



# A356 Alaşımı Parçaların Mekanik Özelliklerinin Toz Formlu Tane İncelticiler Kullanılarak Geliştirilmesi

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

MAKBULE POZAN

ORCID 0000-0001-8365-0292

Tez Danışmanı: Doç. Dr. ONUR ERTUĞRUL

Ocak 2022

İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi **Makbule Pozan** tarafından hazırlanan **A356 Alaşımı Parçaların Mekanik Özelliklerinin Toz Formlu Tane İncelticiler Kullanılarak Geliştirilmesi** başlıklı bu çalışma tarafımızca okunmuş olup, yapılan savunma sınavı sonucunda kapsam ve nitelik açısından başarılı bulunarak jürimiz tarafından YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

**ONAYLAYANLAR:**

**Tez Danışmanı:**            **Doç. Dr. Onur Ertuğrul**            .....

İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

**Tez Eş-danışmanı:**

**Jüri Üyeleri:**

**Doç. Dr. Sinan Kandemir**            .....

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

**Doç. Dr. Esra Dokumacı Alkan**            .....

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

**Savunma Tarihi: 24.01.2022**

# Yazarlık Beyanı

Ben, **Makbule Pozan**, başlığı **A356 ALAŞIMI PARÇALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN TOZ FORMLU TANE İNCELTİCİLER KULLANILARAK GELİŞTİRİLMESİ** olan bu tezimin ve tezin içinde sunulan bilgilerin şahsıma ait olduğunu beyan ederim. Ayrıca:

- Bu çalışmanın bütünü veya esası bu üniversitede Yüksek Lisans derecesi elde etmek üzere çalıştığım süre içinde gerçekleştirilmiştir.
- Daha önce bu tezin herhangi bir kısmı başka bir derece veya yeterlik almak üzere bu üniversiteye veya başka bir kuruma sunulduysa bu açık biçimde ifade edilmiştir.
- Başkalarının yayımlanmış çalışmalarına başvurduğum durumlarda bu çalışmalara açık biçimde atıfta bulundum.
- Başkalarının çalışmalarından alıntıladığımda kaynağı her zaman belirttim. Tezin bu alıntılar dışında kalan kısmı tümüyle benim kendi çalışmamdır.
- Kayda değer yardım aldığım bütün kaynaklara teşekkür ettim.
- Tezde başkalarıyla birlikte gerçekleştirilen çalışmalar varsa onların katkısını ve kendi yaptıklarımı tam olarak açıkladım.

İmza:

---

Tarih:

24.01.2022

---

# A356 Alaşımı Parçaların Mekanik Özelliklerinin Toz Formlu Tane İncelticiler Kullanılarak Geliştirilmesi

## ÖZ

Tane inceltme uygulaması Alüminyum döküm endüstrisi için ince ve eş eksenli tane yapısının sağlanması, metal beslemesinin artışı ile porozite seviyesinin azalması gibi pek çok avantaj sağlamaktadır. Böylece döküm prosesinin etkinliği artmakta ve dökülmüş ürünün kalitesi gelişmektedir. Döküm endüstrisinde tane inceltici olarak master alaşımlar kullanılmaktadır. Bu çalışmada, döküm endüstrisinde yaygın olarak kullanılan geleneksel çubuk formulu Al<sub>5</sub>TiB tane incelticilere alternatif olarak toz formulu tane incelticiler mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilmiştir. Toz tane incelticileri elde etmek için Saf Alüminyum, TiB<sub>2</sub> ve TiC tozları kullanılmış ve Al+TiB<sub>2</sub> ve Al+TiC kompozitler elde edilmiştir. Toz tane inceltici kompozitler dört farklı kompozisyon ve üç farklı ilave yöntemi ile sıvı metale eklenmiştir. 700°C’de gerçekleştirilen dökümlerde en yüksek mekanik özelliklerin ve en küçük tane boyutunun elde edildiği kompozit ve kompozisyonun Al+ağ%0,3TiB<sub>2</sub> olduğu, ilave şeklinin ise tozların alüminyum folyoya sarılması olduğu belirlenmiştir. DAS ve tane boyutları sırasıyla, Al<sub>5</sub>TiB tane inceltici ile gerçekleştirilen üretimlerde 41,5 µm ve 468,34 µm boyutlarında iken toz tane inceltici ile gerçekleştirilen üretimlerde 26,9 µm ve 345,65 µm boyutlarına düşmüş ve daha ince tane yapısı elde edilmiştir. Böylece en iyi mekanik özelliklerin elde edildiği tane inceltici ve ilave şekli belirlenerek 690°C ve 720°C döküm sıcaklıklarında Al+ağ%0,3TiB<sub>2</sub> kompozit tozlar ve çubuk formulu Al<sub>5</sub>TiB alaşımı ile üretimler gerçekleştirilerek farklı döküm sıcaklıklarının etkisi



incelenmiştir. 690°C, 700°C ve 720°C'lerde gerçekleştirilen üretimler sonucunda en ince tane boyutunun 700°C'de Al+ağ%0,3TiB<sub>2</sub> kompozit tane inceltici kullanılarak gerçekleştirilen dökümde olduğu belirlenmiştir. En yüksek tane boyutları, her iki tane inceltici için de 720°C'de gerçekleştirilen üretime aittir. En küçük DAS boyutları Al+ağ%0,3TiB<sub>2</sub> kompozit tane inceltici kullanılarak gerçekleştirilen dökümlere aittir. En yüksek akma ve kopma dayanım (MPa) değerleri 700°C'de Al+ağ%0,3TiB<sub>2</sub> kompozit tane inceltici ile gerçekleştirilen dökümlerde sırasıyla 189,44 MPa, 256,36 MPa olarak belirlenmiştir. En yüksek Brinell sertlik değerleri Al+ağ%0,3TiB<sub>2</sub> ve Al5TiB tane incelticileri için 700°C'de gerçekleştirilen dökümlerde elde edilmiş ve sırasıyla 81,15 HB ve 75,71 HB olarak ölçülmüştür. Tüm üretimlerde mikroyapı ve SEM incelemeleri gerçekleştirilmiş ve yapılarda tozların homojen bir şekilde dağılmış olduğu ile benzer formlarda intermetalik fazlar tespit edilmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** A356, Mekanik Alaşımlama, Toz Metalurjisi, Tane İnceltme Uygulaması, Mekanik Test Değerleri

# Improving the Mechanical Properties of A356 Alloy Parts by Powder Form Grain Refiners

## Abstract

Grain refinement application in Aluminum casting industry ensures various advantages such as generation of finer and equiaxed dendritic structure and lowered porosity level due to enhanced feeding, thus improves the mechanical properties. Thereby, grain refinement increases both qualities of cast aluminum alloy parts and the efficiency of the casting process. In casting industry, master alloys are used as grain refiners. In this study, powder-formed grain refiners were produced by mechanical alloying method as an alternative to traditional rod form Al<sub>5</sub>TiB grain refiners, which are widely used in the casting industry. Pure Al, TiB<sub>2</sub> and TiC ceramic powders were ball-milled in order to obtain composite powder grain refiners then Al+TiB<sub>2</sub> and Al+TiC grain refiners were produced. Powder grain refiners were added to the liquid metal with four different compositions and three different addition methods. It was determined that the grain refiner and composition, in which the highest mechanical properties and the smallest grain size were obtained in the castings carried out at 700°C, were Al+wt0.3%TiB<sub>2</sub>, and the addition was the wrapping of the powders in aluminum foil. DAS values of samples produced with powder Al+wt%0,3TiB<sub>2</sub> grain refiners and rod Al<sub>5</sub>TiB grain refiners were measured as 26.9μm and 41.53μm respectively, %35.23 ratio of DAS values thinning was achieved. When the grain sizes were compared, 26.19% thinning was achieved. In order to determine the casting temperature at which the finest grain sizes and mechanical properties will be obtained, productions were carried out at 690°C, 700°C and 720°C casting temperatures, and it was determined that the best properties were obtained in the castings performed at

700°C. As a result of all productions, 2.25% and 2.68% improvement in yield and tensile strength values respectively, 9.85% improvement in % elongation values, and 7.08% improvement in hardness values were achieved with composite powder form grain refiner.

**Key Words:** A356, Mechanical Alloying, Powder Metallurgy, Grain Refinement, Mechanical Properties

*Aileme...*

# Teşekkür

Tezimin her aşamasında sağladığı değerli desteği, yardımları ve verdiği yüksek motivasyon için danışman hocam Doç. Dr. Onur Ertuğrul'a, parçası olmaktan sonsuz mutluluk duyduğum CMS ailesine, çalışmamın her aşamasında değerli desteğini ve yardımlarını veren Dr. Uğur Aybarç'a ve değerli Ar-Ge ekibine, içerisinde yetişmekten sonsuz onur duyduğum CMS Laboratuvar ekibine ve sayın Anıl Pastırmacı'ya, tüm süreçte desteğini veren, yol gösteren müdürüm Yunus Ercan'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitim hayatımda, desteklerini ve varlıklarını hep hissettiğim, hayatımı kolaylaştıran canım aileme sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

# İçindekiler

Yazarlık Beyanı .....	ii
Öz .....	iii
Abstract .....	iv
Teşekkür .....	vi
Şekiller Listesi.....	x
Tablolar Listesi.....	xi
Kısaltmalar Listesi .....	xii
Semboller Listesi.....	xiii
<b>1 Tezin Kapsamı ve Amacı .....</b>	<b>1</b>
1.1 Teorik Bilgi.....	5
1.1.1 Alüminyum Alaşımları .....	5
1.1.1.1 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırması .....	5
1.1.2 Alüminyum-Silisyum-Magnezyum Alaşımları .....	7
1.1.2.1 Ötektik Silisyum Modifikasyonu .....	10
1.1.2.2 Kimyasal Modifikasyon .....	10
1.1.2.3 Isıl İşlem .....	10
1.1.3 Tane İnceltme Uygulaması.....	13
1.1.4 Mekanik Alaşımlama.....	17
1.1.4.1 Yüksek Enerjili Bilyeli Öğütme .....	17
1.2 Literatür Özeti.....	19

<b>2</b>	<b>Deneyisel Çalışmalar .....</b>	<b>23</b>
2.1	Deney Tasarımları.....	23
2.2	Kullanılan Malzemeler.....	25
2.3	Yüksek Enerjili Bilyeli Öğütücü ile Homojen Karıştırma Yöntemiyle Tane İnceltici Üretimi .....	26
2.4	Tane İnceltici İlaveleri .....	29
2.5	Karıştırmalı Döküm .....	31
2.6	Isıl İşlem Uygulaması .....	33
2.7	Karakterizasyon Çalışmaları .....	34
<b>3</b>	<b>Farklı Kompozisyon Çalışmaları .....</b>	<b>40</b>
3.1	Optik Mikroskop İle Mikroyapı İncelemeleri.....	40
3.1.1	Direkt Toz Olarak İlave Edilen Tane İncelticiler İle Üretim.....	40
3.1.2	Alüminyum Folyoya Sarılı Olarak İlave Edilen Tane İncelticiler ile Üretim .....	45
3.1.3	Preslenerek İlave Edilen Tane İncelticiler İle Üretim .....	50
3.1.4	Geleneksel Çubuk Formlu Tane İnceltici ile Üretim.....	55
3.2	Makroyapı İncelemeleri .....	57
3.2.1	Direkt Toz Olarak İlave Edilen Tane İncelticiler İle Üretim.....	57
3.2.2	Alüminyum Folyoya Sarılı Olarak İlave Edilen Tane İncelticiler ile Üretim .....	59
3.2.3	Preslenerek İlave Edilen Tane İncelticiler İle Üretim .....	60
3.2.4	Geleneksel Çubuk Formlu Tane İnceltici ile Üretim.....	61
3.3	Çekme Test Sonuçları .....	63
3.4	Sertlik Test Sonuçları.....	67
3.5	SEM-EDS Analizleri .....	68
3.5.1	Direkt Toz Olarak İlave Edilen Tane İncelticiler İle Üretim.....	69
3.5.2	Alüminyum Folyoya Sarılı Olarak İlave Edilen Tane İncelticiler ile Üretim .....	71
3.5.3	Preslenerek İlave Edilen Tane İncelticiler İle Üretim .....	73

3.5.4 Geleneksel Çubuk Formlu Tane İnceltici ile Üretim .....	76
3.6 Kalite İndeksi (QI) Değerlendirmesi .....	77
3.7 Optimum Kompozisyon ile Farklı Döküm Sıcaklığı Çalışmaları.....	78
3.7.1 Mikroyapı İncelemeleri .....	79
3.7.1.1 690°C Döküm Sıcaklığında Gerçekleştirilen Üretimlere Ait Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri .....	79
3.7.1.2 720°C Döküm Sıcaklığında Gerçekleştirilen Üretimlere Ait Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri .....	82
3.7.2 Makroyapı İncelemeleri.....	85
3.7.2.1 690°C Döküm Sıcaklığında Gerçekleştirilen Üretimlere Ait Numunelerin Makroyapı İncelemeleri .....	85
3.7.2.2 720°C Döküm Sıcaklığında Gerçekleştirilen Üretimlere Ait Numunelerin Makroyapı İncelemeleri .....	86
3.7.3 Çekme Test Sonuçları.....	88
3.7.4 Kalite İndeksi (QI) Değerlendirmesi .....	90
3.7.5 Sertlik Test Sonuçları .....	90
3.7.6 SEM – EDS Analizleri .....	91
3.7.6.1 690°C Döküm Sıcaklığında Gerçekleştirilen Üretim.....	91
3.7.6.2 720°C Döküm Sıcaklığında Gerçekleştirilen Üretim.....	92
3.7.7 Diferansiyel Termal Analiz (DTA) .....	94
<b>4 Genel Sonuçlar .....</b>	<b>100</b>
<b>Kaynaklar .....</b>	<b>103</b>
<b>Ekler .....</b>	<b>109</b>
Ek A Tezden Üretilmiş Yayınlar .....	110
<b>Özgeçmiş .....</b>	<b>111</b>



# Şekiller Listesi

Şekil 1.1	Alüminyum üretiminde a)Boksit cevheri, b) Alüminyum oksit, c)Metalik Alüminyum.....	1
Şekil 1.2	Alüminyum üretim aşamaları şematik gösterimi .....	2
Şekil 1.3	Geleneksel tane inceltici Al <sub>5</sub> TiB alaşımları, a) Çubuk formu, b) Filmaşın formu, c) Külçe formu. ....	4
Şekil 1.4	İkili Al-Si Faz Diagramı.....	7
Şekil 1.5	Al-Si alaşımlarına ait mikroyapı görüntüleri. (a) Ötektik altı alaşım (b) Ötektik alaşım (c) Ötektik üstü alaşım.....	8
Şekil 1.6	A356 alaşımının (a), (b) ısı işlemsiz ve (c) ısı işlemlili mikroyapıları.....	9
Şekil 1.7	Fe bazlı intermetalik bileşiklerin farklı morfolojileri. (a) iğnesel $\beta$ -Al <sub>5</sub> FeSi, (b) çin yazısı formu $\alpha$ -Al <sub>15</sub> (Fe,Mn) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> , (c) blok formu $\pi$ -Al <sub>8</sub> FeMg <sub>3</sub> Si <sub>6</sub> , (d) çin yazısı formu $\pi$ -Al <sub>8</sub> FeMg <sub>3</sub> Si <sub>6</sub> .....	9
Şekil 1.8	İkili Faz Diagramı .....	11
Şekil 1.9	Isıl İşlem Basamakları .....	12
Şekil 1.10	T6 Isıl işlemi ve çökelti sertleşmesi mekanizması .....	13
Şekil 1.11	Mekanik alaşımlama prensibi .....	17
Şekil 2.1	Mekanik alaşımlama sürecinde kullanılan tozlar. (a) Saf Alüminyum, (b) TiB <sub>2</sub> , (c) TiC. ....	25
Şekil 2.2	(a) Retsch PM 100 Bilyeli Değirmen, (b) karıştırıcı/öğütücü hazne.....	26
Şekil 2.3	(a) Öğütücü hazne, (b) 4g – 2 mm çaplı bilyeler .....	26
Şekil 2.4	Al+TiB <sub>2</sub> (a), Al+TiC (b).....	27
Şekil 2.5	2 saat öğütme süresi sonunda elde edilen SEM Görüntüleri. (a) 2:1 oranı ile üretilen toz tane incelticiler, (b) 5:1 oranı ile üretilen toz tane incelticiler .....	27
Şekil 2.6	Al+TiB <sub>2</sub> ve Al+TiC tozlarının 30, 60 ve 120 dakika öğütülmesi ile elde edilen XRD analizleri.....	28
Şekil 2.7	Kompozit toz tane incelticiler .....	29
Şekil 2.8	Alüminyum folyoya sarılı kompozit tozlar .....	29

Şekil 2.9	Hidrolik Pres .....	30
Şekil 2.10	Presleme sürecinde kullanılan kalıplar (a), içerisine toz eklenmiş kalıbın cihaza yerleştirilmesi (b), presleme işlemi (c). .....	30
Şekil 2.11	Preslenmiş pellet formu tane inceltici .....	31
Şekil 2.12	Ergitme Fırını .....	31
Şekil 2.13	Tane inceltici ilavesi sonrası gerçekleştirilen mekanik karıştırma prosesi.....	32
Şekil 2.14	Feder Kalıbı (a), Feder kalıbına döküm prosesi (b) .....	32
Şekil 2.15	Katılma sürecinde feder kalıbı (a), Katılma sonucunda kalıptan çıkartılan numune (b) .....	33
Şekil 2.16	Zımparalama ve Parlatma Cihazı .....	35
Şekil 2.17	Numune Hazırlama Süreci Tamamlanmış Numune Örnekleri .....	35
Şekil 2.18	Makroyapı incelemesi için hazırlanan numuneler .....	37
Şekil 2.19	ImageJ programı kullanılarak tane boyutu hesaplaması .....	38
Şekil 2.20	Çekme test çubuğu ölçüleri .....	38
Şekil 2.21	Feder kalıplarından hazırlanan çekme test çubukları .....	38
Şekil 2.22	Çekme test cihazı (a), çekme test çubuğu (b).....	39
Şekil 2.23	SEM Cihazı .....	39
Şekil 3.1	1 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f).....	41
Şekil 3.2	2 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f).....	42
Şekil 3.3	3 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f).....	43
Şekil 3.4	4 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f).....	44
Şekil 3.5	5 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f).....	46
Şekil 3.6	6 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f).....	47
Şekil 3.7	7 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f).....	48

Şekil 3.8	8 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f).....	49
Şekil 3.9	9 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f).....	51
Şekil 3.10	10 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f).....	52
Şekil 3.11	11 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f).....	53
Şekil 3.12	12 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f).....	54
Şekil 3.13	13 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f).....	55
Şekil 3.14	DAS Dağılımları .....	56
Şekil 3.15	Direkt toz olarak ilave edilen tane incelticiler ile gerçekleştirilen üretilere ait makroyapı görüntüleri, (a) Al+ağ%0,3 TiC, (b) Al+ağ%0,1 TiB <sub>2</sub> ve Al+ ağ%0,2 TiC, (c) Al+ağ%0,2 TiB <sub>2</sub> ve Al+ ağ%0,1 TiC, (d) Al+ağ%0,3 TiB <sub>2</sub> .....	58
Şekil 3.16	Al folyoya sarılarak ilave edilen tane incelticiler ile gerçekleştirilen üretilere ait makroyapı görüntüleri, (a) Al+ağ%0,3 TiC, (b) Al+ağ%0,1 TiB <sub>2</sub> ve Al+ ağ%0,2 TiC, (c) Al+ağ%0,2 TiB <sub>2</sub> ve Al+ ağ%0,1 TiC, (d) Al+ağ%0,3 TiB <sub>2</sub> .....	60
Şekil 3.17	Preslenerek ilave edilen tane incelticiler ile gerçekleştirilen üretilere ait makroyapı görüntüleri, (a) Al+ağ%0,3 TiC, (b) Al+ağ%0,1 TiB <sub>2</sub> ve Al+ ağ%0,2 TiC, (c) Al+ağ%0,2 TiB <sub>2</sub> ve Al+ ağ%0,1 TiC, (d) Al+ağ%0,3 TiB <sub>2</sub> .....	61
Şekil 3.18	Geleneksel çubuk formulu tane inceltici ile gerçekleştirilen üretime ait makroyapı görüntüsü.....	62
Şekil 3.19	1 numaralı deney tasarımı sonucunda elde edilen tane boyutu değerleri	63
Şekil 3.20	Çekme Test Sonuçları – Akma Dayanımı Değerleri (MPa) .....	64
Şekil 3.21	Çekme Test Sonuçları – Kopma Dayanımı Değerleri (MPa) .....	65
Şekil 3.22	Çekme Test Sonuçları – % Uzama Değerleri.....	65
Şekil 3.23	Sertlik Değerleri .....	68
Şekil 3.24	SEM-EDS analizi numuneleri.....	68

Şekil 3.25	Al+ ağ%0,3 TiC ile üretilen numunelerin SEM Görüntüleri.....	69
Şekil 3.26	Al+ağ%0,1 TiB <sub>2</sub> - Al+ağ%0,2 TiC ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri.....	70
Şekil 3.27	Al+ağ%0,2 TiB <sub>2</sub> - Al+ağ%0,1 TiC ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri.....	70
Şekil 3.28	Al+ ağ%0,3 TiB <sub>2</sub> ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri.....	71
Şekil 3.29	Al+ ağ%0,3 TiC ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri.....	72
Şekil 3.30	Al+ağ%0,1 TiB <sub>2</sub> - Al+ağ%0,2 TiC ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri.....	72
Şekil 3.31	Al+ağ%0,2 TiB <sub>2</sub> - Al+ağ%0,1 TiC ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri.....	73
Şekil 3.32	Al+ ağ%0,3 TiB <sub>2</sub> ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri.....	73
Şekil 3.33	Al+ ağ%0,3 TiC ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri.....	74
Şekil 3.34	Al+ağ%0,1 TiB <sub>2</sub> - Al+ağ%0,2 TiC ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri.....	74
Şekil 3.35	Al+ağ%0,2 TiB <sub>2</sub> - Al+ağ%0,1 TiC ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri.....	75
Şekil 3.36	Al+ ağ%0,3 TiB <sub>2</sub> ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri.....	76
Şekil 3.37	AlTi5B ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri.....	76
Şekil 3.38	Kalite İndeksi – QI değerleri.....	77
Şekil 3.39	690°C’de toz formulu tane inceltici ile üretilen numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f).....	80
Şekil 3.40	690°C’de çubuk formulu Al5TiB tane inceltici ile üretilen numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f). ....	81
Şekil 3.41	720°C’de toz formulu tane inceltici ile üretilen numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f).....	83
Şekil 3.42	720°C’de çubuk formulu Al5TiB tane inceltici ile üretilen numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f). ....	84
Şekil 3.43	Farklı Döküm Sıcaklıklarında DAS değerleri.....	85

Şekil 3.44	690°C’de (a) toz formulu tane inceltici ile, (b) çubuk formulu tane inceltici ile gerçekleştirilen üretime ait numunelerin makroyapı görüntüleri.....	86
Şekil 3.45	720°C’de (a) toz formulu tane inceltici ile, (b) çubuk formulu tane inceltici ile gerçekleştirilen üretime ait numunelerin makroyapı görüntüleri.....	87
Şekil 3.46	Farklı döküm sıcaklıklarında tane boyutu değerleri.....	87
Şekil 3.47	Farklı döküm sıcaklıklarında akma dayanım değerleri .....	88
Şekil 3.48	Farklı döküm sıcaklıklarında kopma dayanım değerleri.....	89
Şekil 3.49	Farklı döküm sıcaklıklarında % uzama değerleri.....	89
Şekil 3.50	Farklı döküm sıcaklıklarında kalite indeksi (QI) değerleri .....	90
Şekil 3.51	Farklı Döküm Sıcaklıklarında Sertlik Değerleri .....	91
Şekil 3.52	Al+ağ%0,3 TiB <sub>2</sub> ile üretilen numunelerin SEM görüntüsü-690°C.....	92
Şekil 3.53	AlTi <sub>5</sub> B ile Üretilen Numunelerin SEM Görüntüleri-690°C .....	92
Şekil 3.54	Al+ağ%0,3 TiB <sub>2</sub> ile üretilen numunelerin SEM görüntüsü-720°C.....	93
Şekil 3.55	AlTi <sub>5</sub> B ile Üretilen Numunelerin SEM Görüntüleri-720°C .....	93
Şekil 3.56	690°C döküm sıcaklığında Al+ağ%0,3TiB <sub>2</sub> ile gerçekleştirilen üretime ait DTA analiz sonucu.....	94
Şekil 3.57	690°C döküm sıcaklığında Al <sub>5</sub> TiB ile gerçekleştirilen üretime ait DTA analiz sonucu .....	95
Şekil 3.58	700°C döküm sıcaklığında Al+ağ%0,3TiB <sub>2</sub> ile gerçekleştirilen üretime ait DTA analiz sonucu.....	95
Şekil 3.59	700°C döküm sıcaklığında Al <sub>5</sub> TiB ile gerçekleştirilen üretime ait DTA analiz sonucu .....	96
Şekil 3.60	720°C döküm sıcaklığında Al <sub>5</sub> TiB ile gerçekleştirilen üretime ait DTA analiz sonucu .....	96
Şekil 3.61	720°C döküm sıcaklığında Al <sub>5</sub> TiB ile gerçekleştirilen üretime ait DTA analiz sonucu .....	97

# Tablolar Listesi

Tablo 1.1	Döküm Alüminyum Alaşımlarının Ana Alaşım Elementleri ve Tanımlamaları .....	6
Tablo 1.2	Dövme Alüminyum Alaşımlarının Ana Alaşım Elementleri ve Tanımlamaları .....	6
Tablo 1.3	A356.0 alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu .....	8
Tablo 2.1	Deney Tasarımı-1 .....	24
Tablo 2.2	Deney Tasarımı-2 .....	25
Tablo 2.3	Kullanılan Tozlar ve Özellikleri.....	25
Tablo 2.4	Her bir homojen karıştırma prosesinde kullanılan toz miktarları .....	29
Tablo 2.5	Isıl İşlem Prosesi .....	33
Tablo 3.1	Deney Tasarımı 1 – Direkt Toz Formlu ilave edilen deneylere ait detaylar .....	41
Tablo 3.2	DAS ve Porozite seviyeleri .....	45
Tablo 3.3	Deney Tasarımı 1 –Alüminyum folyoya sarılarak ilave edilen deneylere ait detaylar .....	45
Tablo 3.4	DAS ve Porozite seviyeleri .....	49
Tablo 3.5	Deney Tasarımı 1 – Preslenerek ilave edilen deneylere ait detaylar.....	50
Tablo 3.6	DAS ve Porozite seviyeleri .....	54
Tablo 3.7	Deney Tasarımı 1 – Referans olarak kullanılacak deneye ait detaylar ...	55
Tablo 3.8	13 numaralı deney DAS ve Porozite seviyeleri .....	56
Tablo 3.9	Blok formulu $\pi$ -Al <sub>8</sub> FeMg <sub>3</sub> Si <sub>6</sub> ve çin yazısı formulu $\pi$ -Al <sub>8</sub> FeMg <sub>3</sub> Si <sub>6</sub> intermetalik bileşiklere ait EDS analiz sonuçları .....	69
Tablo 3.10	Sr elementine ait EDS analiz sonuçları .....	71
Tablo 3.11	Çin yazısı formulu $\alpha$ -Al <sub>15</sub> (Fe,Mn) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> intermetalik bileşiklere ait EDS analiz sonuçları.....	74
Tablo 3.12	İğnesel $\beta$ -Al <sub>5</sub> FeSi intermetalik bileşiklere ait EDS analiz sonuçları .....	75
Tablo 3.13	Optimum Değerlerin Belirlenmesi ile Güncellenen Deney Tasarımı-2..	78
Tablo 3.14	690°C’de üretilen numunelerin DAS ve Porozite seviyeleri .....	81

Tablo 3.15 720°C’de üretilen numunelerin DAS ve Porozite seviyeleri .....	84
Tablo 3.16 Farklı döküm sıcaklıklarında Al+ağ%0,3TiB <sub>2</sub> ve Al5TiB tane incelticileri ile üretilen numunelerin DTA soğuma karakteristikleri .....	98

# Kısaltmalar Listesi

Al	Alüminyum
Si	Silisyum
Mg	Magnezyum
TiB <sub>2</sub>	Titanyum Bromür
TiC	Titanyum Karbür
DAS	Dentrit Kolları Arası Mesafe
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopu
XRD	X Işını Difraktometresi
DTA	Diferansiyel Termal Analiz
QI	Kalite İndeksi
UTS	Maksimum Çekme Dayanım Değeri
A	%Uzama Değeri
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alümina



# Semboller Listesi

$\alpha$	Alfa
$\mu m$	Mikrometre
$MPa$	Gerilme birimi-MegaPaskal [MPa]
%	Yüzde

# Bölüm 1

## Tezin Kapsamı ve Amacı

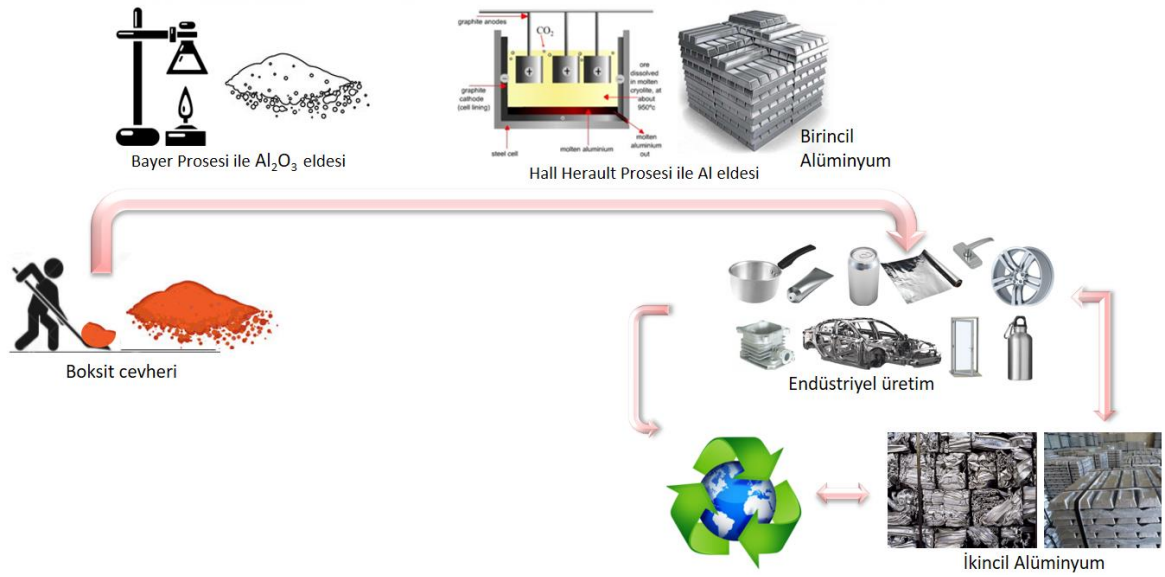
Alüminyum yer kabuğunda oksijen ve silisyum elementlerinden sonra en yaygın bulunan elementtir. Ağırlık olarak yer kabuğu kütlelerinin %8,3'ünü oluşturmaktadır [1]. Alüminyumun oksijen afinitesi çok yüksektir ve doğada oksit formu mineraller halinde bulunmaktadır. Oksit formu bileşiklerinden metalik alüminyum eldesi iki adımda gerçekleşmektedir. İlk adımda Bayer Prosesi ile boksit cevherinden Alüminyum oksit ( $Al_2O_3$  – Alumina) eldesi sağlanmakta ve ikinci adımda alüminyum oksit bileşiminden Hall-Heroult prosesi ile metalik alüminyum elde edilmektedir (Şekil 1.1). Genel olarak, 4 birim boksit cevherinden 2 birim alümina ve 1 birim metalik alüminyum elde edilmektedir [2].



