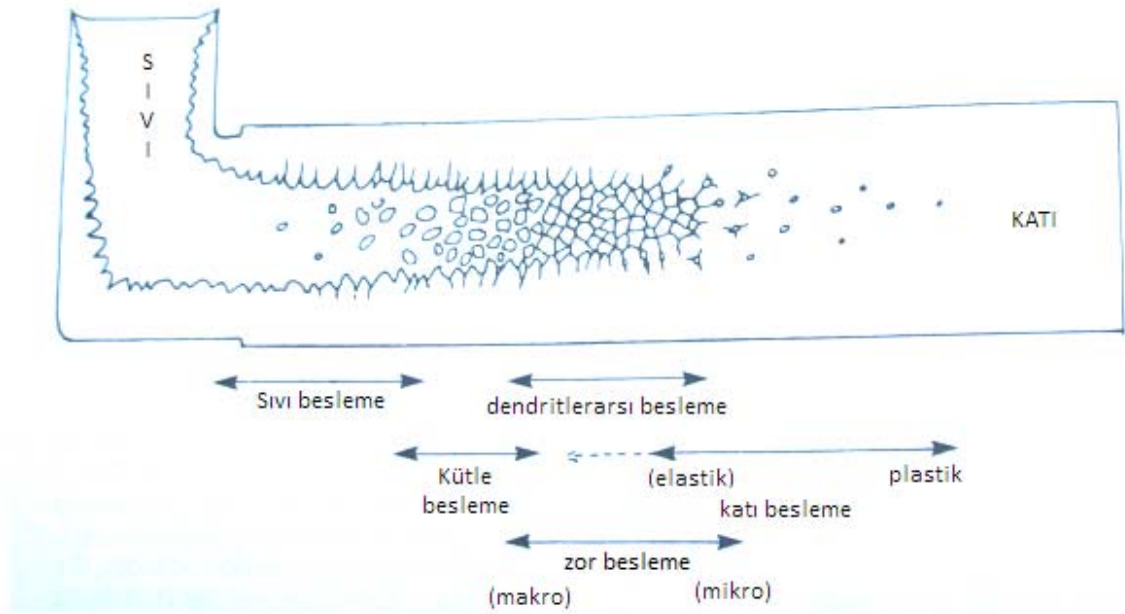


Şekil 2.7. Alüminyum 319 alaşımında tane inceltme sonuçları[8]

2.7. Dökümlerde Besleme Mekanizmaları

Birkaç metal ve alaşım hariç metal ve alaşımların neredeyse tamamı katılaşıma 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 katılaşımanın 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[10].

Belirli bir sıcaklık gradyanı ile katılaşılan saf alüminyum katı – sıvı ara yüzeyi 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[11]. Geniş katılaşma aralığına sahip alaşımlarda sıkça görülen karakteristik besleme mekanizmaları Campbell[12] tarafından açıklanmıştır. Buna göre Şekil 2.8’de şematik olarak gösterilen katılaşılan bir dökümde beş besleme mekanizması aşağıda Campbell’den alınarak özetlenmiştir.



Şekil 2.8. Katılaşılan bir dökümde beş besleme mekanizmasının şematik gösterimi [12]

2.7.1. 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 katılaştan veya ötektik katılaştan ortamlarda tek besleme mekanizmasıdır. Sıvı besleme mekanizması iyi araştırılmış ve diğer besleme mekanizmalarına göre en iyi anlaşılmış bir besleme mekanizmasıdır[13]. Yetersiz sıvı besleme doğrudan makro porozite (çekinti boşluğu) oluşumu ile sonuçlanmaktadır.

2.7.2. 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.

2.7.3. 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 (dendrite coherency) 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.

2.7.4. Zor besleme (Burst feeding)

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[12] 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. Zor besleme noktasının tahmin edilmesinde hem kritik katı oranının bilinmesine hemde maşi bölgesindeki dendrit örgüsünün çekme dayanımı bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır.

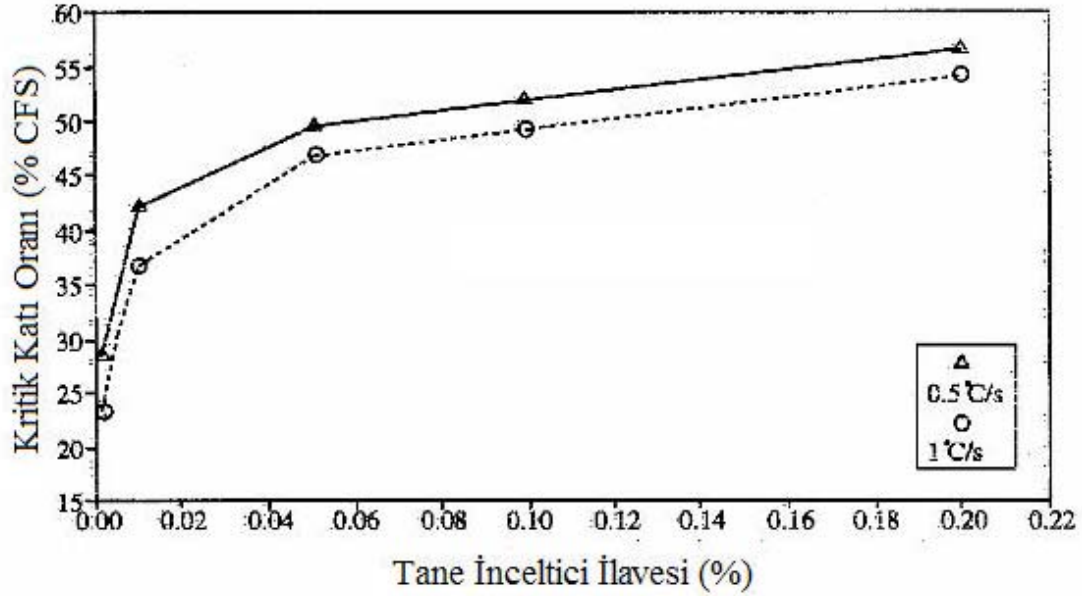
2.7.5. Katı besleme

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 katılaşmış 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 katılaşma sırasında yeterli miktarda sıvı metalin sağlanabilmesi zorunludur. Eğer besleme metali yetersiz kalırsa dökümde makro ve mikroporozite, yüzey çökmesi gibi bir çok kusur oluşabilir.

2.8. Tane İnceltmenin Besleme Üzerine Etkisi

Tane inceltmiş dökümlerde maşi bölgesi boyunca beslenebilirliğin arttığı bilinmektedir [10]. 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 2.8'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü 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 2.8 de 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.

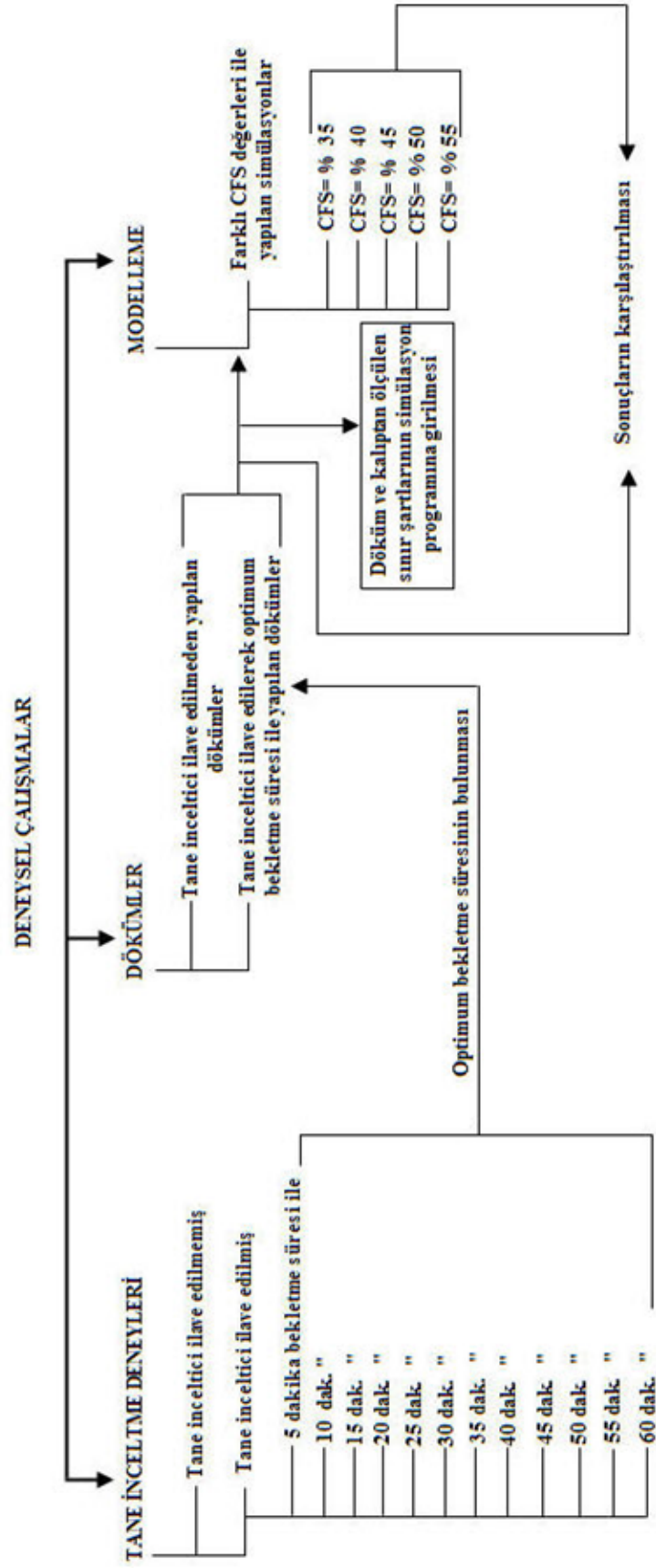


Şekil 2.9. Al-%4Cu alaşımında tane inceltici ilavesinin dendrit blokajına etkisi [9].

BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan bu tezde deneyler 3 ana aşamada gerçekleştirildi. Yapılan deneysel çalışmaların aşamalarını gösteren genel bir akış çizelgesi Tablo 3.1’de görülmektedir. Tablo 3.1’den de görüldüğü gibi 1. aşamada döküm alaşımı olarak kullanılan Etial 177 alaşımı ile tane inceltme deney dökümleri yapılmıştır. Tane inceltme deney dökümlerinin amacı alaşıma ilave edilen tane inceltici mastır alaşımının inceltmeye olan etkisinin zamana göre değişimini ölçerek tanenin en iyi incelendiği bekleme süresinin tayin edilmesidir. Bu döküm deneylerinden elde edilen veriler 2. aşamada yapılan gerçek dökümlerde kullanılmıştır. 2. Aşamada yapılan döküm deneylerinin amacı sıvı metalin katılaşması sırasında katı-sıvı aralığında (maşi bölgesi) sıvı beslemeye gösterdiği direncin tespit edilmesi ve ölçülerek değerlendirilmesidir. 2. aşamadan elde edilen bazı verilerin ışığı altında 3. aşamada modelleme çalışmaları optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.1. Deneysel çalışma aşamaları



3. aşama olan modelleme 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. Yukarıda özetlenen deneysel çalışmalar aşağıdaki alt bölümlerde ayrıntılı biçimde verilmiştir.

3.1. Tane İnceltme Deneilerinin Yapılışı

Bu bölümde ayrıntılı olarak tane inceltme deneylerinin yapılışı ve deney parametreleri ayrıntılı olarak verilmektedir.

3.1.1. Kullanılan alaşımın kimyasal bileşimi

Tane inceltme ve döküm deneylerinde kullanılan Etial 177 alaşımı birincil (premier) külçeler halinde Eti Alüminyum Seydişehir fabrikalarından satın alınmıştır. Deneylerde kullanılan külçelerin kimyasal analizleri Spectromax X spektral analiz cihazı ile belirlenmiştir. Ölçülen kimyasal analiz değerleri Tablo 3.2'de görülmektedir.

Tablo 3.2.Primer ETİAL 177 alaşımının kimyasal bileşimi

Elementler	Si	Fe	Mg	Ti	Al
Ağırlıkça%	8,04	0,2	0,42	0,13	Kalan

3.1.2. Ergitme işleminin yapılışı

Etial 177 alüminyum alaşımı Şekil 3.1'de gösterilen elektrik direnç ocağında Şekil 3.2'de gösterilen 8 kg ergitme kapasitesine sahip SiC pota içerisinde ergitilmiştir. Ocak, 2 kW gücünde olup, azami 1000 °C sıcaklığa çıkma kabiliyetine sahiptir ve K tip termokapıl ve elektronik kontaktör termostat donanımı ile sıcaklığı kontrol edilebilmektedir. Ocak astarı yüksek termal ızalasyon özelliği olan kalsiyum oksit türü plakaların üst üste yerleştirilmesi ve üzerine rezistans yatağı açılıp rezistansın konulması ile yapılmıştır.

Primer külçeden yaklaşık 100'er gramlık parçalar halinde kesilerek potaya doldurulan Etial 177 alaşımının sıcaklığı önceden 750 °C' ye çıkartılarak üzerine curuf yapıcı örtü tozu ilave edildi.



Şekil 3.1. Elektrik direnç ertitme ocağı



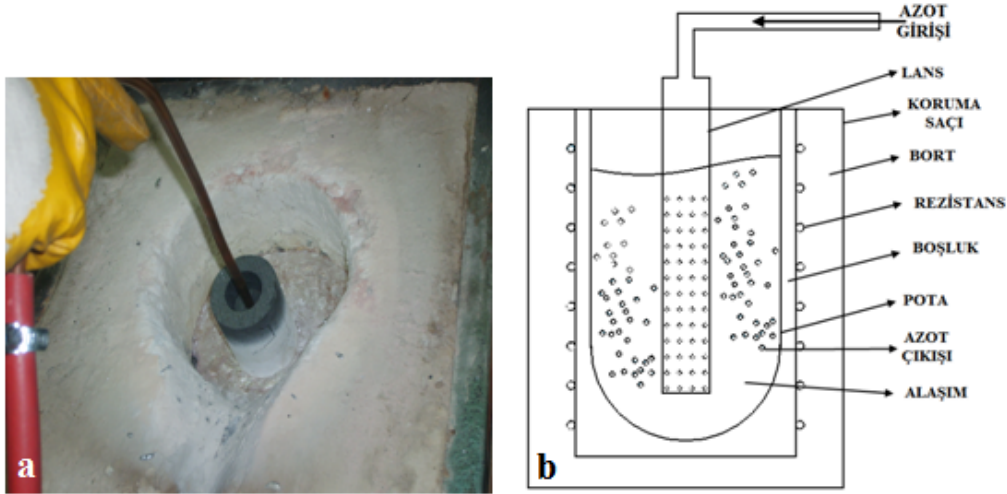
Şekil 3.2. SiC potalar

Örtü tozu ticari bir toz flaks olup içerisinde farklı oranlarda sodyum ve kalsiyum mineralleri bulunmaktadır. Bu tozlar alüminyuma ilave edilmesindeki maksat sıvı metal içerisinde bulunması muhtemel bazı artık maddelerin kolayca curuf haline getirilerek metal içersinden uzaklaştırılmasıdır. Flaks ilavesinden 10 dakika sonra sıvı metal üzerinde biriken curuf ve oksitler bir temizleme laması ile sıvı metal üzerinden sıyrılmak suretiyle kabaca temizlenir.

3.1.3. Sıvı metalde gaz giderme ve gazlılık ölçümleri

Bu aşamadan sonra sıvı metal içersinde çözülmüş olan hidrojenin metal dışına alınabilmesi amacıyla kuru azot gazı ile sıvı metale yıkama işlemi gerçekleştirilmiştir. Azotla yıkama işlemi için Şekil 3.3a'da gösterilen dış yüzeyleri bor nitür (BN) ile kaplanmış grafit sabit bir lans yardımı ile yapılmıştır. Azot gazı kullanılarak sıvı metalde gaz giderme işlemi şematik olarak Şekil 3.3b'de gösterilmiştir. Azot gazı sıvı alüminyum içersine yaklaşık 670-700 °C aralığında ince delikleri bulunan bir grafit lans ile verilmektedir. Bu işlemde amaç çok sayıda küçük

gaz baloncunu sıvı içersinden geçirmektedir. Azot gazının sıvı içersinden geçmesi esnasında metal içersinde çözülmüş bulunan hidrojen atomları bu baloncuklar içersine difüz ederek baloncuklarla beraber atmosfere atılmaktadır.



Şekil 3.3a. Sıvı metalin azot gazı ile yıkanması, b. gaz giderme işleminin şematik görünüşü

Gaz giderme işlemine yaklaşık 8 dakika devam edildikten sonra sıvı metalin gazlılık durumunu test etmek amacıyla RPT (Düşürülmüş Basınç Testi) gaz ölçüm testi uygulanmıştır. Bu çalışmada da kullanılan tipik bir RPT cihazının fotoğrafı Şekil 3.4'te verilmiştir. RPT testi prensip olarak yaklaşık 70 gram ağırlığında bir sıvı metalin, metal bir kroze içinde. -1 atmosferlik (yaklaşık -760 Hg/cm^2) basınç altında katılaştırılmasını ve bu esnada sıvı metal içersinde çözülmüş olarak bulunan hidrojenin katılaşma sırasında gaz kabarcıkları haline geçmesi ve numune içersinde ki gazın gözle görülür gaz boşluklarının oluşmasına dayandırılmaktadır. Test numunesinde ne kadar çok gaz boşluğu oluşursa sıvı alaşımda o derece yüksek oranda hidrojen çözüldüğü, buna karşılık RPT numunesinde ne kadar az sayıda gaz boşluğu var ise sıvı metal içersinde o derece az çözülmüş hidrojen bulunduğu kabul edilmektedir.



Şekil 3.4. RPT gazlılık ölçüm cihazı

Bu çalışmada gaz alma işleminden hemen sonra RPT testi yapılarak sıvı içerisinde çözülmüş hidrojen oranının seviyesine bakılmıştır. Gazlılık oranının yüksek çıktığı durumlarda azotla yıkama işleminin süresini artırarak gaz seviyesinin kabul edilebilir seviyelere kadar düşmesi sağlanarak döküm işlemine geçilmiştir.

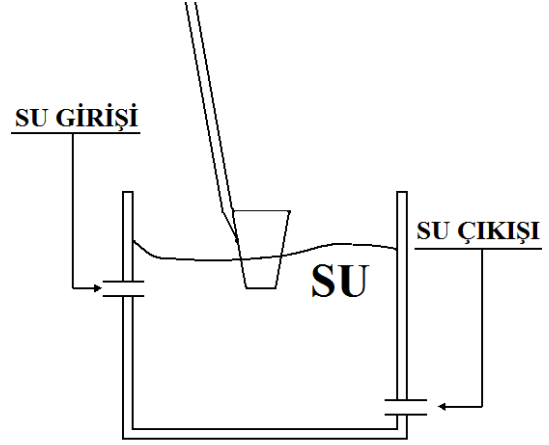
3.1.4. Tane inceltme işlemlerinin yapılışı

Gaz alma ve RPT işlemlerinden sonra sıvı metalin sıcaklığı 750 °C ye çıkartılmıştır. Bu sıcaklıkta sıvı metalin yüzeyinde birikmiş olan oksit ve curuflar sıyrılarak alınır. Herhangi bir tane inceltici ilavesi yapılmadan önce tane inceltmesiz döküm tane yapısını görebilmek amacıyla ilk numune tane incelticisiz olarak alınmıştır. Tane inceltmesiz döküm numunesi de aşağıda detaylandırılan tane inceltme deneylerinde olduğu gibi standart ALCAN [15] tane inceltme kabında soğutulmuştur.

Sıvı metal sıcaklığı 750 °C de sabitlenmek suretiyle sıvı metal içersine önceden çubuktan kesilmiş tartılmış ve kurutulmuş Al5Ti1B mastır alaşımı daldırma yöntemi ile ilave edilmiştir. Muhtemel oksitlenme kayıplarını da göz önüne alarak sıvı metal içersine nominal olarak % 0,20 oranında titanyum ilavesi sağlamak üzere ağırlıkça % 0,25 oranında titanyum içeren Al5Ti1B mastır alaşımı ilave edilmiştir. Tane inceltici mastır alaşımı ilave edilmesinden sonra ilk beş dakikadan itibaren periyodik olarak beşer dakikalık periyotlar halinde numune alınmıştır ve böylece bekletme süresinin tane boyutu üzerine etkisi araştırılmıştır.