Şekil 1.1: Alüminyum üretiminde a)Boksit cevheri, b) Alüminyum oksit, c)Metalik Alüminyum

Alüminyum üretim türüne göre, birincil ve ikincil olmak üzere iki basamağa ayrılmaktadır. Birincil alüminyum, alüminyumun boksit cevherinden eldesi ile başlar ve Hall-Heroult prosesi sonucunda endüstriyel uygulamalarda nihai ürüne dönüştürülecek hammaddeyi ifade eder. İkincil alüminyum ise, nihai ürüne döndürülmüş parçaların yani hurda alüminyum parçalarının geri dönüşüm yolu ile

tekrar hammaddeye çevirilmesi sonucunda elde edilmektedir. Alüminyum üretim basamakları Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2: Alüminyum üretim aşamaları şematik gösterimi

Alüminyum alaşımları yüksek mukavemet/ağırlık oranı, yüksek korozyon direnci, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, düşük yoğunluk, kolay işlenebilirlik, kaynak edilebilirlik, düşük erime noktası gibi üstün özelliklere sahiptir [2].

Üstün özellikleri sayesinde, otomotiv, havacılık sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [3]. Günümüzde enerji tasarruflu otomotiv parçalarına yönelik sürekli artan talep ile düşük ağırlıklı, yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının tercih edilebilirliği artmaktadır [4].

Alüminyum-Silisyum-Magnezyum alaşımları düşük ağırlık ve üstün mekanik özelliklerinin bileşimi sayesinde jant endüstrisinde en çok talep edilen ve yaygın olarak kullanılan döküm alaşımlarıdır [5]. Döküm hali mikroyapı Al-Si ötektik faz ile çevrili birincil  $\alpha$ -Al dendritlerinden ve Mg<sub>2</sub>Si intermetalik bileşiklerinden oluşur. Döküm hali mikroyapıda silisyum taneleri mekanik özellikleri olumsuz etkileyen kaba, sivri yapılıdır. Mekanik özellikler ötektik yapının modifikasyonu ile geliştirilmektedir. Ötektik faz modifikasyonu ısıl işlem, hızlı soğutma ve kimyasal modifikasyon uygulamaları ile sağlanmaktadır. Modifikasyon sonucunda Si taneleri kaba, sivri formdan fibröz, küresel forma dönüştürülür. Böylece mekanik özelliklerde

artış sağlanmaktadır [6]. Sodyum (Na), Stronsiyum (Sr) ve Antimon (Sb) yaygın olarak kullanılan kimyasal modifiye edicilerdir [7].

Üstün mekanik özelliklerin elde edilmesine önemli seviyede katkı sağlayan uygulamalardan bir tanesi de tane inceltme uygulamasıdır [8]. Küçük ve eşeksiz tane yapısı kaliteli bir alüminyum döküm parça elde etmek için gerekli olan vazgeçilmez bir uygulamadır. Tane inceltme uygulaması ile ürünlerin hem çekme ve akma mukavemetleri, hem de uzama değerleri gibi mekanik özelliklerinde artış meydana gelmektedir. Tane inceltici alaşım elementleri sıvı alüminyum alaşımlarına ergitme potası içerisinde ilave edilirler ve eriyik içerisinde heterojen çekirdeklenme mekanizması yapıda ince taneli çekirdeklerin oluşmasını sağlarlar [9]. Böylece tane inceltme uygulaması ile alüminyum dendrit tanelerinin oluşumu çok daha yüksek oranda gerçekleşir ve metal besleme süresi artar. Besleme süresinin artışı yapıda mikroçekinti oluşumunu engeller.

Tane inceltmenin diğer bir avantajı, alüminyum alaşımlı parçaların dökümünden sonra uygulanacak olan ısıtma işlemi süreci küçük tane yapısında daha etkin hale gelir ve işlemdeki çözeltiye alma ile yaşlandırma basamaklarının etkinliği artar. Böylece ince tane yapısına sahip olan döküm parçanın mekanik özellikleri gelişir, şekil alabilirliği, sünekliği artar. Döküm işlemi sonrası yapıda ince taneli bir yapı elde etmek için katılaştırma sürecinde yüksek çekirdeklenme hızı sağlanmalı ve oluşan çekirdeklerin büyüme hızları yavaşlatılmalıdır [10]. Bu kapsamda, endüstride alüminyum alaşımların alçak basınçlı döküm ile üretiminde tane inceltmek amacıyla filmaşın veya çubuk formda master alaşımlar ilave edilmektedir.

Çubuk, külçe, filmaşın (Şekil 1.3) formlarında kullanılan ticari tane inceltici master alaşımlar döküm yöntemi ile üretilmekte ve bu üretim sürecinde çeşitli safsızlıklara maruz kalmaktadır. Söz konusu safsızlıklara örnek olarak hidrojen, oksit tabakaları verilebilir. Bu şekilde yapısında safsızlıklar bulunan tane incelticiler sıvı metale eklendiğinde metalin kirlenmesi söz konusu olmaktadır. Döküm yöntemi ile üretilen tane incelticiler yerine toz formu tane incelticilerin kullanılması ile sıvı metalin kirlenmesinin minimum seviyeye indirilmesi hedeflenmektedir.



Şekil 1.3: Geleneksel tane inceltici Al5TiB alaşımları, a) Çubuk formu, b) Filmaşın formu, c) Külçe formu

Aynı zamanda tane incelticilerin pota içerisinde bekleme süreleri kısıtlıdır. Belirli bir süre sonunda dibe çökmeye ve etkinliklerini kaybetmeye başlarlar. Sıvı metale yoğunluk olarak benzer ve kristallografik olarak en üstün derecede uyum sağlayabilecek, homojen dağılım gösterecek ve pota dibine çökmeyecek tane inceltici alaşımlar eklendiğinde söz konusu olumsuz etkilerin azalacağı öngörülmektedir. Dolayısıyla, mekanik alaşımlama ile üretilecek optimum kompozisyondaki tane inceltici ilavesi ile döküm parça kalitesinin artırılması amaçlanmaktadır.

Bu projede, eriyiğe eklenen toz formda tane incelticilerin tane yapısı ve faz dağılımları, ikincil fazlar ve ötektik faz morfolojileri incelenecektir. Aynı zamanda dökümü yapılan parçalardan alınan numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki değişiklikler analiz edilecektir. Döküm A356 alaşımlarına uygun tane inceltici ilavesi ile parçaların tane yapısının homojen bir şekilde küçültülmesi istenmektedir. Sonuçta, mekanik özelliklerden akma ve çekme mukavemetlerinde artış ve süneklikte en az %20 oranında bir iyileşme sağlanması beklenmektedir.

## 1.1 Teorik Bilgi

### 1.1.1 Alüminyum Alaşımları

Saf haldeki alüminyum yoğunluğu  $2,7 \text{ g/cm}^3$  olan nispeten yumuşak bir metaldir ve akma mukavemeti  $34,5 \text{ N/mm}^2$ , çekme mukavemeti  $90 \text{ N/mm}^2$ 'dir. Geniş bir alaşım yelpazesinin geliştirilmesi ile çeşitli mukavemet değerlerinin elde edilebilirliği sağlanmıştır [11].

Alüminyum alaşımlarının tüm mekanik, kimyasal, fiziksel özellikleri bileşimlerine ve mikroyapılarına bağlıdır. İstenilen özelliklerin sağlanması bir ya da daha fazla element ile alaşımlama yapılmaktadır [12]. Başlıca alaşım elementleri Bakır (Cu), Magnezyum (Mg), Silisyum (Si), Mangan (Mn), Nikel (Ni) ve Çinko (Zn). Alaşım elementlerinin kullanımları sayesinde saf alüminyumun mekanik özelliklerinin artırılması sağlanmaktadır. Cu ve Mg elementleri ilavesi ile alaşım ısıl işlem uygulanabilirlik özelliği kazanmaktadır ve çökeltme sertleşmesi mekanizması ile mekanik özelliklerin artırılması sağlanmaktadır [11].

Alüminyumun erime sıcaklığı saflık oranına göre değişmektedir ve alaşımlama işlemi ile erime noktası düşürülebilmektedir. %99.9 saflıkta olan alüminyumun erime noktası  $660^\circ\text{C}$  iken bazı magnezyum alaşımlarında erime noktası  $500^\circ\text{C}$ 'lere kadar düşebilmektedir [13].

#### 1.1.1.1 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırması

Alüminyum alaşımları üretim proseslerine, ısıl işlem uygulanabilirliklerine ve kimyasal kompozisyonlarına göre sınıflandırılmaktadır. Alüminyum alaşımları dökme ve dövme alaşımlar olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Çoğu alaşım faz çözünürlüklerine bağlı olarak ısıl işleme yanıt vermektedir. Isıl işlem çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma (çökelti sertleşmesi) adımlarını içermektedir [12].

Döküm alüminyum alaşımları tanımlamaları Tablo 1.1'de gösterildiği gibi 4 basamaklı bir sayısal sistem kullanılarak ifade edilir ve ilk rakam ana alaşım elementini belirtir. İkinci ve üçüncü rakamlar alüminyum alaşımını tanımlar. Bununla birlikte üçüncü ve dördüncü rakamlar arasında bir nokta bulunur ve bu noktadan

sonraki son rakam alüminyum alaşımının döküm ya da külçe formunda olduğunu belirtir. ‘0’ bir alaşıma işaret ederken ‘1 ve 2’ külçe olduğunu gösterir. Sayısal tanımlamadan önceki harf, orijinal alaşımın bir modifikasyonunu veya safsızlık sınırını gösterir (Örn. A356.0) [14].

Tablo 1.1: Döküm Alüminyum Alaşımının Ana Alaşım Elementleri ve Tanımlamaları

<b>Alaşım Simgesi</b>	<b>Ana Alaşım Elementi</b>
<b>1xx.x</b>	Saf Al, %99,00 max.
<b>2xx.x</b>	Cu
<b>3xx.x</b>	Si, Cu ve/veya Mg
<b>4xx.x</b>	Si
<b>5xx.x</b>	Mg
<b>7xx.x</b>	Zn
<b>8xx.x</b>	Sn
<b>9xx.x</b>	Diğer Elementler
<b>6xx.x</b>	Kullanılmayan Seriler

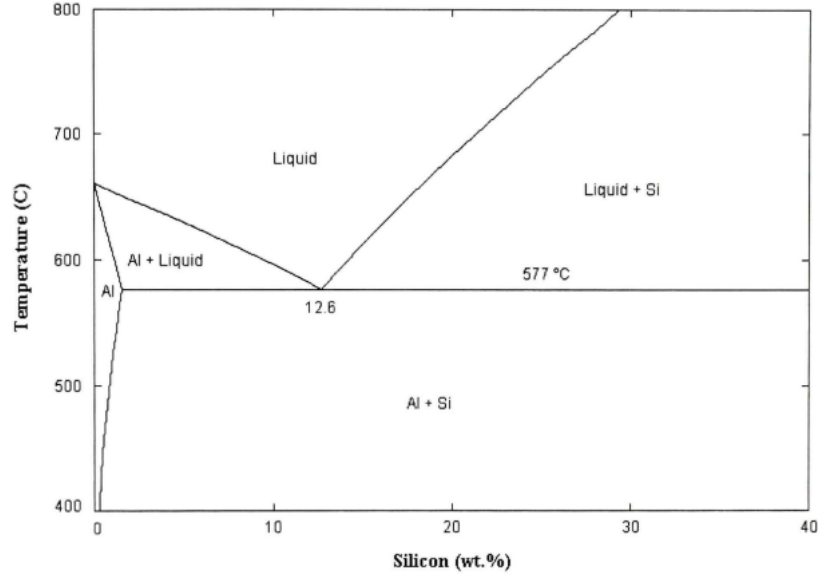
Dövme alüminyum alaşımları Tablo 1.2’de gösterildiği gibi döküm alaşımlara benzer şekilde 4 basamaklı sayısal sistem ile ifade edilir. İlk rakam serinin ana alaşım sınıfını tanımlar. İkinci rakam orijinal alaşımdaki varyasyonları tanımlar. Orijinal alaşım için ‘0’, ilk varyasyon için ‘1’, ikinci varyasyon için ‘2’ tanımlanır ve diğer varyasyonlar için de aynı şekilde devam eder. Üçüncü ve dördüncü rakamlar serideki alaşımı belirtir [14].

Tablo 1.2: Dövme Alüminyum Alaşımının Ana Alaşım Elementleri ve Tanımlamaları

<b>Alaşım</b>	<b>Ana Alaşım Elementi</b>
<b>1xxx</b>	Al, min.. %99,00 veya daha yüksek
<b>2xxx</b>	Cu
<b>3xxx</b>	Mn
<b>4xxx</b>	Si
<b>5xxx</b>	Mg
<b>6xxx</b>	Mg ve Si
<b>7xxx</b>	Zn
<b>8xxx</b>	Diğer Elementler (örn, Fe, Sn)
<b>9xxx</b>	Yeni Nesil

## 1.1.2 Alüminyum-Silisyum-Magnezyum Alaşımları

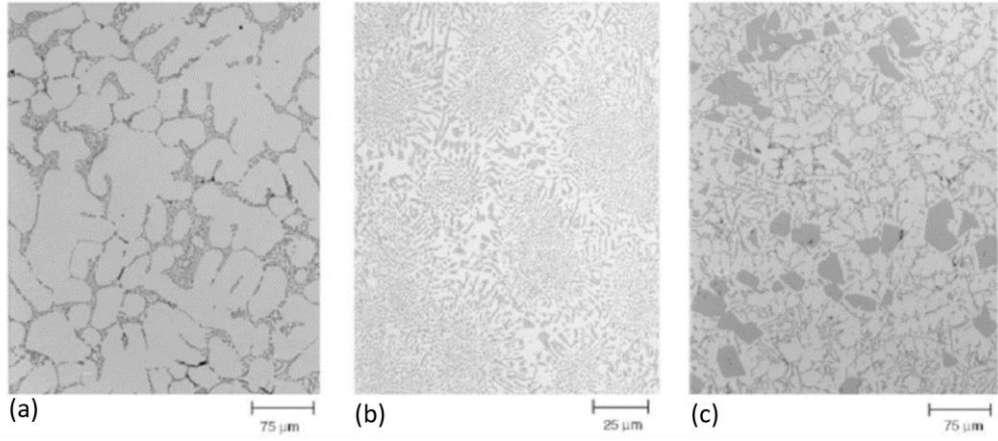
Çift fazlı Al-Si alaşımları mükemmel akışkanlık, dökülebilirlik, korozyon direncine sahiptir ancak düşük mukavemet ve zayıf işlenebilirlik sergiler. Şekil 1.4'te verilen Al-Si faz diagramında 577 °C'de ve %12,6 'da ötektik faz oluştuğu belirtilmektedir [15].



Şekil 1.4: İkili Al-Si Faz Diagramı [15]

Alaşımdaki Silisyum oranına bağlı olarak, Al-Si alaşımları 3 gruba ayrılmaktadır. Alaşımdaki silisyum içeriği %5 ile %10 arasında ise ötektik altı, %11 ile %13 arasında ise ötektik, %14 ile %20 arasında ise ötektik üstü alaşım olarak adlandırılmaktadır [15]. Ötektik ve ötektik altı alaşımlarda sıcaklık azaldıkça  $\alpha$ -Al fazı oluşur ve ötektik reaksiyon gerçekleşir. Ötektik ve ötektik altı alaşımların korozyon direnci ve dökülebilirlik özellikleri daha yüksektir. Ötektik üstü alaşımların aşınma direnci ötektik altı alaşımlara kıyasla daha yüksek olup süneklik özellikleri daha düşüktür [16]. Ötektik, ötektik altı ve ötektik üstü fazların mikroyapıları şekil 1.5'de gösterilmiştir [17].





Şekil 1.5: Al-Si alaşımlarına ait mikroyapı görüntüleri. (a) Ötektik altı alaşım (b) Ötektik alaşım (c) Ötektik üstü alaşım [17]

Alüminyum-Silisyum alaşımlarına az miktarda Mg ya da Cu elementlerinin ilavesi sonucunda alaşıma ek özellikler kazandırılabilir. Cu elementinin ilavesi mukavemet, termal iletkenlik ve işlenebilirlik özelliklerini geliştirirken, Mg elementinin ilavesi yaşlanma sertleşmesini uygulanabilir kılar. Al-7Si-0,3Mg (A356) alaşımına genel olarak solüsyona alma, su verme ve yapay yaşlandırma adımlarından oluşan T6 ısıt işlemleri uygulanmaktadır [15,16]. A356 alaşımı kimyasal kompozisyon değerleri Tablo 1.3'te verilmiştir.

Tablo 1.3: A356.0 alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu

<i>A356.0</i>								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Diğer	Al min.
<b>6,5-7,5</b>	<b>0,20</b>	<b>0,20</b>	<b>0,10</b>	<b>0,25-0,45</b>	<b>0,10</b>	<b>0,20</b>	<b>0,15</b>	<b>Kalan</b>

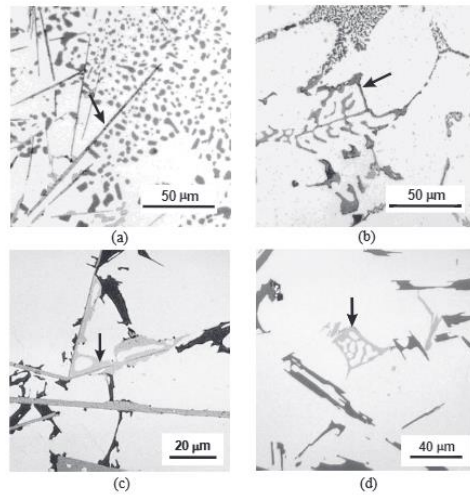
Al-Si-Mg alaşımının mikroyapısında birincil  $\alpha$ -Al dendrit taneleri, kaba ve iğnesel yapılı ötektik silisyum taneleri,  $Mg_2Si$  intermetalik bileşikler ile Fe bazlı intermetalik bileşikler mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir. İnce yapılı  $\alpha$ -Al taneleri ve küresel Si taneleri mekanik özellikleri önemli ölçüde geliştirmektedir [18]. Si tanelerinin küreselliklerinin sağlanması ile %uzama, akma ve kopma dayanım değerlerinde artış meydana gelmektedir [19]. Termal ve kimyasal modifikasyon ile Si tanelerinin yapısı kaba-iğnesel yapılı formdan küresel forma dönüşmektedir.

Mg<sub>2</sub>Si intermetalik bileşikleri çin yazısına benzer morfolojileri nedeni ile ‘Chinese Script’ formu ile tanımlanmaktadır. Mg<sub>2</sub>Si bileşikleri ısıtıl işlem görmemiş A356 alaşımının mikroyapısında Şekil 1.6’da gösterildiği gibi intermetalik (a), (b) formda bulunurlar. Mg<sub>2</sub>Si intermetalik bileşikleri ısıtıl işlem uygulaması sonrasında Al matris içerisinde çökelerek mekanik özelliklerin artışına katkı sağlar (c).



Şekil 1.6: A356 alaşımının (a), (b) ısıtıl işlemsiz ve (c) ısıtıl işlemlili mikroyapıları. 1, 2, 3: Mg<sub>2</sub>Si intermetalik bileşikleri

A356 alaşımlı ürünlerin mekanik özellikleri yapıda bulunan intermetalik bileşiklerin varlıkları, yoğunlukları ve boyutlarından etkilenmektedir. Fe (Demir) alaşımında mevcut olan diğer elementler ile mekanik özellikler üzerinde negatif etki yaratan intermetalik bileşikler oluşur. Fe bazlı intermetalik bileşikler alaşımdaki demir oranı ve soğuma hızı gibi faktörlerin etkisi ile farklı morfolojilerde (Şekil 1.7) oluşmaktadır.  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi intermetalikleri iğnesel formda,  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(Fe,Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> intermetalikleri çin yazısı, iskelet, kübik ya da polihedral kristal formlarda,  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> intermetalikleri kaba blok ya da çin yazısı formlarında oluşmaktadır. [20, 21].



Şekil 1.7: Fe bazlı intermetalik bileşiklerin farklı morfolojileri. (a) iğnesel  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi, (b) çin yazısı formu  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(Fe,Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>, (c) blok formu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub>, (d) çin yazısı formu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> [21]

### 1.1.2.1 Ötektik Silisyum Modifikasyonu

Ötektik silisyum taneleri Al-Si alaşımının mekanik özellikleri üzerinde önemli rol oynamaktadır. Normal şartlar altında, ötektik Si taneleri mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyen kaba, iğnemsî ve lamelli morfolojidedir. Mekanik özelliklerin geliştirilmesi silisyum tanelerinin modifikasyonu ile sağlanmaktadır. Modifikasyon kimyasal modifikasyon, termal modifikasyon ve hızlı katılaşma olmak üzere üç farklı uygulama ile gerçekleştirilmektedir. Modifikasyon sonucunda ötektik silisyum tanelerinin kaba, iğnemsî morfolojileri ince ve küresel morfolojiye dönüştürülmektedir [22,23,24].

### 1.1.2.2 Kimyasal Modifikasyon

Ötektik faz kimyasal modifikasyonu Na (Sodyum), Sr (Stronsiyum), Sb (Antimon), K (Potasyum), Rb (Rubidyum), Ce (Seryum), Ca (Kalsiyum), Ba (Baryum), La (Lantanyum), Yb (İterbiyum) elementlerinin ilavesi ile gerçekleştirilmektedir. Endüstri uygulamalarında çoğunlukla Na, Sr, Sb elementleri kullanılmaktadır. Kullanılacak modifikasyon elementlerinin miktarları alaşımın kompozisyonu, katılaşma hızı gibi faktörlerle ilişkilidir. Örneğin, silisyum oranının artışı daha fazla modifiye edici kullanılmasını gerektirirken, katılaşma hızının yüksek olması daha az modifiye edici kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Al-Si alaşımlarına, modifiye edici olarak Sr ilavesi genellikle 100-200 ppm (0,01-0,02 ağırlık%) oranlarında yapılmaktadır [7,23].

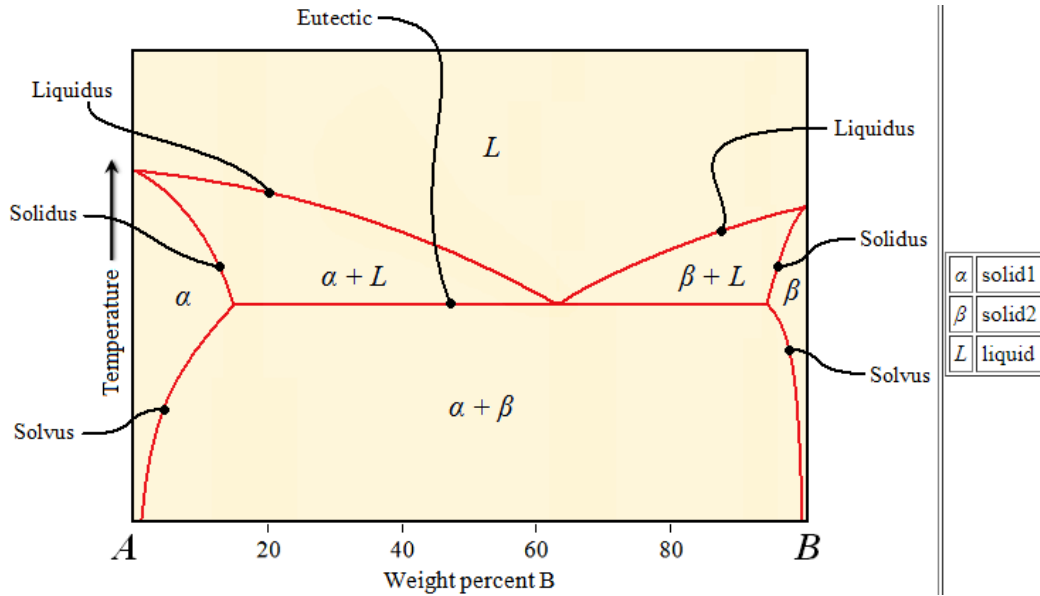
Saf Sr hava ve su buharı ile tepkimeye girme eğiliminde olup birkaç dakika içerisinde SrO, SrO<sub>2</sub>, Sr(OH)<sub>2</sub>, (CaSr)NO<sub>3</sub> bileşiklerini oluşturmaktadır. Bu nedenle modifiye edici olarak saf Sr kullanımı yerine master alaşımlarının kullanılması tercih edilmektedir. Sr master alaşımlarına örnek olarak AlSr<sub>3,5</sub>, AlSr<sub>10</sub>, AlSr<sub>15</sub> alaşımları verilebilir [7].

### 1.1.2.3 Isıl İşlem

Çözelti sertleşmesi çoğu alüminyum alaşımına mukavemet kazandırmak için yeterli etkiye sahip değildir ve bu nedenle yüksek mukavemet elde etmek için farklı yöntemlerin uygulanması gerekmektedir. Çökelti sertleşmesi yüksek mukavemet elde

edilebilmesi için uygulanan en etkili yöntemdir. Çökelti sertleşmesi, çökeltiler yaşlandırma prosesinde elde edildiği için yaşlandırma olarak da adlandırılmaktadır. Çökelti sertleşmesi ile mukavemet kazandırılabilen alüminyum alaşımları ısıl işlem uygulanabilir alaşımlardır [25].

Bir alüminyum alaşımına çökelti sertleşmesi (yaşlandırma) işleminin uygulanabilmesi için alaşımın yüksek sıcaklıklarda kayda değer çözünürlüğe, düşük sıcaklıklarda ise minimum çözünürlüğe sahip en az bir element ya da bileşik içermelidir. Cu, Zn, Mg ve Si elementleri bu özelliğe sahiptir ve alüminyum matris içerisinde metaller arası (intermetalik) çökelti oluşturabilirler. Bu şekilde alaşım içerisinde daha az miktarda bulunan ikinci fazın ana faz içerisinde çökmesinin sağlanması ile mukavemet artışı sağlanmış olacaktır. Şekil 1.8’de örneği gösterilen faz diagramında solvus eğrisi bulunan yani katı çözelti bölgesi bulunan alaşımlara çökelti sertleşmesi uygulanabilir [26,27].



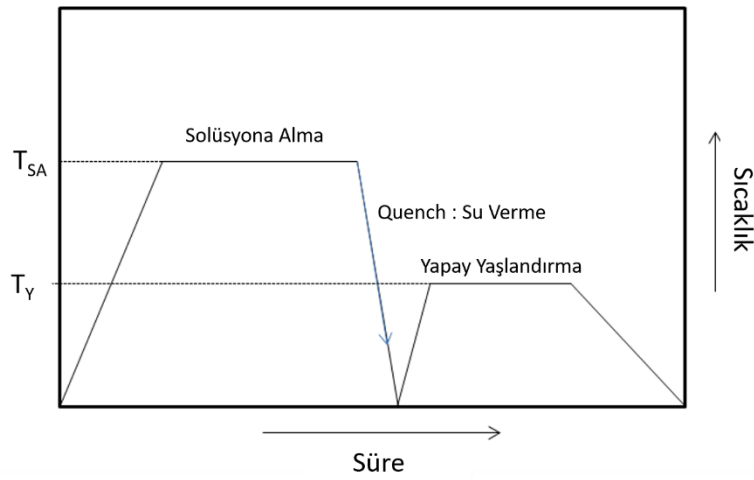
Şekil 1.8: İkili Faz Diagramı [28]

Isıl işlem uygulanabilir alüminyum alaşımları yüksek sıcaklığa ısıtılıp bir süre o sıcaklıkta bekletildiğinde (solüsyona alma) alaşım elementleri matris içerisinde çözünür. Daha sonra düşük bir sıcaklığa soğutulduğunda (quench) alaşım elementlerinin atomları Al matris içerisinde donar ve aşırı doymuş katı çözelti (Supersaturated Solid Solution-SSSS) oluştururlar. Katı çözelti oluşturulmuş alaşım, orta derecede bir sıcaklığa tekrar ısıtıldığında aşırı doymuş alaşım elementleri ayrışır

ve Al matris içerisindeki diğer elementler ile birleşerek çökelti olarak adlandırılan intermetalik yani metaller arası bileşikler oluşturur [25]. İnce yapılı ve homojen olarak dağılmış çökeltiler alaşımın mekanik özelliklerinin gelişmesini sağlamaktadır [29].

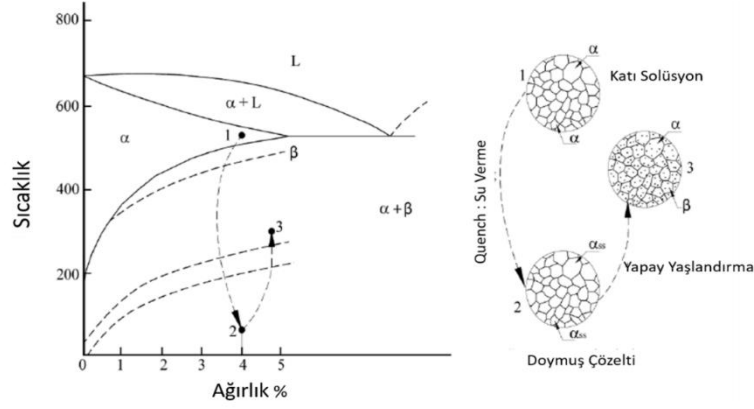
Isıl işlem uygulaması ile dökülmüş ürünün metalürjik yapısı değişmekte ve mekanik özellikleri geliştirmektedir. Mg elementi ısıl işlem sonucunda yapıda çökelti oluşturarak mekanik özelliklerin gelişmesini sağlamaktadır.

T6 ısıl işlem prosesi solüsyona alma, su verme (Quench) ve yaşlandırma adımları olmak üzere 3 adımdan (Şekil 1.9) oluşmaktadır [30].



Şekil 1.9: T6 ısıl işlemi basamakları [30]

T6 ısıl işlemi sürecinde, dökülmüş ürün katılaşma sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılmakta ve bir süre bu sıcaklıkta bekletilmektedir. Solüsyona alma adımı tek fazlı  $\alpha$ -Al bölgesinde gerçekleşmekte ve alaşım elementlerinin çözünürlüklerinde artış sağlanmaktadır. Çözeltiyeye alma adımının ardından su verme işlemi ile hızlı soğutma gerçekleşmekte ve böylece çözülmüş elementlerin çökmesi engellenerek düşük sıcaklıkta yüksek doygunlukta bir yapı elde edilmektedir. Son adım olan yapay yaşlandırma işlemi, su verilmiş ürünün yaşlandırma fırınlarında, belirli yaşlandırma sıcaklıklarında bekletilmesi ile gerçekleşmektedir. Yapay yaşlandırma adımı sonucunda A356 alaşımının yapısında bulunan Mg elementlerinin çökerek yapıda mekanik dayanımı artırma özelliğine sahip olan çökeltileri oluşturması sağlanmaktadır [44]. T6 ısıl işlemi ve çökelti sertleşmesi mekanizması Şekil 1.10'da verilmiştir [30].