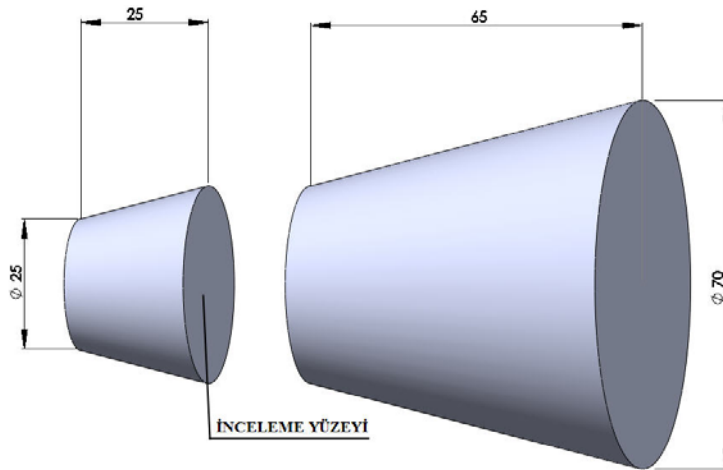


Şekil 3.5. Koni dökümü



Şekil 3.6. Koninin soğutulması

Şekil 3.5'te koni şeklindeki ALCAN standart tane inceltme test potasına sıvı alaşımı ocaktan alma ve sıvı alaşım ile doldurulmuş hali gösterilmiştir. Pota 2 mm kalınlığında çelik saçtan yapılmış olup iç kısmı ince bir bor nitrür (BN) tabakasıyla kaplanmıştır. Pota Şekil 3.6'te gösterildiği şekilde aynı anda hem su girişi ve su çıkışı sağlanan bir su kabına alttan yaklaşık 25mm lik kısmı su içinde kalacak şekilde akan suya daldırılmak suretiyle alttan hızlı bir şekilde soğutulmuştur. Tane inceltme numunesinin boyutları Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Soğutulan külçe potadan çıkarıldıktan sonra tane yapısı incelemek üzere Şekil 3.8'da gösterildiği gibi kesilir.



Şekil 3.7. Tane inceltme numunesinin boyutları



Şekil 3.8. Kesilmiş tane inceltme külçesi

3.1.5. Yüzeylerin tane ölçümü için hazırlanması

Tane inceltme test konilerinin ince uç kısmından 25 mm mesafede tane boyutu ölçümü yapabilmek için kesilen küçük konilerin yüzeyleri 600 gritten başlayarak 1200 grite kadar giderek incelen zımparalar ile döner disk üzerinde su ile zımparalanmıştır. Bu aşamadan sonra 1 mikronluk alümina solüsyonu emdirilmiş keçe ile numune yüzeyleri ayna parlaklığında parlatılmıştır. Parlatılan yüzeyler yıkanarak kurutulmuştur Tane yapısının ortaya çıkarmak üzere yüzeyler PAULTON [14] dağlama ajanı ile 20 saniye süre ile dağlanmıştır. Dağlama işleminden önce numuneler sıcak su içerisinde yaklaşık 80 °C' ye ısıtılarak reaksiyonun hızı ve etkinliği arttırılmıştır. PAULTON dağlama çözeltisinin bileşimi Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. PAULTON dağlama çözeltisinin yüzde bileşimi

Bileşikler	HCl	HNO ₃	HF	H ₂ O
Ağırlıkça%	60	30	5	5

3.1.6. Tane inceltme test konilerinin değerlendirilmesi

Parlatılan ve dağlanan yüzeylerde tane boyutu değerlendirmesi şu şekilde yapılmıştır. Her bir koni yüzeyinin NIKON SMZ 800 stereoskopa bağlı Clemex dijital kamera yardımıyla görüntüsü alındı ve Clemex Vision Lite görüntü değerlendirme yazılımıyla görüntüler değerlendirildi. Stereoskopik mikroskop kullanmadaki amaç tane boyutlarının normal ışık mikroskobu altında görüntülenmesi en küçük büyütmelerde bile ancak 1 veya 2 taneyi kapsadığından stereoskopik görüntüde çok sayıda taneyi bir defada görüntüleyip ölçme imkanı sağlamasından dolayıdır. Böylece her bir görüntüleme karesinde yaklaşık 1,5 mm²'lik bir alanın değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Bu boyutta bir alan yaklaşık 30-40 tane içermekte dolayısıyla her bir kare mikro yapı fotoğrafından bu sayıda tanenin boyutları ölçülebilmektedir.

Tane ölçümünde kullanılan yazılımdan gelen bir özellik 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 177 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.

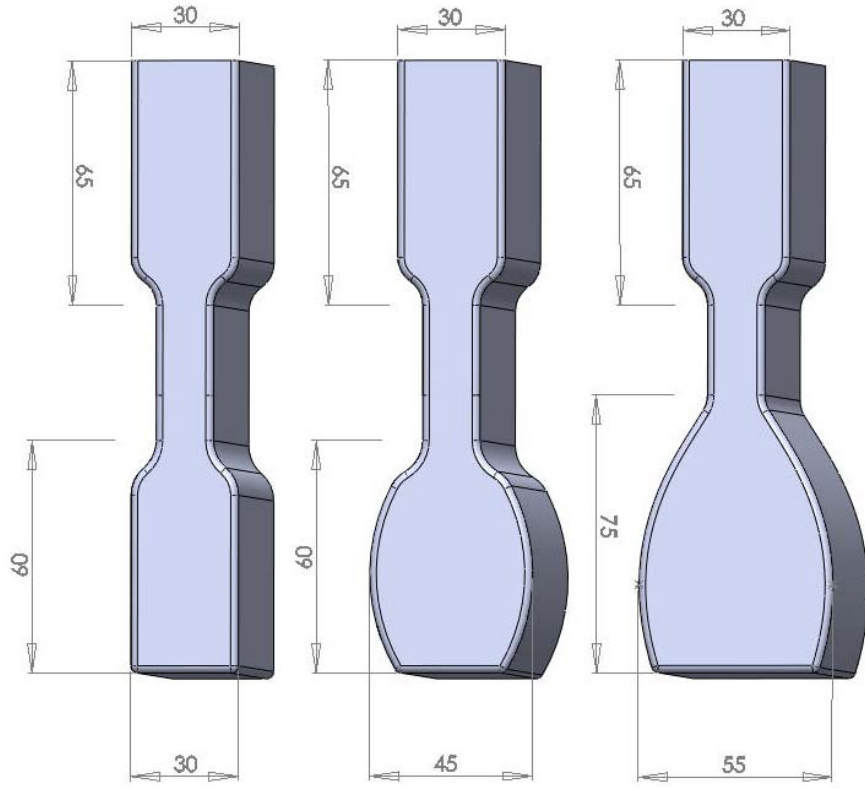
3.2. Dökümlerin Yapılışı

Bu çalışmada gerçekleştirilen döküm deneyleri ETİAL 177 alaşımının hacimsel beslenmesi sırasında katı sıvı aralığının (maşi bölgesinin) sıvı akışına karşı gösterdiği direncin o bölgedeki yüzde katı oranıyla olan ilişkisini belirlemek amacıyla yapılmıştır.

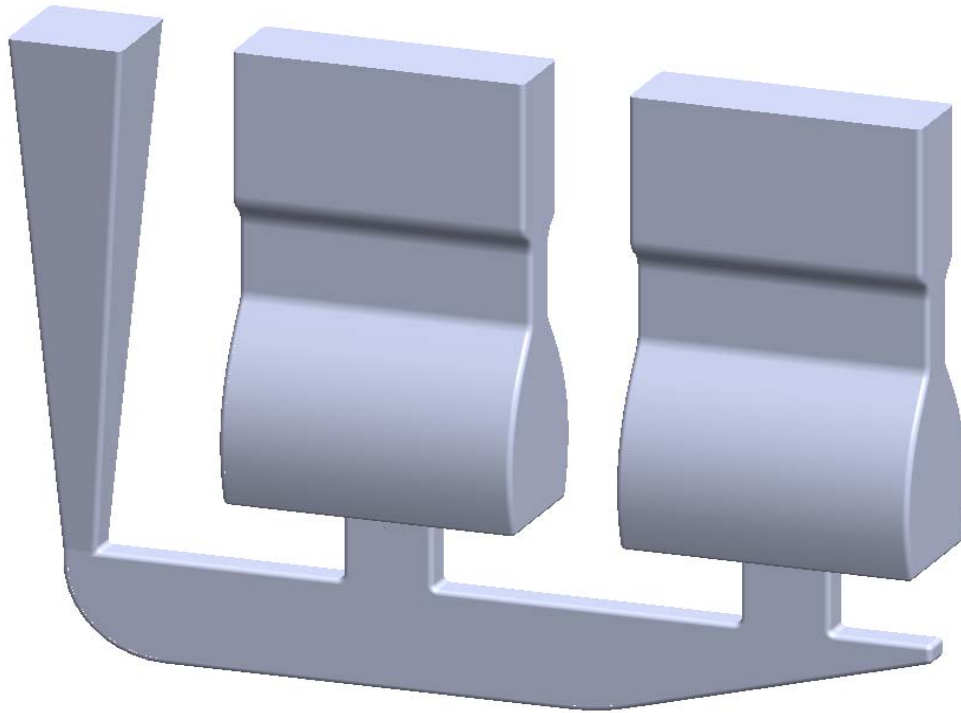
3.2.1. Döküm geometrisinin seçimi

Döküm geometrisi seçiminde rol oynayan en önemli etken dökümün herhangi bir bölgesinde tamamen beslenmesi imkansız bir sıcak nokta oluşturmaktır. Böylece yapılan tane inceltilmemiş (kaba taneli) ve iyi derecede tane inceltilmiş (ince taneli) döküm şartlarında bu sıcak noktanın ne derece beslene bildiği ölçülebilmektedir. 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. Yüzey çökmesi şeklinde oluşan kusurların boyutları tam olarak ölçülemediğinden seçilen geometride yüzey çökmesi şeklinde bir besleme kusuru da istenmemiştir.

Bu çalışma için belirlenen üç farklı döküm geometrisi Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Hazırlık aşamasında her üç geometri ile yapılan deneme dökümleri değerlendirilmiş ve Şekil 3.10'da gösterilen geometrinin en uygun geometri olduğuna karar verilmiş ve döküm deneyleri ve modellemeler tamamen bu geometri kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.9. Kullanılan modeller



Şekil 3.10. Sanal ortamdaki parça tasarımı

Bu çalışma için seçilen döküm geometrileri Şekil 3.9 ve 3.10'da görüldüğü gibi üst ve alt kısımları orta kısma göre daha kalın kesitli olarak tasarlanmıştır. Bunun sebebi kalıp içerisinde katılaşıp sıvı metalin katılaşması esnasında üst kısımda alt bölgeyi besleyecek sıvı metal olmasına rağmen orta kısımların ince kesitli olmasından dolayı kritik bir katı orandan sonra besleme yolunu kapatmasına sebep olmasıdır. Bu tasarım sayesinde isteyerek alt kısımda yetersiz beslemeye bağlı bir miktar hata oluşması sağlanmış ve bu hata boyutu incelenerek katı sıvı aralığının hangi kritik katı oranında tamamen geçirgenliğini kaybettiği (bloke olduğu) tespit edilmeye çalışılmıştır.

3.2.2. Kalıplama işleminin yapılışı

Şekil 3.10'da gösterilen geometri çift taraflı bir kalıplama plakasına figür olarak işlenerek kalıplama modeli oluşturulmuştur. Bu modelin kum kalıbın yarısını oluşturmak üzere bir açma dereceye bağlanmış hali Şekil 3.11'de görülmektedir.



Şekil 3.11. Model ve Açma Derece

Kalıplama işlemi sodyum silikat (camsuyu) reçine bağlayıcılı AFS 50 tane iriliğine sahip yıkanmış silis kumu ile yapılmıştır. Kumun hazırlanışı Şekil 3.12'de gösterilen 60 kg kapasiteli kum mikseri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Silis kumu içerisine ağırlıkça % 3 oranında reçine eklenerek 5 dakika karıştırılarak reçinenin kumu homojen bir şekilde kaplaması sağlanmıştır.



Şekil 3.12. Karıştırma mikserinde kumun hazırlanması

Mikserden alınan kum bekletilmeden modelin üzerine konulmuş ve model figürünü tamamen alabilmesi için bir lastik tokmakla sıkıştırılmıştır. Son olarak kum kalıba şiş yardımıyla açılan kanallardan Şekil 3.13'te ki gibi CO₂ gazı verilerek kalıbın sertleşmesi sağlanmıştır. Her iki kalıp parçası bu şekilde üretilerek kalıp boşluğunun düşey döküme uygun şekilde oluşması sağlanmıştır.



Şekil 3.13. Kumun CO₂ gazı ile Serleştirilmesi

3.2.3. Termokapıl 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 termokapıl yerleştirilmiştir. Termokapıl uçları özel termokapıl kabloları ile bir Agilent HP34970A entegreli veri toplama ve anahtar birimine bağlanarak birer saniye aralıklarla veri kaydetme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Kalıp Şekil 3.14’de görüldüğü Şekilde kapatılarak nemini almak üzere LPG aleviyle yüzeyleri ısıtılmış ve döküme hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.14. Kapatılmış kalıbın görünüşü

3.2.4. Alaşımın ergitilmesi ve döküm işlemi

ETİAL 177 alaşımı primer külçelerden yaklaşık 100-200 gramlık parçalar halinde doğranmış. Parçalar yağ vs. maddelerden arındırılmak üzere sıcak suyla yıkanarak temizlenmiştir. Parçalar ocak içerisinde bulunan 8 kg kapasiteli SiC pota içerisine Şekil 3.15’de görüldüğü gibi düzgün Şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 3.15. Ocağın Yüklenmesi

Ocak sıcaklığı $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ yükseltilecek alaşımın tamamen sıvı hale gelmesi sağlanmıştır. Bu aşamadan sonra alaşımın döküme hazır hale getirilmesi, curuf ve gazdan arındırılması için sırasıyla curuf temizleme ve gaz giderme işlemleri yapılmıştır. Bu işlemlere ait fotoğraf görüntüleri Şekil 3.16 ve 3.17’te verilmektedir. Curuf temizleme ve gaz giderme işlemleri Bölüm 3.1.2 ve 3.1.3’te detaylıca anlatılan prosedüre benzer şekilde yapıldığından bu detaylar burada tekrar verilmemiştir.



Şekil 3.16. Sıvı Metale Curuflaştırıcı toz Atılması



Şekil 3.17. Curuf Alma

Döküm işlemi tane inceltme ilavesi yapılmadan ve tane inceltme yapıldıktan sonra iki farklı kalıba yapılmıştır. İlkinde alaşımın sıcaklığı pota içinde 700 °C düşürülerek bu sıcaklıkta kalıba dökülmüştür. Dökülmüş bir kalıbın fotoğraf görüntüsü Şekil 3.18’de verilmektedir.



Şekil 3.18. Dökülmüş bir kalıbın görünüşü

Tane inceltmeli döküm için alaşımın sıcaklığı tekrar 750 °C a çıkarılmış. Bu sıcaklıkta sıvı metale ağırlıkça % 0,25 Al5Ti1B mastır alaşımı ilave edilmiştir. Bir önceki bölümde tanımlanan koni şeklindeki tane inceltme deneylerinden alınan sonuçlar minimum tane boyutunun 25 dakikalık bekletme süresiyle elde edildiğini göstermiştir. Buna göre tane inceltmeli döküm için Al5Ti1B tane inceltici potaya ilave edildikten sonra 25 dakika beklenerek tane inceltmeli döküm yapılmıştır.

Dökümler kalıp içerisinde oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra Şekil 3.19'da görüldüğü gibi kalıp açılarak parça çıkartılmış. Döküm parçalar üzerinde gerekli incelemelerin yapılabilmesi için uygun biçimde kesilerek numuneler alınmıştır.

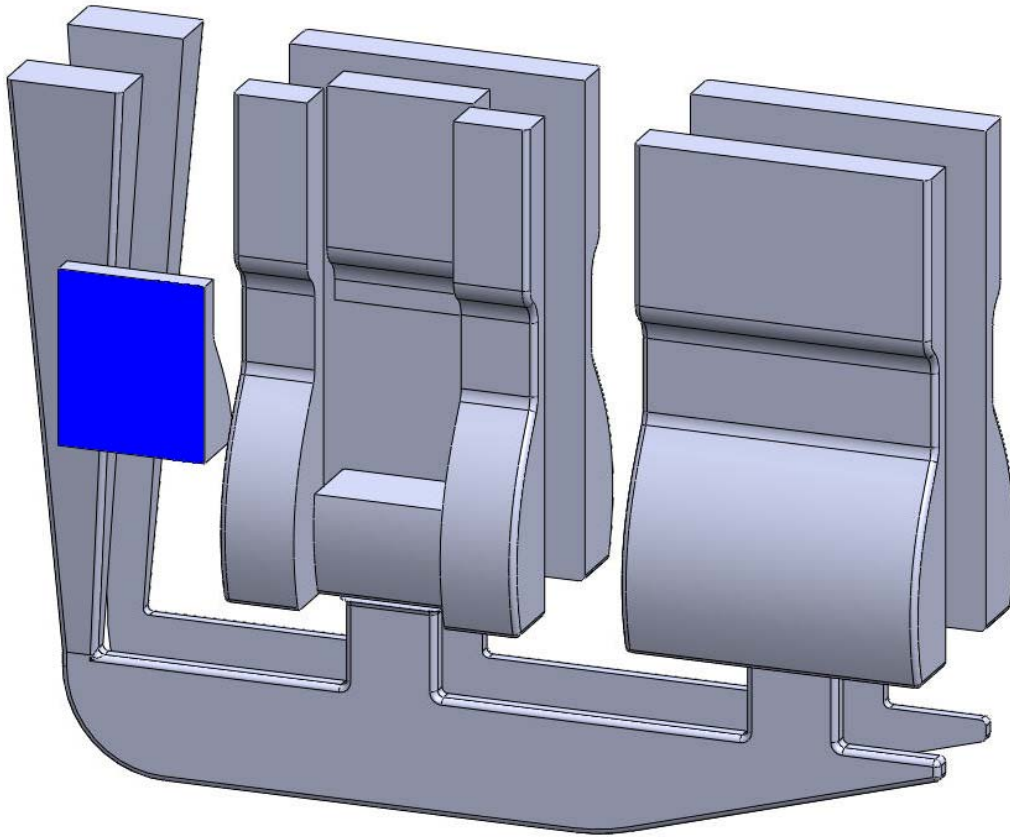


Şekil 3.19. Kalıbın Bozulması

3.2.5. Numunelerin hazırlanması

Oda sıcaklığına soğuyan dökümlerin önce yolluk bağlantıları kesilerek her bir yolluğa bağlı iki döküm parça serbest hale getirilmiş daha sonra her bir döküm parça düşey eksende geniş yüzeyi ortadan simetrik olarak ikiye ayrılacak şekilde elektrikli şerit testere ile kesilmiştir. Bu yüzeylerde göz ve büyüteç ile yapılan kaba incelemeler sonucunda porozite içeren bölgeler belirlenmiştir. Porozite ölçümleri için bu bölgeyi kapsayacak şekilde her bir dökümden iki numune Şekil 3.20'de görüldüğü gibi kesilerek çıkartılmıştır.

Çıkartılan numunenin boyutları $60 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} = 3000 \text{ mm}^2 = 30 \text{ cm}^2$ lik bir yüzeyin incelenmesine olanak vermektedir. İnceleme yüzeyi önce 100 grit zımpara ile tesviye edilmiş. Daha sonra sırası ile incelen zımparalar kullanılarak döner disk üzerinde yüzey 1200 grit zımparaya kadar zımparalanmıştır. Bu aşamadan sonra alümina emdirilmiş keçe kullanılarak yüzey parlatılmış. Son olarak parlatılan yüzeyler incelemeye alınmıştır.



Şekil 3.20. Numunenin döküm parçadan kesilerek çıkarılmasını gösteren model

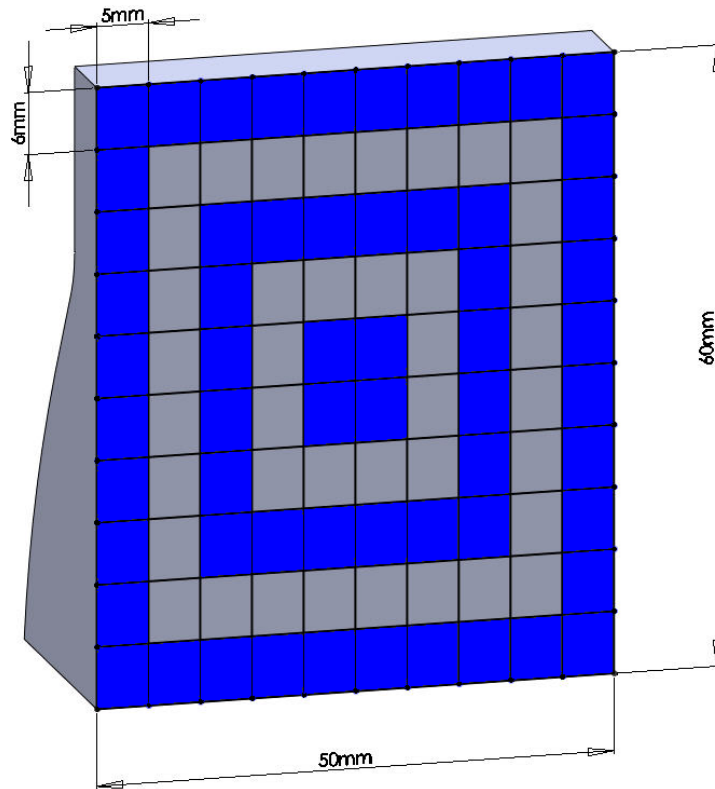
3.2.6. Numunelerin incelenmesi

Döküm yüzeylerinin incelenmesinde hedeflenen amaç o yüzeyin temsil ettiği döküm kesitinde (bu kesit dökümün tam merkezinden geçen bir düzlemdir) yetersiz beslemeye bağlı olarak oluşan porozite oranının ölçülebilmesidir. Bu ölçüm bir görüntü analiz programı yardımı ile otomatik olarak yapıldığından öncelikle yüzeylerin uygun büyütmeyle fotoğraflanması gerekmektedir. Bu çalışmada her bir inceleme yüzeyi Şekil 3.21’de gösterildiği gibi 100 adet fotoğraf karesi ile görüntülenerek imaj analiz programına aktarılmıştır.