Şekil 1.10: T6 Isıl işlemi ve çökeltili sertleşmesi mekanizması [30]

### 1.1.3 Tane İnceltme Uygulaması

Tane inceltme A356 alaşımlı döküm parçaların sünekliğini düşürmeden mekanik özelliklerin artırılmasını sağlayan en etkin uygulamadır [30]. Tane inceltme uygulaması ile homojen, ince ve eş eksenli tane yapısı sağlayarak Al-Si-Mg döküm alaşımlarının kalitesini artırmanın yanı sıra üretilen parçaların süneklik ve çekme, akma mukavemetleri ile uzama değerleri gibi mekanik özelliklerinin artmasını sağlamaktadır. Tane inceltme uygulaması katılaşma esnasında beslemenin artmasına da katkı sağlayarak döküm prosesinin etkinliğini arttırmaktadır. Böylece mikroçekinti oluşumunun azalmasına da katkı sağlanmaktadır. Alüminyum alaşımları için Al-Ti-B üçlü faz sistemine ait master alaşımlar yaygın olarak kullanılmaktadır. A356 alaşımında tane inceltici olarak Al-5Ti-B alaşımı kullanılmaktadır ancak Ti elementinin ana alaşımdaki Si elementi ile reaksiyona girme yeteneği yüksek olduğu için alaşımın tane inceltme uygulamasını olumsuz etkilemektedir [31-32].

Tane inceltme uygulamasına ek olarak soğuma hızını arttırmak tane boyutunu değiştirmek için kullanılan en etkili yöntemlerden biridir. Ancak soğuma hızı etkisi ile tane boyutu değişimi alçak basınçlı dökümde üretilen kompleks şekilli parçalarda kesit kalınlığına bağlı olarak farklılık göstermekte ve bu farklılık sonucunda verim düşmektedir. Alüminyum alaşımlı parçaların dökümünde, bu farklılıkların ortadan kaldırılması ve homojen dağılmış, ince, eş eksenli tane yapısı elde edilebilmesi için en etkili yöntem tane inceltici kullanmaktır [9].

Döküm parçalarda ince tane yapısı elde etmek için katılaşma sürecinde yüksek çekirdeklenme hızı sağlanmalı ve oluşan çekirdeklerin büyümeleri yavaşlatılmalıdır.

Bu kapsamda endüstride döküm alüminyum alaşımlı parçaların üretiminde tane incelmesini sağlamak amacıyla filmaşın veya çubuk formda master alaşımlar kullanılmaktadır. Tane inceltici alaşım elementleri sıvı alüminyum alaşımlarına ergitme potası içerisinde ilave edilirler ve eriyik içerisinde heterojen çekirdeklenme mekanizması ile yapıda ince taneli çekirdeklerin oluşmasını sağlarlar [9].

Tane inceltici alaşımların kullanılması ile gerçekleşen iyileşmeler Hall-Petch denkleminde ve tane boyutunun küçülmesine dayanmaktadır. Komşu taneler ortak tane sınırlarına sahiptir. Bu ortak tane sınırlarında plastik deformasyon sırasında kayma ve dislokasyon hareketleri gerçekleşmektedir. Kristalografik yönleri farklı olan komşu tanelerden birinden diğerine geçen dislokasyon hareketi yönünü değiştirmek zorunda kalmaktadır. Tanelerin kristalografik yönlenmesi arttıkça dislokasyon hareketleri güçleşmektedir. Ek olarak, tane sınırında var olan atomik düzensizlik, kayma düzleminin bir taneden diğerine geçişi sırasında süresiz davranmasına yol açmaktadır. Böylece tane sınırları dislokasyon hareketini engelleyici rol oynamaktadır. Deformasyon sürecinde, dislokasyonlar tane sınırını aşamayabilir ve tane sınırlarında birikir. Tane sınırlarında biriken bu dislokasyonlar komşu tanelerde yeni dislokasyon oluşturan kayma düzlemlerinde gerilim birikmesine yol açmaktadır. Hall-Petch denkleminde de formülize edildiği üzere (1.1) ince tane yapısı, kaba tane yapısına oranla daha fazla tane sınırına sahip olacağından dislokasyon hareketlerini engelleyici rol oynayacaktır ve böylece mukavemeti daha yüksek olacaktır. Pek çok malzeme için akma mukavemeti ( $\sigma$ ) tane boyutuna göre değişmektedir. Hall-Petch denkleminde akma mukavemeti  $\sigma$ ,  $\sigma_0$  dislokasyon hareketini başlatmak için gerekli olan gerilim miktarı,  $k$  malzemeye özgü mukavemet katsayısı,  $d$  tane boyutu değerlerine karşılık gelmektedir [33].

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{1/2} \quad (1.1)$$

Tane inceltme uygulaması ile ısıtma işlemi prosesinin etkinliğinde artış meydana gelmektedir. Isıtma işlemi prosesi ince tane yapısında daha etkin hale gelmekte ve inceltmiş tane yapısına sahip alüminyum alaşımlı parçalarda çözültüye alma, yaşlandırma basamaklarının etkinliği artmaktadır. Böylece ince tane yapısına sahip parçaların mekanik özelliklerinde yüksek oranda artış meydana gelmektedir [10].

Günümüzde yaygın olarak kullanılan Al-5Ti-1B alaşımı tane inceltici olarak sıvı metale eklendiğinde TiB<sub>2</sub> ve TiAl<sub>3</sub> partiküllerine ayrışır ve bu partiküller α-Al tanelerinin çekirdeklenmesini sağlamaktadır [34]. TiAl<sub>3</sub>, alüminyum içerisinde yüksek çözünürlüğe sahip olması nedeni ile zamanla tane inceltici etkisini kaybeder ancak aynı zamanda tane büyümesini yavaşlatıcı etki göstermektedir [35].

TiAl<sub>3</sub> partiküllerinin aksine, TiB<sub>2</sub> alüminyum içerisinde çözünürlüğe sahip değildir. Böylece yüksek çekirdeklendirme performansı gösterir ve tane inceltme uygulamasının verimliliğinin artmasını sağlar [9].

Al-Ti-B tane inceltici ve Al-Sr ana alaşımları kombine olarak alüminyum alaşımlarına eklendiğinde, tane inceltme ve modifikasyon etkilerinin karşılıklı zehirlenmesine yol açtığı literatürde bildirilmektedir. Tane incelticiler Al-Si alaşımlarına eklendiğinde Si ile tepkimeye girme eğilimi gösterip Si-Ti bileşikleri oluşturmaktadır. Söz konusu bileşikler alaşımın tane inceltici etkisinin azalmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda ötektik faz morfolojisini, yani Si tanelerinin modifikasyonunu sağlamak amacıyla eklenen Sr ile tane inceltici alaşımdaki B bileşik oluşturma eğilimi gösterecek ve modifikasyon verimi de azalacaktır [35].

Söz konusu olumsuzlukların oluşmasına engel olmak ve etkili bir şekilde tane incelmelerini sağlayabilmek amacıyla alüminyum alaşımı ile kristalografik olarak uyumlu, ıslanabilirliği yüksek, sıvı eriyik içerisinde çözünmeden kalabilen ve pota içerisinde dibe çökmemesi için yoğunluk olarak sıvı metale benzer alaşımlar kullanılmalıdır.

Bu kapsamda Al alaşımlarının mekanik özelliklerini arttırmak amacıyla toz katkı malzemeleri kullanılabilir. Örneğin, çekme dayanımını arttırmak için seramik katkıları eklenebilir. Ancak seramik partiküller ile Al arasındaki zayıf ıslatılabilirlik nedeniyle seramik partiküller α-Al tane sınırlarında segregasyon olup sünekliğin azalmasına neden olacaktır. Al alaşımı ile yüksek uyumlu olan ve ıslatılabilirliği yüksek olan tane inceltici toz partiküller kullanıldığında, partiküllerin tane sınırlarında segregasyon olması engellenecek ve tane sınırları dışında Al matris içinde dağılımı gerçekleşecektir [36]. Böylece mekanik özelliklerin iyileşmesi sağlanacaktır.

Endüstride yaygın olarak kullanılan çubuk, külçe, filmaşın formlarında kullanılan ticari tane inceltici master alaşımlar döküm yöntemi ile üretilmekte ve bu üretim



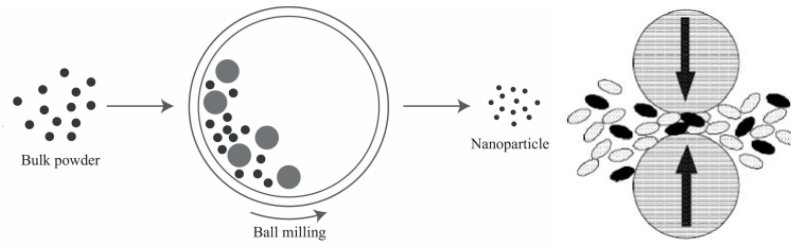
sürecinde çeşitli safsızlıklara maruz kalmaktadır. Söz konusu safsızlıklara örnek olarak hidrojen ve oksit tabakaları verilebilir. Bu şekilde yapısında safsızlıklar bulunan tane incelticiler sıvı metale eklendiğinde metalin kirlenmesi yani kalitesinin düşmesi söz konusu olmaktadır. Döküm yöntemi ile üretilen tane incelticiler yerine toz formulu tane incelticilerin kullanılması ile sıvı metalin kirlenmesinin minimum seviyeye indirilmesi hedeflenmektedir. Aynı zamanda tane incelticilerin pota içerisinde bekleme süreleri kısıtlıdır. Belirli bir süre sonunda dibe çökmeye ve etkinliklerini kaybetmeye başlarlar. Sıvı metale yoğunluk olarak benzer ve kristallografik olarak en üstün derecede uyum sağlayabilecek, homojen dağılım gösterecek ve pota dibine çökmeyecek tane inceltici alaşımlar eklendiğinde söz konusu olumsuz etkilerin azalacağı düşünülmektedir. Dolayısıyla, mekanik alaşımlama ile üretilen optimum kompozisyondaki tane inceltici ilavesi ile yapılacak parça üretiminde döküm performansı ile döküm parça kalitesinin artırılması ve sonucunda şekillendirilebilme ve sünekliğin artırılması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada, tane inceltme amacıyla laboratuvar ortamında üretilen toz formda kompozit tane incelticiler kullanılmıştır. Referans olarak, A356 alaşımı jant üretiminde yaygın olarak kullanılan Al5TiB tane incelticiler kullanılarak dökülen parçaların mekanik test sonuçları alınacaktır. Laboratuvar ölçeğinde kompozit toz tane incelticilerin üretiminde ise; Al, TiB<sub>2</sub>, TiC tozları kullanılarak yüksek enerjili bilyeli öğütme yöntemi ile homojen karıştırma performansı sonucunda Al+TiB<sub>2</sub> ve Al+TiC tozları üretilen ve iki farklı tane inceltici olarak kullanılacaktır. Bilyeli öğütücü ile homojen karışımları sağlanarak üretilen her iki tane inceltici dört farklı oranda ve üç farklı formda A356 eriyiğine ilave edilecek ve üretilen parçaların mekanik özellikleri incelenecektir. Çalışma sonucunda en iyi performans sergileyen, mekanik özelliklere en yüksek oranda katkı sağlayan tane inceltici, optimum döküm sıcaklığı tespit edilecek ve çubuk formda tane incelticiler yerine toz formulu tane incelticilerin kullanılmasının A356 alaşımının mekanik özelliklerine olan etkisi araştırılacaktır.

## 1.1.4 Mekanik Alaşımlama

### 1.1.4.1 Yüksek Enerjili Bilyeli Öğütme

Mekanik alaşımlama (MA), yüksek hızlı bir bilyeli değirmende farklı metal toz parçacıklarının kaynaklanması, kırılması ve tekrar kaynaklanmasını içeren katı hal toz işleme prosesidir [37]. Bilyeli değirmen kullanılarak gerçekleştirilen mekanik alaşımlama sürecinde bilyelerin etkisi ile yüksek darbe enerjisi oluşur ve nano boyutlarda tanelerin elde edilmesi sağlanır [38]. Tane boyutlarında meydana gelen küçülmeye ek olarak mekanik alaşımlama sonucunda homojen dağılmış bir kompozit toz elde edilmektedir. Çarpışan bilyeler arasında hapsolan tozlar darbe enerjisi ile plastik deformasyona uğrar ve kırılır, tekrar kaynaklanır. Tozların yapısı ve parçacık boyutları sürekli olarak değişime uğrar. Şekil 1.11’de mekanik alaşımlama prensibi gösterilmiştir.



Şekil 1.11: Mekanik alaşımlama prensibi [38]

Mekanik alaşımlama karmaşık bir prosestir ve istenilen ürünün elde edilmesi için bir dizi değişkenin optimize edilmesi gerekir. Örneğin, bakır oksidin demir ile indirgenmesi sırasında bir yanma reaksiyonu başlayabilir. Ancak aynı reaksiyonun, biraz farklı öğütme koşulları altında kademeli olarak ilerlemesi de sağlanabilir. Sonuç olarak, farklı laboratuvarlardan elde edilen sonuçlar, ancak reaksiyonun gerçekleştiği kesin koşullar bildirilirse etkili bir şekilde karşılaştırılabilir. Bu koşulların en iyi verim için optimize edilmelidir [37]. Mekanik alaşımlama işlemi partikül boyutunu ve kristal yapıyı belirlediği için, yanma reaksiyonu için gerekli olan tutuşma sıcaklığı (Ignition Temperature :  $T_{ig}$ ) öğütme süresinin artışı ile azalmaktadır. Artan öğütme süresi ile tozların sıcaklığı ( $T_c$ ) artar ve  $T_{ig}$  ve  $T_c$  sıcaklıklarının kesiştiği kritik süre ( $t_{ig}$ ) yanmanın gerçekleştiği süreyi ifade etmektedir. Üretilen mekanik alaşımlama nihai yapısı

üzerinde etkisi olan bazı önemli parametreler aşağıda sıralanmıştır ve bu parametreler birbiri ile bağlantılıdır [37].

- Değirmen türü,
- Değirmen öğütücü haznesi,
- Öğütme hızı,
- Öğütme süresi,
- Bilye-toz ağırlık oranı,
- Bilye çapı,
- Haznenin doldurulma oranı,
- Öğütme atmosferi,
- Öğütme sıcaklığı.

Değirmen türü, tozun türüne, istenilen nihai ürüne, toz miktarına bağlı olarak değişmektedir.

Hazne, öğütme aşamasında aşınmayacak, kontaminasyon yaratmayacak özellikte seçilmelidir. Genellikle temperlenmiş çelik, paslanmaz çelik, takım çeliği, sertleştirilmiş çelik, WC-Co (Tungsten karbür-Kobalt) alaşımli hazneler kullanılmaktadır.

Öğütme hızı, hazne içerisindeki sıcaklığı yüksek miktarda attırmayacak ve bilyelerin haznenin duvarına yapışarak öğütme işleminin etkinliğini azaltmayacak seviyelerde seçilmelidir. Öğütme esnasında sıcaklıkta artış meydana gelmektedir. Öğütme hızının optimum seviyenin üzerine çıkması oluşan sıcaklığın artmasına ve hazne içerisinde kontaminasyon oluşmasına ya da tozun yapısının değişmesine neden olmaktadır.

Bilye-toz ağırlık oranı (Ball to powder weight ratio : BPR) nihai ürüne ulaşmak için çok önemli bir parametredir. BPR ne kadar yüksek olursa, öğütme süresi o kadar kısalmaktadır. Bilyelerin ağırlık oranındaki artış sebebiyle birim zamandaki bilyelerin birbirleri ile çarpışma sayısı yükselir ve toz tanelerine daha fazla enerji aktarımı sağlanmış olur. Hazne içerisinde bilyelerin etkin bir şekilde hareket edebilmelerinin sağlanması için, haznenin doluluk oranı çok önemlidir ve bu nedenle genellikle haznenin %50'si boş bırakılır. Hazne içerisinde bilyelerin sayısı ve toz oranı çok az ise üretim oranı çok düşük olacaktır. Karşılık olarak toz ve bilyelerin oranı çok fazla ise, bilyelerin hareket etmesi için yeterli boşluk bulunmayacağından enerji boşa

harcanacaktır. Öğütmenin argon atmosferinde gerçekleştirilmesi tozların kontamine olmasını engelleyeceği için tercih edilmektedir [37].

Mekanik alaşımlama uygulamasında bilye çapı yanma reaksiyonu üzerinde etkili bir parametredir. Bilye çapının artışı yanma reaksiyonu için ateşleme süresini azaltmaktadır. Yanma oluşması için toz karışımının tutuşma sıcaklığına (Ignition Temperature : $T_{ig}$ ) ulaşması gerekir. Mekanik alaşımlama esnasında, toz parçacıklar ve bilyeler arasındaki çarpışma toz sıcaklığını yükseltir. Bu nedenle artan bilye boyutu ile toz sıcaklığı yükselecektir. Parçacık boyutu, kristal yapısı gibi mikroyapısal özellikler yanma reaksiyonundan direkt olarak etkilenmektedir [37].

## 1.2 Literatür Özeti

Zhiwei Liu ve arkadaşları toz Ti partikülleri erimiş A356 alaşımına ekleyerek in situ tekniği ile  $Al_3Ti$ /A356 kompozitini elde etmiş ve  $800^{\circ}C$ 'de sıvı metale eklemiş ve T6 ısıl işlemleri sonrasında mekanik özelliklerini incelemiştir. Toz Ti partikülleri ağırlıkça %1,5 ve %3,0 oranlarında eklenmiştir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda, 1, 3 ve 5 dakika sonunda Ti partiküllerinin küçük boyutlu Al, Si ve Ti partikülleri ile çevrelendiği, A356 alaşımı içerisinde tam olarak çözünemediği ancak 10 dakika sonunda çözünememiş Ti partikülü kalmadığı tespit edilmiştir. T6-A356 alaşımlı üretimde mikroyapı incelemeleri sonucunda  $\alpha$ -Al dentrit tanelerinin tipik sütunlu morfolojide ve ortalama  $150 \mu m$  boyutlarında olduğu, %1,5 Ti tozu ilavesi sonucunda sütunlu yapıdan eş eksenli yapıya geçiş sağlandığı ve tane boyutlarının  $100 \mu m$  boyutlarına düştüğü, %3,0 Ti tozu ilavesi sonucunda ise daha yüksek oranda küreselleştiği ve tane boyutlarının ortalama  $70 \mu m$  seviyelerine düştüğü saptanmıştır. Çalışmaları sonucunda  $Al_3Ti$  bileşiğinin heterojen çekirdeklendirici etkisi sayesinde daha yüksek oranda tane sınırı oluştuğunu ve böylece  $\alpha$ -Al dentrit tane boyutlarının azaldığını, homojen ve eş eksenli dağılım gösterdiğini tespit etmişlerdir. Mekanik özellikler analiz edildiğinde akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve % uzama değerlerinin sırasıyla %29,2, %36,0, %143,6 oranında arttığını tespit etmişlerdir [36].

Zhiwei Liu ve arkadaşları bir başka çalışmalarında ise toz Ti partiküllerini sıvı A356 metaline  $780^{\circ}C$ 'de ilave etmiş,  $\alpha$ -Al kristallerinin morfoloji ve boyutlarını inceleyerek mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu çalışmada Ti katkısı

kullanılarak  $Al_3Ti/Al$  kompozitinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Ti parçacıklarının eklenmesiyle, A356 alaşımının  $\alpha-Al$  kristalleri, uzun sütunlu dendrit morfolojisinden kaba küresel morfolojiye dönüştürülmüş ve boyutları önemli ölçüde azalmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen değerler A356 alaşımı ile karşılaştırmışlar ve sertlik, UTS, % uzama değerlerinin sırasıyla %24,7, %42,3 ve %29,9 oranlarında yükseldiğini tespit etmişlerdir [39].

Özen Gürsoy ve arkadaşları, tane inceltici alaşımların metal temizliği üzerindeki etkisini analiz etmek için yapmış oldukları çalışma sonucunda tane inceltici olarak kullanılan alaşımların bifilm oluşumunu arttırdığını ve metal kalitesini düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Al-Ti-B geleneksel tane inceltici alaşımı sıvı metale eklendiğinde, sıvı metal ile aralarındaki yoğunluk farkı etkisi ile dibe çökme eğilimi göstermekte ve bu nedenle alaşımın tane inceltici etkinliği tartışılmaktadır. Bifilm tabakalarının yoğunlukları sıvı metale benzer seviyelerde olduğu için metal içerisinde askıda kalmakta ve tane inceltici alaşımların eklenmesi sonrası geçen sürenin artışı ile  $TiB_2$  ve  $TiAl_3$  partiküllerinin çökmesi bifilm tabakalarının potanın dibine süpürülmesine neden olmaktadır. Bu durumun zamanla potanın dibine Ti çöküşünün eşlik ettiği bifilm birikiminin bir kanıtı olduğunu tespit etmişlerdir. Çalışma sonucunda master alaşım ilavesi ile bifilm tabakalarının artışı sonucu metal kalitesi azaldığı tespit edilmiştir [40].

Pengting Li ve arkadaşları, Al-Ti-B ana alaşımına karbon ilavesi ile elde ettikleri Al-3Ti-1B-0,2C tane inceltici alaşımını kullanarak mekanik özelliklerini değerlendirmişlerdir. Al-5Ti-B ve Al-3Ti-1B-0,2C tane inceltici master alaşımları A356 alaşımına eklenmiş  $710^\circ C$  döküm sıcaklığında üretimler gerçekleştirilmiştir. Yapılan mikroyapı incelemeleri sonucunda  $\alpha-Al$  dentritlerinin tane boyutlarının ortalama 333-358  $\mu m$  değerlerinden  $167 \pm 8 \mu m$  boyutlarına kadar azaldığını ve akma dayanımı, kopma dayanımı, %uzama değerlerinin %5,9, %11,7, %9,2 oranında yükseldiğini tespit etmişlerdir [41].

Mingliang Wang ve arkadaşları, in situ tekniği ile  $TiB_2/A356$  kompozit üretimini gerçekleştirmiş, döküm hali ve T6 ısıl işlem uygulaması sonucunda mekanik özelliklerini değerlendirmişlerdir. Gerçekleştirilen incelemeler sonucunda  $TiB_2$  partiküllerinin mikroyapıda kümelenmiş olarak bulunduğu ve artan  $TiB_2$  oranı ile dentritik tane boyutunun azaldığı tespit edilmiştir. Akma dayanımı ve kopma dayanımı

değerlerinin artan  $TiB_2$  oranı ile arttığını, %uzama değerinin ise azalma eğilimi gösterdiğini tespit etmişlerdir [42].

Hui Zhang ve arkadaşları, A356 alaşımına Al - % 3 VN master alaşımını tane inceltici olarak ilave ederek tane yapısı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında, saf Al ve VN (Vanadyum Nitrür) tozlarını kullanarak Al - % 3 VN tane inceltici master alaşımını elde etmişlerdir. VN tozları, eriyik alüminyuma 700-720 °C sıcaklıkta eklenmiştir. 10 dk mekanik karıştırma uygulanan eriyik, 850 °C'ye ısıtılmış ve 5 dk ultrasonik karıştırma uygulanmış ve dökümler 720°C'de gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, VN partiküllerinin Al matris içerisine tamamen difüze olduğu XRD analizi ile tespit edilmiştir. SEM incelemeleri sonucunda, VN partiküllerinin mikroyapıda farklı boyutlarda bulunduğu saptanmıştır. Tane inceltici eklenmeyen, geleneksel Al-5Ti-B tane inceltici kullanılan ve Al - % 3 VN tane inceltici kullanılan ürünlerin tane boyutları incelendiğinde sırasıyla 1060±230 µm, 570±105 µm, 350±95 µm olarak hesaplanmıştır. Çekme test sonuçları değerlendirildiğinde Al - % 3 VN tane inceltici ile üretilen ürünlerin akma ve kopma dayanımları ile %uzama değerlerinin sırasıyla 170±2MPa, 296±3MPa ve 8.8±0.3% olarak en yüksek değerleri verdiği tespit edilmiştir [43].

Bu tezde, Alüminyum-silisyum alaşımlarından A356 alaşımı parçalar feder kalıplarına döküm yapılarak üretilecek, tane inceltme amacıyla laboratuvar ortamında üretilecek toz formda master alaşımlar kullanılacaktır. Referans olarak, alüminyum A356 alaşımı jant üretiminde yaygın olarak kullanılan Al-5Ti-1B tane incelticiler kullanılarak dökülen parçalar alınacaktır. Laboratuvar ölçeğinde master alaşım üretiminde ise; Al,  $TiB_2$ , TiC tozları kullanılarak mekanik alaşımlama yöntemi ile Al+ $TiB_2$  ve Al+TiC tozları üretilecek ve iki toz da iki farklı tane inceltici olarak kullanılacaktır. Üretilen her iki tane inceltici % 0,3, % 0,2, % 0,1 ve % 0 oranlarında kullanılarak dökümler gerçekleştirilecektir. Her iki tane inceltici ile döküm yapılan parçalara uygulanan testler sonucunda en yüksek mekanik özellikleri ve en düşük tane boyutunu sağlayan optimum oran belirlenecek ve belirlenen bu alaşım ile farklı döküm sıcaklıklarında üretimler gerçekleştirilecektir. Çalışma sonucunda en iyi performans sergileyen, mekanik özelliklere en yüksek oranda katkı sağlayan tane inceltici, optimum döküm sıcaklığı ve çubuk, külçe, filmaşın formlarında tane incelticiler yerine toz formulu tane

incelticilerin kullanılmasının A356 alaşımının mekanik özelliklerine olan etkisi araştırılacaktır.

## Bölüm 2

# Deneysel Çalışmalar

Öncelikle mevcut durumu anlamak ve yapılacak olan çalışmaların etkinliğini, farkını analiz edebilmek için alçak basınçlı dökümde yaygın olarak kullanılan çubuk formulu Al5TiB tane inceltici master alaşımı ile referans üretimler gerçekleştirilmiştir. Referans üretimlerin ardından, yüksek enerjili bilyeli değirmen ile homojen karıştırılarak elde edilen kompozit toz tane incelticiler kullanılarak çalışma kapsamında sonuçları değerlendirilecek olan üretimler gerçekleştirilmiştir. Kompozit toz tane incelticiler A356 alaşımına preslenmiş, alüminyum folyoya sarılmış ve direkt toz halde olmak üzere 3 farklı şekilde ilave edilmiştir.

Deneysel çalışmalara ait sonuçların sistematik bir şekilde analiz edilmesi için bir deney tasarımı oluşturulmuştur. Deneysel çalışmalar toz formulu tane incelticilerin bilyeli öğütücü ile homojen karıştırılması, en yüksek mekanik özellik sergileyen tane inceltici içeriğinin ve ilave şeklinin belirlenmesi ve bu tane incelticinin farklı döküm sıcaklıklarındaki mekanik özelliklerinin incelenmesi olarak 3 adımdan oluşmaktadır. Toz formulu tane inceltici kullanılarak gerçekleştirilen üretime ait sonuçlar, dökümhanede mevcut durumda kullanılan çubuk formulu geleneksel tane inceltici ile gerçekleştirilen üretimlerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

### 2.1 Deney Tasarımları

Çalışmaların ilk adımında, bilyeli öğütücü ile homojen karıştırılmış toz formulu tane incelticilerin üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretimlerin ardından gerçekleştirilen tam faktöriyel (full-factorial) deney tasarımları ile en etkin tane incelticinin ve formunun tespiti amaçlanmıştır.



- Gerçekleştirilen ilk deney tasarımı (Tablo 2.1) ile, her iki Al+TiB<sub>2</sub> ve Al+TiC toz tane incelticiler, 4 farklı oranda ve 3 farklı ilave formu ile sıvı eriyiğe ilave edilmiş ve en yüksek mekanik özellikleri veren tane incelticinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında ilave formları;
  - Toz formu,
  - Alüminyum Folyoya Sarılı,
  - Preslenmiş pellet formu olarak belirlenmiştir.

Tablo 2.1: Deney Tasarımı-1

<b>Deney Tasarımı - 1</b>					
<b>Al+TiB<sub>2</sub></b> <b>%</b>	<b>Al+TiC</b> <b>%</b>	<b>Al5TiB</b> <b>ppm</b>	<b>Döküm</b> <b>Sıcaklığı</b> <b>°C</b>	<b>Karıştırma</b> <b>Süresi</b>	<b>İlave</b> <b>Formu</b>
0	0,3	-	700	2 dk	<b>Toz</b>
0,1	0,2	-	700	2 dk	
0,2	0,1	-	700	2 dk	
0,3	0	-	700	2 dk	
0	0,3	-	700	2 dk	<b>Alüminyum</b> <b>Folyoya</b> <b>Sarılı</b>
0,1	0,2	-	700	2 dk	
0,2	0,1	-	700	2 dk	
0,3	0	-	700	2 dk	
0	0,3	-	700	2 dk	<b>Preslenmiş</b> <b>Pellet</b>
0,1	0,2	-	700	2 dk	
0,2	0,1	-	700	2 dk	
0,3	0	-	700	2 dk	
-	-	1000	700	2 dk	<b>Referans</b> <b>Çubuk</b>

- İlk deneysel tasarım sonucunda, en yüksek mekanik özelliklere sahip tane inceltici ve ilave formu belirlendikten sonra 3 farklı döküm sıcaklığında üretim gerçekleştirilerek en yüksek mekanik özellikleri sağlayan döküm sıcaklığının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Tablo 2.2’de oluşturulması gereken ikinci deney tasarımına ait plan gösterilmiştir. İlk deney tasarımının çıktılarına göre oluşturulacak olan bu tabloda çıktılar aşağıdaki gibi kodlanmıştır.
  - X; en yüksek mekanik özellikleri sergileyen tane inceltici,
  - Y; en yüksek mekanik özellikleri sergileyen tane inceltici ilave formu;
  - Z; en yüksek mekanik özellikleri sergileyen tane inceltici oranı.

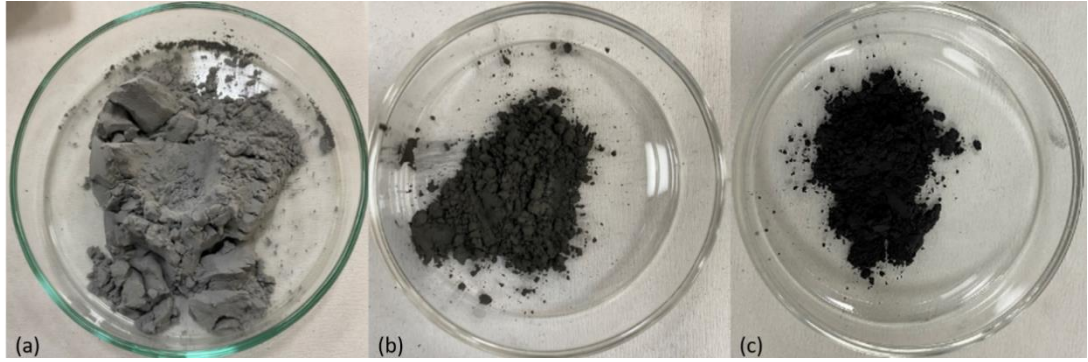
Tablo 2.2: Deney Tasarımı-2

Deney Tasarımı - 2				
X %	Al5TiB ppm	Döküm Sıcaklığı °C	Karıştırma Süresi	İlave Formu
Z	-	690	2 dk	Y
Z	-	700	2 dk	
Z	-	720	2 dk	
-	1000	690	2 dk	Referans Çubuk
-	1000	700	2 dk	
-	1000	720	2 dk	

X, Y, Z daha sonraki adımlarda belirlenip açıklanacaktır.