Fotoğraf çekiminde her bir karede daha fazla bir alan tarayabilmek için normal ışık mikroskobu yerine NIKON SMZ 800 stereoskop kullanılmıştır. Bu stereoskopa bağlı Clemex dijital kamera yardımıyla alınan görüntüler Clemex Vision Lite görüntü analiz programına aktarılmış ve bu program yardımı ile her bir fotoğraf karesindeki

yüzde porozite oranı belirlenerek Şekil 3.21’de görülen numune yüzeyinde bir porozite haritası çıkartılmıştır.

Yüzeylerdeki makro porozite dağılımının bir bütün halinde tek bir karede gözümüzle gördüğümüz gibi görüntülenebilmesi için detaylı olarak mikroskopta incelenen tüm döküm yüzeyleri bir tarayıcıda taranarak görüntülenmiştir.

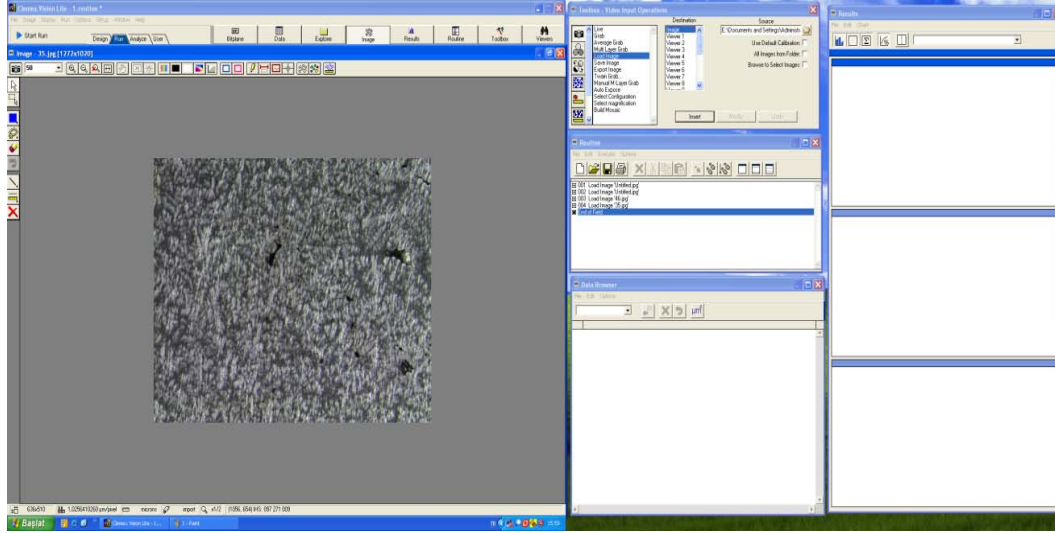


Şekil 3.21. Fotoğrafların çekildiği bölgeler

3.2.7. Mikro yapı resimlerinin imaj analiz programında değerlendirilmesi

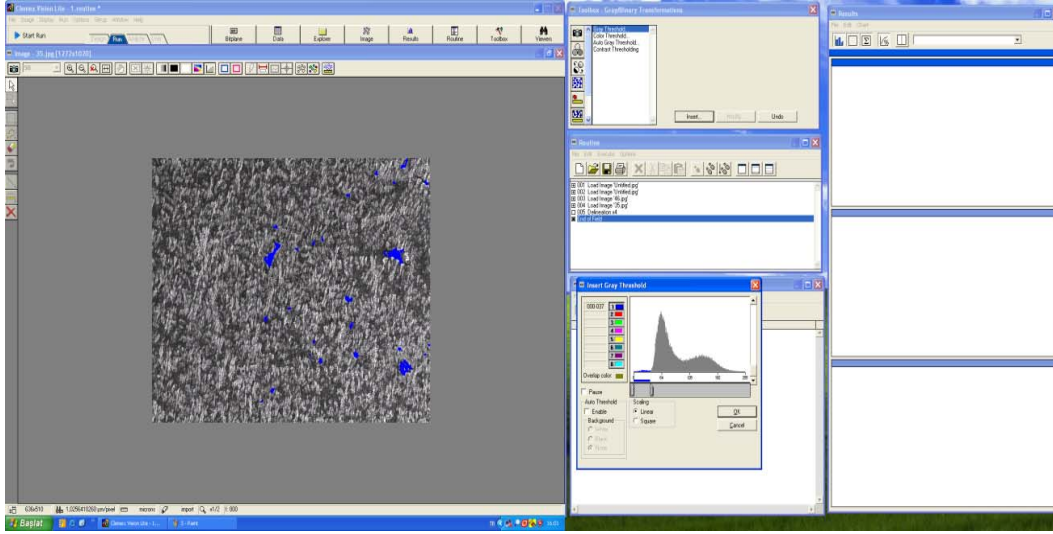
Clemex İmage Analiz programı; çekilen makro veya mikro yapı resimlerini renk tonlamasına göre ayırt ederek ölçüm yapmaktadır. Mikro yapı resmi üzerinde porozite bölgesi siyah renkte görüleceğinden bu bölgeyi program otomatik olarak algılayarak istenilen renk tonuyla boyamaktadır. Program bu renk tonuyla boyalı alanların toplamını toplam alana oranlayarak o resim karesindeki yüzde porozite miktarını belirlemektedir.

Bir mikro yapı fotoğrafı üzerinden görüntü analiz programı ile porozite ölçümü genel olarak iki aşamada yapılmaktadır. Birinci aşamada porozite oranı ölçülecek mikroyapı resmi Şekil 3.22’de görüldüğü gibi Clemex Image analiz programına yüklenir.



Şekil 3.22. Bilgisayar ortamındaki yüklenmiş fotoğraf görüntüsü

İkinci aşamada ise Sharpen seçeneğiyle renk kontrastlığı daha da belirginleştirilen mikroyapı resmi gray threshold seçeneğiyle renk farklılıklarına göre Şekil 3.23’te görüldüğü gibi renklere ayrılmıştır. Şekil 3.23’te görüldüğü gibi poroziteli bölge mavi renge boyanarak belirlenmiştir. Bu işlemin sonunda resim toolbox menüsündeki area percent seçeneğine tıklanarak porozitesinin yüzde kaç olduğunu results menüsünden görülmektedir.



Şekil 3.23. Porozitelerin renklendirildiği görüntü resmi

3.3. Simülasyon (Modelleme)

Bu çalışmada 3 boyutlu bir ticari döküm simülasyon programı olan SolidCast yazılımı kullanılmıştır. Program sonlu fark(Finite Difference) metodu ile ısı transfer ve faz dönüşüm hesaplamalarını 3 boyutlu döküm ve kalıp kesitlerinde yaparak bir döküm parçanın katılaşmasını modelleyebilmektedir.

Bu çalışmada simülasyon kullanımının en temel amacı fiziksel olarak gerçek döküm şartlarında yapılan dökümlerin simülasyon ortamında sayısal olarak birebir modellenmesini sağlamaktır. Böylece gerçek dökümlerde ortaya çıkan yetersiz beslemeye bağlı porozite kusurlarının simülasyon programında CFS olarak tanımlanan maşi bölgesi geçirgenlik değerini değiştirmek suretiyle simülasyon programında bu değer gerçek karşılığı bulunabilecektir.

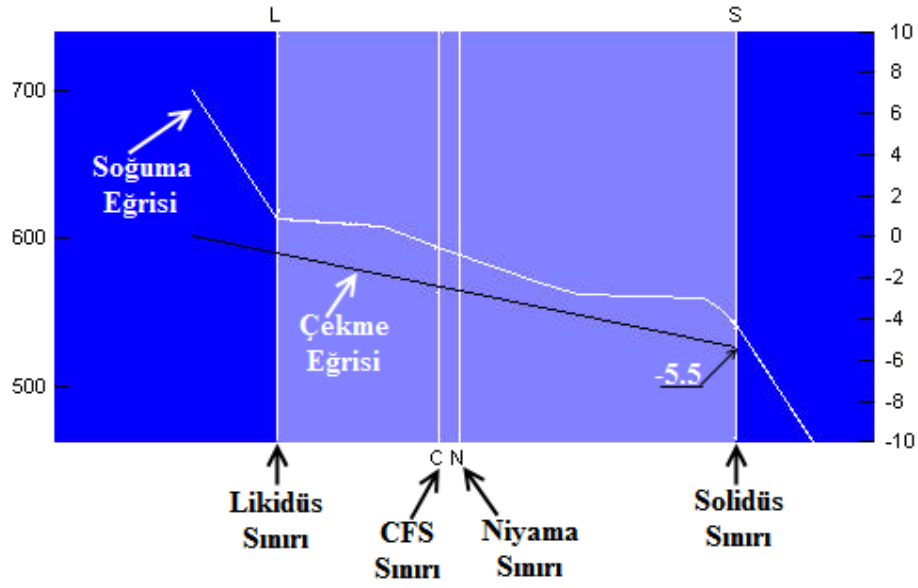
3.3.1. Döküm- kalıp geometrisinin ve malzeme özelliklerinin simülasyon programına girilmesi

Bölüm 3.2.1'deki Şekil 3.10'da görülen döküm geometrisi SolidWorks programında katı model olarak oluşturulduktan sonra STL formatına çevrilerek döküm simülasyon programına aktarılmış. Bu aşamadan sonra döküm alaşımı ve kalıp malzemesinin türü ve termo fiziksel özelliklerinin tanımlanması yapılmıştır. Döküm alaşımının termo fiziksel değerleri simülasyon programının veri tabanında Etial 177 alaşımına karşılık gelen ISO A 319 alaşımı için verilen değerler Tablo 3.4'de gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Simülasyonda kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri

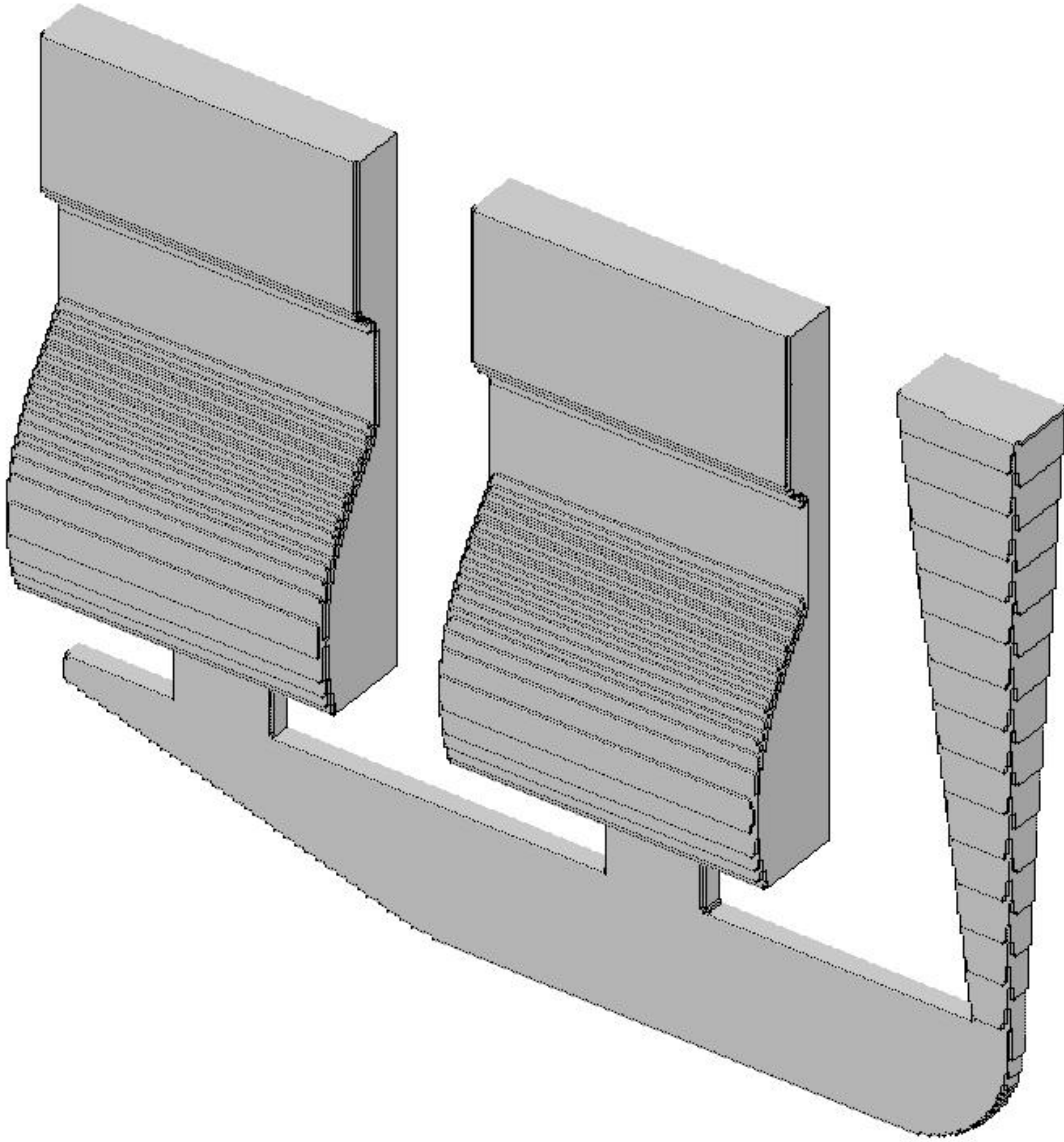
Döküm Modelindeki Malzemenin Cinsi	Isıl iletkenlik (W/m.K)	Özgül ısı J/kg.K	Yoğunluk kg/m ³	Başlangıç Sıcaklığı (°C)
ETİAL 177	159,1	962,3	2684,6	700
Silis Kumu	0,59	1075,28	1521,71	26,6

Simülasyon programına girilmesi gereken diğer sınır şartları alaşımın soğuma eğrisi, alaşımın CFS değeri ve alaşımın yüzde hacimsel çekme oranıdır. Bunlardan soğuma eğrisi dökümlere yerleştirilen temokapılar yardımıyla ölçülen zaman-sıcaklık verilerinden yararlanılarak çizilmiş ve programa girilmiştir. Programa Etial 177 alaşımı için girilen soğuma eğrisi Şekil 3.24'te gösterilmiştir. Şekil 3.24'te ayrıca diğer bir sınır şartı olan CFS sınırı görülmektedir. Örneğin bu çalışmada CFS sınırınının 45 olarak seçildiği varsayılmıştır. Son olarak sıvı alaşımın hacimsel çekme oranını belirleyen çekme eğriside şekil üzerinde görülmekte ve alaşımın % 100 oranında katılaştığı noktada yüzde çekme oranı bu alaşım için % 5,5 olarak belirtilmektedir.



Şekil 3.24. Etial 177 alaşımı için girilen soğuma eğrisi

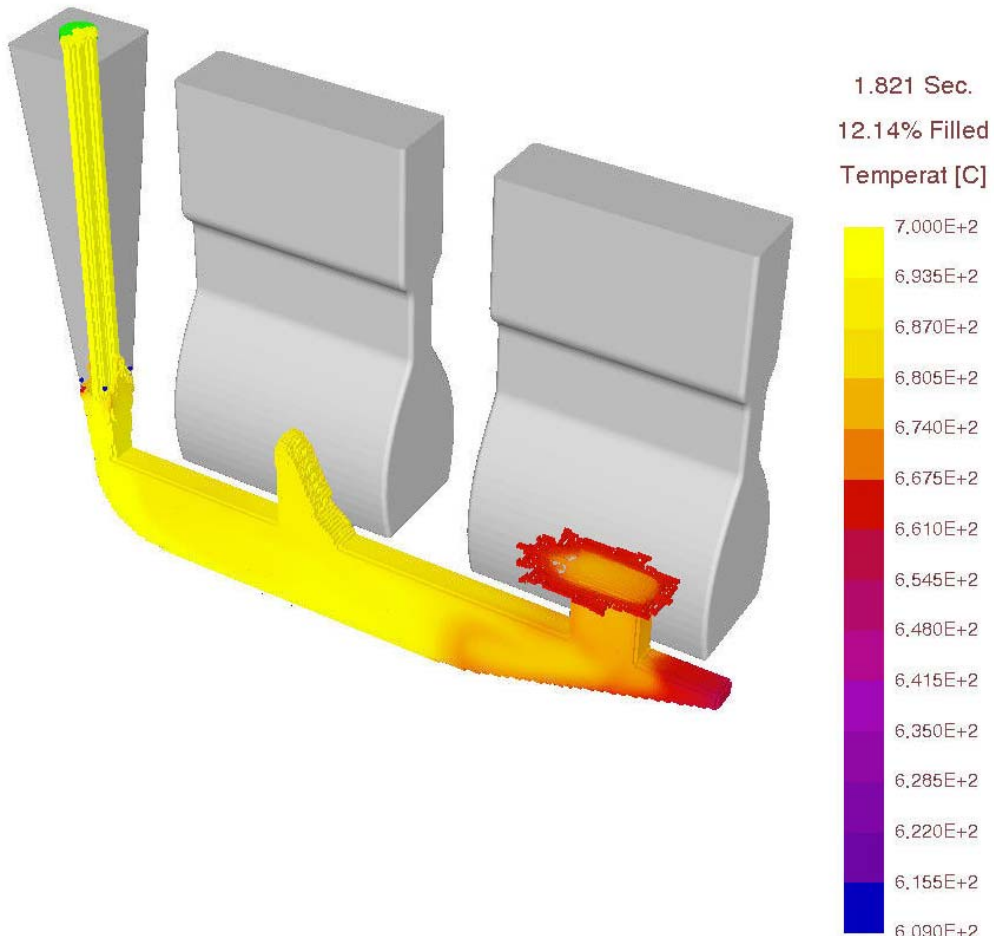
Bu aşamadan sonra katı model geometrisinin meş edilerek girilen sınır şartlarının her bir meş elemanı için simülasyon programında çözümlenmesi sağlanmıştır. Şekil 3.25'te döküm katı modelinin meş edilmiş hali gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi daha az bilgisayar hafızasını kullanmak ve daha hızlı çözüme ulaşmak için döküm modelinin simetri düzleminde kesilmiş bir yarısı meş edilmiştir.



Şekil 3.25. Mesh görüntüsü

3.3.2. Simülasyon programında kalıbın doldurulması ve dökümün katılaşması

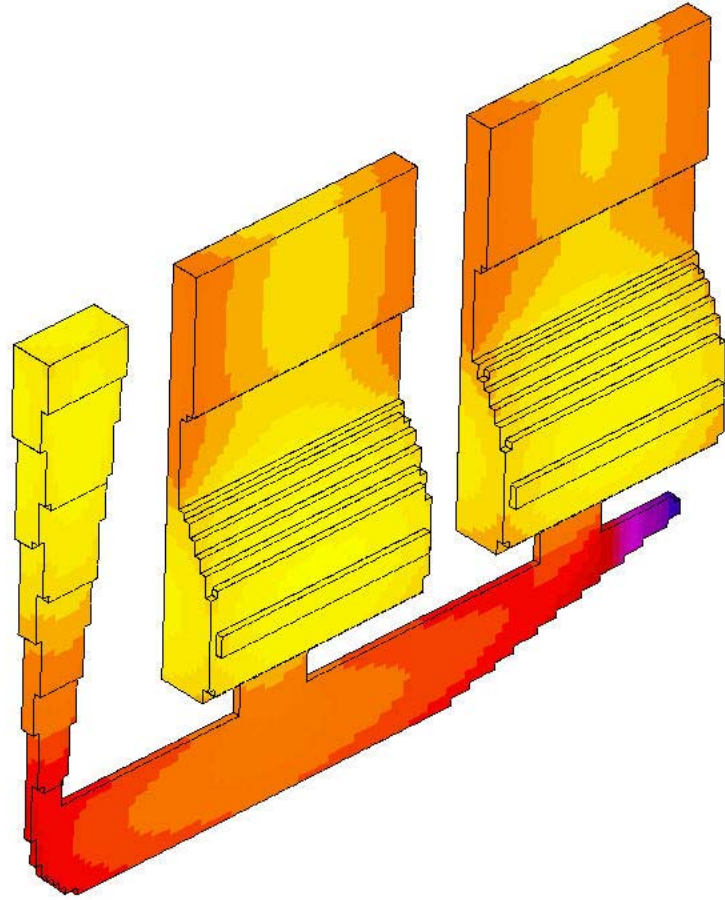
SolidCast simülasyon programında kalıp doldurma işlemi için ayrı bir yazılım olan FlowCast modülü kullanılmaktadır. FlowCast akışkanlar dinamiği kıstaslarına göre sıvı metali kalıp boşluğuna doldururken türbülans, eksik doldurma, soğuk birleşme ve basınç vb. gibi faktörleri de hesaplamaktadır. Şekil 3.26'da simülasyon programında kalıbın doldurulmasını gösteren bir görüntü verilmiştir.



Şekil 3.26. FlowCast programında kalıbın doldurulması

Kalıp doldurulduktan sonra SolidCast programı dökümü soğutmaya geçer ve tüm döküm kesitleri katılaşmaya kadar soğutma işlemine devam eder. Katılaşma tamamlandığı anda program otomatik olarak sonlanır ve döküm parça üzerinde simülasyon sonrası analizlere geçilir. Şekil 3.27’de dökümün soğumasına ait bir görüntü verilmiştir.

Time: 1.383 Min. Max Cast Temp: 608.583C Min Cast Temp: 498.752C
Time Step: 2532 Max Mold Temp: 599.666C Min Mold Temp: 26.667C
Percent Solid: 0.00 %
Calculating volumetric feeding



Şekil 3.27. Simülayondan alınan soğuma görüntüsü

BÖLÜM 4. SONUÇLAR

Deneysel çalışmalardan ve bilgisayar modellemelerinden elde edilen sonuçlar üç alt başlık altında toplanmıştır. İlk olarak tane inceltme deneylerinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirmesi verilmiştir. Daha sonra tane inceltme deney sonuçlarının bir kısmının da kullanıldığı normal dökümlerden alınan sonuçlar ve değerlendirmeleri sunulmuştur. Son olarak döküm simülasyon programı ile yapılan modelleme sonuçları ve bu sonuçların gerçek dökümlerle karşılaştırılmasından elde edilen sonuçlar ve bunların değerlendirmeleri verilmiştir.

4.1. Tane İnceltme Deney Sonuçları

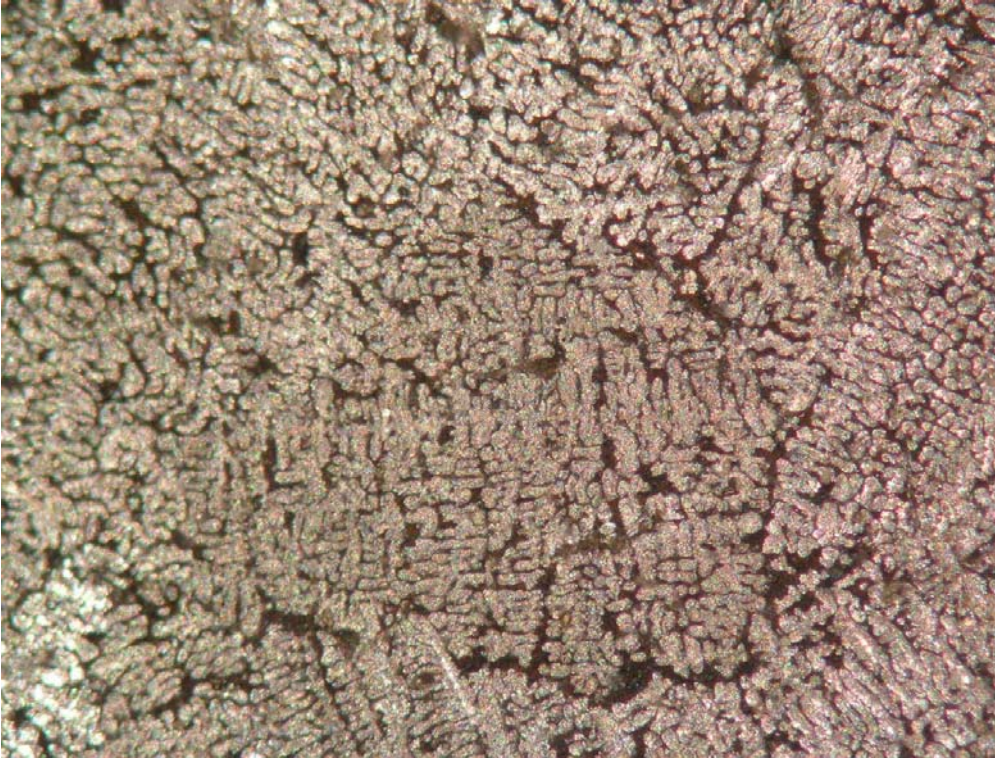
4.1.1. Tane yapıları ve boyutları

Koni şeklinde dökülen standart ALCAN tane inceltme numunelerinin yüzeyleri Bölüm 3'te verilen tekniklerle incelenerek ortalama tane boyutu dağılımı her bir numune için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

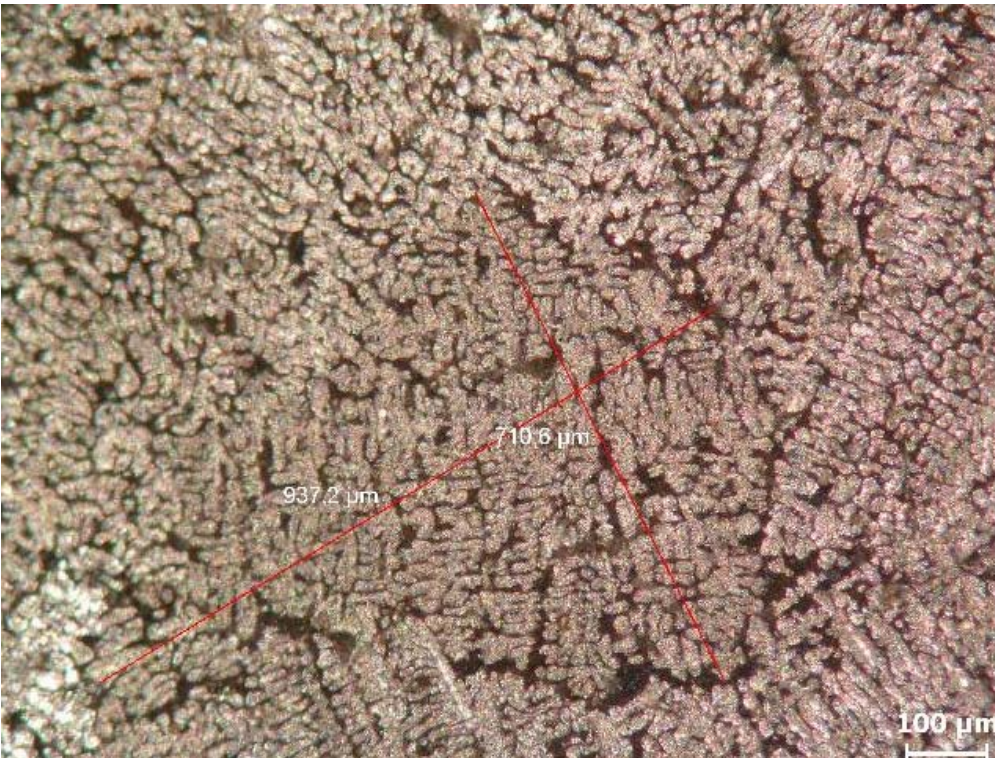
Şekil 4.1a'da Etial 177 alaşımına tane inceltici mastır alaşımı ilave edilmeden alınan sıvı alaşım ile elde edilen döküm numunesinin tane yapısı gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi tane yapısı dendritik bir görünüme sahip olup dendritlerin boyları yaklaşık 1 mm uzunluğa kadar çıkabilmektedir. Şekil 4.1b'de ise bazı tanelerin görüntü analiz programında ölçülmesini gösteren ölçü çizgileri ile görüntülenmiş hali verilmiştir. Her bir resim karesinde bulunan taneler bu yöntem ile ölçülerek o resmin temsil ettiği bölgedeki ortalama tane boyutu bulunmuştur. Tane inceltici ilave edilmemiş olan bu test numunesinde ortalama tane boyutu 823,9 µm olarak hesaplanmıştır.

Tane inceltici olarak AL5Ti1B mastır alaşımının ilave edilmesinden 5 dakika sonra alınan en düşük bekletme süreli tane inceltme numunesine ait tane yapısı görüntüsü Şekil 4.2a – b’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi tane inceltici mastır alaşımı ilave edildikten 5 dakika gibi kısa bir süreden sonra bile tane yapısı önemli ölçüde değişikliğe uğramıştır. Bir önceki şekilde gösterilen normal döküm Etial 177 tane yapısına göre tane inceltmeli Etial 177 tane yapısı daha yuvarlak (global) ve daha küçüktür. Yapılan tane boyutu ölçümleri Şekil 4.2b’de görüldüğü gibi tane boyutlarının 600-800 μm arasında değiştiğini göstermektedir. Numune yüzeyinden görüntülenen tüm tanelerin ortalama tane boyutu ise 794,1 μm olarak hesaplanmıştır.

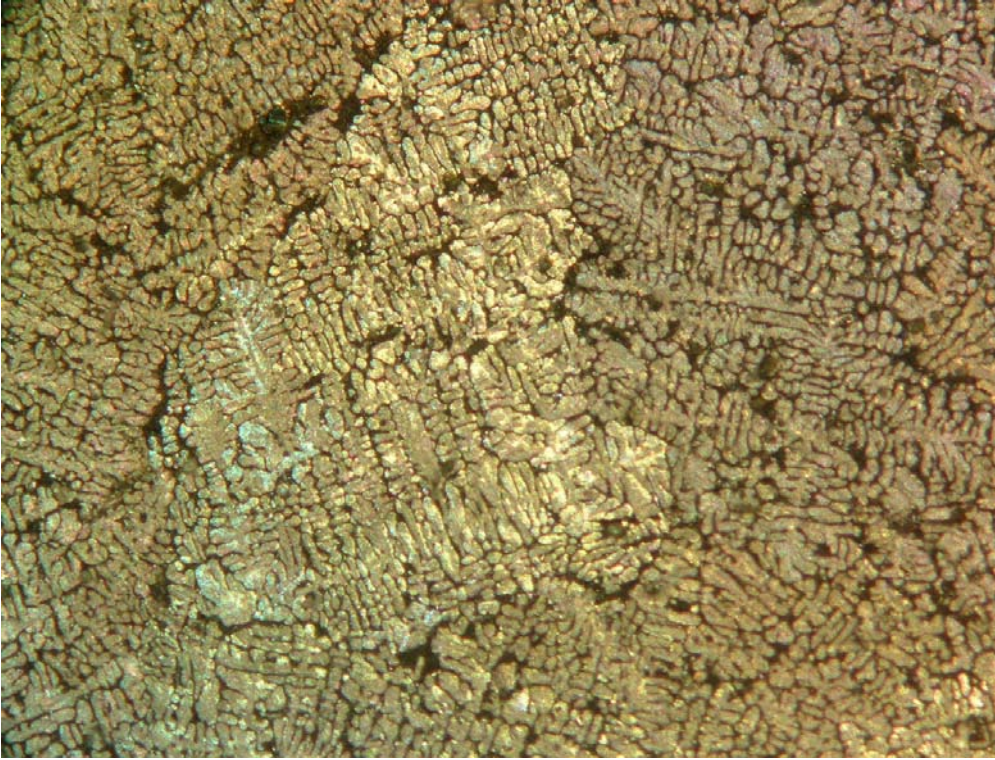
Şekil 4.3a ile Şekil 4.11b arasında sırası ile 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 ve 50 dakikalık bekletme süreleriyle alınan tane inceltme numunelerine ait tane yapıları ve tane boyutları gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi bekletme süresi arttıkça tane boyutu belirli bir süreye kadar küçülmekte ve süre uzadıkça tane boyutu tekrar büyüme eğilimine girmektedir.



Şekil 4.1a. Al5Ti1B ilavesiz döküm mikro yapısı (ölçüştüz)



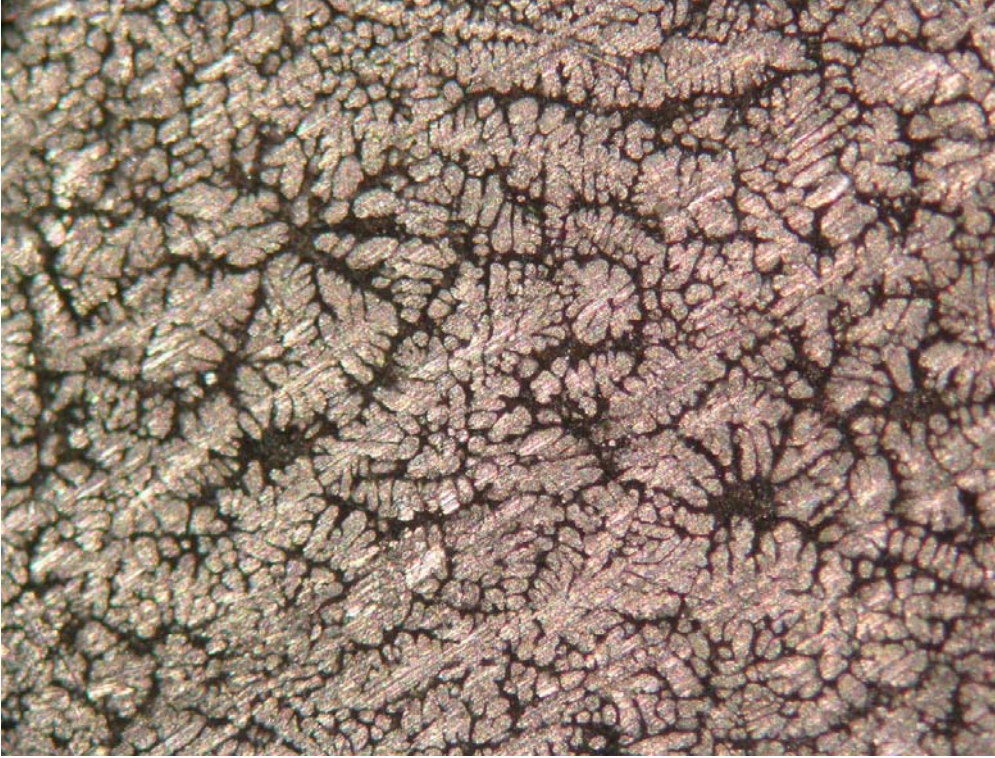
Şekil 4.1b. Al5Ti1B ilavesiz döküm mikro yapısı (ölçülü)



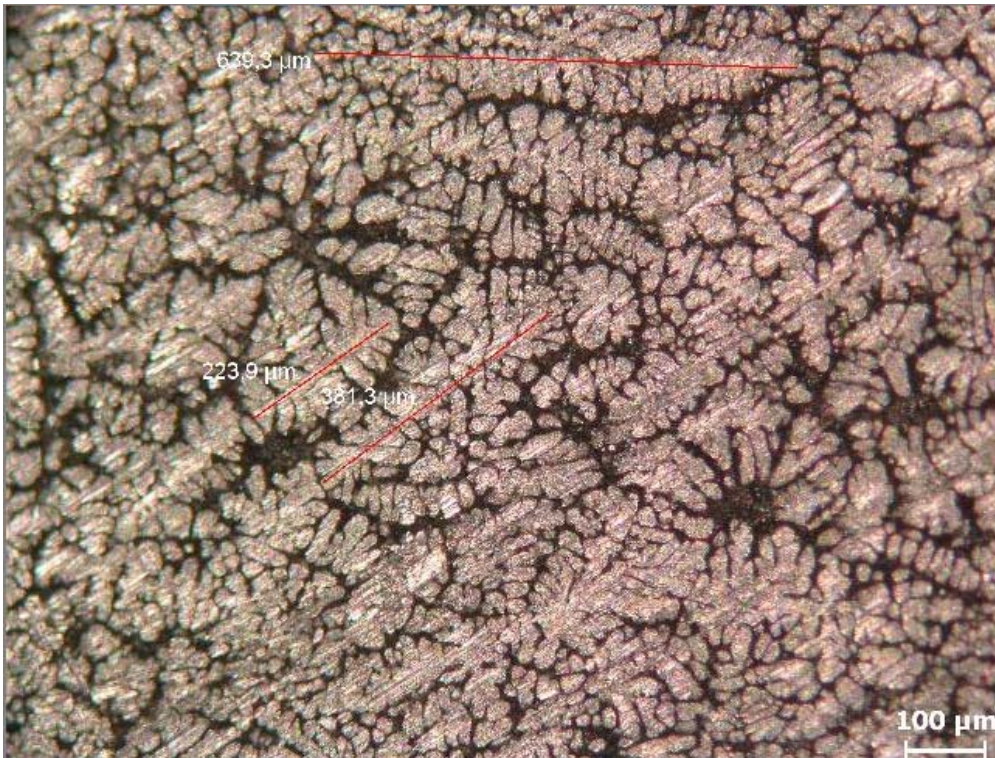
Şekil 4.2a. Al₅Ti₁B ilavesinden 5 dakika sonra (ölçüsüz)



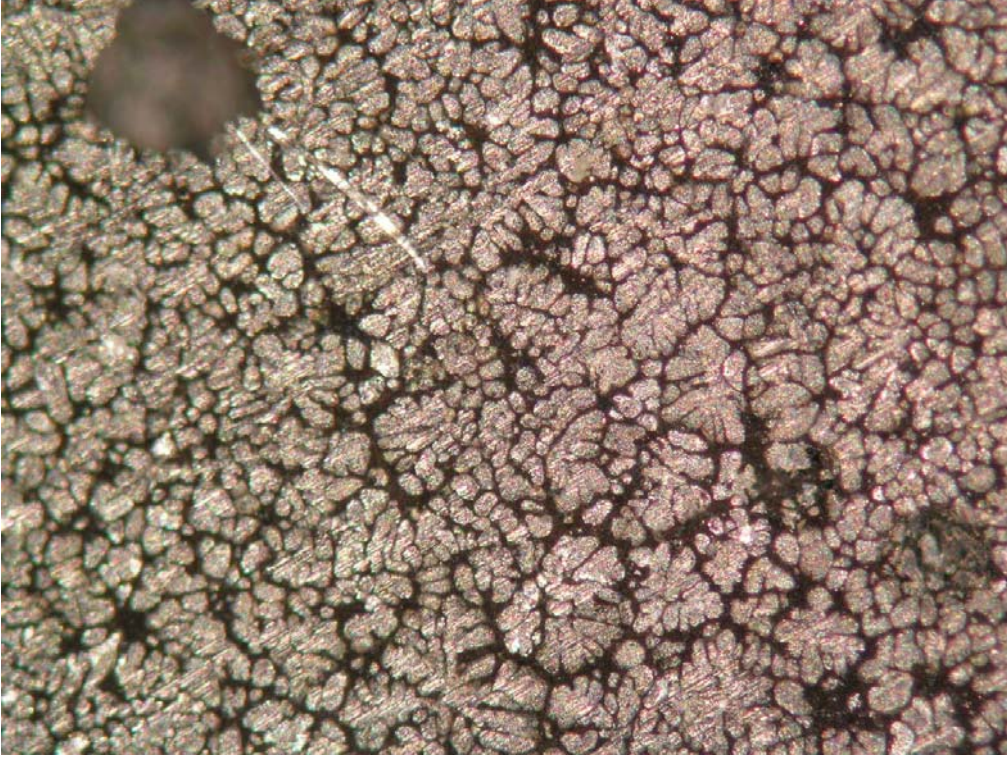
Şekil 4.2b. Al₅Ti₁B ilavesinden 5 dakika sonra (ölçülü)



Şekil 4.3a. Al5Ti1B ilavesinden 10 dakika sonra (ölçsüz)



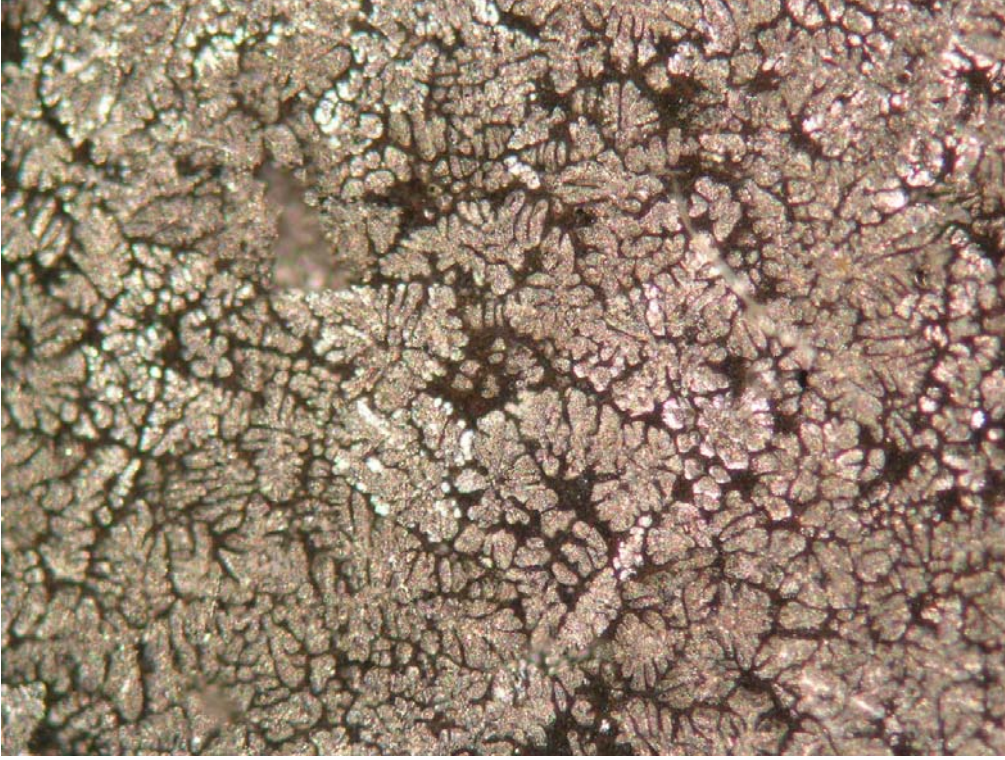
Şekil 4.3b. Al5Ti1B ilavesinden 10 dakika sonra (ölçülü)