## 2.2 Kullanılan Malzemeler

Kompozit tozlar, matris olarak kullanılan ağırlıkça %95 oranında toz formulu saf Alüminyum tozuna  $TiB_2$  ve  $TiC$  tozlarının %5 oranlarında ilave edilmesi ile elde edilmiştir (Şekil 2.1). Deneyde kullanılan tozların saflık oranları ve tane boyutları Tablo 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.1: Homojen Karıştırma sürecinde kullanılan tozlar. (a) Saf Alüminyum, (b)  $TiB_2$ , (c)  $TiC$

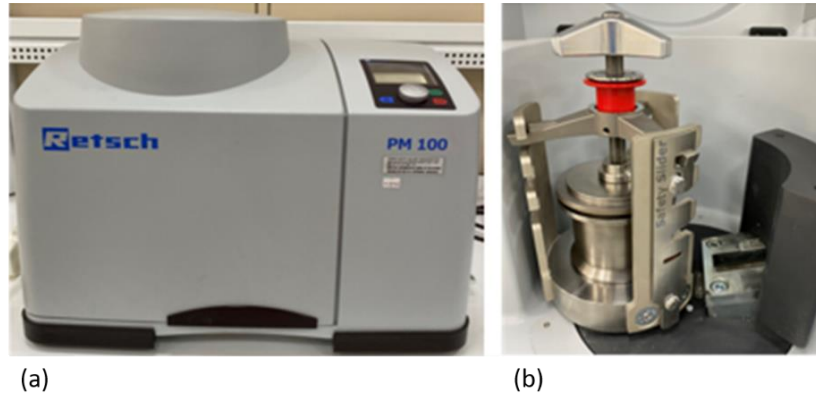
Tablo 2.3: Kullanılan tozlar ve özellikleri

Toz Adı	Saflık Oranı (%)	Tane Boyutu
$TiB_2$	%99	2 – 6 $\mu m$
$TiC$	%99	2 $\mu m$
Saf Alüminyum	%99,9	-44 $\mu m$ (-325 mesh)

Toz formu kompozit tane incelticiler A356 alaşımlı külçelerin ergitilmesi ile oluşan sıvı metale ilave edilmiştir. Tane modifikasyonunun sağlanması amacıyla tüm üretimlerde 160 ppm oranında, çubuk formu Sr modifiye edici elementi kullanılmıştır. Referans üretim gerçekleştirilmesi amacıyla geleneksel çubuk formu Al5TiB master alaşımı kullanılmıştır.

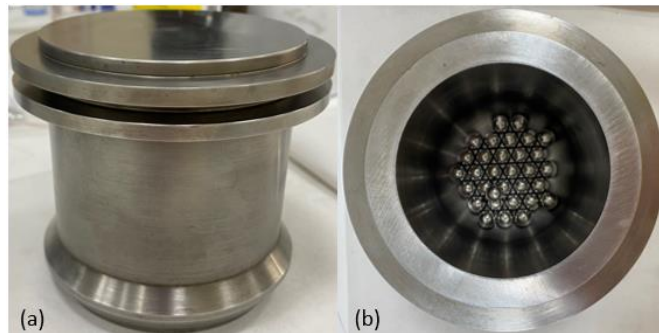
## 2.3 Yüksek Enerjili Bilyeli Öğütücü ile Homojen Karıştırma Yöntemiyle Tane İnceltici Üretimi

Homojen karıştırma işlemi Retsch PM100 bilyeli değirmen kullanılarak (Şekil 2.2) gerçekleştirilmiştir.



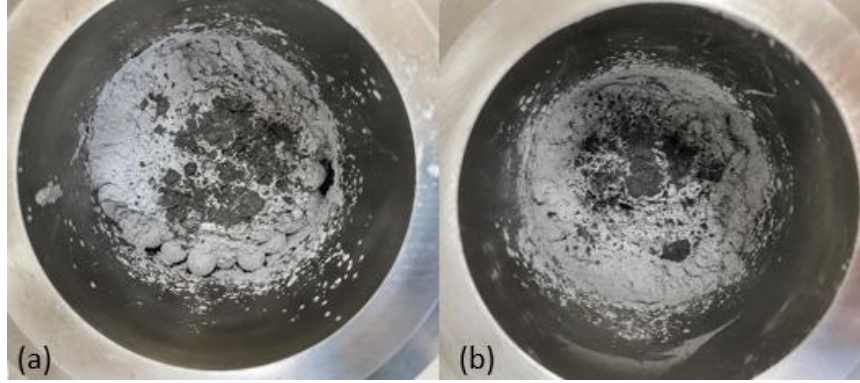
Şekil 2.2: (a) Retsch PM 100 Bilyeli Değirmen, (b) karıştırıcı/öğütücü hazne

Homojen karıştırma sürecinde kullanılan öğütücü hazne (Şekil 2.3 (a)) 2379 çeliği ile üretilmiş ve ısıl işlem ile sertleştirilmiştir. Haznenin sertlik değeri 62HRC'dir. Bilyeler (Şekil 2.3 (b)) 4 gram ağırlığında 10 mm çapında paslanmaz çelik malzemesi ile üretilmiştir.



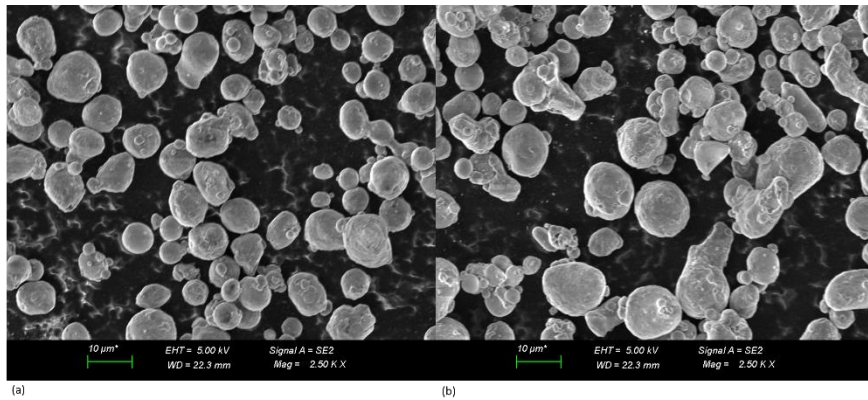
Şekil 2.3: (a) Öğütücü hazne, (b) 4g – 10 mm çaplı bilyeler

Ağırlıkça %5 oranında kullanılan  $TiB_2$  ve  $TiC$  tozları ile %95 oranında kullanılan saf Al tozları bilyeli öğütücü hazne içerisine eklenmiş (Şekil 2.4) ve gerçekleştirilen mekanik alaşımlama sonucunda  $Al+TiB_2$  ve  $Al+TiC$  kompozit tozlar elde edilmiştir.



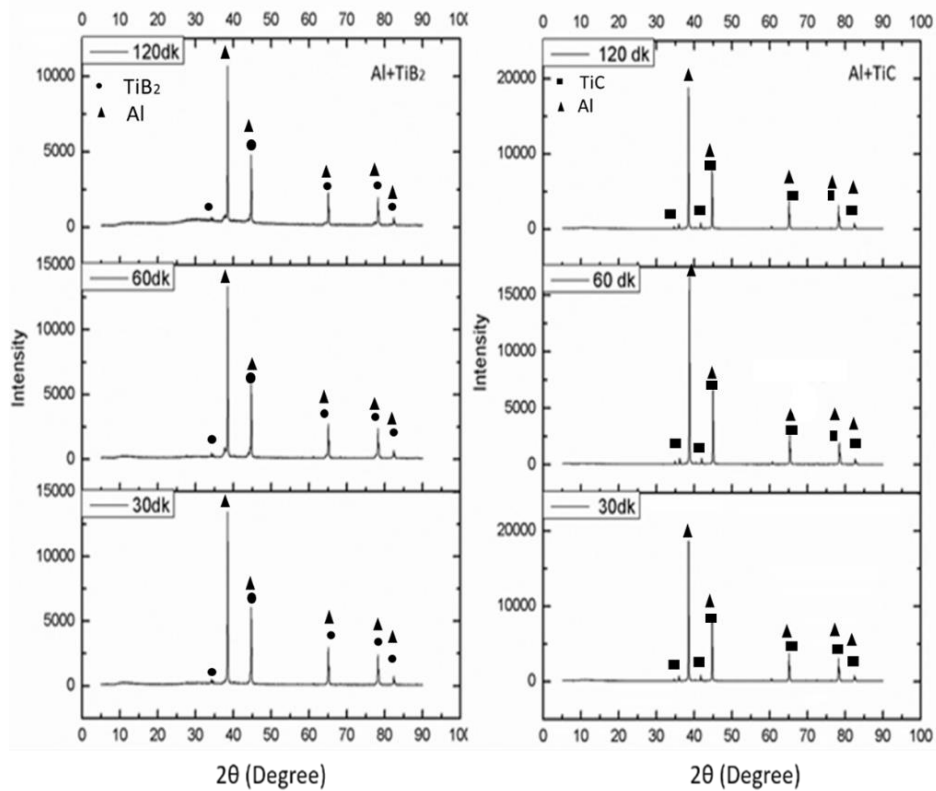
Şekil 2.4:  $Al+TiB_2$  (a),  $Al+TiC$  (b)

Homojen karıştırma prosesi, bilye-toz ağırlık oranı 5:1 ve 2:1 olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. 32 adet bilye ile 2:1 (Şekil 2.5 (a)) ve 80 adet bilye ile 5:1 (Şekil 2.5 (b)) oranlarında 120 dakika boyunca gerçekleştirilerek elde edilen tane inceltici kompozit tozların SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. 5:1 oranında gerçekleştirilen üretimde kullanılan bilyelerin ağırlığı 320 gram, tozların ağırlığı 64 gram iken 2:1 oranında gerçekleştirilen üretimde kullanılan bilyelerin ağırlığı 128 gram, tozların ağırlığı 64 gramdır. SEM analizi sonucunda elde edilen görüntüler incelendiğinde 5:1 oranı ile üretilen toz tane incelticilerde, topaklanmaların olduğu ve tozların yapılarının bozulduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle üretimlerin 2:1 oranı ile gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.



Şekil 2.5: 2 saat öğütme süresi sonunda elde edilen SEM Görüntüleri; (a) 2:1 oranı ile üretilen toz tane incelticiler, (b) 5:1 oranı ile üretilen toz tane incelticiler

SEM analizlerinin ardından deney tasarımlarında belirlenen toz formulu tane incelticilerin bilyeli öğütücü ile homojen karıştırma sonucunda elde edebilmeleri için 32 adet bilye kullanılarak 100 rpm hız ile bilye/toz oranı 2:1 oranında olacak şekilde üretimler gerçekleştirilmiştir. Homojen karıştırma her 30 dakikada 15'er dakika ara verilerek gerçekleştirilmiştir. Verilen ara ile tozların aşırı ısınması sonucu formlarının değişmesini ya da kontaminasyon oluşumunu engellemek amaçlanmıştır. Homojen karıştırma prosesi, her hazne için toplam 120 dakika boyunca devam ettirilmiştir. Her 30, 60 ve 120 dakika sonunda hazne içerisindeki kompozit tozlardan örnekler alınarak XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Al+TiB<sub>2</sub> ve Al+TiC kompozit tozların XRD analizleri (Şekil 2.6) incelenerek 30, 60 ve 120 dakikalar sonunda aynı piklerin olduğu görülmüş ve homojen karıştırma süresinin gerçekleştirilen karıştırma prosesinin toz tane incelticiler üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle tüm karıştırma işlemlerinin 60 dk yapılmasına karar verilmiştir.



Şekil 2.6: Al+TiB<sub>2</sub> ve Al+TiC tozlarının 30, 60 ve 120 dakika karıştırılması ile elde edilen XRD analizleri

Al+TiB<sub>2</sub> ve Al+TiC tane incelticileri elde edebilmek için her bir karıştırma prosesi toplam 64 gram toz ile gerçekleştirilmiştir. Tablo 2.4'te her bir karıştırma prosesi için kullanılan toz oranları verilmiştir.

Tablo 2.4: Her bir homojen karıştırma prosesinde kullanılan toz miktarları

Toz Adı	Toz Oranı (%)	Toz Miktarı (g)	Bilye Miktarı (g)	Toplam Toz Miktarı (g)
TiB <sub>2</sub> ya da TiC	%5	3,2	128	64
Saf Alüminyum	%95	60,8		

## 2.4 Tane İnceltici İlaveleri

Homojen karıştırma yöntemi ile üretilen kompozit tane incelticiler direkt toz formu, alüminyum folyoya sarılı ve preslenmiş pellet formu olarak da sıvı metale ilave edilmiştir.

Al+TiB<sub>2</sub> ve Al+TiC kompozit tozlar Şekil 2.7'te gösterildiği gibi hazırlanmış ve sıvı metale direkt olarak eklenmeleri sağlanmıştır.



Şekil 2.7: Kompozit toz tane incelticiler

Tane incelticilerin sıvı metale direkt olarak eklenmelerinin ardından, ikinci türdeki ilaveler tozların alüminyum folyoya sarılması (Şekil 2.8) ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.8: Alüminyum folyoya sarılı kompozit tozlar

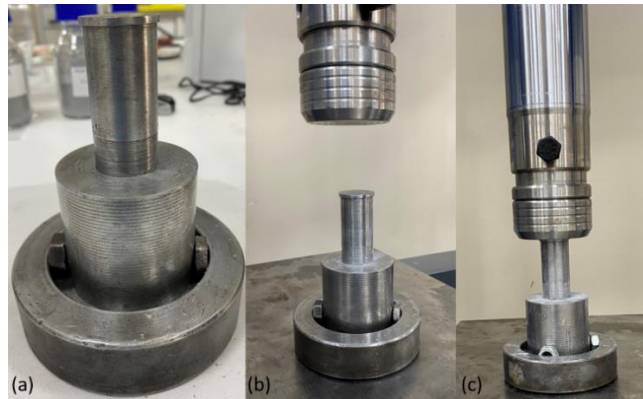


Toz tane inceltici ilave şekillerinin sonucusu olan preslenmiş pellet formlu tane incelticiler hidrolik pres cihazı (Şekil 2.9) ile 10 mbar basınç uygulanarak şekillendirilmiştir.



Şekil 2.9: Preslemede kullanılan hidrolik pres

Üretilen  $Al+TiB_2$  ve  $Al+TiC$  kompozit tozların presleme işlemi Şekil 2.10'de verilen pres kalıplarında ve kalıplar hidrolik pres cihazına yerleştirilerek 10 mbar basıncın 2 dakika boyunca uygulanması sonucunda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.10: Presleme sürecinde kullanılan kalıplar (a), içerisine toz eklenmiş kalıbın cihaza yerleştirilmesi (b), presleme işlemi (c)

Presleme işlemi sonrası tozlar Şekil 2.11’da verilmiş olduğu gibi pellet şeklinde elde edilmiştir.



Şekil 2.11: Preslenmiş pellet formu tane inceltici

## 2.5 Karıştırmalı Döküm

Üretimler CMS Jant ve Makine Sanayii fabrikasında laboratuvar ölçekli ergitme fırını, döküm potaları, feder kalıpları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

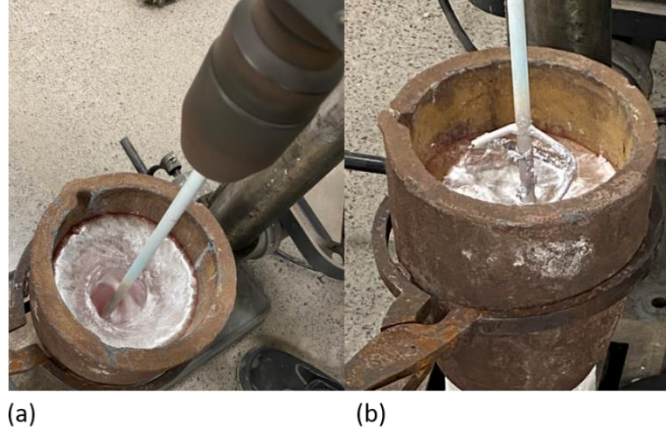
A356 alaşım külceleri ergitme fırını içerisine potalar içerisinde yerleştirilmiş ve 755°C sıcaklıkta ergitme işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12: Ergitme Fırını



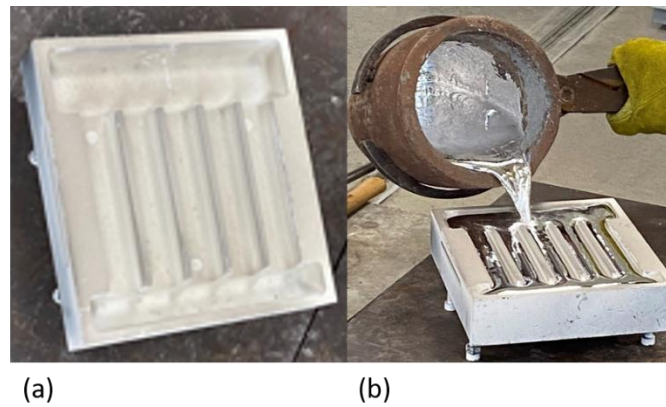
A356 alaşımlı külçelerin ergitilmesi sonucunda elde edilen sıvı metal ergitme fırınından çıkarıldıktan sonra üzerinde oluşan cüruf tabakası temizlenmiştir. Sıvı metal potası, cüruf alma işleminin ardından, mekanik karıştırıcı uç potanın içerisine girecek şekilde yerleştirilmiştir. Son olarak, tane incelticiler ile Sr modifiye edici elementinin ilavesi gerçekleştirilmiş ve 2 dakika boyunca 600 rpm hızında mekanik karıştırma prosesi uygulanmıştır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13: Tane inceltici ilavesi sonrası gerçekleştirilen mekanik karıştırma prosesi

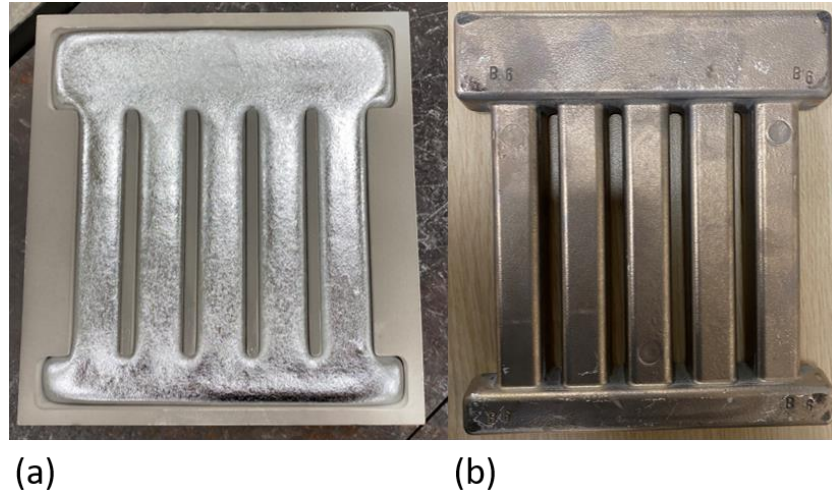
Mekanik karıştırma prosesi sonucunda, tane incelticiler ile Sr elementinin sıvı metal içerisinde homojen karışmasını sağlamak amaçlanmıştır.

Mekanik karıştırma sürecinde feder kalıplarının sıcaklıkları pirometre ile ölçülerek kontrol altında tutulmuştur. Mekanik karıştırma prosesinin tamamlanması sonucunda, dökümlerin yapılacağı feder kalıplarının sıcaklığı 350 °C’de sabit tutularak dökümler gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14: Feder Kalıbı (a), Feder kalıbına döküm prosesi (b)

Feder kalıplarının sıcaklıklarına ek olarak sıvı metal sıcaklıklarının sabit tutulması gerekmektedir. Bu kapsamda pirometre sıvı metal içerisinde daldırılarak metal sıcaklığının kontrol altında tutulması sağlanmış ve deney tasarımlarında belirlenen metal sıcaklıklarında dökümler gerçekleştirilmiştir. Feder kalıbına gerçekleştirilen dökümlerin katılaşması sonucu elde edilen numuneler Şekil 2.15'te verilmiştir. Dökümler sonucunda feder kalıplarından çıkartılan numuneler karışmamaları için markalanmıştır.



Şekil 2.15: Katılaşma sürecinde feder kalıbı (a), Katılaşma sonucunda kalıptan çıkartılan numune (b)

## 2.6 Isıl İşlem Uygulaması

Bu çalışma sürecinde üretilen ürünler ısıl işlem hattına iletilmiştir. Uygulanan ısıl işlem prosesine ait detaylar tablo 2.5'te özetlenmiştir.

Tablo 2.5: Isıl İşlem Prosesi Parametreleri

Isıl İşlem Adımı	Sıcaklık °C	Süre
Solüsyona Alma	540 °C	240 dk
Su Verme	80 °C	120 sn
Yaşlandırma	150 °C	180 dk

## 2.7 Karakterizasyon Çalışmaları

Karakterizasyon çalışmaları kapsamında optik mikroskop, SEM, XRD, çekme test cihazı, sertlik cihazı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Mikroyapı incelemeleri boyunca Nikon Epiphot 200 optik mikroskop kullanılmıştır. Optik mikroskop ile mikroyapı incelemesi gerçekleştirilecek numunelerin yüzeylerinin ayna parlaklığında olması gerekmektedir. Bu nedenle numune hazırlama süreci gerçekleştirilir ve bu süreç zımparalama, parlatma, dağlama olarak üç ana adımdan oluşmaktadır.

İncelenecek numune testere ile kesildikten sonra yüzeyinde çizikli bir yapı oluşur. Bu çiziklerin giderilmesi ve mikroyapıya ulaşıp inceleme yapılabilmesi amacıyla zımparalama ve parlatma işlemleri gerçekleştirilir. Bu işlemler zımparalama cihazlarına yerleştirilen zımparalama kağıtları, parlatma keçeleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Zımparalama işlemi aşındırıcı SiC zımparalama kağıtları ile gerçekleştirilmiştir. Zımpara kağıtları yapılarında bulunan SiC tanelerinin boyutlarına göre numaralandırılmaktadır. Zımpara kağıtlarının numaraları, yapılarında bulunan aşındırıcıların sayısına göre değişmektedir. Zımpara kağıdı numarası arttıkça tane sayısı azalmakta ve tane boyutu küçülmektedir. Yani zımpara kağıdı numarası arttıkça zımparalama işlemi daha hassas gerçekleştirilebilmektedir. Çalışmalar boyunca, incelenecek tüm numunelerin zımparalama işlemlerinde sırasıyla 180-320-400-600-800-1000-1200-2000 numaralı zımparalama kağıtları kullanılmıştır. Zımparalama işlemi boyunca, kopan parçaların yüzeyi çizmemesi, numunenin ısınmaması, zımpara kağıtlarının yırtılmaması için işlem akan su altında gerçekleştirilmiştir.

Zımparalama işlemi sonrasında yüzeydeki çizikler giderilmiş ve pürüzsüz bir yüzey elde edilmiştir. Böylece zımparalama sonrası ayna benzeri görüntünün elde edilmesi amacıyla parlatma adımına geçilmiştir. Zımparalama ve parlatma adımlarının gerçekleştirildiği cihaz örnek olarak şekil 2.16'da gösterilmiştir. Parlatma işlemi için kadife bir parlatma keçesi zımparalama cihazına yerleştirilerek üzerine parlatma solüsyonu eklenir. Çalışma sürecinde elmas bazlı parlatma sıvısı kullanılmıştır. Zımparalama işlemi tamamlanan ve çiziksiz yüzeye sahip numunelerin parlatma

işlemi sonrası yüzeylerinde ayna parlaklığı elde edilmiştir. Parlatma işlemi sonrasında numuneler etanol ile yıkanarak yüzeylerindeki parlatma çözeltisinden arındırılmış ve sonrasında yüzeyler kurutulmuştur.



Şekil 2.16: Zımparalama ve Parlatma Cihazı

Zımparalama ve parlatma adımları tamamlanan numunelerin mikroyapı incelemelerinin gerçekleştirilmesi için tamamlanması gereken son adım kimyasal dağlama adımdır. Kimyasal dağlama işlemi her malzeme için farklı olan çeşitli kimyasalların karışımından elde edilen çözeltiler ile daldırma, batırma, yıkama, yüzeyi silme gibi farklı uygulama yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir.

Çalışma sürecinde A356 alaşımı için kimyasal dağlayıcı olarak HF (Hidroflorik asit) ve H<sub>2</sub>O çözeltisi kullanılmıştır. Numunelerin yüzeyi HF dağlayıcı çözeltisi ile 15 saniye kadar çalkalanmıştır. Çalkalama işlemi ardından su ile yıkanan numunelerin yüzeyleri kurutularak mikroskobik inceleme için hazır hale getirilmiştir (Şekil 2.17).



Şekil 2.17: Numune hazırlama süreci tamamlanmış numune örnekleri

Dağlama işlemi sonucunda incelenecek numunelerin tane yapılarının incelenmesine olanak sağlanmıştır.

Mikroyapı incelemeleri ortalama DAS ( $\mu\text{m}$ ) boyutlarının ve ortalama porozite seviyelerinin tespiti, faz dağılımları, Si tane modifikasyonu değerlendirmelerini içermektedir. Ortalama porozite seviyeleri Nikon Epiphot 200 optik mikroskobu kullanılarak görüntü işleme methodu ile ölçülmüştür.

Makroyapı incelemesi ile numunelerin tane boyutlarının hesaplanmaktadır. Makroyapı ve mikroyapı incelemelerinin birbirlerinden farkı adlandırılmalarından da anlaşılacağı üzere incelemesi yapılabilecek derinlik ile ilişkilidir. Mikroyapı incelemesi için optik mikroskop kullanılması gerekmekte ve numunenin mikron boyutları incelenebilecek kadar derinliklerine ulaşılabilmektedir. Makroyapı incelemesi için numunenin makro boyutlarının göz ile incelenebilmesine olanak sağlamaktadır.

Makroyapı incelemesi yapılacak olan numunelere ait kesitler, mikroyapı incelemesi yapılan kesitler gibi zımparalama, parlatma ve dağlama adımlarından geçirilmiştir. Zımparalama ve parlatma adımları birebir aynı olmakla beraber dağlama adımıyla kullanılan kimyasal dağlayıcı ve uygulama yöntemi farklıdır.

Parlatma işlemi sonrasında ayna benzeri görüntü elde edilmesinin ardından tane yapısının makro olarak incelenebilmesi için makro dağlayıcı olan demir(III) klorür heksahidrat,  $\text{FeCl}_3 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$ , kimyasal kompozisyonu kullanılmaktadır.

Makroyapı incelemesi yapılacak olan numunelerin üzerine  $\text{FeCl}_3 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$  kimyasal dağlayıcısı sürülmüş ve numune yüzeyi bir sünger yardımı ile 30 saniye boyunca ovalanmıştır. Böylece numunenin yüzeyi (Şekil 2.18) makroyapı incelemesi için hazır hale getirilmiştir.

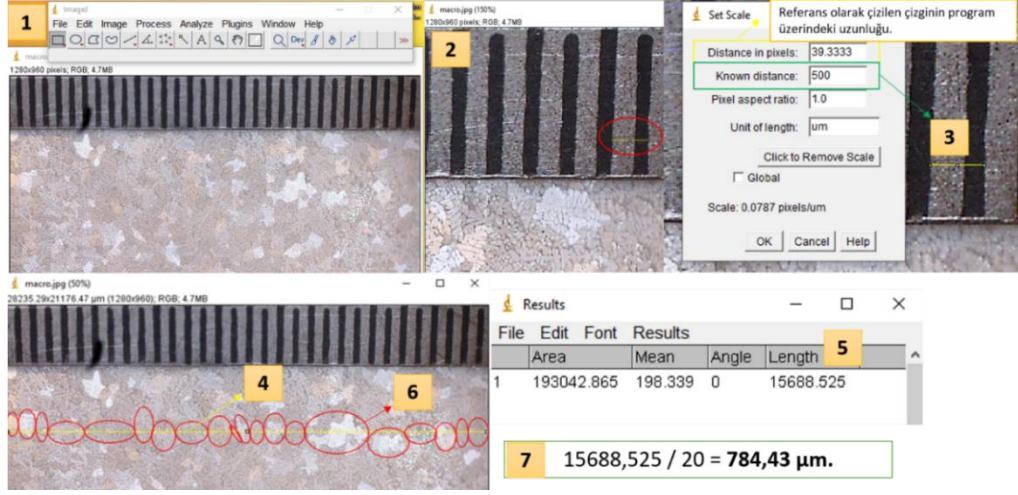


Şekil 2.18: Makroyapı incelemesi için hazırlanan numuneler

Makro dağlamaları yapılmış olan numunelerin tane boyutlarının hesaplanması için ImageJ görüntü işleme programı kullanılmıştır. Hesaplamaların yapılması için ilk olarak tane boyutları hesaplanacak olan numunelerin üzerine uzunluğu bilinen aralıklara sahip olan bir cetvel yerleştirilerek görüntüleri kaydedilir ve sırasıyla aşağıdaki adımlar (Şekil 2.19) gerçekleştirilir.

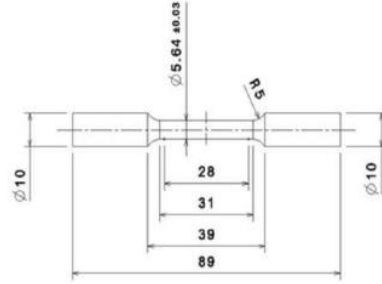
1. ImageJ programı kullanılarak kaydedilen görüntüler açılır.
2. Görüntü üzerinde, referans olarak kullanılması için uzunluğu bilinen bir çizgi çekilir. Bu çizgi numune üzerine yerleştirilen cetvel aralıklarına çizilir.
3. Referans olarak çizilen çizgi kullanılarak ölçümler boyunca kullanılacak olan skala belirlenir.
4. Skala belirlenmesinin ardından, ölçümü yapılacak olan numuneye soldan sağa bütün alanı kapsayacak bir çizgi çizilir.
5. Çizilen çizginin uzunluğu hesaplanır.
6. Çizilen çizgi üzerine denk gelen tüm taneler yuvarlak daireler içerisine alınır ve sayılır.
7. Numune üzerinde soldan sağa çizilen çizginin boyutu, çizgi üzerinde daire içerisine alınan toplam tane sayısına bölünerek tane boyutu hesaplanır.