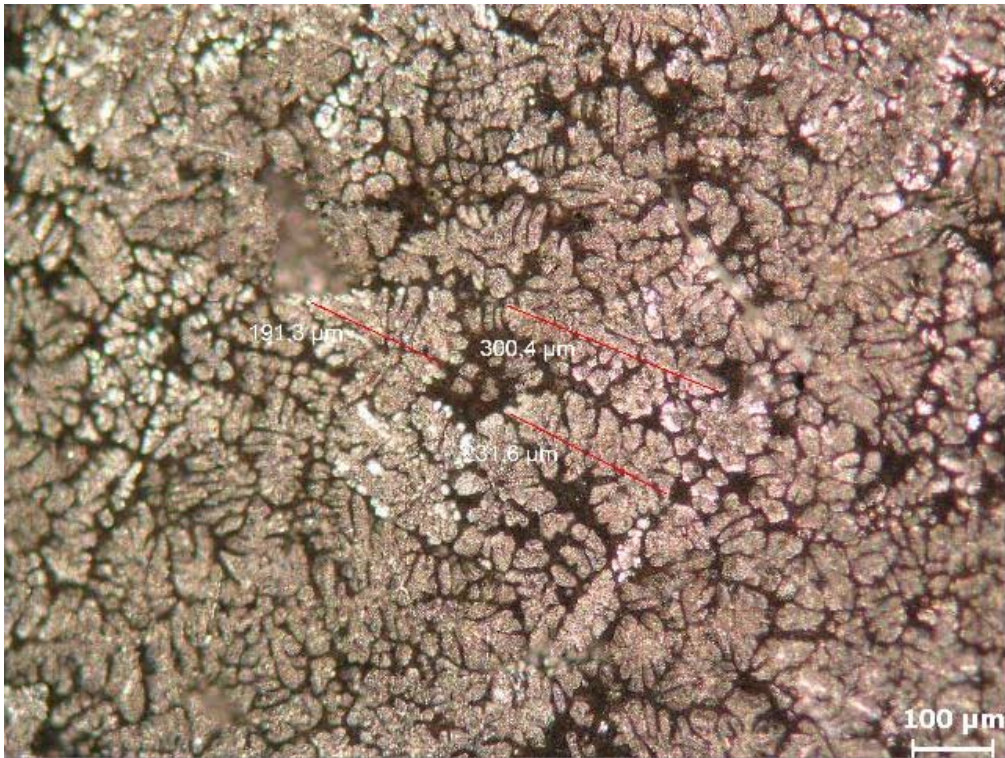
Şekil 4.4a. Al5Ti1B ilavesinden 15 dakika sonra (ölçüsüz)



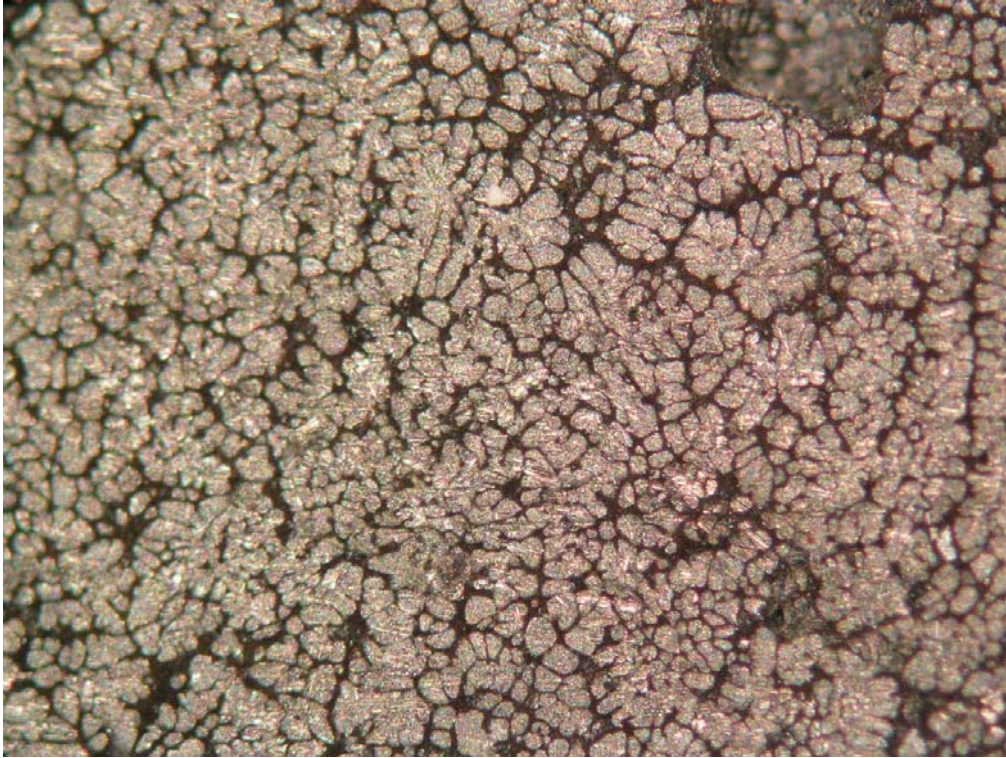
Şekil 4.4b. Al5Ti1B ilavesinden 15 dakika sonra (ölçülü)



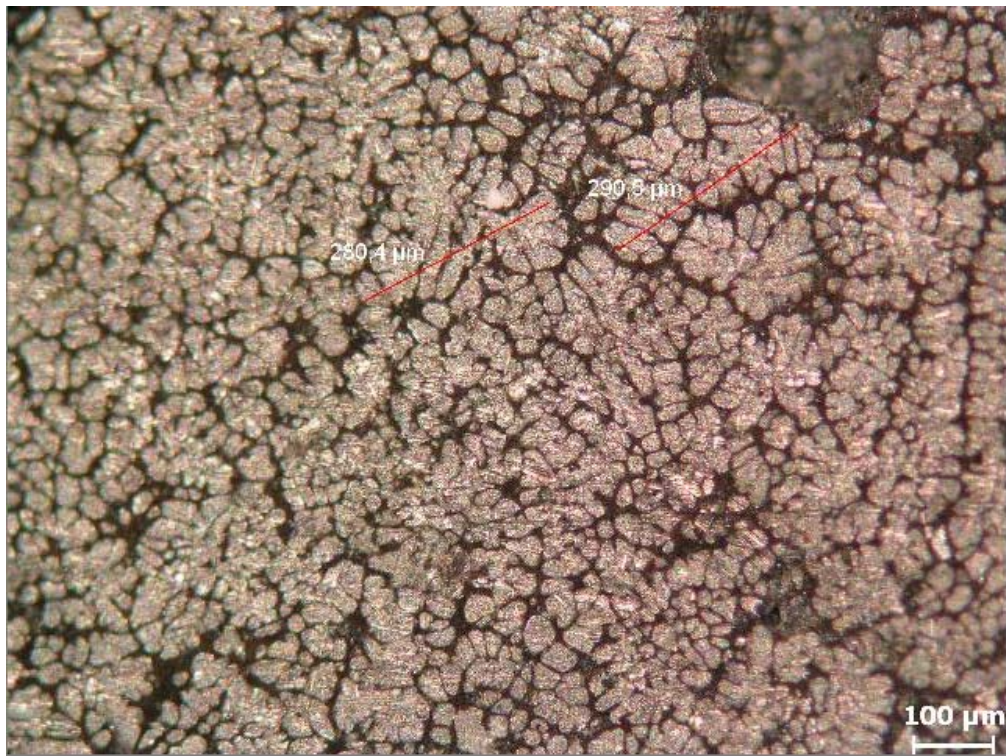
Şekil 4.5a. Al5Ti1B ilavesinden 20 dakika sonra (ölçüsüz)



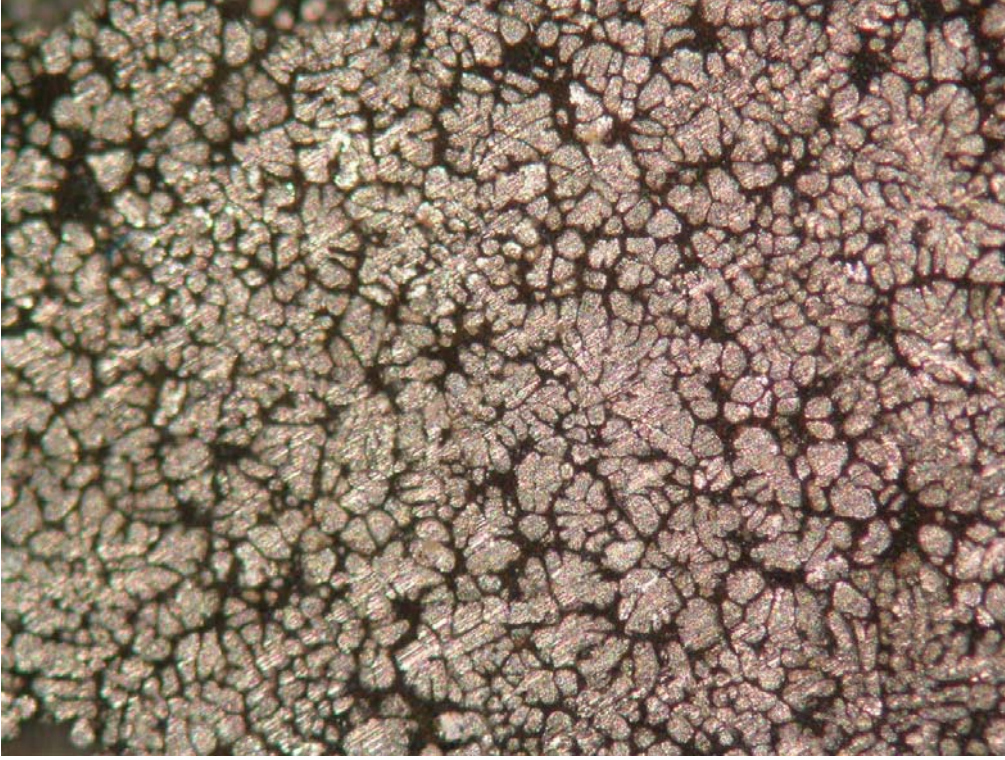
Şekil 4.5b. Al5Ti1B ilavesinden 20 dakika sonra (ölçülü)



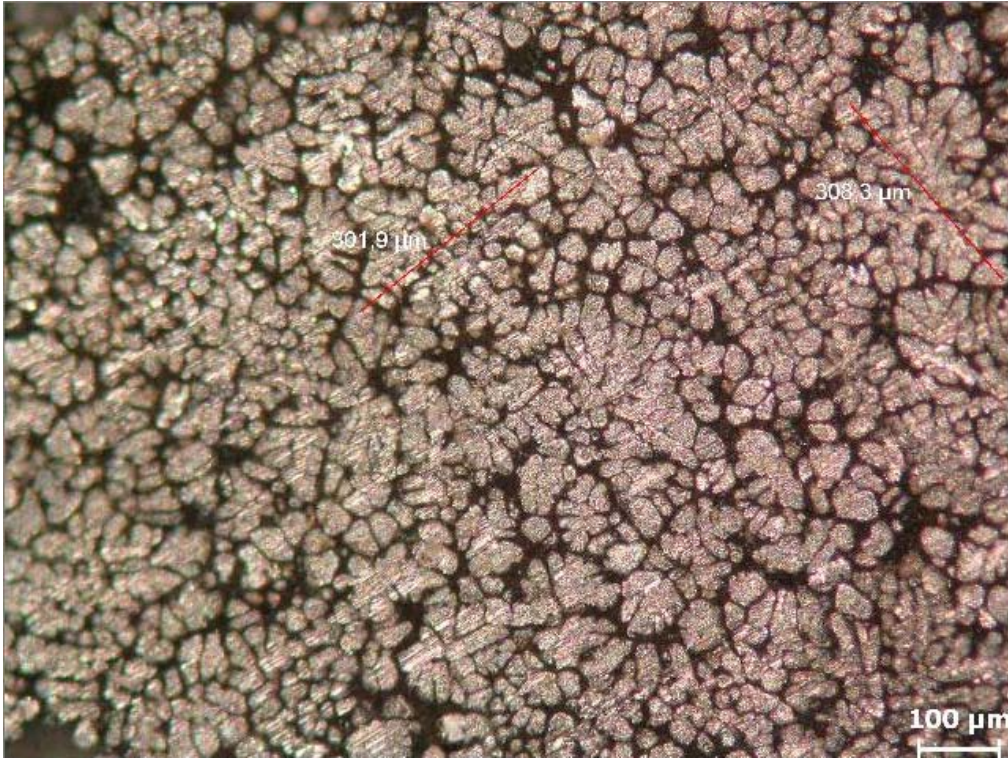
Şekil 4.6a. Al5Ti1B ilavesinden 25 dakika sonra (ölçsüz)



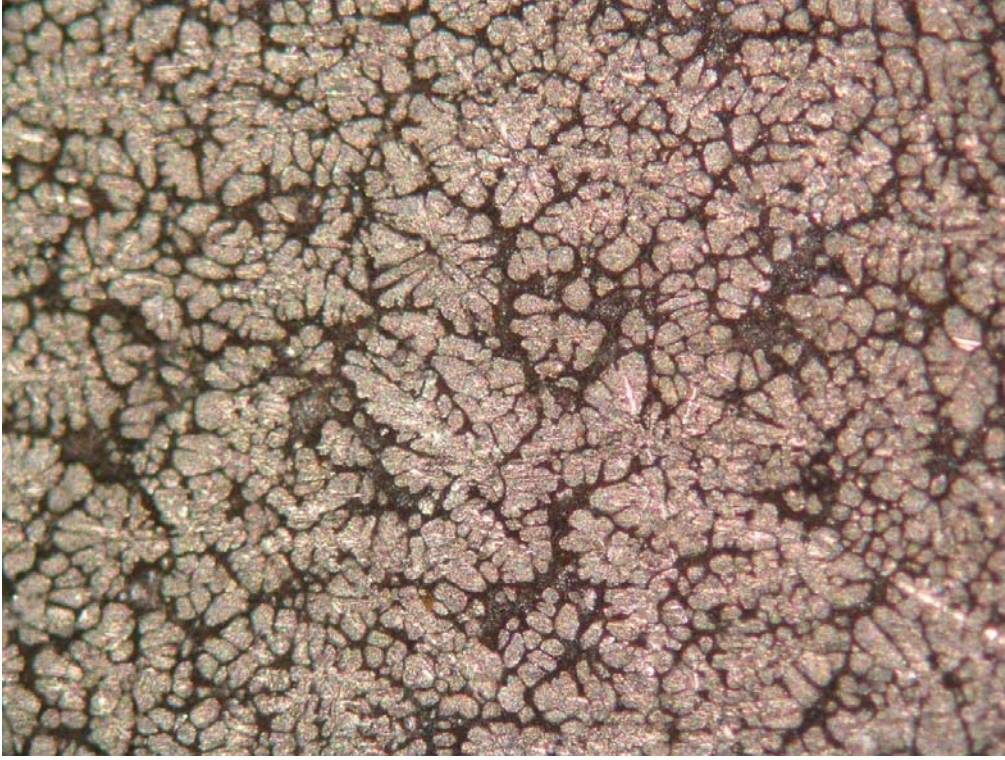
Şekil 4.6b. Al5Ti1B ilavesinden 25 dakika sonra (ölçülü)



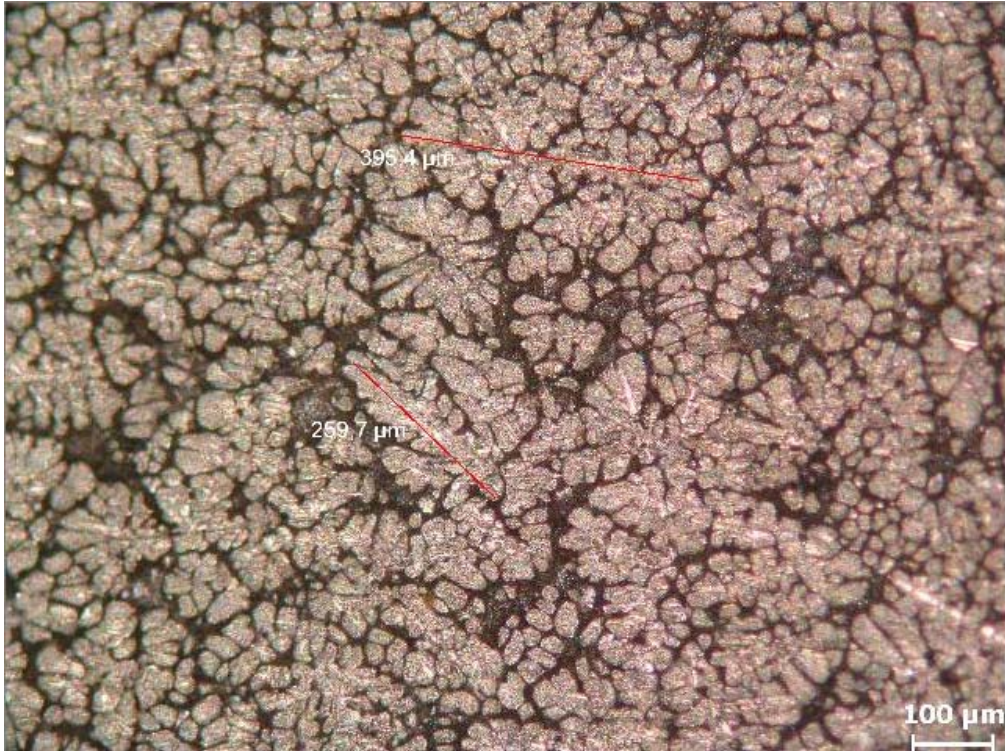
Şekil 4.7a. Al5Ti1B ilavesinden 30 dakika sonra (ölçüsüz)



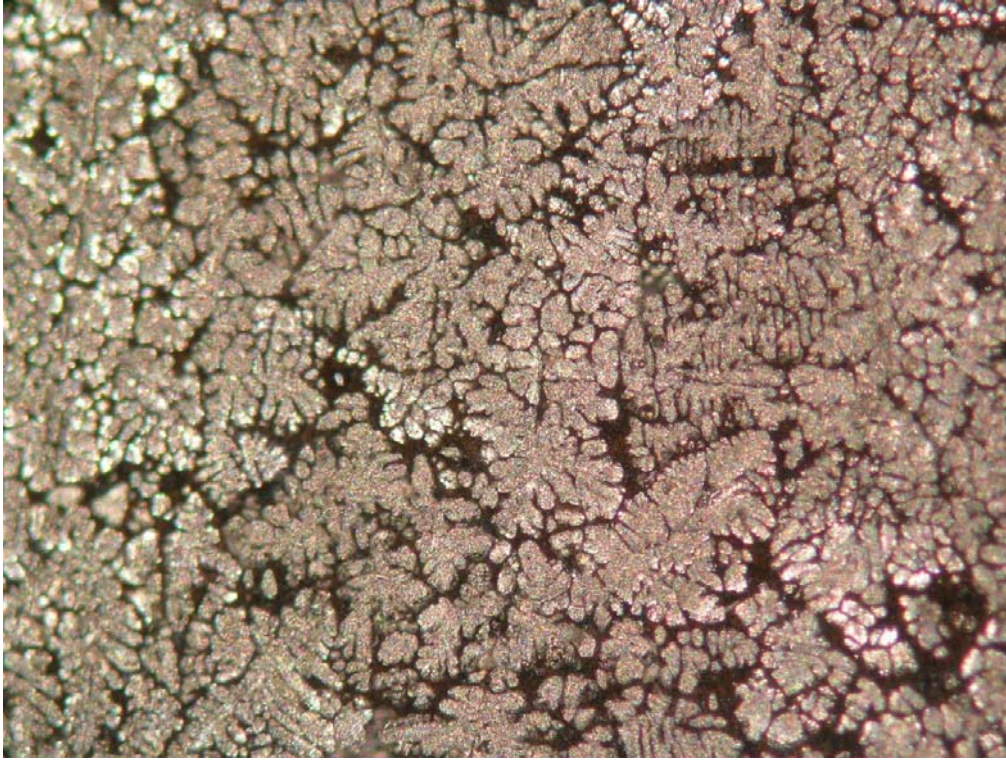
Şekil 4.7b. Al5Ti1B ilavesinden 30 dakika sonra (ölçülü)



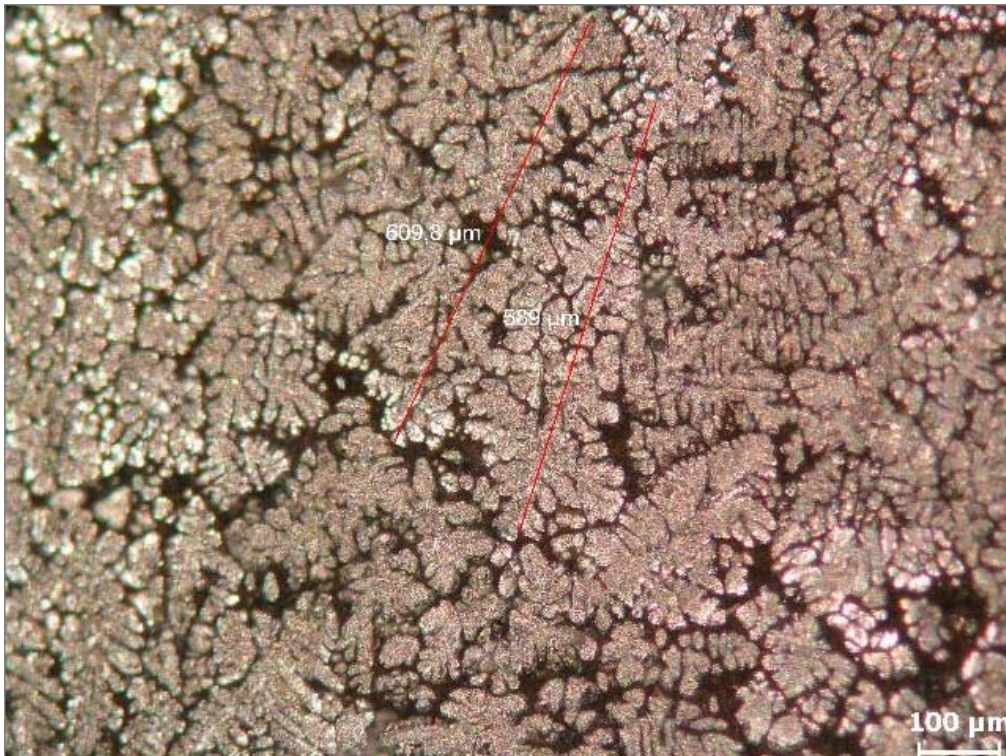
Şekil 4.8a. Al5Ti1B ilavesinden 35 dakika sonra (ölçsüz)



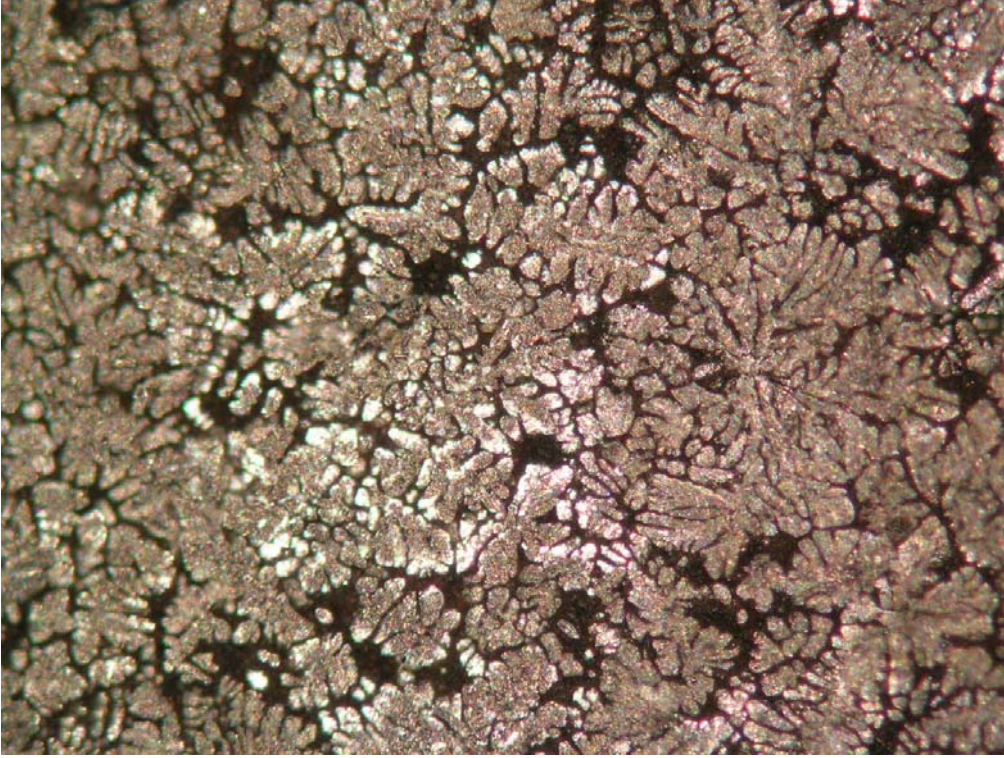
Şekil 4.8b. Al5Ti1B ilavesinden 35 dakika sonra (ölçülü)



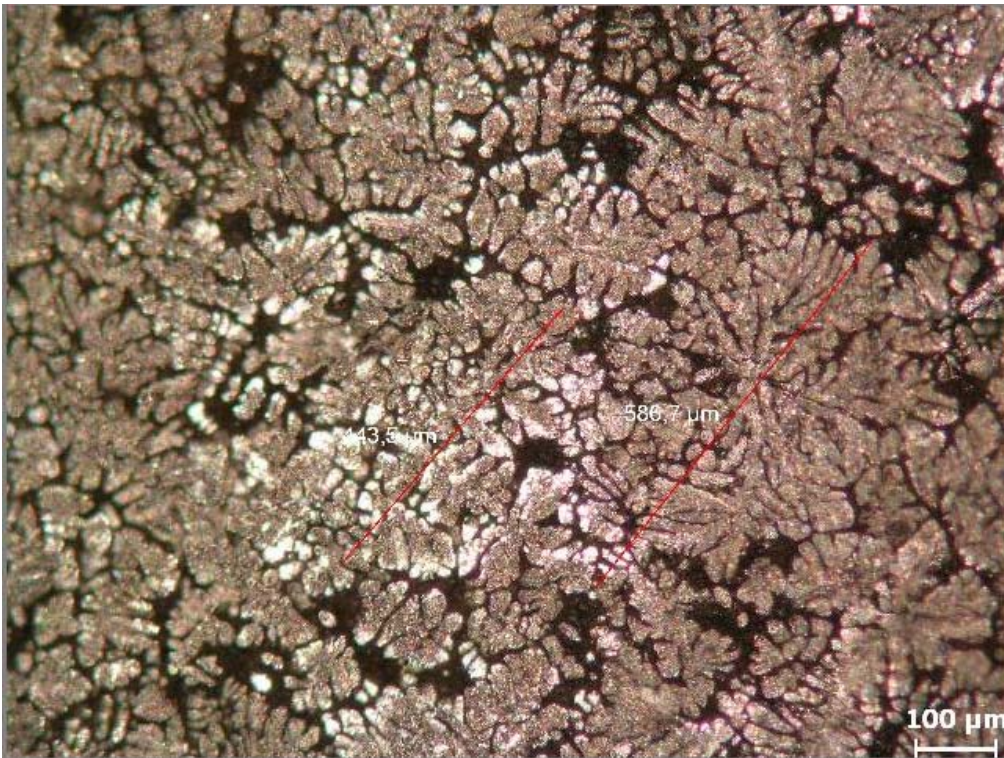
Şekil 4.9a. Al5Ti1B ilavesinden 40 dakika sonra (ölçüsüz)



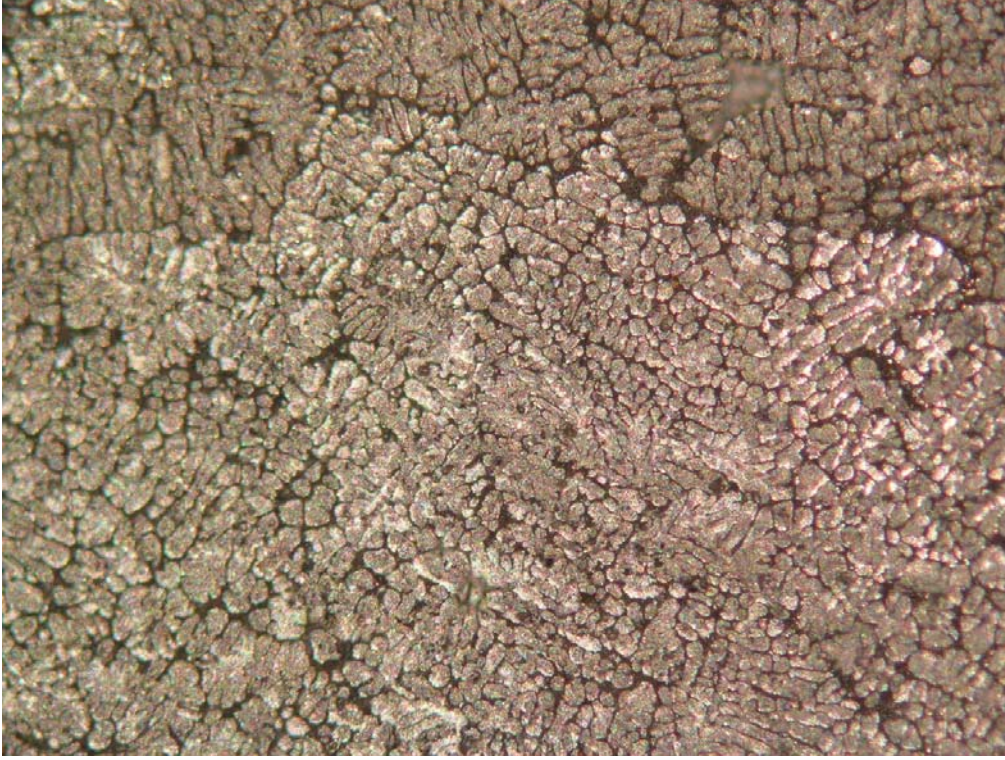
Şekil 4.9b. Al5Ti1B ilavesinden 40 dakika sonra (ölçülü)



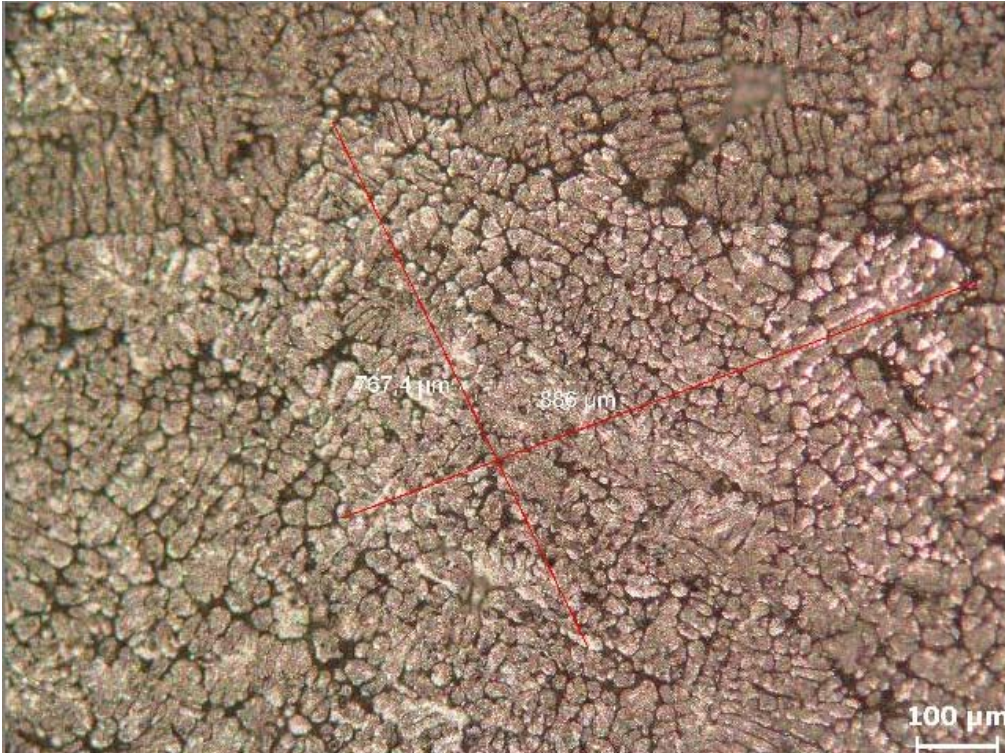
Şekil 4.10a. Al5Ti1B ilavesinden 45 dakika sonra (ölçüsüz)



Şekil 4.10b. Al5Ti1B ilavesinden 45 dakika sonra (ölçülü)



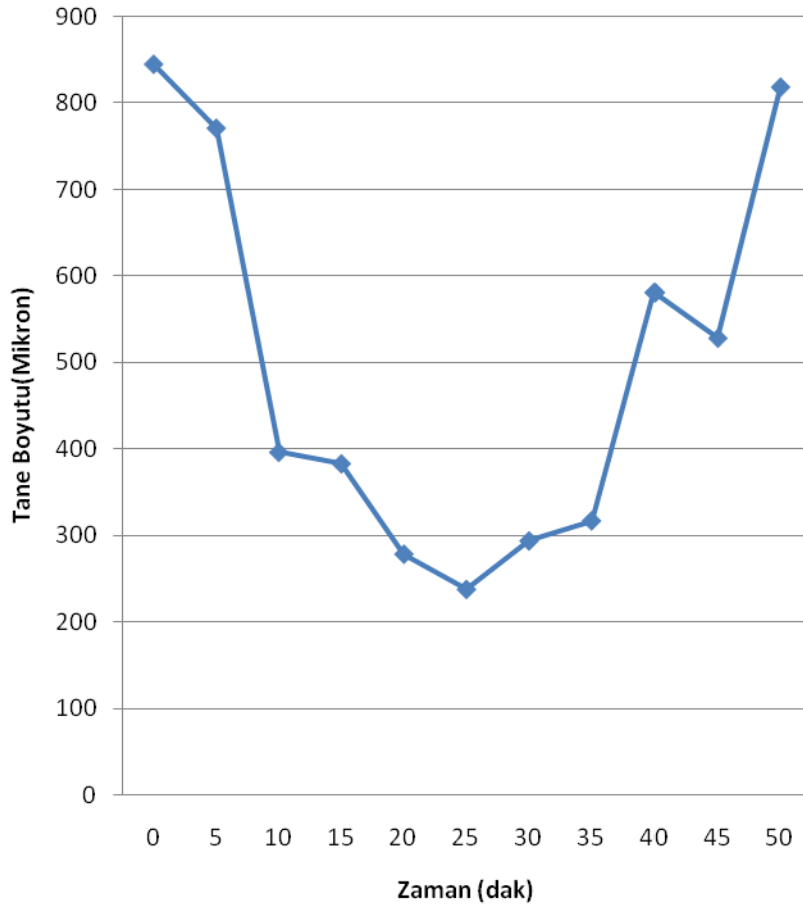
Şekil 4.11a. Al5Ti1B ilavesinden 50 dakika sonra (ölçüsüz)



Şekil 4.11b. Al5Ti1B ilavesinden 50 dakika sonra (ölçülü)

4.1.2. Bekletme zamanının tane boyutuna etkisi

Al5Ti1B tane inceltici mastır alaşımının Etial 177 döküm alaşımında bekletme süresi boyunca göstermiş olduğu inceltme etkisi standart ALCAN tane inceltme testiyle incelenmiş olup tane yapıları bir önceki bölümde gösterilmiştir. Ortalama tane boyutlarının bekletme süresine karşı değişimini gösteren bir grafik ise Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi ortalama tane boyutu bekletme süresiyle küçülerek 25. dakikada 240 μm seviyesine düşmektedir. Bu süreden sonra tane boyutu düzenli olarak zaman arttıkça artmakta ve 60. dakikada 850 μm seviyelerine yükseldiği görülmektedir.



Şekil 4.12. Tane incelticinin zamanla malzemenin tane büyüklüğüne etkisi

4.2. Döküm Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar ve Değerlendirmesi

Tane inceltici ilavesi yapılmadan yapılan dökümler ile tane inceltici ilave edilerek 25 dakika bekletme süresi ile dökülen döküm parçalar iç kesitlerinde oluşan porozitelerin incelenmesi ve değerlendirilmesi için Bölüm 3'te anlatıldığı şekilde kesildi ve hazırlandı. Kalıptan çıkmış bir döküm parçanın kesilmeden önceki fotoğraf görüntüsü Şekil 4.13'te verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi bir yolluktan iki ayrı döküm parça üretilmiştir. Bunun bir avantajı aynı döküm şartlarından iki numune ve iki sonuç üreterek sonuçların daha tekrarlanabilir olmasını sağlamaktır. Bir diğer avantaj ise farklı soğuma hızları oluşturarak soğuma hızının diğer ölçülen faktörler üzerine etkisinin olup olmadığının görülmesidir. Şekilde görüldüğü gibi 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.



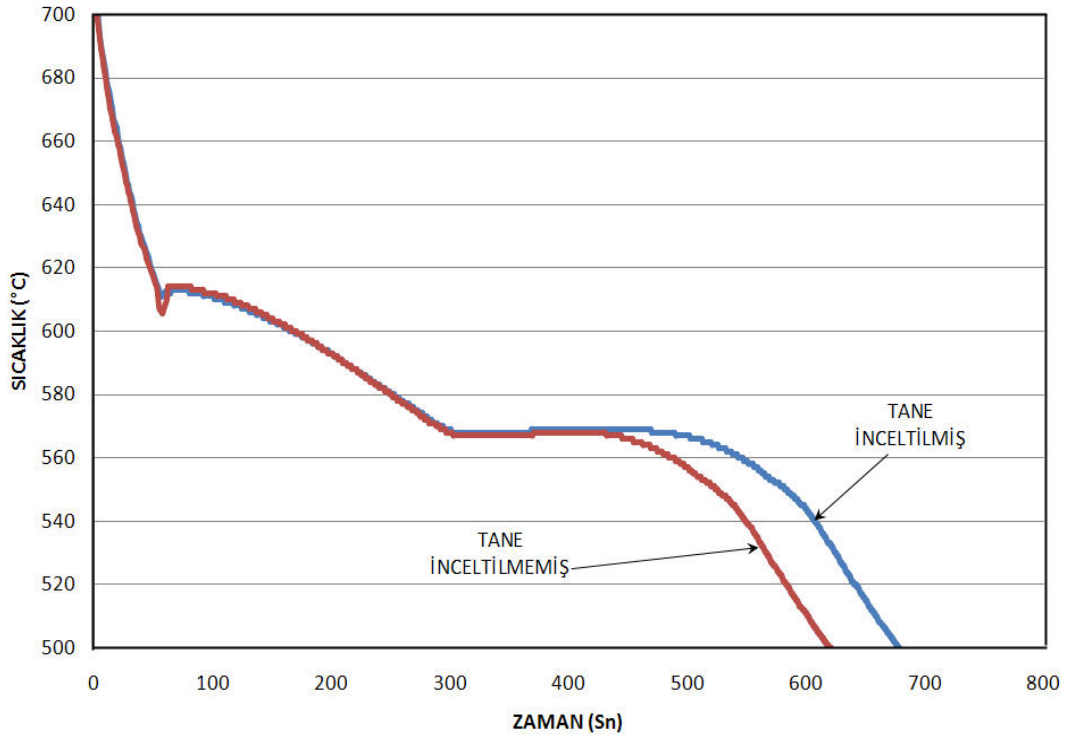
4.13. Döküm parçanın kalıptan çıkmış hali

4.2.1. Soğuma eğrileri

Döküm parçalardan sıcaklık-zaman verileri almak üzere her bir döküme K tip termokapıl yerleştirilmiş ve termokapıların döküm içerisinde kalmalarına izin verilerek soğuma ve katılaşma süresince veri alınması sağlanmıştır. Alınan zaman-sıcaklık verileri daha sonra grafik programına aktarılarak soğuma eğrilerine dönüştürülmüştür. Etial 177 alaşımı için tane inceltici ilave edilmemiş ve tane inceltici ilave edilmiş iki ayrı dökümden alınan verilerle çizilmiş soğuma eğrileri Şekil 4.14'te gösterilmiştir.

Soğuma eğrilerinden görüldüğü gibi Etial 177 alaşımı yaklaşık 610 °C' de alfa alüminyumun çekirdeklenmesi ile katılaşmaya başlamaktadır. Burada dikkat çeken nokta ise tane inceltilmiş alaşımda alfa alüminyumun tane inceltilmemiş olan alaşıma göre yaklaşık 3-4 °C daha yukardan çekirdeklenmiş olmasıdır. Bu durum Al5Ti1B tane inceltici ilavesinin dökümde etkili bir tane inceltme gösterdiğini teyit etmektedir.