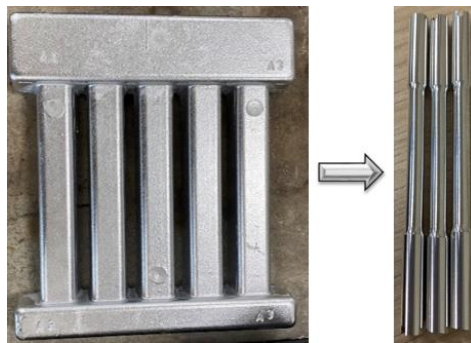
Şekil 2.19: ImageJ programı kullanılarak tane boyutu hesaplaması

Çekme testi EN ISO 6892-1 standartına tabi tutularak 5 mm/dk çekme hızı ile gerçekleştirilmiştir. Testler 100 kN test yüküne sahip Zwick Roell Z100 çekme test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Çekme test çubukları Şekil 2.20’de verilen ölçülerde TS EN ISO 6892-1 standardına göre hazırlanmıştır.



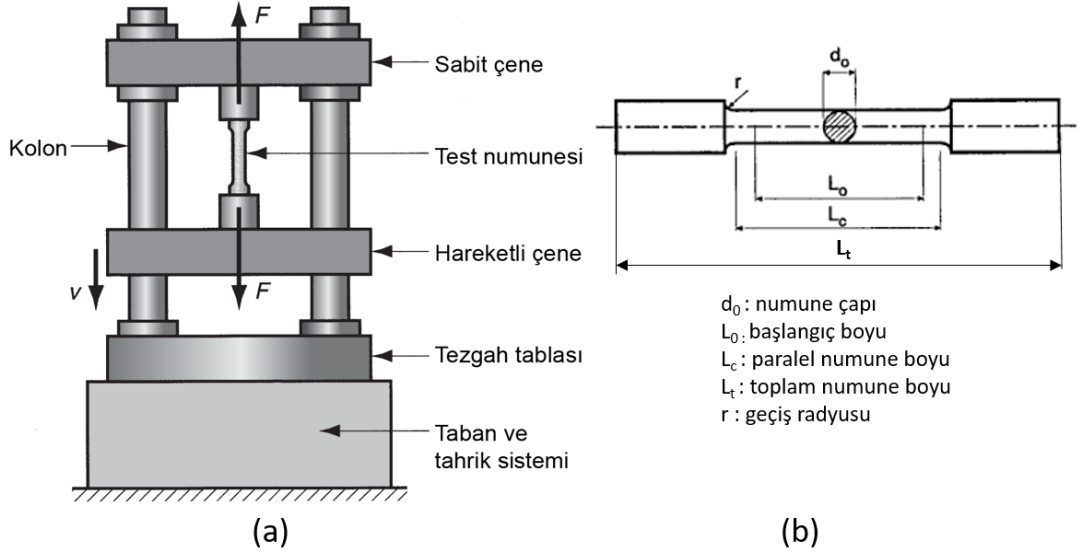
Şekil 2.20: Çekme test çubuğu ölçüleri

Çekme test çubukları, ısıl işlem prosesi sonrası feder kalıplarındaki numunelerden hazırlanmıştır (Şekil 2.21). Her bir deney için toplam 10 adet çekme test çubuğu hazırlanmış ve test edilmiştir.



Şekil 2.21: Feder kalıplarından hazırlanan çekme test çubukları

Çekme test cihazı ve çubuğu Şekil 2.22’de örneklendirilmiştir. Mekanik özellikleri belirlenecek olan malzemelerden, çekme test çubuklarının çıkartılıp cihaza yerleştirilmesi ile testler gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.22: Çekme test cihazı (a), çekme test çubuğu (b)

Brinell Sertlik testleri TS EN ISO 6506-1 standardı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Testler Innovatest Nemesis 9000 sertlik cihazı ile uygulanmıştır. SEM incelemeleri Zeiss Sigma 300 VP cihazı (Şekil 2.23) ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.23: SEM Cihazı

Optimum mekanik özellikler ile en ince tane boyutlarının elde edildiği numunelerin farklı döküm sıcaklıklarında üretilmelerinin ardından, söz konusu tüm şartlarda üretilen numunelere DTA analizleri gerçekleştirilmiştir.



## Bölüm 3

### Farklı Kompozisyon Çalışmaları

4 farklı oranda hazırlanan ve 3 farklı ilave şekli ile sıvı metale ilave edilen toz formlu kompozit tane incelticiler ile, 700°C döküm sıcaklığında üretimleri gerçekleştirilen numunelerin karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

#### 3.1 Optik Mikroskop ile Mikroyapı İncelemeleri

Numuneler optik mikroskobun farklı büyütme oranları kullanılarak incelenmiştir. Bu büyütme oranları sırasıyla 25, 50, 100, 200 ve 500'dür.

700 °C döküm sıcaklığında, 3 farklı formda ilavesi gerçekleşen kompozit tane inceltici tozların sıvı metale 4 farklı oranda ilave edilmesi sonucu elde edilen numunelerin mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

##### 3.1.1 Direkt Toz Olarak İlave Edilen Tane İncelticiler ile Üretim

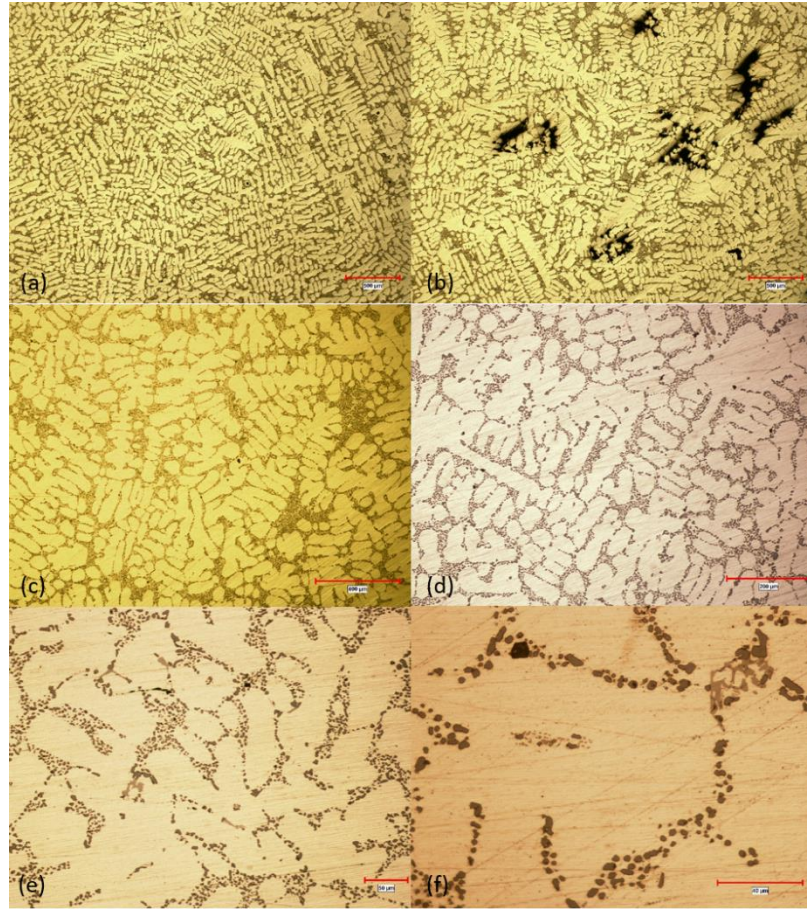
1 numaralı deney tasarımının girdisi olan 1,2,3,4 (Tablo 3.1) numaralı deneylere ait mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapıda tespit edilen ortalama DAS (dentrit kolları arası mesafe) boyutları ve ortalama porozite oranları Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.1: Deney Tasarımı 1 – Direkt Toz Formlu ilave edilen deneylere ait detaylar

Deney Tasarımı - 1						
Deney No	Al+TiB <sub>2</sub> %	Al+TiC %	Al5TiB ppm	Döküm Sıcaklığı °C	Karıştırma Süresi	İlave Formu
1	0	0,3	-	700	2 dk	Direkt Toz
2	0,1	0,2	-	700	2 dk	
3	0,2	0,1	-	700	2 dk	
4	0,3	0	-	700	2 dk	

▪ Deney 1 – Mikroyapı İncelemesi

Ağırlıkça Al+ ağı%0 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0,3 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin direkt toz formunda sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin 2.5X, 5X, 10X, 20X ve 50X objektif büyütme oranlarında mikroskobik incelemeleri (Şekil 3.1) gerçekleştirilmiştir. Büyütme oranları sırasıyla 25, 50, 100, 200 ve 500'dür.

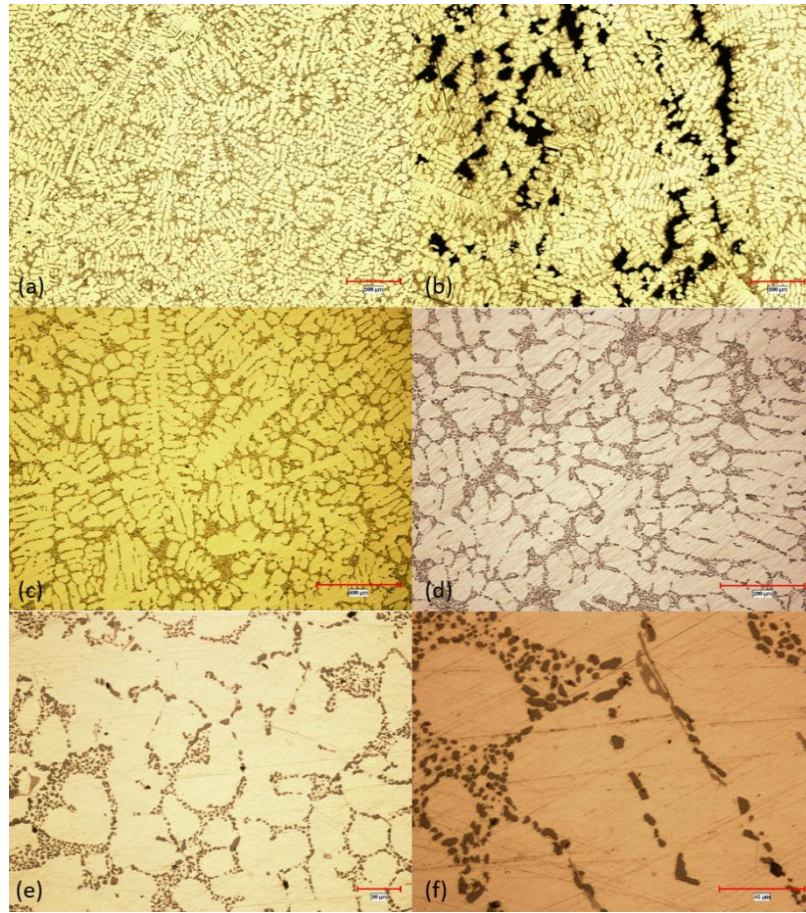


Şekil 3.1: 1 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f)

Mikroyapı incelemeleri sonucunda, mikroyapıda dentrit tanelerinin ve faz dağılımlarının homojen olduğu tespit edilmiştir. Belirli bölgelerde porozite seviyelerinde artış gözlenmiştir. Çin yazısı formülü  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> (Şekil 3.1 (f)) intermetalik fazları tespit edilmiştir.

▪ Deneysel 2 – Mikroyapı İncelemesi

Ağırlıkça Al+ ağı%0,1 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0,2 TiC kompozit toz formülü tane incelticilerin direkt toz formunda sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 3.2’te verilmiştir.



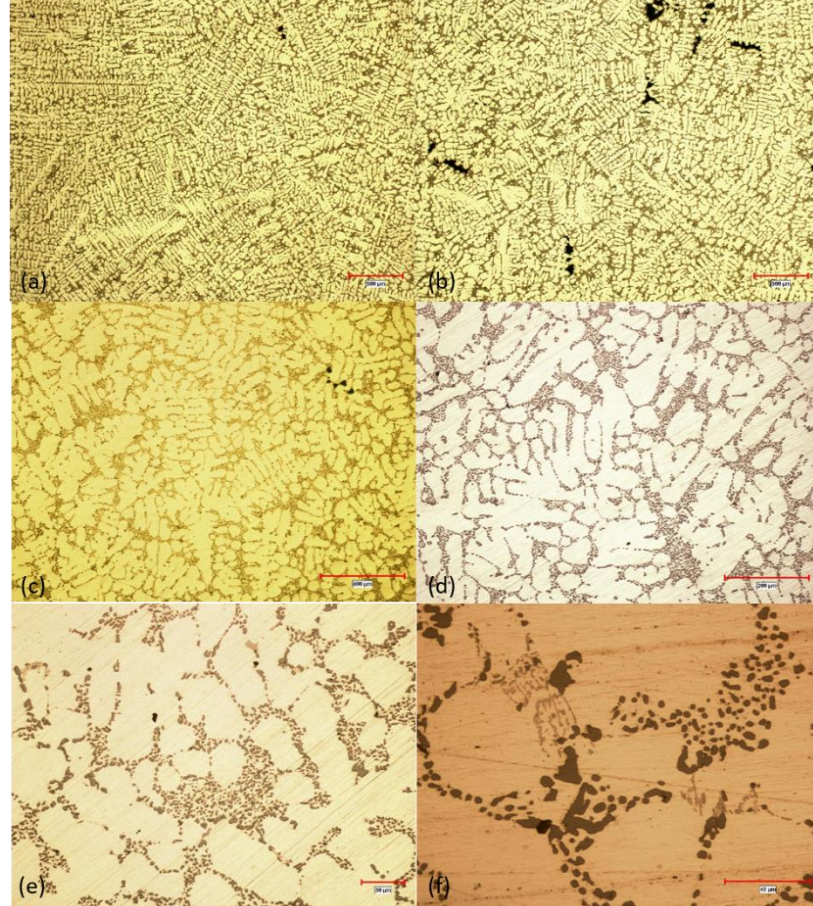
Şekil 3.2: 2 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f)

Mikroyapı incelemeleri sonucunda, mikroyapıda dentrit tanelerinin ve faz dağılımlarının homojen olduğu tespit edilmiştir. Belirli bölgelerde porozite seviyelerinde artış gözlenmiştir. Blok formülü  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> (Şekil 3.2 (f)) intermetalik fazları tespit edilmiştir.



▪ Deney 3 – Mikroyapı İncelemesi

Ağırlıkça Al+ ağı%0,2 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0,1 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin direkt toz formunda sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 3.3'te verilmiştir.

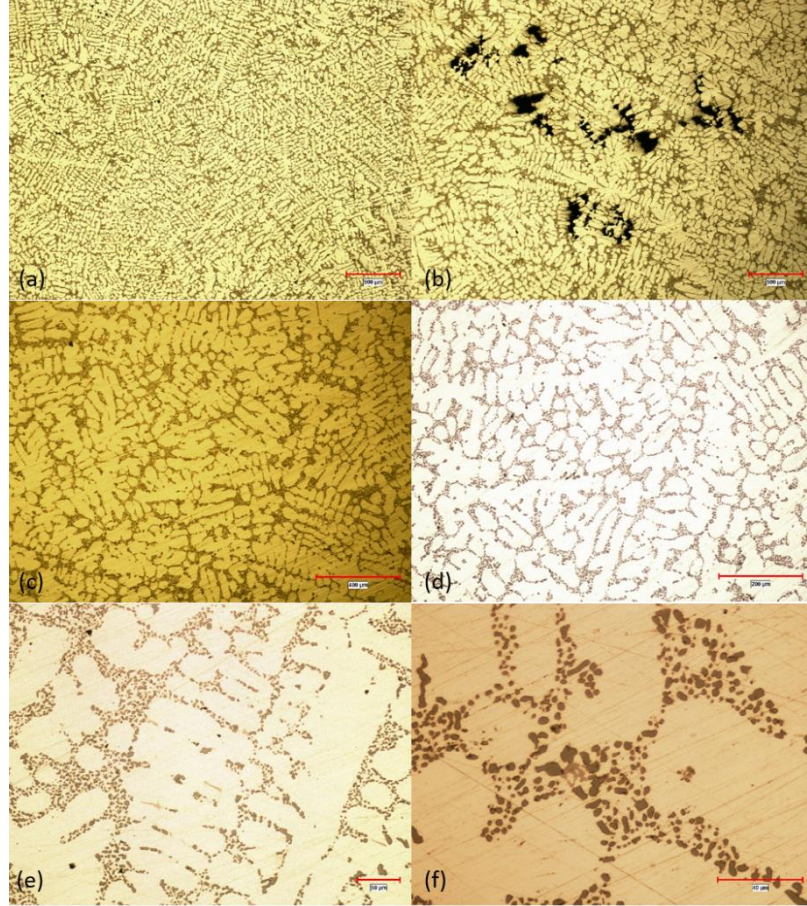


Şekil 3.3: 3 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f)

Mikroyapı incelemeleri sonucunda, mikroyapıda dentrit tanelerinin ve faz dağılımlarının homojen olduğu tespit edilmiştir. Belirli bölgelerde porozite seviyelerinde artış gözlenmiştir. Çin yazısı formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> ve iğnesel  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi yapılı (Şekil 3.3 (f)) intermetalik fazları tespit edilmiştir.

▪ Deney 4 – Mikroyapı İncelemesi

Ağırlıkça Al+ ağı%0,3 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin direkt toz formunda sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4: 4 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f)

Mikroyapı incelemeleri sonucunda, mikroyapıda dentrit tanelerinin ve faz dağılımlarının homojen olduğu tespit edilmiştir. Belirli bölgelerde porozite seviyelerinde artış gözlenmiştir. Çin yazısı formulu  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(Fe,Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> (Şekil 3.4 (f)) intermetalik fazları tespit edilmiştir.

Tablo 3.2: DAS ve Porozite seviyeleri

Deney No	Kompozisyon	DAS ( $\mu\text{m}$ )	Porozite (%)
1	Al+ağ%0,3 TiC	33,46	1,80
2	Al+ağ%0,1 TiB <sub>2</sub> ve Al+ağ%0,2 TiC	33,83	1,84
3	Al+ağ%0,2 TiB <sub>2</sub> ve Al+ağ%0,1 TiC	32,58	1,84
4	Al+ağ%0,3 TiB <sub>2</sub>	32,94	1,01

### 3.1.2 Alüminyum Folyoya Sarılı Olarak İlave Edilen Tane İncelticiler ile Üretim

1 numaralı deney tasarımının girdisi olan 5,6,7,8 (Tablo 3.3) numaralı deneylere ait mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapıda tespit edilen ortalama DAS (dentrit kolları arası mesafe) boyutları ve ortalama porozite oranları Tablo 3.4'te verilmiştir.

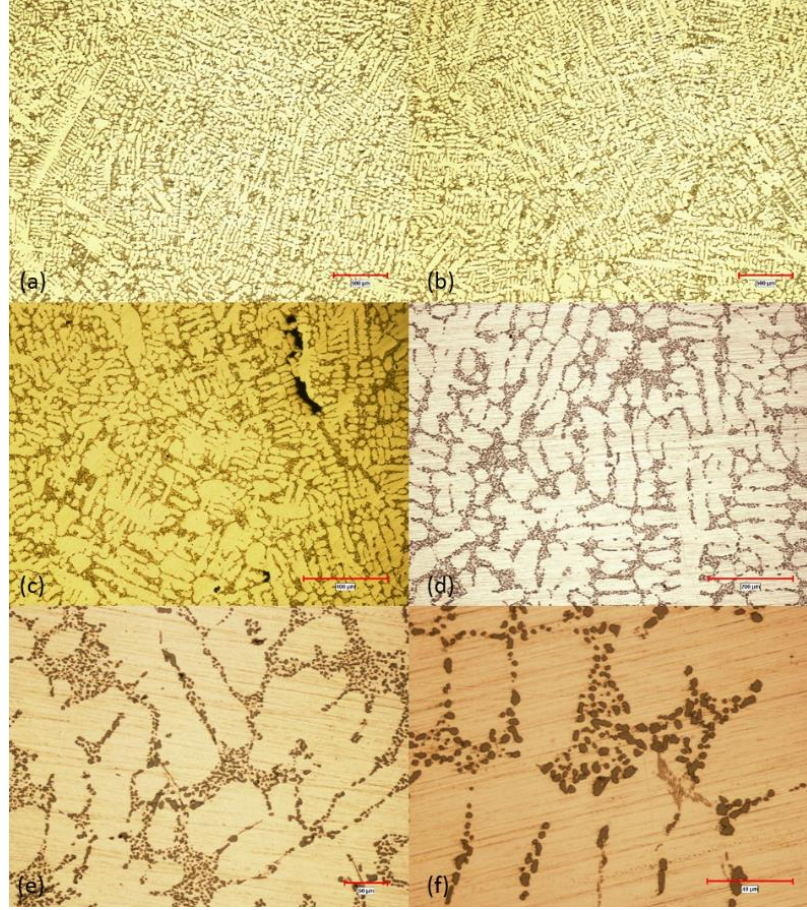
Tablo 3.3: Deney Tasarımı 1 – Al folyoya sarılarak eklenen deneylere ait detaylar

Deney Tasarımı - 1						
Deney No	Al+TiB <sub>2</sub> %	Al+TiC %	Al5TiB ppm	Döküm Sıcaklığı °C	Karıştırma Süresi	İlave Formu
5	0	0,3	-	700	2 dk	Alüminyum Folyoya Sarılı
6	0,1	0,2	-	700	2 dk	
7	0,2	0,1	-	700	2 dk	
8	0,3	0	-	700	2 dk	

- Deney 5 – Mikroyapı İncelemesi

Ağırlıkça Al+ ağ%0 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağ%0,3 TiC kompozit toz formlu tane incelticilerin alüminyum folyoya sarılı olarak sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 3.5'te verilmiştir.



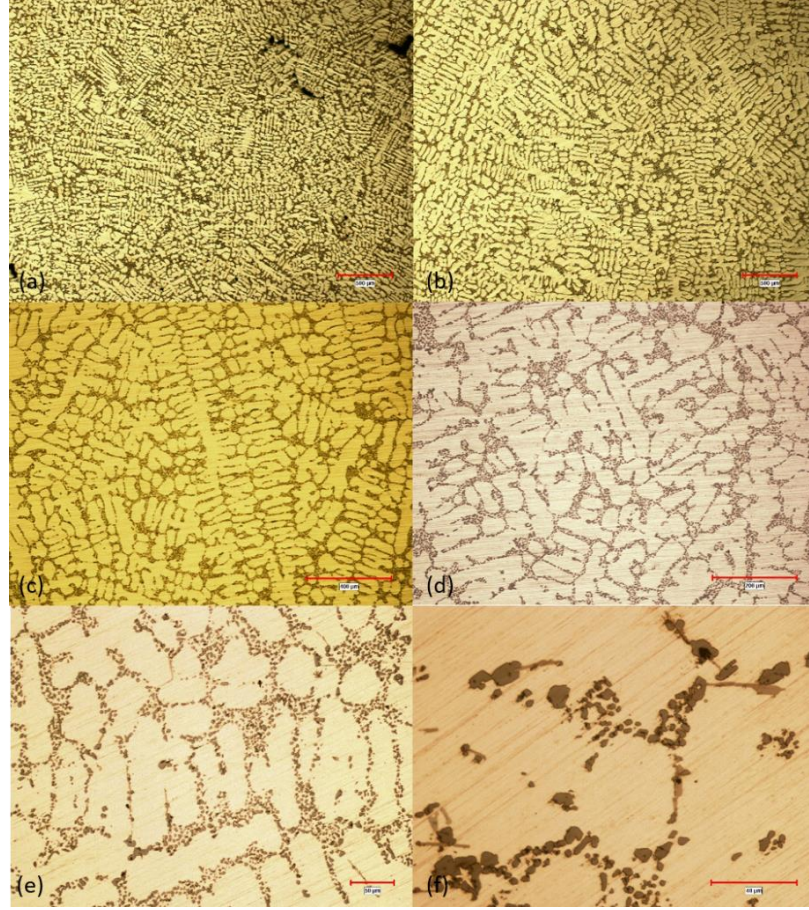


Şekil 3.5: 5 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f)

Mikroyapı incelemeleri sonucunda, mikroyapıda dentrit tanelerinin ve faz dağılımlarının homojen olduğu tespit edilmiştir. Belirli bölgelerde porozite gözlenmiştir. Çin yazısı formülü  $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$  ve iğnesel  $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$  yapılı (Şekil 3.5 (f)) intermetalik fazları tespit edilmiştir.

#### ▪ Deney 6 – Mikroyapı İncelemesi

Ağırlıkça Al+ ağı%0,1 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0,2 TiC kompozit toz formülü tane incelticilerin alüminyum folyoya sarılı olarak sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 3.6’da verilmiştir.



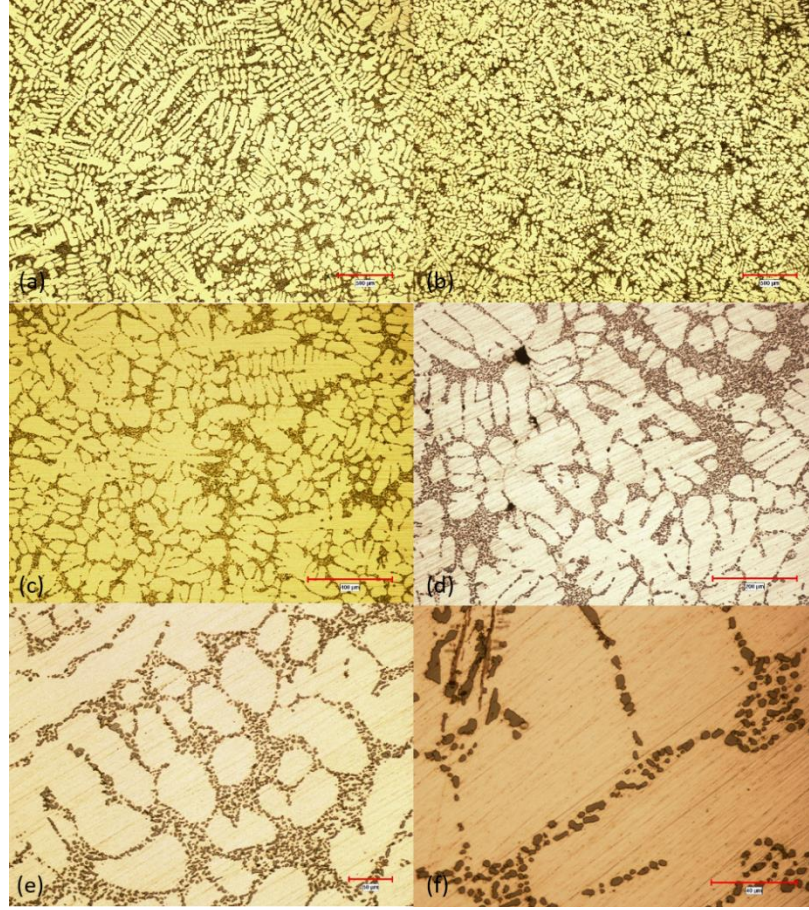
Şekil 3.6: 6 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f)

Mikroyapı incelemeleri sonucunda, mikroyapıda dentrit tanelerinin ve faz dağılımlarının homojen olduğu tespit edilmiştir. Belirli bölgelerde porozite gözlenmiştir. Blok formulu  $\pi$ - $\text{Al}_3\text{FeMg}_3\text{Si}_6$  ve iğnesel  $\beta$ - $\text{Al}_5\text{FeSi}$  yapılı (Şekil 3.6 (f)) intermetalik fazları tespit edilmiştir.

#### ▪ Deney 7 – Mikroyapı İncelemesi

Ağırlıkça Al+ ağı%0,2  $\text{TiB}_2$  ve Al+ ağı%0,1  $\text{TiC}$  kompozit toz formulu tane incelticilerin alüminyum folyoya sarılı olarak sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 3.7’de verilmiştir.



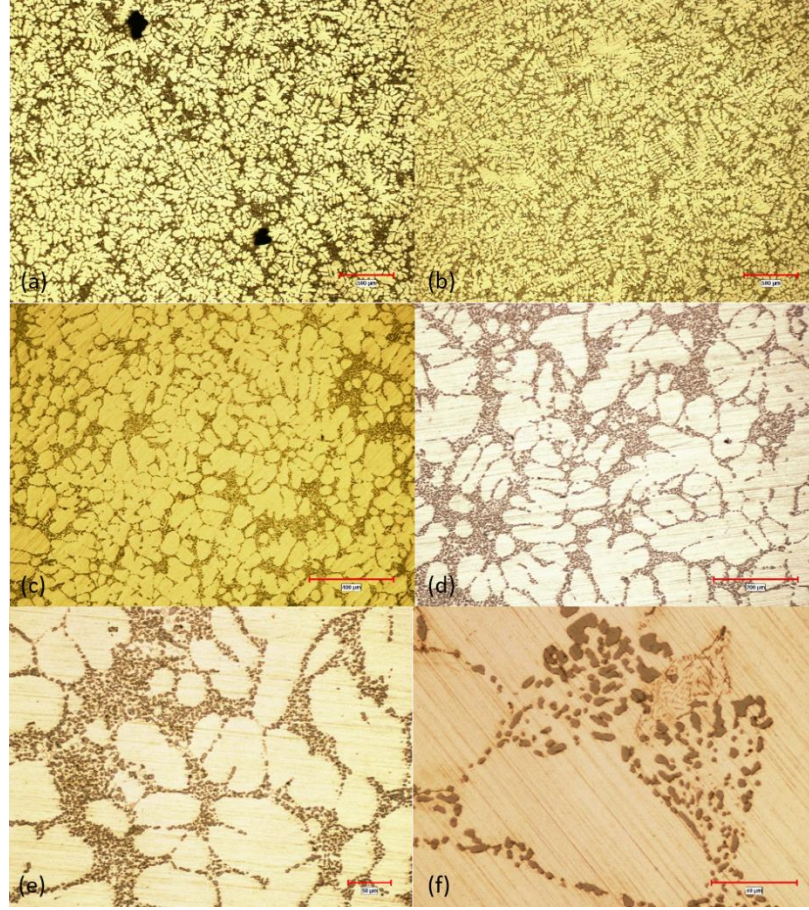


Şekil 3.7: 7 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f)

Mikroyapı incelemeleri sonucunda, mikroyapıda dentrit tanelerinin ve faz dağılımlarının homojen olduğu tespit edilmiştir. Blok formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> ve iğnesel yapılı iğnesel  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi (Şekil 3.7 (f)) intermetalik fazları tespit edilmiştir.

#### ▪ Deney 8 – Mikroyapı İncelemesi

Ağırlıkça Al+ ağı%0,3 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin alüminyum folyoya sarılı olarak sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8: 8 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f)

Mikroyapı incelemeleri sonucunda, mikroyapıda dentrit tanelerinin ve faz dağılımlarının homojen olduğu tespit edilmiştir. İğnesel  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi (Şekil 3.10 (f)) intermetalik fazları tespit edilmiştir.

Tablo 3.4: DAS ve Porozite seviyeleri

Deney No	Kompozisyon	DAS ( $\mu$ m)	Porozite (%)
5	Al+ağ%0,3 TiC	30,18	0,60
6	Al+ağ%0,1 TiB <sub>2</sub> ve Al+ağ%0,2 TiC	31,09	0,49
7	Al+ağ%0,2 TiB <sub>2</sub> ve Al+ağ%0,1 TiC	30,51	0,41
8	Al+ağ%0,3 TiB <sub>2</sub>	26,90	0,35

### 3.1.3 Preslenerek İlave Edilen Tane İncelticiler İle Üretim

1 numaralı deney tasarımının girdisi olan 9,10,11,12 (Tablo 3.5) numaralı deneylere ait mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapıda tespit edilen ortalama DAS (dentrit kolları arası mesafe) boyutları ve ortalama porozite oranları Tablo 3.6'da verilmiştir.