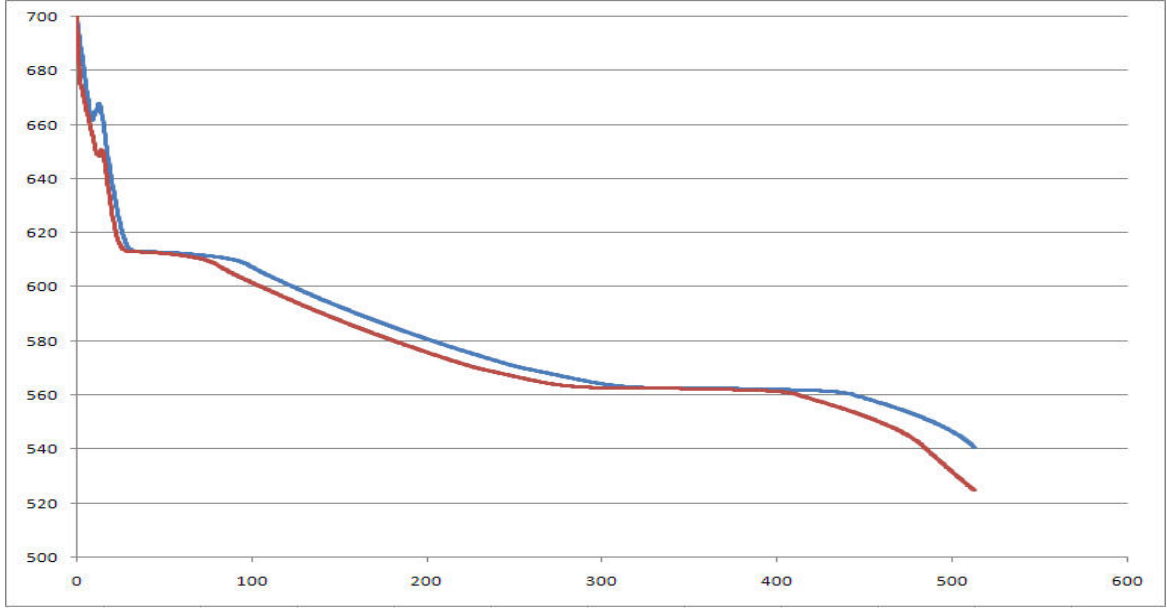
Alfa alüminyum fazının katılaşmasından hemen sonra alaşım yaklaşık 565 °C' de bir ötektik katılaşma göstermektedir. Bunu takip eden aşamada zamana bağlı olarak alaşım tekrar soğumaya devam etmekte ve katılaşmasını tamamlamaktadır.



Şekil 4.14. Dökümlerden alınan soğuma eğrileri

Gerçek dökümlerde kullanılan termokapılara benzer şekilde simülasyon programında da aynı noktalara gelen mesh noktalarına sanal olarak termokapıl yerleştirilerek simülasyon süresince zaman-sıcaklık verileri alınmıştır. Elde edilen bu verilerde aynı şekilde soğuma eğrilerinin çizilmesinde kullanılmıştır. Bir simülasyondan elde edilen tipik soğuma eğrileri şekil 4.15'te gösterilmiştir. Şekilden görüleceği gibi simülasyon programından elde edilen zaman sıcaklık verileri ile gerçek dökümden elde edilen veriler arasında hemen hemen hiç fark bulunmamaktadır. Bu durum bu çalışmada modelleme için simülasyon programına girilen verilerin ve sınır şartlarının gerçeğe oldukça yakın olduğunu göstermektedir.

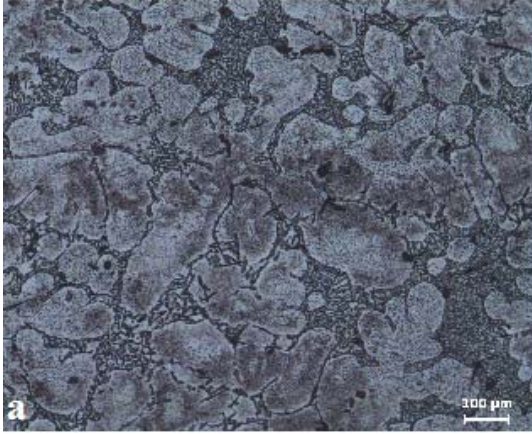
Soğuma eğrilerinden görülen katılaşma zamanına ilişkin farklar yolluğa yakın olan döküm parçanın diğerine göre daha geç soğumasından kaynaklanmaktadır. Bu durum hem termokapıl ile ölçülen gerçek döküm soğuma eğrilerinde hem de simülasyondan elde edilen sanal soğuma eğrilerinde net bir şekilde görülmektedir. Simülasyon programı tane inceltme etkisini soğuma eğrisine yansıtmadığından şekil 4.15'te verilen soğuma eğrilerinde alfa alüminyum fazının çekirdeklenme sıcaklığı ile ilgili herhangi bir yorum yapılamamaktadır.



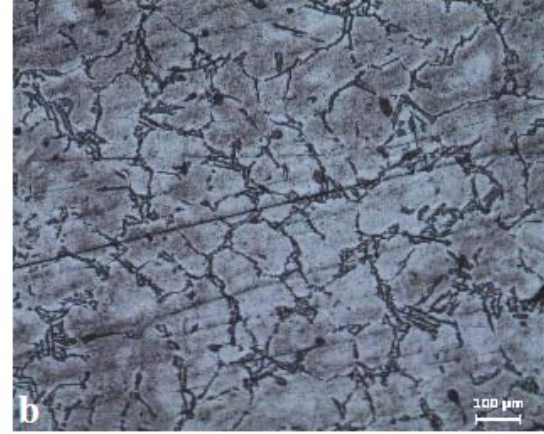
Şekil 4.15. Simülasyon modellemelerinden alınan soğuma eğrileri

4.2.2. Döküm mikroyapıları

Şekil 4.16a ve şekil 4.16b de sırası ile tane inceltilmemiş ve tane inceltici ilave edilmiş döküm parçalardan alınmış mikro yapı resimleri görülmektedir. Tane inceltilmemiş yapının kanat şekilli dendiritik yapıda olduğu görülmektedir. Dendirit boyunun yaklaşık $950 \mu\text{m}$ ($0,95 \text{ mm}$) civarında olduğu buna karşılık tane inceltilmiş döküm mikro yapısında ise tanelerin daha yuvarlak şekilli olduğu ve ortalama tane boyutunun yaklaşık $240 \mu\text{m}$ ($0,24 \text{ mm}$) civarında olduğu görülmektedir. Bu durum tane inceltme konilerine benzer şekilde normal döküm tane yapısında da tane incelticinin yeterince inceltme etkisi gösterdiği anlamına gelmektedir. Buna göre bu çalışmanın temel amacı olan tane boyutunun besleme ve porozite oluşumuna etkisinin araştırılması deneysel olarak gerçekleşmiş olmaktadır.



Şekil 4.16a. Tane inceltilmemiş mikroyapı



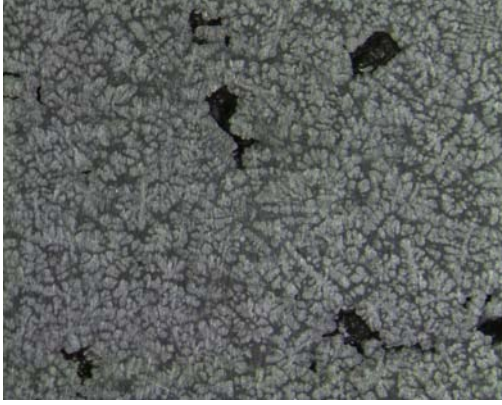
Şekil 4.16b. Tane inceltilmiş mikroyapı

4.2.3. Porozite ölçüm sonuçları

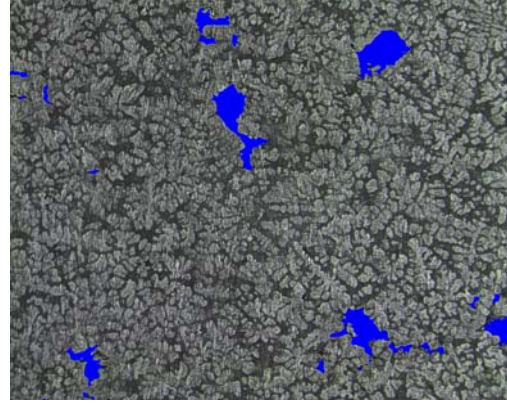
Tane inceltilmemiş ve Al5Ti1B mastır alaşımı ilavesi ile tane inceltilmiş dökümlerin merkezinden geçen kesit düzleminde makro ve mikro porozite ölçümleri yapılarak döküm parçalara ait genel bir porozite haritası çıkartılmıştır. Porozite ölçümünde amaç sadece yapılan dökümlerdeki porozite miktarlarının belirlenmesi değildir. Önceki bölümlerde de değinildiği gibi seçilen döküm geometrisi zaten iç kısımlarda belirli oranda bir makro porozite oluşturmak üzere seçilmiştir. Bu bağlamda hedeflenen 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 4.17a'da tipik bir makro porozite bölgesi görülmektedir. Porozite şekline dikkatlice bakıldığında çoğunlukla şekilsiz ve girinti-çıkıntı görüntüsü veren bir porozite dağılımı olduğu anlaşılmaktadır. Buradan porozite oluşumunun gaz porozitesi şeklinde oluşmadığı yetersiz beslemeye bağlı çekinti porozitesi şeklinde olduğu anlaşılmaktadır. Gaz porozitesinin olmaması veya minimum seviyede kalması gaz giderme işleminin döküm metalinde yeterli derecede ve başarılı bir

şekilde yapıldığını göstermiştir. 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.



Şekil 4.17a. Tipik makroyapı görüntüsü

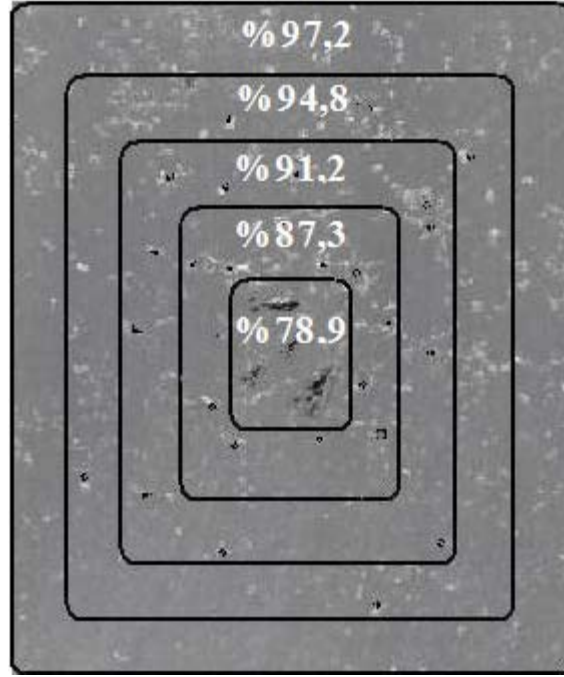


Şekil 4.16b. Renklendirilmiş makroyapı görüntüsü

Şekil 4.17b'de ise aynı porozite bölgesinin bilgisayarlı görüntü analiz programında farklı renk tonu ile tanımlanmasını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi herhangi bir kayıp veya ilave olmaksızın porozite alanlarının bu yöntem ile bire bir ölçülerek tüm dökümlerin yüzeyinde bir porozite haritası oluşturulabilmiştir.

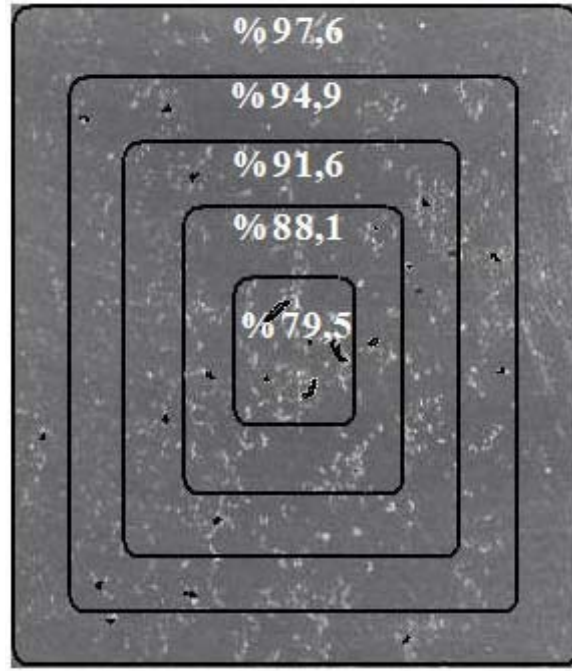
4.2.3.1. Tane incelticisiz makro porozite haritası

Tane inceltici ilave edilmemiş bir dökümün yolluğa yakın olan parçasından alınan numune üzerinde ölçülen porozite oranları şekil 4.18'de gösterildiği gibi yüzde yoğunluk şeklinde ifade edilerek bir porozite-yoğunluk haritası çıkarılmıştır. Şekilden görüldüğü gibi dökümün sıcak noktası olan merkezi bölgede malzeme yoğunluğu %78,9 olarak ölçülmüştür. Bu oran porozite olarak %21,1'ye karşılık gelmektedir. Dökümün dış bölgelerine doğru gittikçe yüzde porozite oranı azalmakta buna karşılık yüzde yoğunluk oranı maksimum %97,2 seviyesine yükselmektedir.



Şekil 4.18. Tane incelticisiz makro porozite haritası

Aynı dökümün yolluğa uzak olan ikinci parçasından alınan numune üzerinde ölçülen porozite değerleri ile oluşturulan porozite-yoğunluk haritası ise şekil 4.19’da gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi yoğunluk oranları bir önceki döküm (yolluğa uzak olan) ile karşılaştırıldığında çok az bir düşüş göstermiştir. Bunun nedeni yolluğa uzak olan dökümün yolluğa yakın olan döküme göre daha yüksek bir soğuma hızı ile soğumuş olmasından kaynaklanmıştır.

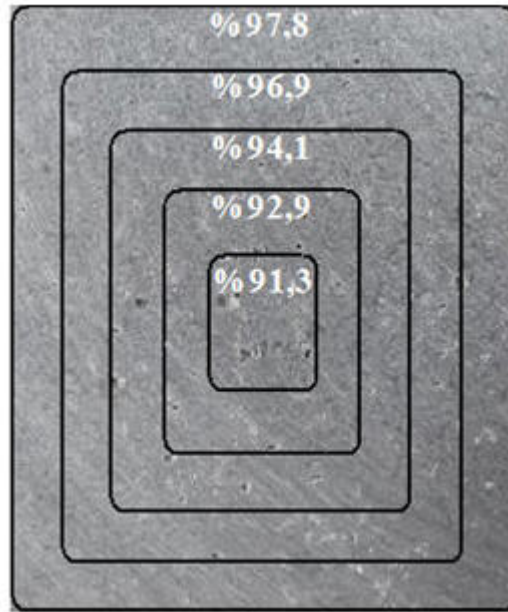


Şekil 4.19. Tane incelticisiz makro porozite haritası uzak

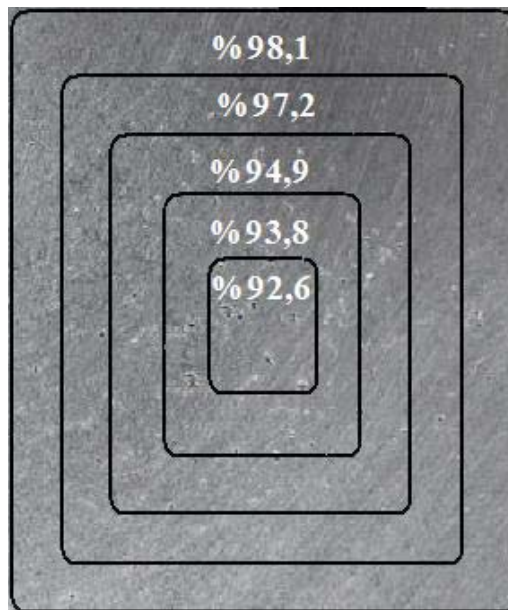
4.2.3.2. Tane incelticili makro porozite haritası

Tane inceltici ilave edilerek dökülmüş bir dökümün yolluğa yakın parçası ve yolluğa uzak olan parçası üzerinden ölçülen porozite-yoğunluk haritası sırası ile şekil 4.20 ve 4.21’de gösterilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü gibi sıcak nokta olarak tabir edilen merkezi bölgede tane inceltilmemiş dökümlerin aynı bölgesiyle karşılaştırıldığında önemli ölçüde bir yoğunluk artışı gözlenmiştir. Tane inceltmesiz dökümlerin sıcak noktalarında ortalama malzeme yoğunluğu % 80 civarında iken tane inceltmiş dökümlerin aynı bölgelerinde malzeme yoğunluğunun %90’nın üzerinde seviyelere yükseldiği görülmektedir.

Bu karşılaştırmalardan açıkça görüldüğü gibi tane inceltme ETİAL 177 alaşımının besleme özelliğini iyileştirmiştir. Bunun en temel nedeni katı sıvı aralığında (maşi bölgesi) dendrit örgüsünün tane inceltmiş dökümlerde besleme yolunu daha geç bloke ederek besleyicinin daha fazla besleme yapabilmesine olanak sağlamasıdır. Bir sonraki bölümde bu olgu değişik değerler girilerek modellenmiş ve gerçek dökümlerden elde edilen değerler ile modelleme sonuçlarından elde edilen değerler karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.20. Tane incelticisiz makro porozite haritası



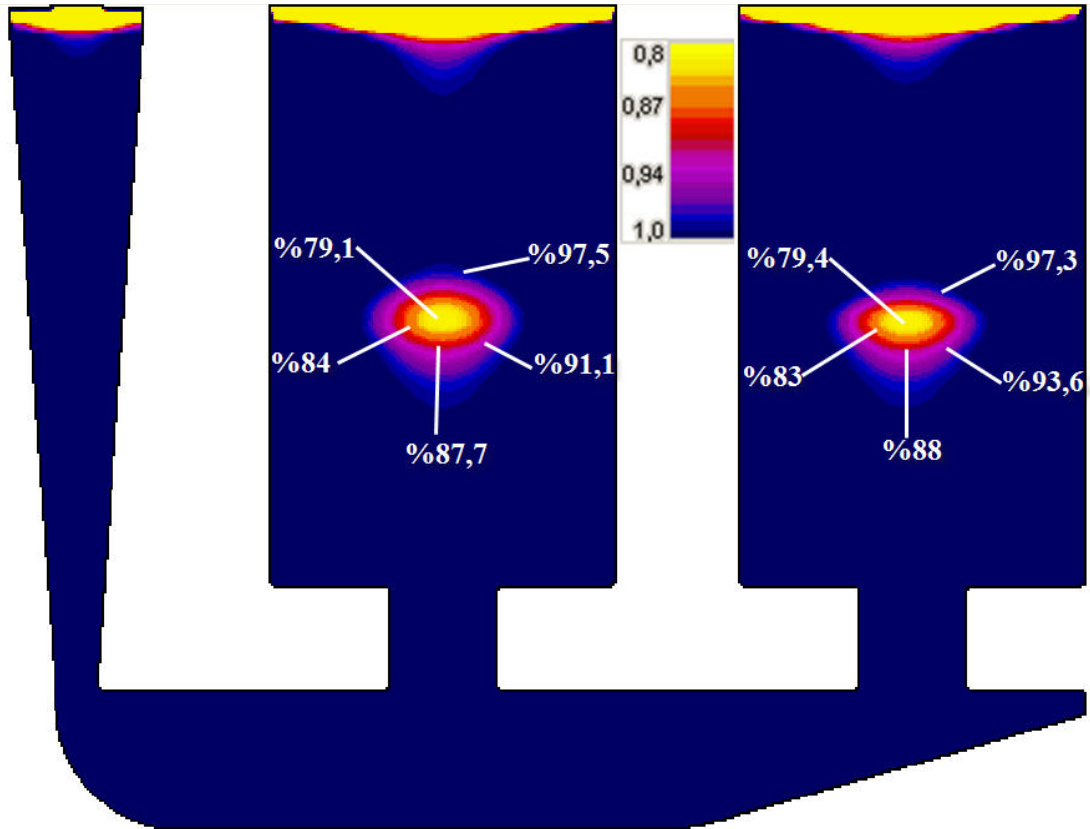
Şekil 4.21. Tane incelticisiz makro porozite haritası

4.3. Bilgisayar Modellemelerinden Elde Edilen Sonuçlar ve Değerlendirilmesi

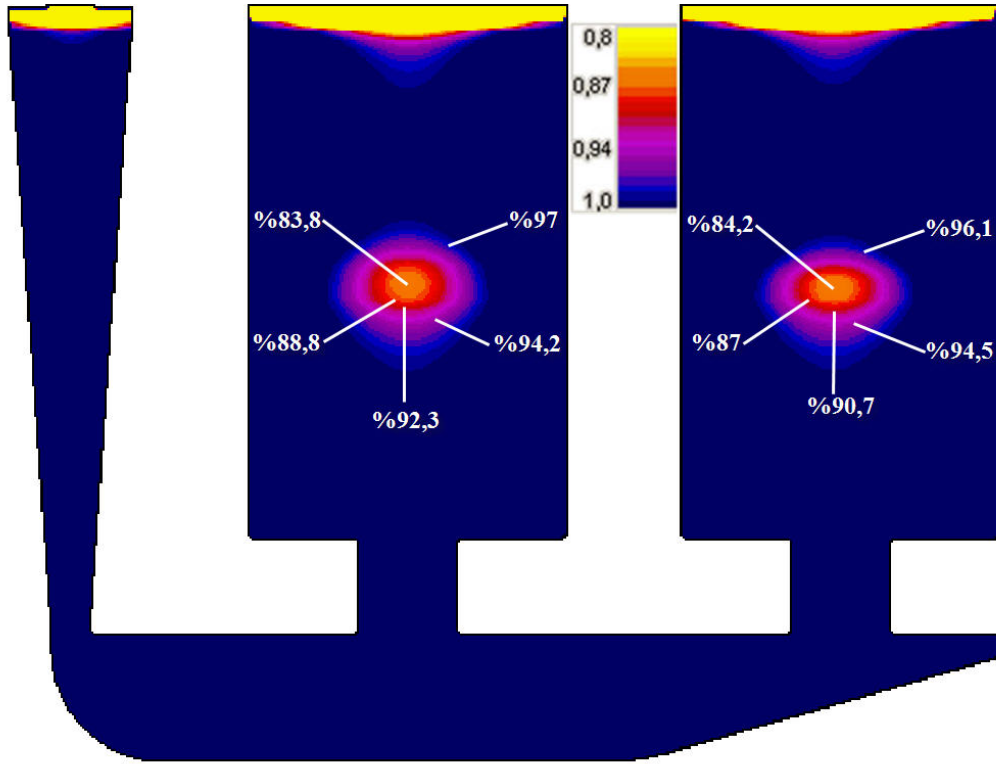
Bu çalışmada kullanılan döküm simülasyon programı üç boyutlu döküm-kalıp geometrisini kübik meşler yardımıyla verilen sınır şartlarına göre sonlu fark yöntemi ile çözümleyen bir yazılımdır. Yazılım soğuma modellemesini ısı transfer formülleri yardımıyla gerçekleştirmektedir. Döküm alaşımının soğuma ve soğuma sırasında oluşan sıcaklığa bağlı hacim değişimi ile ilgili sınır şartları gerçek dökümden alınan veriler doğrultusunda programa girilmiştir. Bu çalışmada kullanılan Etial 177 alaşımı ve kullanılan döküm geometrisi için CFS olarak tabir edilen kritik katı oranı dışındaki tüm başlangıç ve sınır şartları her bir döküm için sabit alınmıştır. Ancak tane inceltmenin kritik katı oranı üzerindeki etkisini görebilmek ve hem tane inceltmemiş hem de iyi derecede tane inceltmiş bir dökümden CFS oranının hangi değerlerde olacağı araştırılmak üzere farklı CFS oranları kullanılmıştır.