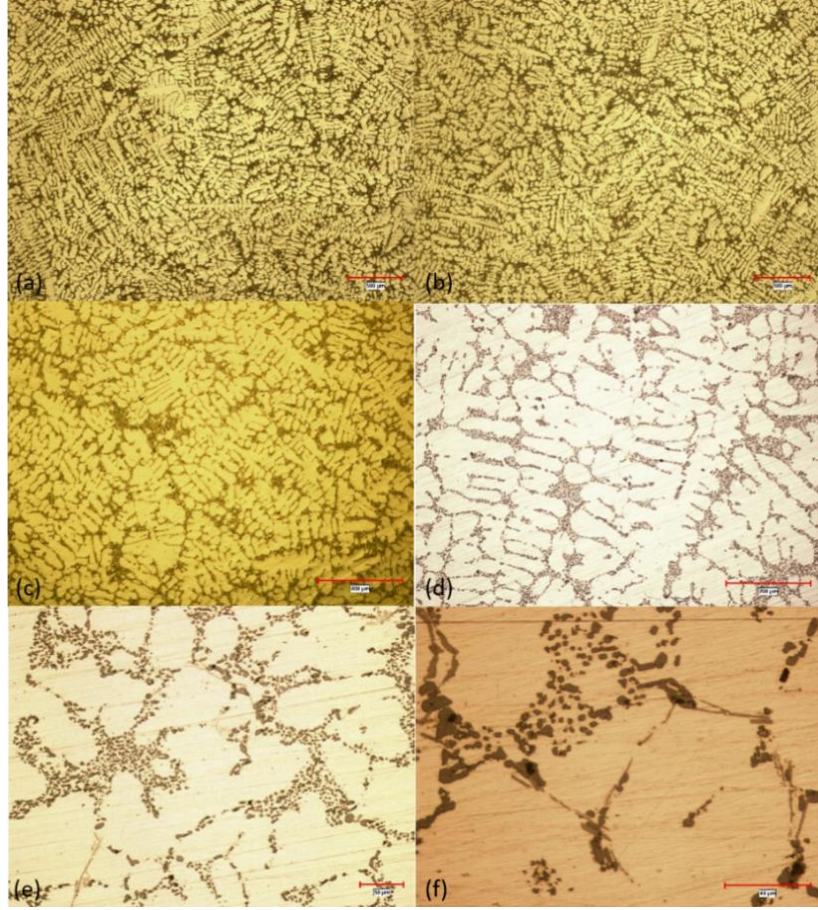
Tablo 3.5: Deney Tasarımı 1 –Preslenerek ilave edilen deneylere ait detaylar.

<b>Deney Tasarımı - 1</b>						
<b>Deney No</b>	<b>Al+TiB<sub>2</sub> %</b>	<b>Al+TiC %</b>	<b>Al5TiB ppm</b>	<b>Döküm Sıcaklığı °C</b>	<b>Karıştırma Süresi</b>	<b>İlave Formu</b>
9	0	0,3	-	700	2 dk	<b>Preslenmiş Pellet</b>
10	0,1	0,2	-	700	2 dk	
11	0,2	0,1	-	700	2 dk	
12	0,3	0	-	700	2 dk	

- Deney 9 – Mikroyapı İncelemesi

Ağırlıkça Al+ ağı%0 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0,3 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin preslenerek sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 3.9'da verilmiştir.



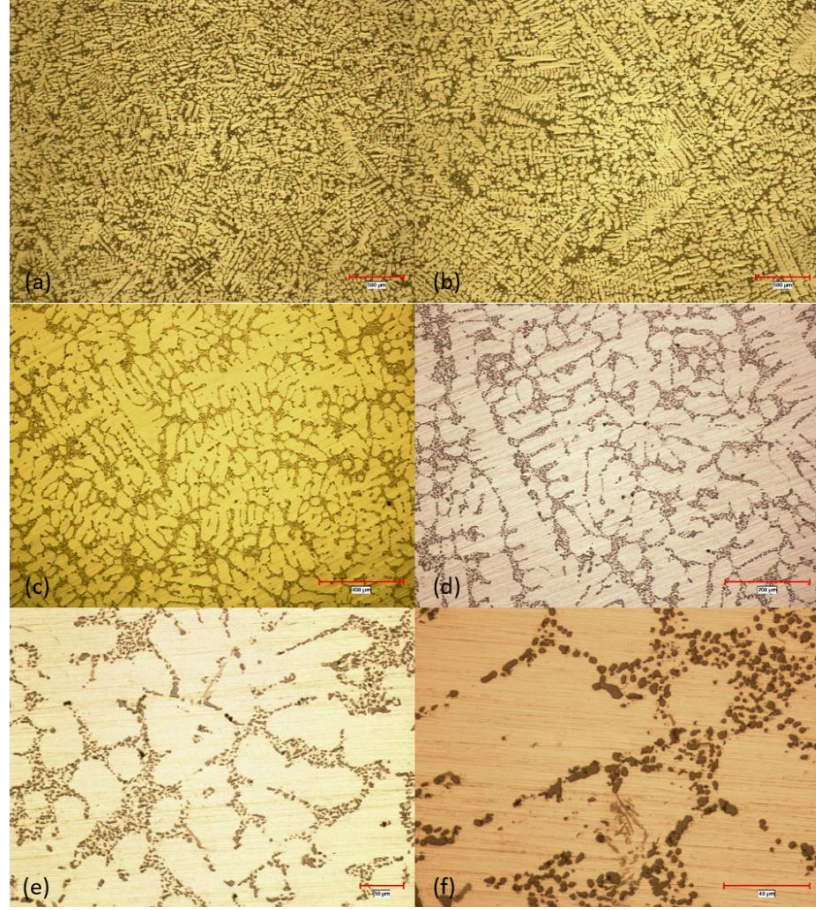


Şekil 3.9: 9 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f)

Mikroyapı incelemeleri sonucunda, mikroyapıda dentrit tanelerinin ve faz dağılımlarının homojen olduğu tespit edilmiştir. İğnesel  $\beta$ - $\text{Al}_5\text{FeSi}$  (Şekil 3.9 (f)) intermetalik fazları tespit edilmiştir.

▪ Deney 10 – Mikroyapı İncelemesi

Ağırlıkça Al+ ağı%0,1  $\text{TiB}_2$  ve Al+ ağı%0,2  $\text{TiC}$  kompozit toz formulu tane incelticilerin preslenerek sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 3.10’da verilmiştir.



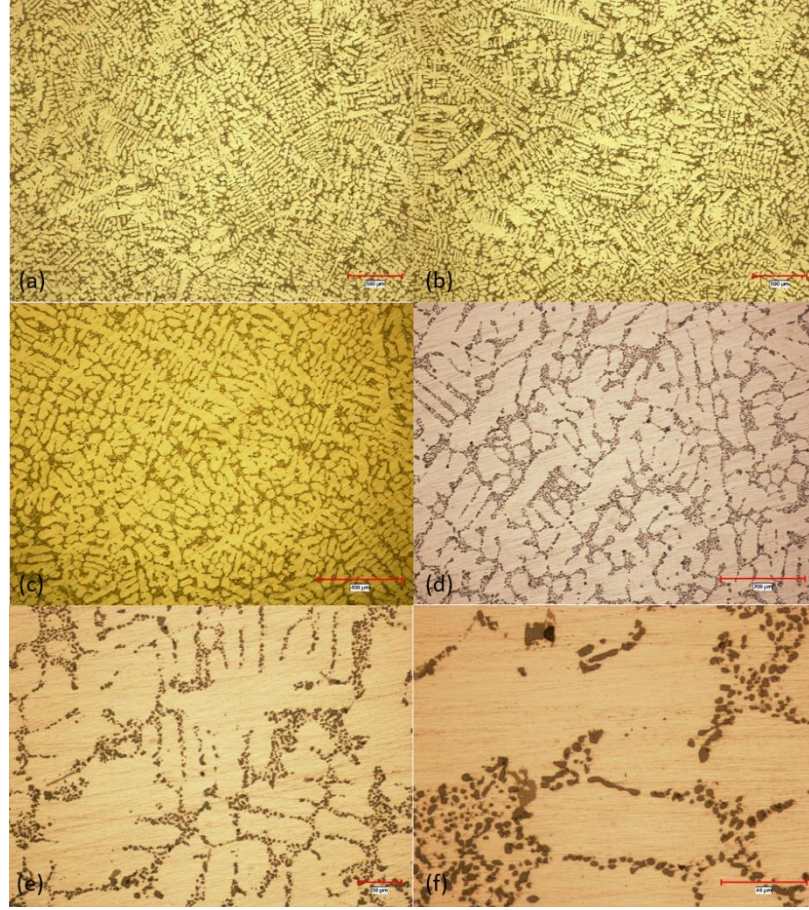
Şekil 3.10: 10 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f)

Mikroyapı incelemeleri sonucunda, mikroyapıda dentrit tanelerinin ve faz dağılımlarının homojen olduğu tespit edilmiştir. İğnesel  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi (Şekil 3.10 (f)) intermetalik fazları tespit edilmiştir.

- Deney 11 – Mikroyapı İncelemesi

Ağırlıkça Al+ ağı%0,2 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0,1 TiC kompozit toz formu tane incelticilerin preslenerek sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 3.11’de verilmiştir.



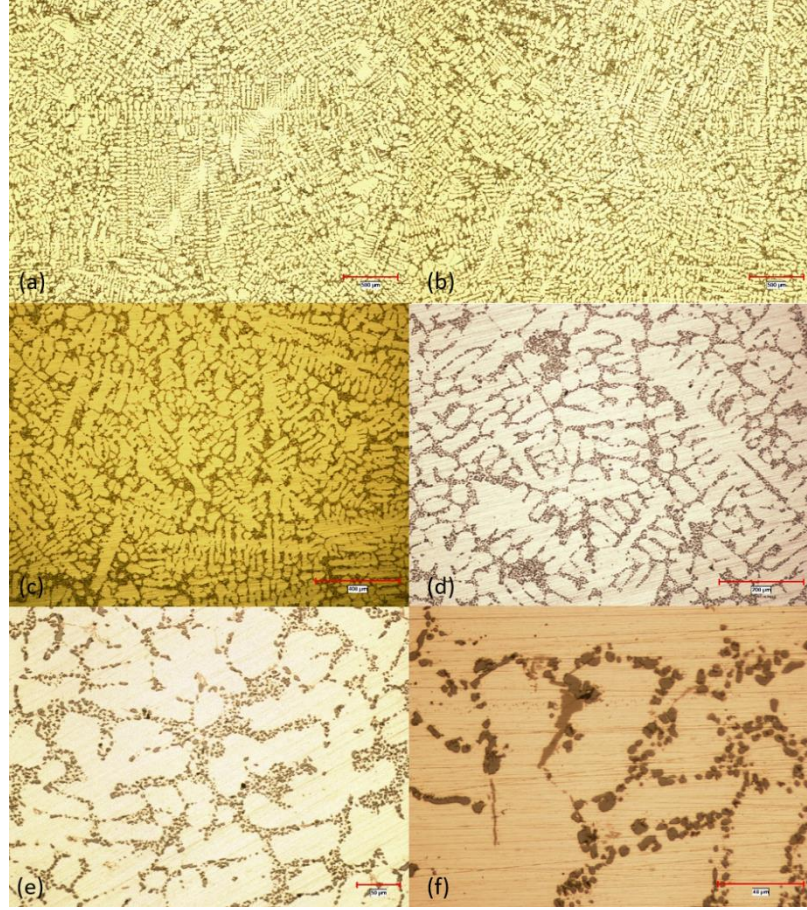


Şekil 3.11: 11 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f)

Mikroyapı incelemeleri sonucunda, mikroyapıda dentrit tanelerinin ve faz dağılımlarının homojen olduğu tespit edilmiştir. Blok formulu  $\pi\text{-Al}_8\text{FeMg}_3\text{Si}_6$  (Şekil 3.11 (f)) intermetalik fazları tespit edilmiştir.

- Deney 12 – Mikroyapı İncelemesi

Ağırlıkça Al+ ağı%0,3 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin preslenerek sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12: 12 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f)

Mikroyapı incelemeleri sonucunda, mikroyapıda dentrit tanelerinin ve faz dağılımlarının homojen olduğu tespit edilmiştir. Blok formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> ve iğnesel  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi yapılı (Şekil 3.12 (f)) intermetalik fazları tespit edilmiştir.

Tablo 3.6: DAS ve Porozite seviyeleri

Deney No	Kompozisyon	DAS ( $\mu$ m)	Porozite (%)
9	Al+ağ%0,3 TiC	30,27	0,12
10	Al+ağ%0,1 TiB <sub>2</sub> ve Al+ağ%0,2 TiC	28,24	0,19
11	Al+ağ%0,2 TiB <sub>2</sub> ve Al+ağ%0,1 TiC	30,18	0,27
12	Al+ağ%0,3 TiB <sub>2</sub>	29,72	0,38



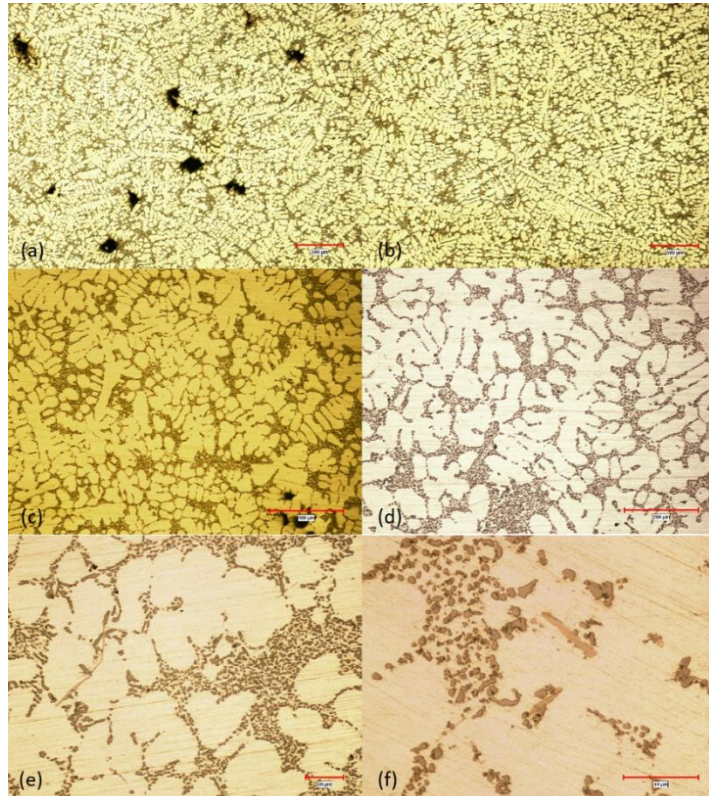
### 3.1.4 Geleneksel Çubuk Formlu Tane İnceltici İle Üretim

Endüstride yaygın olarak kullanılan çubuk formulu Al<sub>5</sub>TiB tane incelticisi kullanılarak üretimler gerçekleştirilmiştir. 1 numaralı deney tasarımının girdisi olan 13 numaralı deney (Tablo 3.7) referans olarak kullanılacak ve toz formulu tane incelticiler kullanılarak gerçekleştirilen üretilere ait numuneler ile karşılaştırılacak olan üretime aittir.

Tablo 3.7: Deney Tasarımı 1 – Referans olarak kullanılacak olan deneye ait detaylar.

Deney Tasarımı - 1						
Deney No	Al+TiB <sub>2</sub> %	Al+TiC %	Al <sub>5</sub> TiB ppm	Döküm Sıcaklığı °C	Karıştırma Süresi	İlave Formu
13	-	-	1000	700	2 dk	<b>Referans Çubuk</b>

1000 ppm çubuk formulu Al<sub>5</sub>TiB tane inceltici kullanılarak gerçekleştirilen üretime ait mikroyapı incelemeleri Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13: 13 numaralı deney numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f)

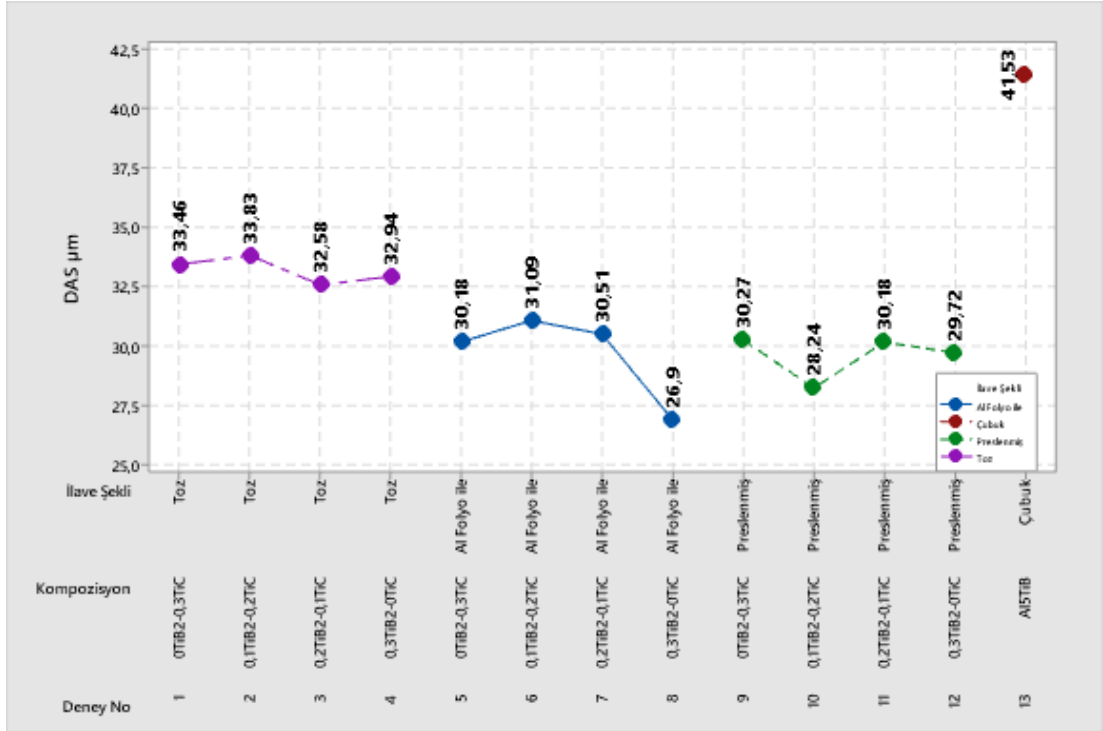


Mikroyapı incelemeleri sonucunda, mikroyapıda dentrit tanelerinin ve faz dağılımlarının homojen olduğu tespit edilmiştir. Blok formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> ve iğnesel  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi yapılı (Şekil 3.13 (e,f)) intermetalik fazları tespit edilmiştir. Mikroyapıda tespit edilen ortalama DAS boyutları ve porozite oranları Tablo 3.8’te verilmiştir.

Tablo 3.8: 13 numaralı deney DAS ve Porozite seviyeleri

Deney No	Kompozisyon	DAS ( $\mu$ m)	Porozite (%)
13	Al5TiB	41,53	1,05

700 °C’de dökümleri gerçekleştirilen, 1 numaralı deney tasarıma ait 13 adet üretim sonrası gerçekleştirilen mikroyapı incelemeleri sonucunda elde edilen DAS dağılım değerleri Şekil 3.14’te verilmiştir.



Şekil 3.14: DAS Dağılımları

- Genel olarak tüm üretimlerde faz dağılımlarının homojen olduğu,
- Dentritik tane dağılımlarının homojen olduğu,
- Si tanelerinin küreselliklerinin sağlandığı ve böylece Si modifikasyonunun gerçekleşmiş olduğu,

- Üretimlerde lokal alanlarda yoğunlaşan çekintilerin olduğu ve buna bağlı olarak özellikle direkt toz formu olarak sıvı metale ilave edilen toz kompozit tane incelticilerde porozite seviyesinin daha yüksek olduğu,

Toz formu kompozit tane incelticiler ile gerçekleştirilen üretime ait DAS boyutlarının çubuk formu tane inceltici ile gerçekleştirilen üretimden daha küçük olduğu (Şekil 3.14) tespit edilmiştir. Elde edilen tüm DAS değerleri incelendiğinde, en küçük boyutun sıvı metale alüminyum folyoya sarılı olarak ilave edilen, ağırlıkça Al+ ağı%0,3 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0 TiC kompozit toz formu tane incelticinin sahip olduğu tespit edilmiştir. Çubuk formu geleneksel tane inceltici ise en yüksek DAS boyutuna sahiptir.

## 3.2 Makroyapı İncelemeleri

700 °C döküm sıcaklığında, 3 farklı formda ilavesi gerçekleşen kompozit tane inceltici tozların sıvı metale 4 farklı oranda ilave edilmesi sonucu elde edilen numunelerin makroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışma boyunca tüm deney çıktılarına ait tane boyutları hesaplanmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Böylece toz formu tane inceltici kullanımı ile geleneksel çubuk formu tane inceltici kullanımının tane boyutuna etkileri incelenmiş ve en ince tane yapısına sahip olan tane inceltici ve kompozisyon oranı saptanmıştır.

### 3.2.1 Direkt Toz Olarak İlave Edilen Tane İncelticiler ile Üretim

1 numaralı deney tasarımının girdisi olan 1,2,3,4 numaralı deneylere ait makroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiş (Şekil 3.15) ve tane boyutları hesaplanmıştır.

- Deney 1 – Makroyapı İncelemesi

Ağırlıkça Al+ ağı%0 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0,3 TiC kompozit toz formu tane incelticilerin direkt toz formunda sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin makroskobik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu 518,16 µm olarak hesaplanmıştır.

- Deney 2 – Makroyapı İncelemesi

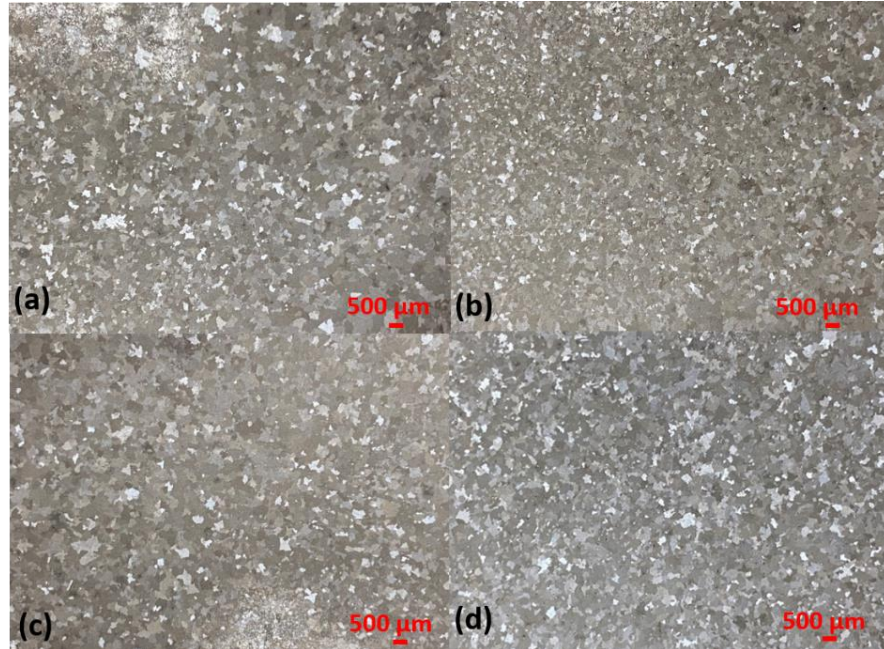
Ağırlıkça Al+ ağı%0,1 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0,2 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin direkt toz formunda sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin makroskobik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu 530,83 µm olarak hesaplanmıştır.

- Deney 3 – Makroyapı İncelemesi

Ağırlıkça Al+ ağı%0,2 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0,1 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin direkt toz formunda sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin makroskobik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu 700,65 µm olarak hesaplanmıştır.

- Deney 4 – Makroyapı İncelemesi

Ağırlıkça Al+ ağı%0,3 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin direkt toz formunda sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin makroskobik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu 600,83 µm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.15: Direkt toz olarak ilave edilen tane incelticiler ile gerçekleştirilen üretilere ait makroyapı görüntüleri, (a) Al+ağı%0,3 TiC, (b) Al+ağı%0,1 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0,2 TiC, (c) Al+ağı%0,2 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0,1 TiC, (d) Al+ağı%0,3 TiB<sub>2</sub>

### 3.2.2 Alüminyum Folyoya Sarılı Olarak İlave Edilen Tane İncelticiler İle Üretim

1 numaralı deney tasarımının girdisi olan 5,6,7,8 numaralı deneylere ait makroyapı incelemeleri (Şekil 3.16) gerçekleştirilmiştir.

- Deney 5 – Makroyapı İncelemesi

Ağırlıkça Al+ ağı%0 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0,3 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin alüminyum folyoya sarılarak sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin makroskobik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu 687,48 µm olarak hesaplanmıştır.

- Deney 6 – Makroyapı İncelemesi

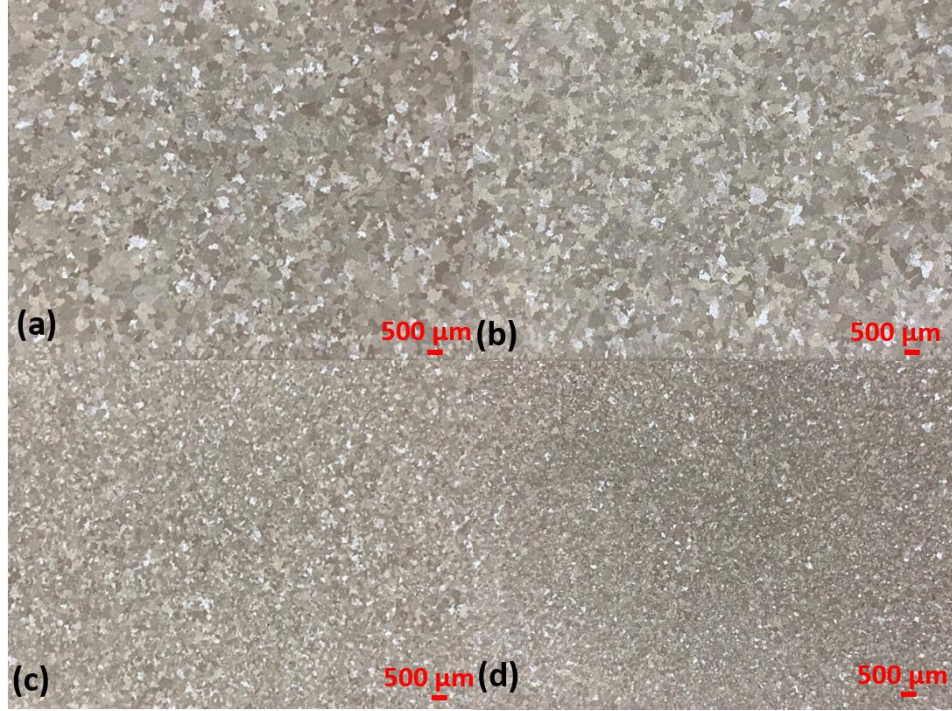
Ağırlıkça Al+ ağı%0,1 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0,2 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin alüminyum folyoya sarılarak sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin makroskobik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu 589,94 µm olarak hesaplanmıştır.

- Deney 7 – Makroyapı İncelemesi

Ağırlıkça Al+ ağı%0,2 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0,1 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin alüminyum folyoya sarılarak sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin makroskobik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu 369,855 µm olarak hesaplanmıştır.

- Deney 8 – Makroyapı İncelemesi

Ağırlıkça Al+ ağı%0,3 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin alüminyum folyoya sarılarak sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin makroskobik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu 345,65 µm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.16: Al folyoya sarılarak ilave edilen tane incelticiler ile gerçekleştirilen üretilere ait makroyapı görüntüleri, (a) Al+ağ%0,3 TiC, (b) Al+ağ%0,1 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağ%0,2 TiC, (c) Al+ağ%0,2 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağ%0,1 TiC, (d) Al+ağ%0,3 TiB<sub>2</sub>

### 3.2.3 Preslenerek İlave Edilen Tane İncelticiler ile Üretim

1 numaralı deney tasarımının girdisi olan 9,10,11,12 numaralı deneylere ait makroyapı incelemeleri (Şekil 3.17) gerçekleştirilmiştir.

- Deney 9 – Makroyapı İncelemesi

Ağırlıkça Al+ ağ%0 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağ%0,3 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin preslenerek sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin makroskobik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu 545,46 μm olarak hesaplanmıştır.

- Deney 10 – Makroyapı İncelemesi

Ağırlıkça Al+ ağ%0,1 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağ%0,2 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin preslenerek sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin makroskobik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu 537,77 μm olarak hesaplanmıştır.

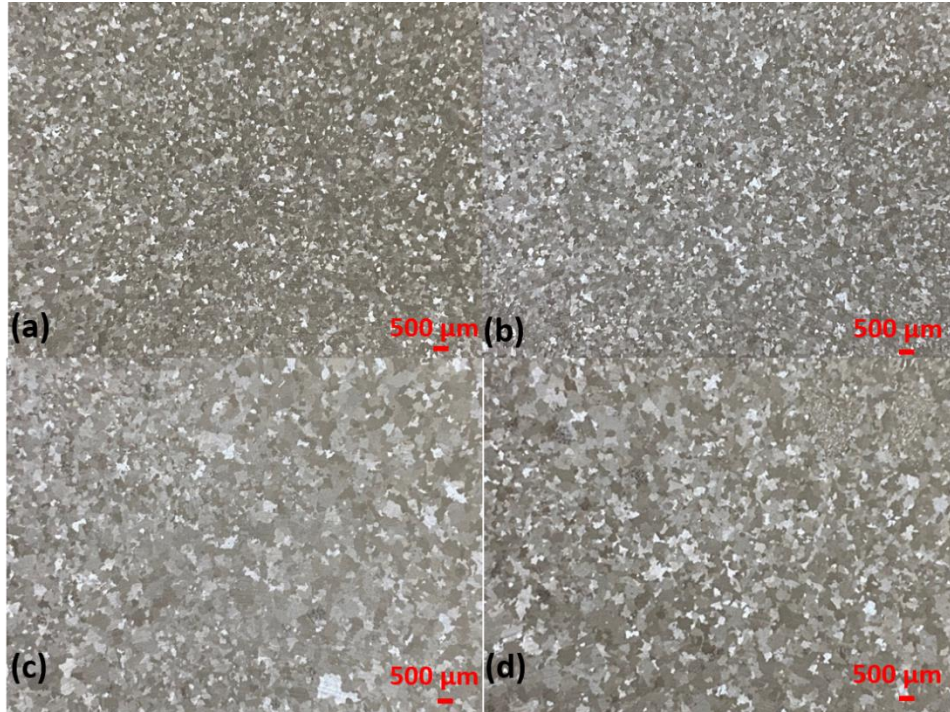


- Deneý 11 – Makroyapı İncelemesi

Ağrılıkça Al+ ağ%0,2 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağ%0,1 TiC kompozit toz formu tane incelticilerin preslenerek sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin makroskobik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu 671,57 μm olarak hesaplanmıştır.

- Deneý 12 – Makroyapı İncelemesi

Ağrılıkça Al+ ağ%0,3 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağ%0 TiC kompozit toz formu tane incelticilerin preslenerek sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerin makroskobik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu 573,836 μm olarak hesaplanmıştır.



şekil 3.17: Preslenerek ilave edilen tane incelticiler ile gerçekleştirilen üretime ait makroyapı görüntüleri, (a) Al+ağ%0,3 TiC, (b) Al+ağ%0,1 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağ%0,2 TiC, (c) Al+ağ%0,2 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağ%0,1 TiC, (d) Al+ağ%0,3 TiB<sub>2</sub>

### 3.2.4 Geleneksel Çubuk Formlu Tane İncelticiler ile Üretim

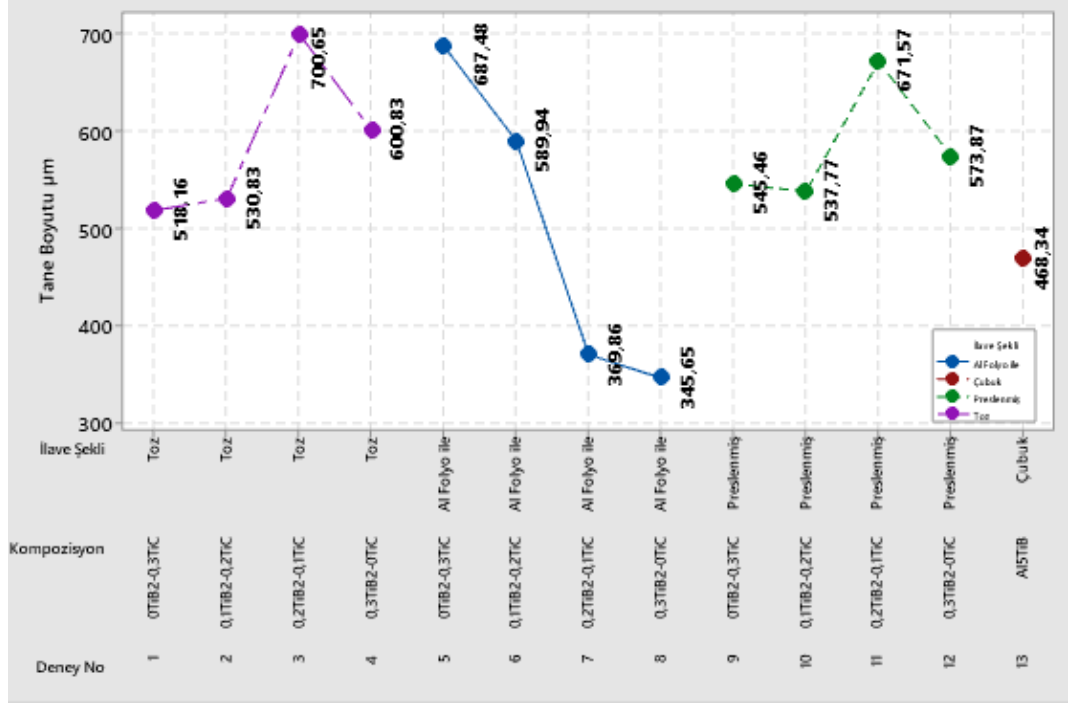
Endüstride yaygın olarak kullanılan çubuk formu Al<sub>5</sub>TiB tane incelticisi kullanılarak gerçekleştirilen 13 numaralı deneye ait numunelerin makroyapı incelemeleri (şekil 3.18) gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu 468,336 μm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.18: Geleneksel çubuk formulu tane inceltici ile gerçekleştirilen üretime ait makroyapı görüntüsü

Makroyapı incelemeleri sonucunda tane boyutu dağılımları (Şekil 3.19) değerlendirildiğinde elde edilen tespitler aşağıdaki gibidir;

- En ince tane boyutu elde edilen ilave formu toz tane incelticilerin alüminyum folyoya sarılı olarak sıvı metale ilavesi olduğu tespit edilmiştir.
- En ince tane boyutu, ağırlıkça Al+ağ%0,3 TiB<sub>2</sub> kompozisyonlu toz formulu kompozit tane inceltici ile elde edilmiştir.
- En ince tane boyutu, TiB<sub>2</sub> toz miktarının artması ile, alüminyum folyoya sarılarak ilave edilen üretimlerde elde edilmiştir.
- Geleneksel tane inceltici kullanılarak gerçekleştirilen üretime ait numunelerin tane boyutlarının, en ince tane boyutunun elde edildiği alüminyum folyo ile üretilen numunelere yakın olduğu tespit edilmiştir.
- Toz olarak direkt sıvı metale eklenen tane incelticiler kullanılarak gerçekleştirilen üretimlerde tane boyutlarının en yüksek seviyelerde olduğu ve tane incelmesinin gerçekleşmediği tespit edilmiştir.



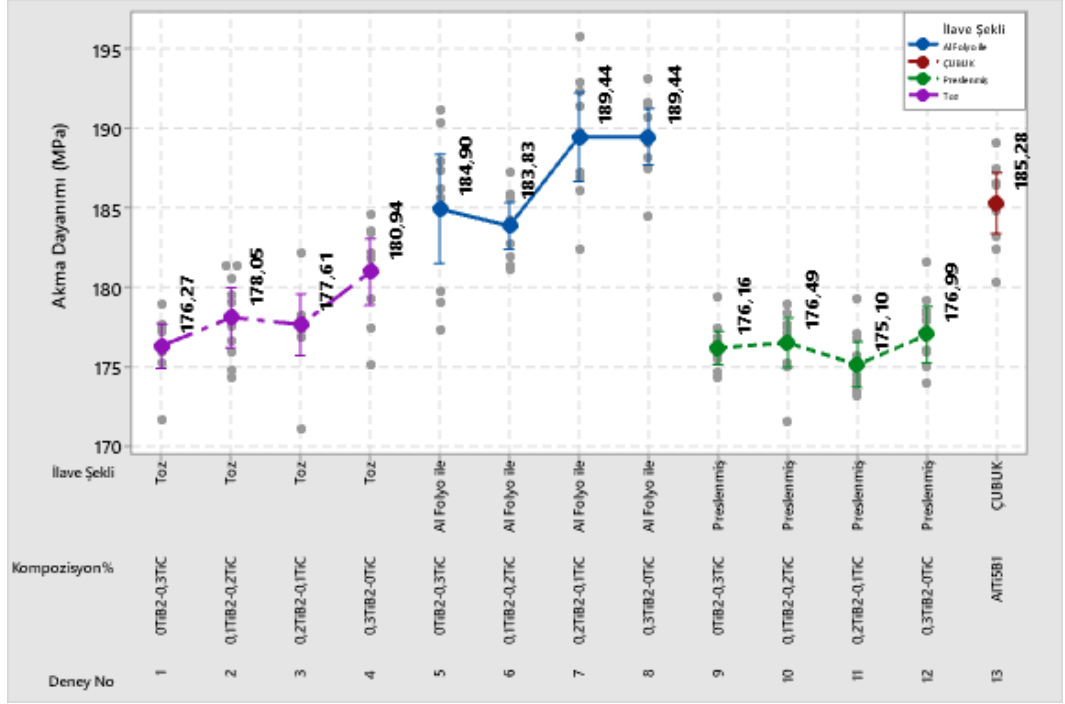
Şekil 3.19: 1 numaralı deney tasarımı sonucunda elde edilen tane boyutu değerleri

### 3.3 Çekme Test Sonuçları

1 numaralı deney tasarımına ait 13 adet deneyin üretimlerinin gerçekleştirilmesinin ardından tüm numunelerden çekme test çubukları hazırlanmış ve testler gerçekleştirilmiştir.

Farklı kompozisyonlarda ve farklı ilave şekilleri ile sıvı metale eklenmiş olan tane incelticiler ile gerçekleştirilen üretimlerin akma dayanım değerleri, kopma dayanım değerleri ve %uzama değerleri sırasıyla Şekil 3.20, Şekil 3.21, Şekil 3.22’de verilen grafiklerdedir.



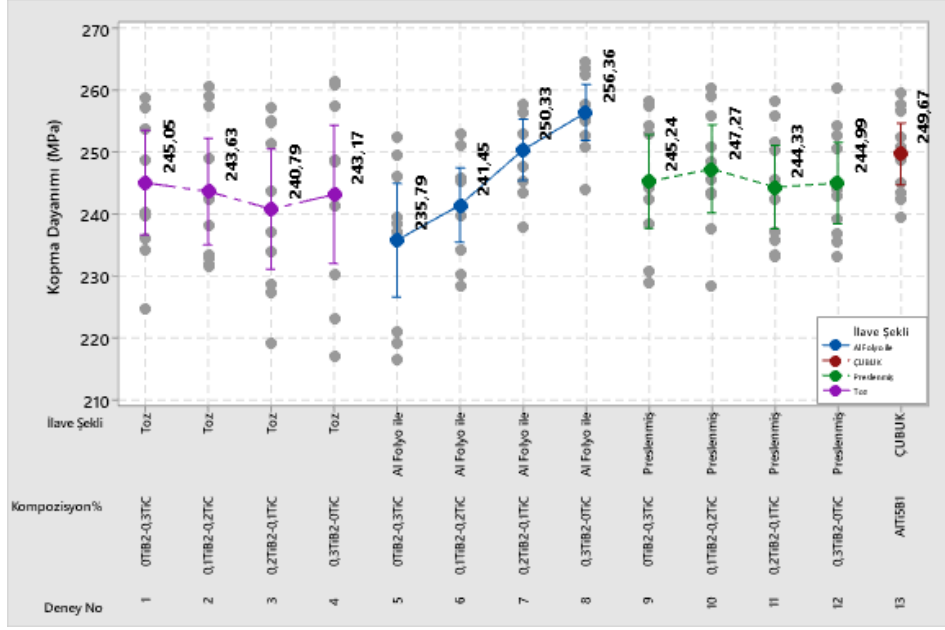


Şekil 3.20: Çekme test sonuçları – Akma dayanımı değerleri (MPa)

Akma dayanım değerleri incelendiğinde,

- Toz formulu kompozit tane incelticilerin direkt olarak eklendiği üretimlerde akma dayanım değerleri geleneksel tane inceltici çubuk kullanılarak gerçekleştirilen üretimden düşük seviyedir.
- Toz formulu kompozit tane incelticilerin preslenerek eklendiği üretimlerde akma dayanım değerleri arasındaki sapma daha düşük olmakla beraber değerlerin ortalamaları geleneksel tane inceltici çubuk kullanılarak gerçekleştirilen üretimden düşük seviyededir.
- Toz formulu kompozit tane incelticilerin alüminyum folyoya sarılarak eklendiği üretimlerde akma dayanım değerleri geleneksel çubuk formulu tane inceltici kullanılarak gerçekleştirilen üretime en yakın olan değerlerdedir.

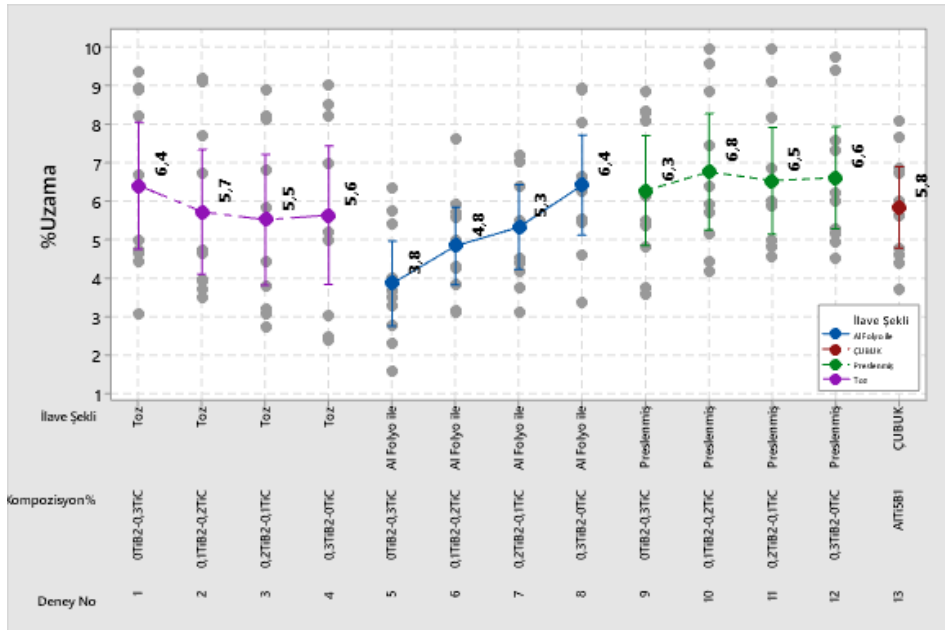
Tüm üretime bakıldığında, toz formulu tane inceltici kompozit içerisindeki TiB<sub>2</sub> değerinin oranı yükseldikçe akma dayanım değerlerinin arttığı görülmektedir.



Şekil 3.21: Çekme test sonuçları – Kopma dayanımı değerleri (MPa)

Kopma dayanım değerleri incelendiğinde,

- Tüm üretimlerde birbirlerine yakın seviyelerde kopma dayanımları elde edilmiştir.
- En yüksek ortalamaya sahip kopma dayanım değerleri toz formulu tane incelticilerin alüminyum folyoya sarılarak eklendiği üretimlerde elde edilmiştir.



Şekil 3.22: Çekme test sonuçları – % Uzama değerleri

% Uzama değerleri incelendiğinde,

- Tüm üretimlerde birbirlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir.
- Al folyoya sarılarak eklenen Al+ağ%0 TiB<sub>2</sub> ve Al+ağ%0,3 TiC alaşımlı tane inceltici ile gerçekleştirilen üretime ait numune en düşük %uzama değerine sahiptir.
- Preslenerek eklenen toz formulu tane incelticiler ile gerçekleştirilen üretimlerde %uzama değerleri en yüksek değerlere sahiptir.

Tüm retimlere ait çekme test sonuçları değerlendirildiğinde, kopma dayanım değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu ancak özellikle akma dayanım değerlerinde farklılıklar olduğu görülmektedir. Akma dayanım değerleri incelendiğinde alüminyum folyoya sarılı olarak ilavesi gerçekleştirilen üretimler en yüksek değerlere sahiptir.

Mikroyapı, makroyapı ve çekme test sonuçları değerlendirildiğinde; mikroyapılarda lokal alanlarda yoğunlaşan çekintiler mevcuttur. Buna bağlı olarak özellikle direkt toz formulu olarak sıvı metale ilave edilen kompozit toz tane incelticilerle gerçekleşen üretimlerde porozite seviyesi daha yüksektir. Söz konusu numunelerin DAS ve tane boyutu değerleri de en yüksek seviyelere sahiptir. Porozite seviyesinin ve DAS seviyelerinin yüksek olması tane inceltme prosesinin yüksek performans ile gerçekleşmemiş olduğunu göstermektedir. Bu üretimlerde akma dayanım değerleri geleneksel tane inceltici çubuk kullanılarak gerçekleştirilen üretimden düşük seviyedir. Yüksek porozite değerleri, akma ve kopma dayanım değerlerinin düşük olması ve tane boyutlarının büyük olması ile ilişkilendirilebilmektedir.

Toz formulu kompozit tane inceltici alaşımlarla gerçekleştirilen üretimlere ait DAS boyutları çubuk formulu tane inceltici ile gerçekleştirilen üretimden daha küçüktür. En küçük DAS boyutu sıvı metale alüminyum folyoya sarılı olarak ilave edilen, ağırlıkça Al+ağ%0,3 TiB<sub>2</sub> ve Al+ağ%0 TiC kompozit toz formulu tane inceltici ile 26,9 µm olarak elde edilmiştir. ubuk formulu geleneksel tane inceltici ise 41,53 µm olmak üzere en yüksek DAS boyutuna sahiptir. En küçük DAS değeri ile tane boyutunun elde edildiği tane inceltici ile en yüksek akma ve kopma dayanım değerlerine ulaşılmıştır. Tane boyutu değerlerinin incilmesi ile %uzama, akma ve kopma değerlerinde artış meydana gelmektedir.

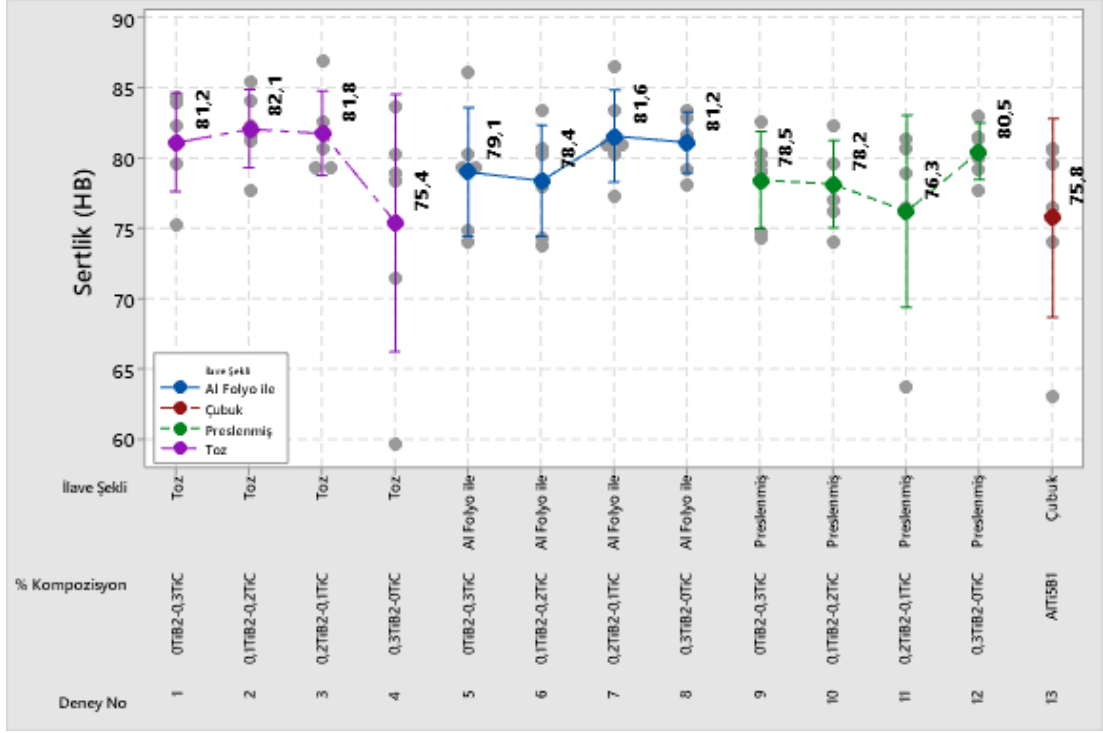
Zhiwei Liu ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada, A356 alüminyum alaşımına toz Ti partiküllerini sırasıyla %1,5 ağ ve %3,0 ağ oranlarında, 780°C’de ilave ederek DAS boyutlarında 100 µm’den 50 µm’ye düşüş elde etmişlerdir. Çalışmalarında en yüksek mekanik özellikleri %ağ0,3 Ti ilavesi ile etmişlerdir. Benzer olarak, gerçekleştirdiğimiz çalışmada da en yüksek mekanik özellikler %ağ0,3 oranında tane inceltici kompozit alaşım ilavesi ile elde edilmiştir. UTS değerlerinde %42,3, %uzama değerlerinde %29,9 elde etmişken, çalışmamızda UTS 2,68, uzama değerinde %9,85 elde edilmiştir. Zhiwei Liu ve arkadaşları çalışmalarında akma dayanım değerinde gerçekleşen değişiklikten bahsetmemektedir. Çalışmamızda akma dayanım değerlerinde %2,25 oranında iyileşme elde edilmiştir.

Pengting Li ve arkadaşları, Al-5Ti-B ve Al-3Ti-1B-0,2C tane inceltici master alaşımlarını karşılaştırmış ve tane boyutlarının ortalama 333-358 µm değerlerinden 167±8 µm boyutlarına kadar inceldiğini tespit etmiştir. Gerçekleştirdiğimiz çalışmada tane boyutu değerleri 468,34 µm boyutlarından 345,65 µm boyutlarına kadar incelmektedir. Pengting Li ve arkadaşları, akma dayanımı, kopma dayanımı, %uzama değerlerinin %5,9, %11,7, %9,2 oranında artış göstermekte iken gerçekleştirdiğimiz çalışmada sırasıyla %2,25, %2,68 ve %9,85 oranlarında artış elde edilmiştir.

### 3.4 Sertlik Test Sonuçları

Malzemenin sertlik değerleri, ısıl işlem uygulaması ile doğrudan ilişki içerisindedir. Deneysel tasarımda belirtilen her deneye ait üretimlerden ikişer adet numunenin zımparalama işlemleri yapılarak sertlik ölçümü için hazır hale getirilmiş ve her numunedan 3’er adet ölçüm yapılmıştır.

Böylece her deneye ait olmak üzere toplam 6 adet ölçümün ortalama değerleri hesaplanmıştır (Şekil 3.23). Toz formulu tane incelticiler ile gerçekleştirilen üretimlerin sertlik değerleri geleneksel çubuk formulu tane inceltici ile gerçekleştirilen üretimden yüksektir.

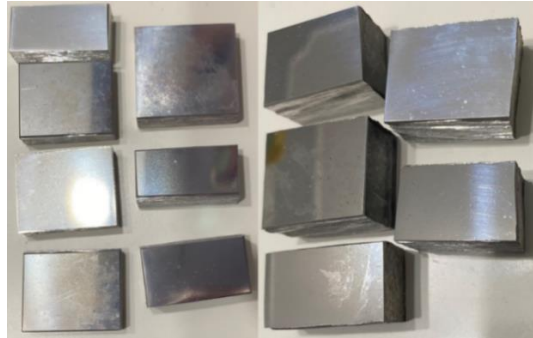


Şekil 3.23: Sertlik değerleri

Zhiwei Liu ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada, A356 alüminyum alaşımına toz Ti partiküllerini sırasıyla %ağ1,5 ve %ağ3,0 oranlarında, 780°C’de ilave ederek sertlik değerlerinde %24,7 oranında artış elde edilmişken, çalışmamızda %7,08 oranında artış elde edilmiştir.

### 3.5 SEM-EDS Analizleri

Mikroyapı incelemesi yapılan kesitlerin belirlenen noktalarından SEM analizi yapılabilmesi için parçalar kesilmiş (Şekil 3.24) ve inceleme için hazırlanmıştır.

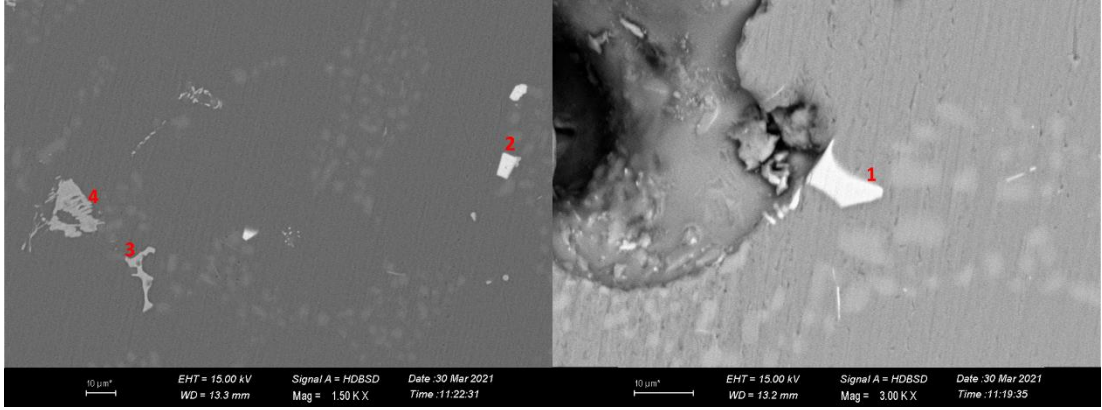


Şekil 3.24: SEM-EDS analizi numuneleri

### 3.5.1 Direkt Toz Olarak İlave Edilen Tane İncelticiler ile Üretim

#### ▪ Deney 1

Ağırlıkça Al+ ağı%0,3 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin direkt toz formunda sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerde blok formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> (Şekil 3.25, 1-2) ve çin yazısı formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> intermetalik bileşikler (Şekil 3.25, 3-4) mevcuttur. Tablo 3.9’da intermetalik bileşiklere ait EDS analizleri verilmiştir ve çalışma boyunca tespit edilen çin yazısı formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> intermetalik bileşiklere ait elemental değerler örneklendirilmiştir.



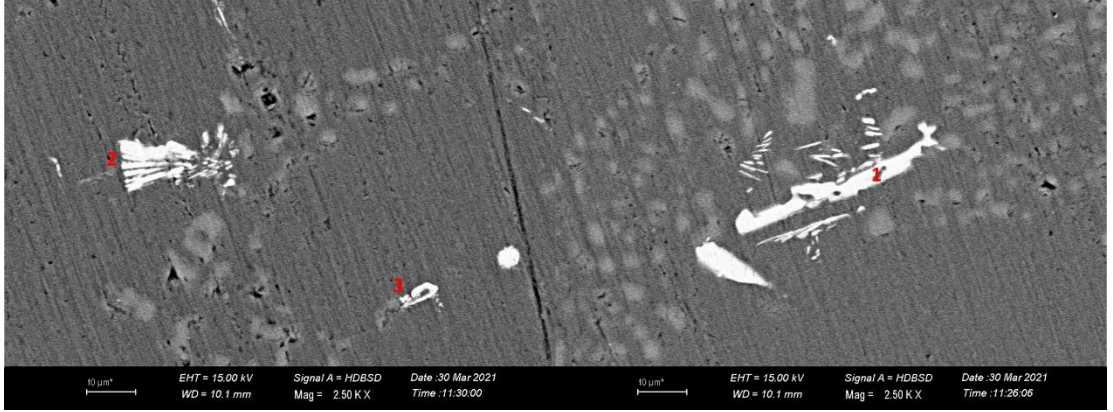
Şekil 3.25: Al+ ağı%0,3 TiC ile üretilen numunelerin SEM Görüntüleri

Element	$\pi$ -Al <sub>8</sub> FeMg <sub>3</sub> Si <sub>6</sub>	
	Blok formulu Atomik %	Çin yazısı formulu Atomik %
B K	0.14	0.17
C K	3.63	2.74
MgK	5.10	4.10
AlK	69.07	67.31
SiK	9.79	9.74
SrL	0.16	0.14
TiK	0.20	0.17
FeK	11.91	15.63

Tablo 3.9: Blok formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> ve çin yazısı formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> intermetalik bileşiklere ait EDS analiz sonuçları

▪ *Deney 2*

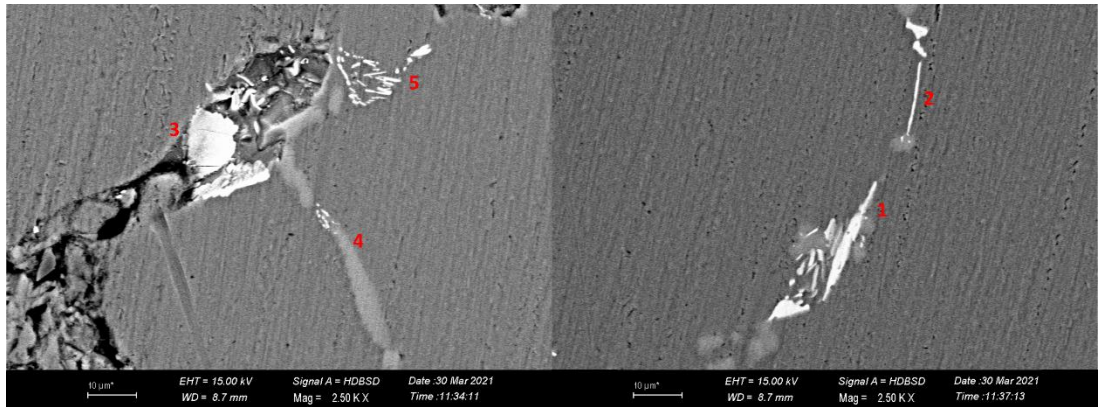
Ağırlıkça Al+ ağı%0,1 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0,2 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin direkt toz formunda sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerde çin yazısı formulu  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(Fe,Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> (Şekil 3.26, 3) ve blok formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> intermetalik bileşikler (Şekil 3.26, 1-2-3) mevcuttur.



Şekil 3.26: Al+ağı%0,1 TiB<sub>2</sub> - Al+ağı%0,2 TiC ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri

▪ *Deney 3*

Ağırlıkça Al+ ağı%0,2 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0,1 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin direkt toz formunda sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerde iğnesel  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi (Şekil 3.27, 2-5) ve blok formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> intermetalik bileşikler (Şekil 3.27, 1-3) mevcuttur. 4 numara Si tanesini (Şekil 3.27) göstermektedir.



Şekil 3.27: Al+ağı%0,2 TiB<sub>2</sub> - Al+ağı%0,1 TiC ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri.



- *Deney 4*

Ağırlıkça Al+ağ%0,3 TiB<sub>2</sub> kompozit toz formulu tane incelticilerin direkt toz formunda sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerde kristal yapıları Sr elementleri (Şekil 3.28, 1-2-3), iğnesel β-Al<sub>15</sub>FeSi (Şekil 3.28, 4) ve blok formulu π-Al<sub>18</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> intermetalik bileşikler (Şekil 3.28, 5) mevcuttur. Tablo 3.10’da Sr elementine ait EDS analiz sonuçları verilmiştir ve çalışma boyunca tespit edilen Sr elementine ait sonuçlar örneklendirilmiştir.



Şekil 3.28: Al+ağ%0,3 TiB<sub>2</sub> ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri.

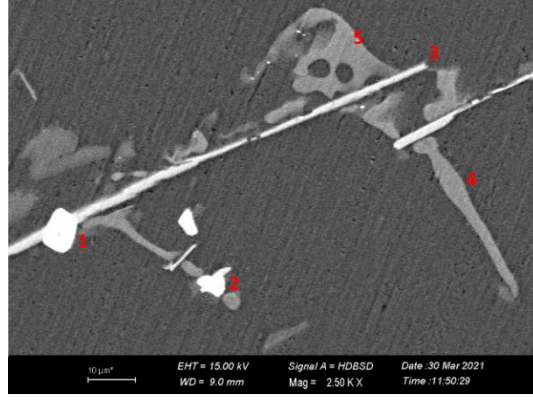
Element	Sr Atomik %
B K	0.14
C K	0.39
MgK	0.26
AlK	42.60
SiK	30.45
SrL	25.84
TiK	0.32

Tablo 3.10: Sr elementine ait EDS analiz sonuçları

### 3.5.2 Alüminyum Folyoya Sarılı Olarak İlave Edilen Tane İncelticiler ile Üretim

- *Deney 5*

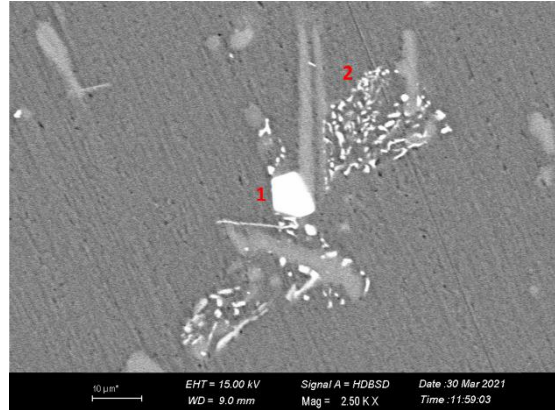
Ağırlıkça Al+ ağ%0,3 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin alüminyum folyoya sarılarak sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerde kristal yapıları Sr elementleri (Şekil 3.29, 1-2) ve blok formulu π-Al<sub>18</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> intermetalik bileşikler (Şekil 3.29, 3) mevcuttur. 4 ve 5 numaralar (Şekil 3.29) Si taneleridir.