Modellemelerde % 30'dan başlayarak, %5' lik artışlarla % 60'a kadar değişen oranlarda CFS değeri kullanılmış ve bu CFS değerlerine göre simülasyon programından elde edilen porozite-yoğunluk değerleri gerçek dökümlerden ölçülen porozite-yoğunluk değerleri ile karşılaştırılmıştır. Gerçek dökümden ölçülen porozite yoğunluk değeri ile modellenen dökümden elde edilen porozite-yoğunluk oranı çakıştığında o modelleme için kullanılan % CFS oranı o döküm şartları için geçerli CFS oranı olarak kabul edilmiştir. Tane inceltmemiş dökümler için minimum CFS oranı ve tane inceltmiş dökümler için maksimum CFS oranı mümkün olduğunca birebir eşleştirebilmek için ara değerlerde CFS oranları da kullanılarak sonuçların daha hassas bir şekilde çakıştırılması sağlanmıştır.

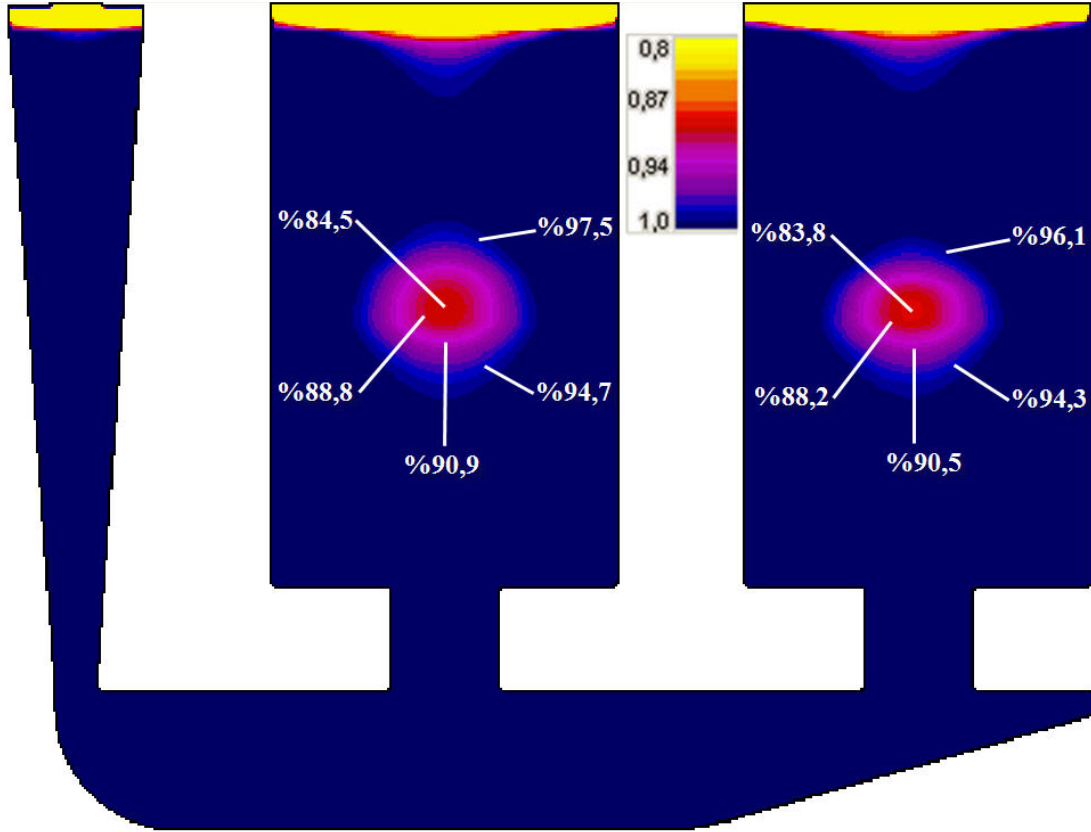
Modellenen dökümlerden farklı CFS oranları kullanılarak elde edilen porozite-yoğunluk oranları Şekil 4.22-4.26'de gösterilmiştir. Şekil 4.22'de tane inceltmesiz dökümlerin porozite-yoğunluk değerine karşılık gelen %35 CFS oranı kullanılırken Şekil 4.26'de iyi tane inceltmiş dökümün porozite-yoğunluk değerine karşılık gelen %55 CFS oranı kullanılmıştır.



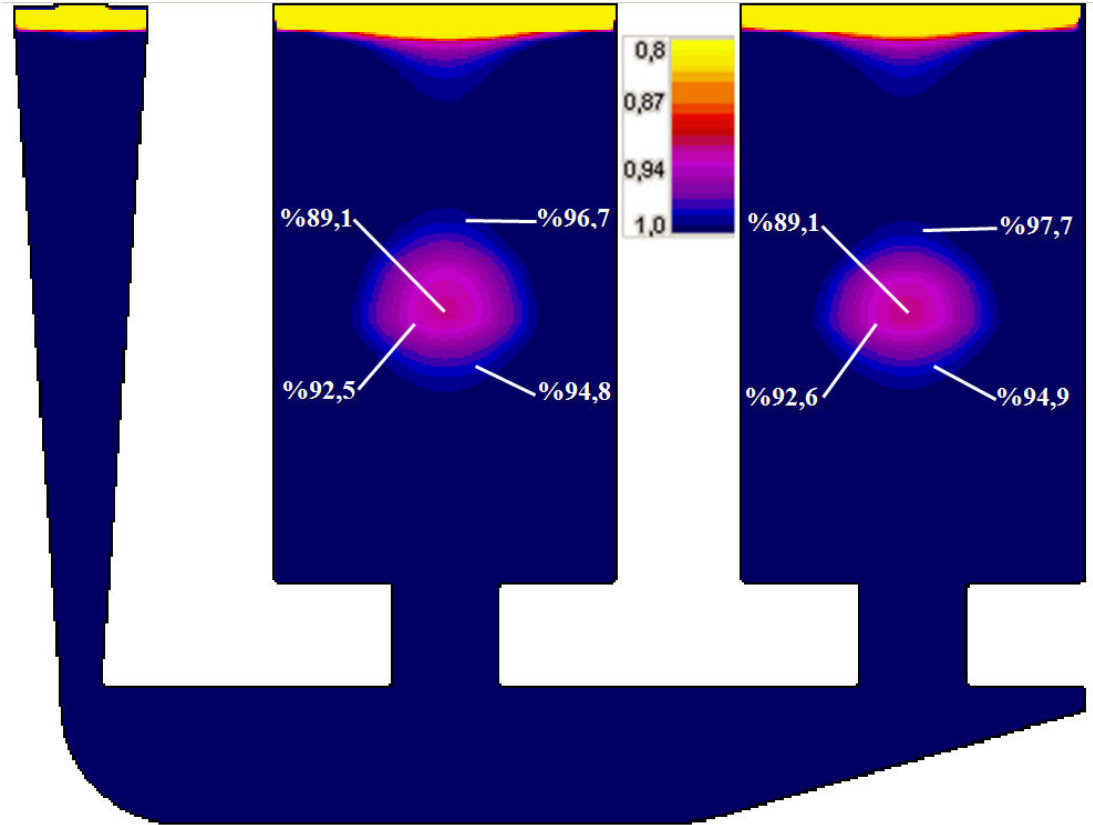
Şekil 4.22. CFS oranı %35 e göre yapılan simülasyon sonucunun parça merkezinden geçen kesit düzlemindeki görünüşü (0,8 %80 ve altı yoğunluğu göstermektedir - 1 %100 yoğunluğu göstermektedir.)



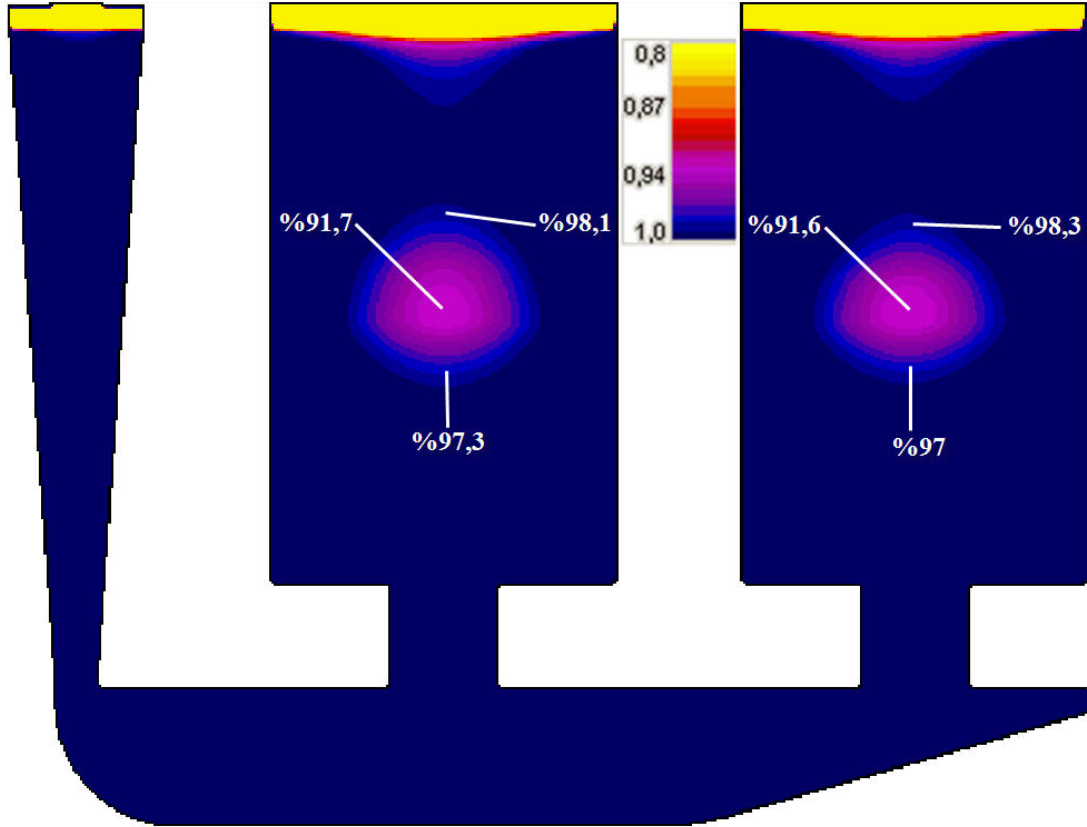
Şekil 4.23. CFS oranı %40 e göre yapılan simülasyon sonucunun parça merkezinden geçen kesit düzlemindeki görünüşü (0,8 %80 ve altı yoğunluğu göstermektedir - 1 %100 yoğunluğu göstermektedir.)



Şekil 4.24. CFS oranı %45 e göre yapılan simülasyon sonucunun parça merkezinden geçen kesit düzlemindeki görünüşü (0,8 %80 ve altı yoğunluğu göstermektedir - 1 %100 yoğunluğu göstermektedir.)



Şekil 4.25. CFS oranı %50 e göre yapılan simülasyon sonucunun parça merkezinden geçen kesit düzlemindeki görünüşü (0,8 %80 ve altı yoğunluğu göstermektedir - 1 %100 yoğunluğu göstermektedir.)



Şekil 4.26. CFS oranı %55 e göre yapılan simülasyon sonucunun parça merkezinden geçen kesit düzlemindeki görünüşü (0,8 %80 ve altı yoğunluğu göstermektedir - 1 %100 yoğunluğu göstermektedir.)

Şekil 4.22-4.26 de görülen modelleme sonuçları bu çalışmadaki gibi kuma dökülen bir Etial 177 alaşımında tane inceltmiş bir döküme tane inceltilmemiş olana göre %20 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. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

1. Etial 177 alaşımına Al5Ti1B mastır alaşımı şeklinde % 0,20 oranında Ti ilave edilerek 5'er dakikalık aralıklarla ALCAN standart tane inceltme deneyleri yapılmıştır. Tane inceltme deneylerinin amacı alaşıma ilave edilen tane inceltici mastır alaşımı ile tane inceltme etkisinin zamana göre değişimini ölçerek optimum bekletme süresinin tespit edilmesidir. Sonuçlar kullanılan Etial 110 alaşımı ve Al5Ti1B master alaşımı ile azami tane inceltme etkisinin 25 dakika bekletme süresi ile alındığını göstermiştir.

2. ALCAN tane inceltme deneyleri sonuçları numunelerin kesit düzleminde ortalama tane boyutunun tane inceltici ilave edilmemiş testte 720 µm dan tane inceltici ilave edilerek 25 dakika bekletilmiş sıvı ile yapılan testte 270 µm seviyesine küçüldüğünü fakat daha uzun bekletme sürelerinde yapılan testlerde ise tane boyutunun süre ile tekrar büyümeye başladığını göstermiştir.

3. Etial177 alaşımı tane inceltmesiz ve tane inceltici ilave edilmiş olarak özel bir geometriye sahip kum kalıplara döküldü. Döküm geometrisi döküm içinde %100 beslenmesi imkansız bir sıcak nokta oluşturarak tane boyutunun bu sıcak noktanın beslenebilme derecesi üzerindeki etkisini araştırmak üzere seçildi. Yapılan dökümlerden, zaman-sıcaklık verileri (soğuma eğrileri), tane boyutu ve % porozite ve yoğunluk ölçümleri yapıldı.

4. Döküm kesitlerinden alınan ortalama tane boyutu ölçümleri tane incelticinin kum dökümde de iyi bir inceltme etkisi oluşturduğunu göstermiştir. Ortalama tane boyutu tane inceltilmemiş bir dökümde 900 µm iken tane inceltilmiş bir dökümde bu değer 240 µm olarak ölçülmüştür. Buna göre yapılan dökümlerde amaçlanan kaba ve ince taneli yapılar elde edilerek tane boyutunun kritik katı oranı (CFS) değerleri üzerindeki etkileri incelenebilmiştir.

5. Kuma yapılan döküm deneylerinden alınan sonuçlar tane inceltmenin dökümlerin beslenebilirliğini önemli ölçüde artırdığını ve buna karşılık porozite oranlarını da aynı derecede azalttığını göstermiştir. Tane inceltmesiz dökümlerin sıcak noktalarında ortalama malzeme yoğunluğu % 80 civarında iken tane inceltmiş dökümlerin aynı bölgelerinde malzeme yoğunluğunun % 90 seviyelerine yükseldiği görülmektedir. Bu oranlar sırasıyla %20 ve %10 porozite oranlarına karşılık gelmektedir.

6. Dökümlerden termokapıl yardımı ile alınan sıcaklık-zaman verileri dökümlerin modellenebilmesi için sınır şartı olarak simülasyon programına aktarılmıştır. 3 Boyutlu bir döküm simülasyon programı ile yapılan dökümlerden alınan sonuçlar gerçek dökümlerden alınan sonuçlar ile karşılaştırmış ve her iki sonucun mükemmel derecede uym sağladığı görülmüştür.

7. Yapılan modelleme çalışmalarında hedeflenen amaç kullanılan döküm simülasyon yazılımında bir modelleme parametresi olan kritik katı oranı (CFS) değerinin dökümlerin tane boyutuna göre nasıl değiştiğinin tespit edilmesidir. Modellemelerde % 35'ten başlayarak, %5' lik artışlarla % 55'e kadar değişen oranlarda CFS değeri kullanılmış ve bu CFS değerlerine göre simülasyon programından elde edilen porozite-yoğunluk değerleri gerçek dökümlerden ölçülen porozite-yoğunluk değerleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar tane inceltici ilave edilmemiş dökümlerde CFS oranının %35 civarında olduğunu buna karşılık iyi tane inceltmiş dökümlerde ise bu oranın % 55 seviyesine çıkararak daha uzun bir besleme zamanı sağladığını göstermiştir.

8. 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] SIGWORTH, G.K., KUHN, T.A., "Refinement of Aluminium casting Alloys", AFS Transactions, Vol.115, pp.1-12, 2007.
- [2] 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.
- [3] BACKERUD, L., "How Does a Good Grain Refiner Work?'," Light Metal Age, pp. 6-12 (October, 1983).
- [4] EASTON, M.A. and STJOHN, D.H., "The Partitioning of Titanium During Solidification of Aluminum Alloys," Mater. Sci.Technol., Vol. 16(9), pp. 993-1000,2000.
- [5] COLE, G.S., CISSÉ, J., KERR, H.W. and BOLLING, G.F., "Grain Refinement in Aluminum and Aluminum Alloys", *AFS Trans*, Vol.80, pp. 211-218 (1972).
- [6] LU, H.T., WANG, L.C. and KUNG, S.K., "Grain Refining in A356 Alloys, J. Chinese Foundrymen's Association", Vol. 29, pp. 10-18 (June, 1981).
- [7] SIGWORTH, G.K. and GUZOWSKI, M.M., "Grain refining of Hypo-eutectic Al-Si Alloys," AFS Transactions, Vol 93, pp. 907-12,(1985).
- [8] PASCIAK, K. and SIGWORTH, G.K., Role of Alloy Composition in Grain Refining of 319 Alloy, AFS Transactions, Vol. 109, pp. 567-577, 2001.
- [9] GUOCAI, C., "Dendrite Coherency During Equiaxed Solidification in Aluminum Alloys," Chemical Communications,Stockholm University, 83 pages (1994, No. 1)
- [10] Metals Handbook, Vol.15. casting, Ed. ASM International Handbook Committee, 743-770, 1989, Metals Park, OH, ASM International.
- [11] DASH, M. and MAKHLOUF, M., "Effect of key alloying elements on the feeding characteristics of aluminum–silicon casting alloys" Journal of Light Metals 1 (2001) pp. 251–265.

- [12] CAMPBELL, J., Casting, Heinemann Ltd, Oxford, 1991.
- [13] CAMPBELL, J., "Feeding mechanisms in casting", AFS Cast Metals, Research Journal 5 (1969) pp.1-8.
- [14] SIGWORTH, G.K. and KUHN, T.A., Grain Refinement of Aluminum Casting Alloys, American Foundry Society, Schaumburg, IL USA, 07-067(02), 2007.
- [15] Aluminium Association Standard Test Procedure for Aluminium Grain Refiners, TP-1, The Aluminium Association, Washington, D.C, 1990.

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Manisa'nın Akhisar ilçesinde doğdu. İlköğrenimini Misak-1 Milli ilk okulunda, ortaöğrenimini Ali Şefik orta okulunda ve lise eğitimini Akhisar Teknik Lisesi'nde tamamladı. 2002 yılında Sakarya üniversitesi teknik eğitim fakültesi metal öğretmenliği bölümünü kazandı. Okulla birlikte 2003 yılında Daloğlu Dökün Makine firmasında CAD/CAM ve talaşlı imalat sorumlusu olarak çalışmaya başladı 2008 yılına kadar bu firmada çalışmasını sürdürdü. 2006 yılında lisans eğitimini bitirdi ve yine aynı yıl Sakarya üniversitesi metal eğitimi ana bilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2008 senesinde Stil makine'de fabrika sorumlusu olarak çalışmaya başladı.

Y. YURTSEVEN	ETİAL 177 ALAŞIMININ DÖKÜMÜNDE MAKRO VE MİKRO POROZİTE OLUŞUMUNUN MODELLENMESİ	OCAK 2009
---------------------	---	------------------