Şekil 3.29: Al+ ağ%0,3 TiC ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri

▪ *Deney 6*

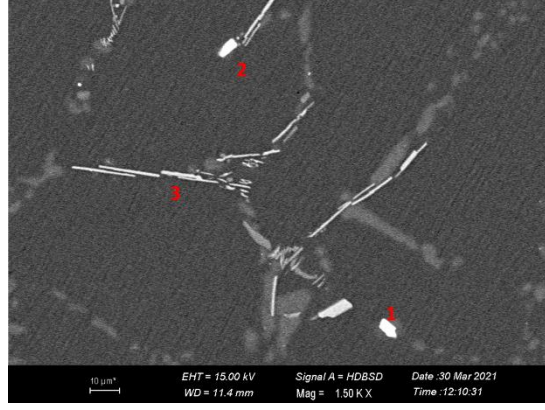
Ağırlıkça Al+ ağ%0,1 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağ%0,2 TiC kompozit toz formu tane incelticilerin alüminyum folyoya sarılarak sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerde kristal yapıları Sr elementleri (Şekil 3.30, 1), iğnesel β-Al<sub>5</sub>FeSi ve blok formu π-Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> intermetalik bileşikler (Şekil 3.30, 2) mevcuttur.



Şekil 3.30: Al+ ağ%0,1 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağ%0,2 TiC ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri

▪ *Deney 7*

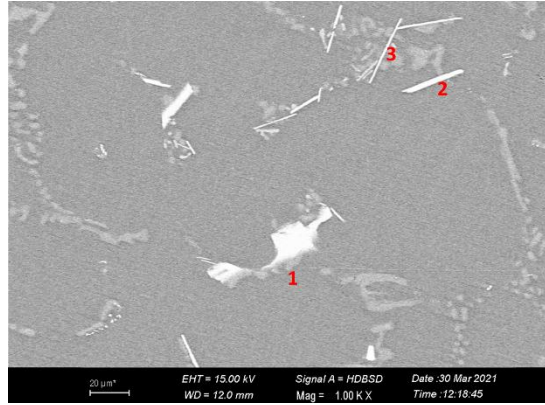
Ağırlıkça Al+ ağ%0,2 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağ%0,1 TiC kompozit toz formu tane incelticilerin alüminyum folyoya sarılarak sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerde kristal yapıları Sr elementleri (Şekil 3.31, 2), iğnesel β-Al<sub>5</sub>FeSi ve blok formu π-Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> intermetalik bileşikler (Şekil 3.31, 1-3) mevcuttur.



Şekil 3.31: Al+ ağı%0,2 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0,1 TiC ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri

▪ *Deney 8*

Ağırlıkça Al+ ağı%0,3 TiB<sub>2</sub> kompozit toz formulu tane incelticilerin alüminyum folyoya sarılarak sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerde kristal yapıları Sr elementleri (Şekil 3.32, 1), iğnesel  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi ve blok formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> intermetalik bileşikler (Şekil 3.32, 2-3) mevcuttur.

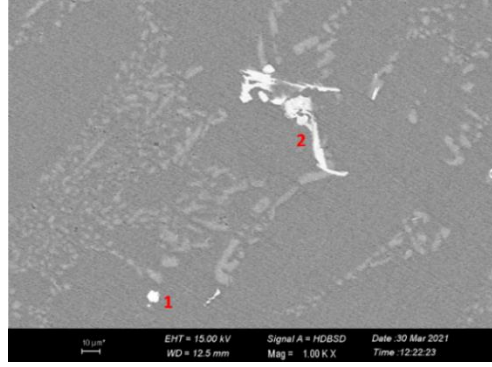


Şekil 3.32: Al+ ağı%0,3 TiB<sub>2</sub> ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri

### 3.5.3 Preslenerek İlave Edilen Tane İncelticiler İle Üretim

▪ *Deney 9*

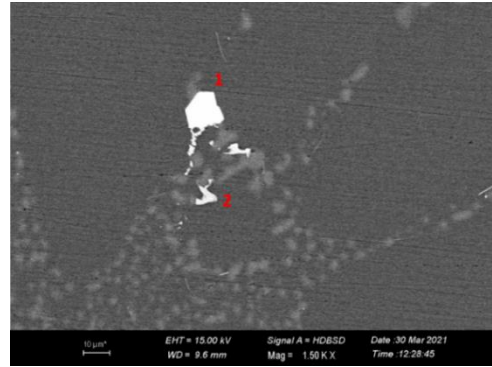
Ağırlıkça Al+ ağı%0,3 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin preslenerek sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerde kristal yapıları Sr elementleri (Şekil 3.33, 1) ve blok formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> intermetalik bileşikler (Şekil 3.33, 2) mevcuttur.



Şekil 3.33: Al+ ağı%0,3 TiC ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri

▪ *Deney 10*

Ağırlıkça Al+ ağı%0,1 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0,2 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin preslenerek sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerde kristal yapıları Sr elementleri (Şekil 3.24, 1) ve çin yazısı formulu  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(Fe,Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> intermetalik bileşikler (Şekil 3.34, 2) mevcuttur. Tablo 3.11’de intermetalik bileşiğe ait EDS analiz sonuçları verilmiş ve çalışma boyunca tespit edilen çin yazısı formulu  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(Fe,Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> intermetalik bileşiklerine ait %atomik değerler örneklendirilmiştir.



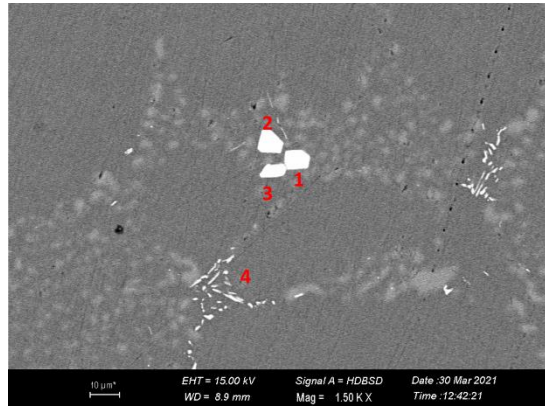
Şekil 3.34: Al+ ağı%0,1 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0,2 TiC ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri

Tablo 3.11: Çin yazısı formulu  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(Fe,Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> intermetalik bileşiklere ait EDS analiz sonuçları

Element	Çin yazısı formulu $\alpha$ -Al <sub>15</sub> (Fe,Mn) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> Atomik %
<b>B K</b>	0.13
<b>MgK</b>	0.29
<b>AlK</b>	65.08
<b>SiK</b>	16.52
<b>SrL</b>	0.07
<b>TiK</b>	0.16
<b>MnK</b>	2.58
<b>FeK</b>	15.17

- *Deney 11*

Ağırlıkça Al+ ağı%0,2 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0,1 TiC kompozit toz formulu tane incelticilerin preslenerek sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerde kristal yapıları Sr elementleri (Şekil 3.35, 1-2-3) ve iğnesel β-Al<sub>5</sub>FeSi intermetalik bileşikler (Şekil 3.35, 4) mevcuttur. Tablo 3.12’de intermetalik bileşiğe ait EDS analiz sonuçları verilmiş ve çalışma boyunca tespit edilen iğnesel β-Al<sub>5</sub>FeSi intermetalik bileşiklerine ait %atomik değerler örneklendirilmiştir.



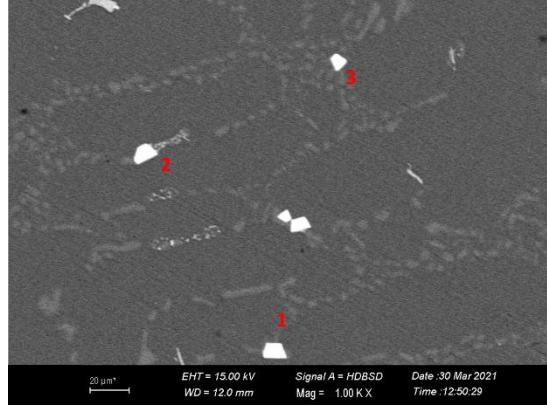
Şekil 3.35: Al+ ağı%0,2 TiB<sub>2</sub> ve Al+ ağı%0,1 TiC ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri

Element	İğnesel β-Al <sub>5</sub> FeSi Atomik %
<b>B K</b>	0.12
<b>MgK</b>	0.29
<b>AlK</b>	1.24
<b>SiK</b>	70.53
<b>SrL</b>	6.85
<b>TiK</b>	0.17
<b>MnK</b>	20.80
<b>FeK</b>	0.12

Tablo 3.12: İğnesel β-Al<sub>5</sub>FeSi intermetalik bileşiklere ait EDS analiz sonuçları

- *Deney 12*

Ağırlıkça Al+ ağı%0,3 TiB<sub>2</sub> kompozit toz formulu tane incelticilerin preslenerek sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerde kristal yapıları Sr elementleri (Şekil 3.36, 1) ve Fe bazlı intermetalik bileşikler mevcuttur.

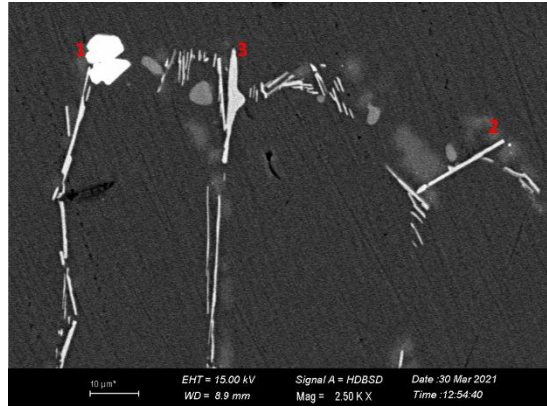


Şekil 3.36: Al+ ağ%0,3 TiB<sub>2</sub> ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri

### 3.5.4 Geleneksel Çubuk Formlu Tane İnceltici İle Üretim

#### ▪ Deney 13

Geleneksel çubuk formulu AlTi<sub>5</sub>B tane inceltici alaşımının sıvı metale ilavesi sonucunda elde edilen numunelerde kristal yapıları Sr elementleri (Şekil 3.37, 1), iğnesel β-Al<sub>3</sub>FeSi ve blok formulu π-Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> intermetalik (Şekil 3.37, 2-3) bileşikler mevcuttur.



Şekil 3.37: AlTi<sub>5</sub>B ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri

SEM incelemeleri sonucunda tüm üretimlerde birbirlerine benzer yapılar görülmüştür. Analiz sonucunda elde edilen bilgiler aşağıdaki gibidir;

- Toz tane incelticiler ile gerçekleştirilen üretilere ait numunelerde toz aglomerasyonu tespit edilmemiştir. Toz kompozit tane incelticiler yapıya homojen olarak dağılmıştır.

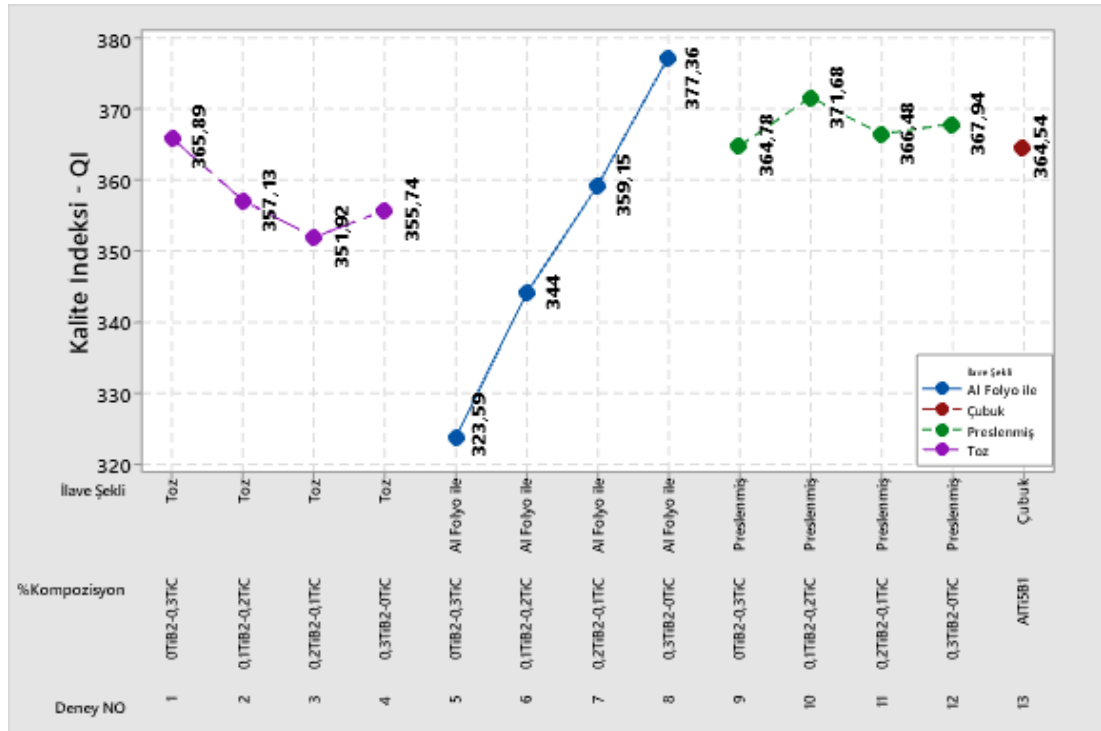


- Tüm üretimlerde kristal yapılı Sr taneleri tespit edilmiştir.
- Tüm üretimlerde genellikle iğnesel  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi ve blok formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> intermetalik bileşikleri ile nadiren çin yazısı formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> bileşikleri tespit edilmiştir.

### 3.6 Kalite İndeksi (QI) Değerlendirmesi

En ince tane boyutunu ve en yüksek mekanik özellikleri elde edebilmek için gerçekleştirilen 1 numaralı deney tasarımına ait olan tüm üretimler değerlendirilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak çekme test sonuçları kullanılarak üretimlerin kalite indeksleri (QI) hesaplanmıştır (Şekil 3.38). QI formülü Formül 3.1’de verilmiştir. Maksimum çekme dayanımı; ‘UTS’, %uzama değeri ‘A’ ile gösterilmektedir. ‘d’ ise her malzeme tipine özgü olan deneysel katsayıdır ve döküm alüminyum alaşımları için 150 olarak belirlenmiştir.

$$QI : UTS + d \cdot \log(A) \quad (3.1)$$



Şekil 3.38: Kalite indeksi – QI değerleri



Tüm QI değerleri incelendiğinde en yüksek kalite indeksine sahip olan üretimin Al folyoya sarılarak eklenen Al+ ağı%0,3 TiB<sub>2</sub> kompozisyonlu toz tane inceltici ile elde edildiği görülmektedir.

1 numaralı deney tasarımı ile gerçekleştirilen tüm üretimler değerlendirildiğinde en ince tane boyutunun, en yüksek mekanik özelliklerin elde edildiği üretimin Alüminyum folyoya sarılı olarak sıvı metale ilave edilen Al+ ağı%0,3 TiB<sub>2</sub> kompozisyonuna ait toz tane inceltici olduğu belirlenmiştir. Böylece, optimum kompozisyon ve ilave şekli belirlenmiş ve Bölüm 2’de belirtilen 2 nolu deney tasarımı Tablo 3.13’te güncellenmiş olarak verilmiştir.

Tablo 3.13: Optimum Değerlerin Belirlenmesi ile Güncellenen Deney Tasarımı-2

Deney Tasarımı - 2				
Al+TiB <sub>2</sub> %	Al5TiB ppm	Döküm Sıcaklığı °C	Karıştırma Süresi	İlave Formu
0,3	-	690	2 dk	Al Folyoya Sarılı
0,3	-	700	2 dk	
0,3	-	720	2 dk	
-	1000	690	2 dk	Referans Çubuk
-	1000	700	2 dk	
-	1000	720	2 dk	

### 3.7 Optimum Kompozisyon ile Farklı Döküm Sıcaklığı Çalışmaları

1 numaralı deney tasarımının çıktısı olarak, optimum tane incelticinin ilave şekli ve kompozisyon oranlarının belirlenmesinin ardından farklı döküm sıcaklıklarında üretimler gerçekleştirilmiştir. Böylece en yüksek mekanik özelliklerin ve en ince tane boyutunun elde edileceği döküm sıcaklığının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu kapsamda Al+ağı%0,3 TiB<sub>2</sub> kompozit toz tane inceltici alüminyum folyoya sarılarak sıvı metale ilave edilmiş ve 700°C’de gerçekleştirilen üretilere ek olarak 690°C ve 720°C döküm sıcaklıklarında üretimler gerçekleştirilmiştir. Referans olarak kullanılan geleneksel çubuk formulu tane inceltici ile aynı döküm sıcaklıklarında üretimler gerçekleştirilmiş ve tüm üretimler sonucunda elde edilen mekanik özellikler karşılaştırılmıştır.

### 3.7.1 Mikroyapı İncelemeleri

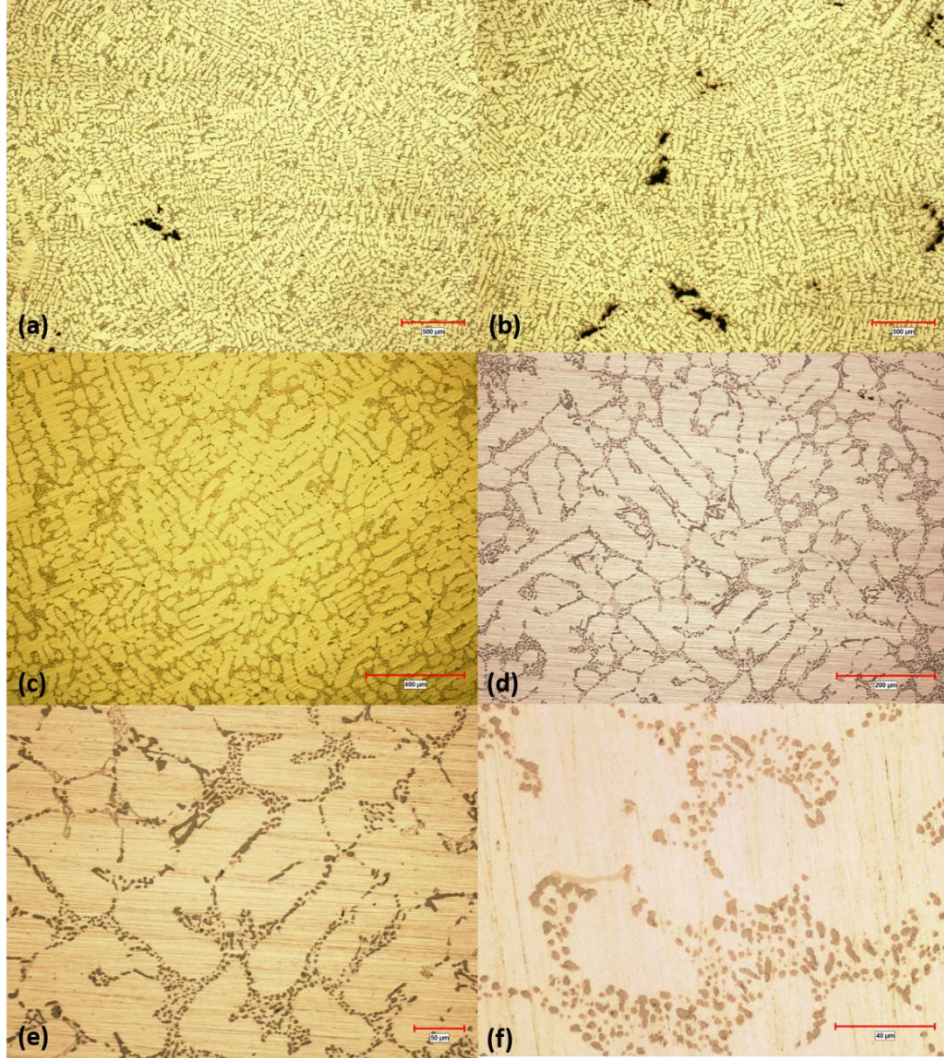
690°C ve 720°C döküm sıcaklıklarında gerçekleştirilen üretilere ait numunelerin mikroyapı, makroyapı incelemeleri ve mekanik testleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler zımparalama, parlatma ve dağlama proseslerinden geçirilerek mikroyapı, makroyapı ve sertlik incelemeleri için hazırlanmıştır. Mekanik testlerin gerçekleşmesi için çekme test çubukları hazırlanmıştır.

#### 3.7.1.1 690°C Döküm Sıcaklığında Gerçekleştirilen Üretilere Ait Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri

Mikroyapı incelemeleri sürecinde sırasıyla 25, 50, 100, 200 ve 500 büyütme oranları kullanılmıştır. Mikroyapı incelemesi sonucunda tespit edilen ortalama DAS boyutları ve ortalama porozite oranları Tablo 3.14'te verilmiştir.

- *Toz Formlu Tane İnceltici ile Gerçekleştirilen Üretilere Ait İncelemeler*

Al+ağ%0,3 TiB<sub>2</sub> kompozit toz tane incelticiler alüminyum folyoya sarılarak 690°C döküm sıcaklığında gerçekleştirilen üretilere ait numunelerin 2.5X, 5X, 10X, 20X ve 50X objektif büyütmelerinde mikroskobik incelemeleri (Şekil 3.39) gerçekleştirilmiştir.



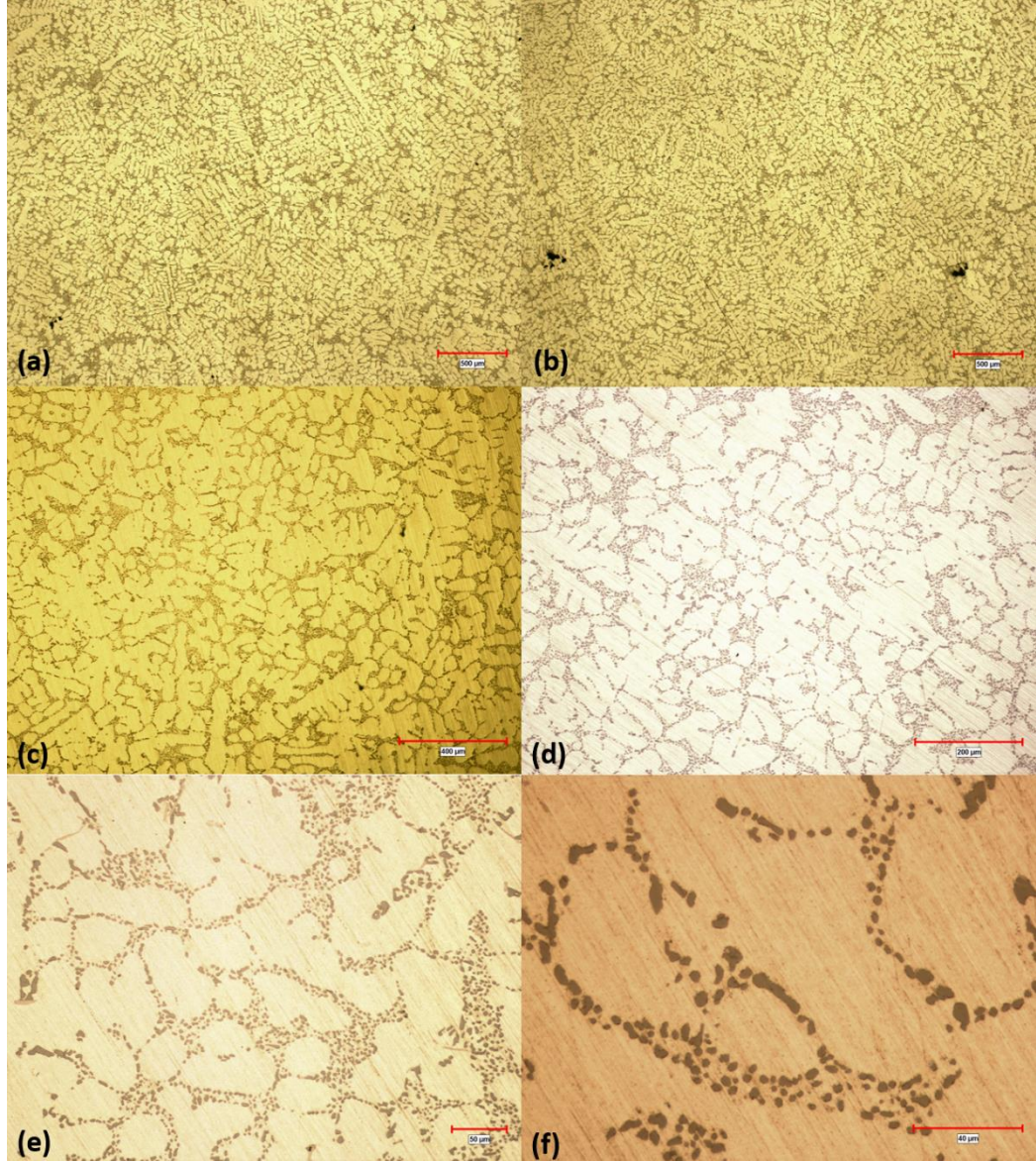
Şekil 3.39: 690°C’de toz formulu tane inceltici ile üretilen numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f)

Mikroyapı incelemeleri sonucunda, mikroyapıda dentrit tanelerinin ve faz dağılımlarının homojen olduğu tespit edilmiştir. Blok formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> (Şekil 3.39 (f)) ve çin yazısı formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> intermetalik fazları tespit edilmiştir.

- *Geleneksel Çubuk Formlu Tane İnceltici ile Gerçekleştirilen Üretimlere Ait İncelemeler*

Al<sub>5</sub>TiB geleneksel çubuk formulu tane inceltici ile 690°C döküm sıcaklığında gerçekleştirilen üretime ait numunelerin 2.5X, 5X, 10X, 20X ve 50X objektif büyütmelerinde mikroskobik incelemeleri (Şekil 3.40) gerçekleştirilmiştir.





Şekil 3.40: 690°C’de çubuk formulu Al<sub>5</sub>TiB<sub>2</sub> tane inceltici ile üretilen numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f)

Mikroyapı incelemeleri sonucunda, mikroyapıda dentrit tanelerinin ve faz dağılımlarının homojen olduğu tespit edilmiştir. Blok formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> (Şekil 3.40 (f)) intermetalik fazları tespit edilmiştir.

Tablo 3.14: 690°C’de üretilen numunelerin DAS ve Porozite seviyeleri

Tane İnceltici	DAS (µm)	Porozite (%)
%0,3 Al+TiB <sub>2</sub>	29,01	0,41
Al <sub>5</sub> TiB <sub>2</sub>	30,3	0,33

### 3.7.1.2 720°C Döküm Sıcaklığında Gerçekleştirilen Üretime Ait Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri

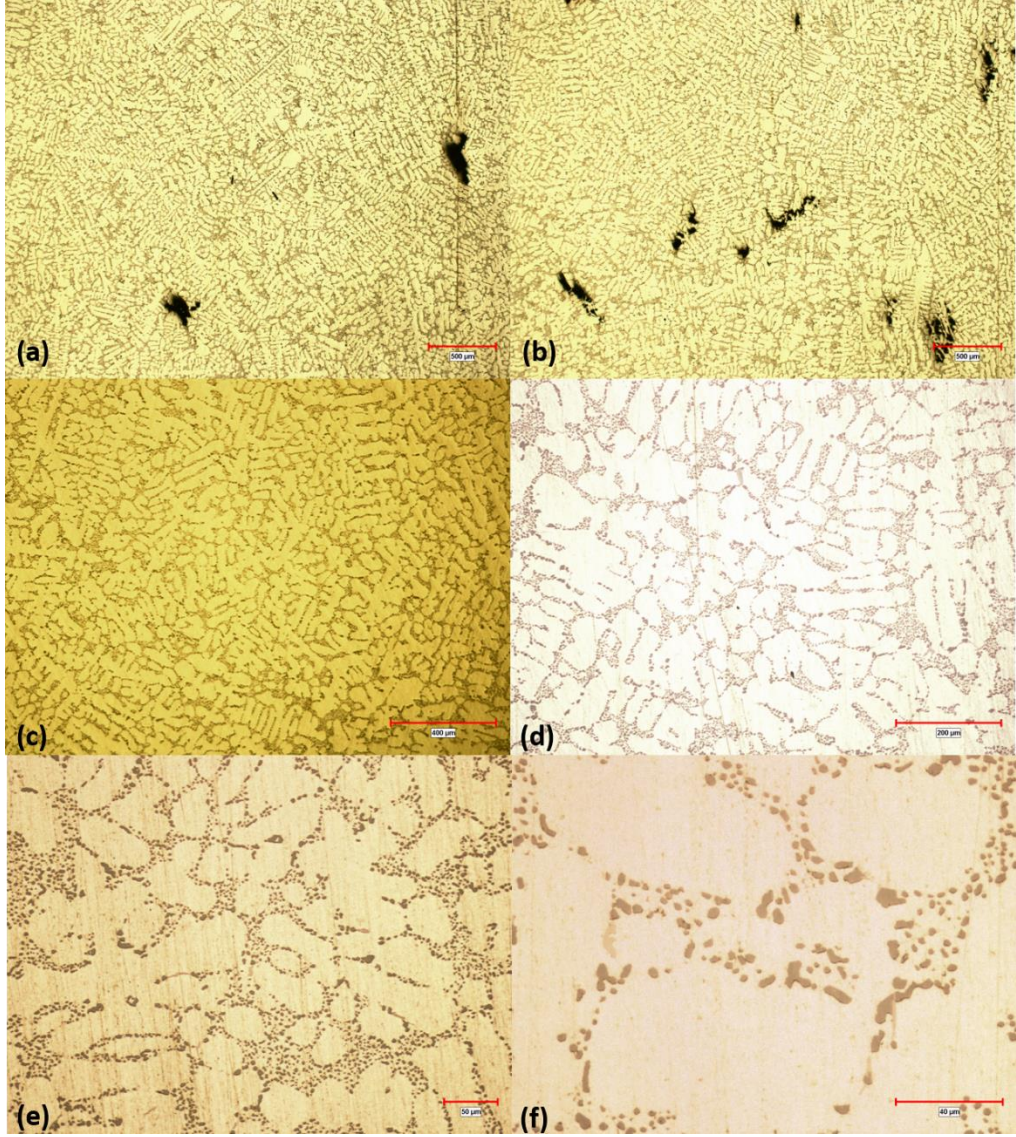
Mikroyapı incelemeleri sürecinde sırasıyla 25, 50, 100, 200 ve 500 büyütme oranları kullanılmıştır. Mikroyapı incelemesi sonucunda tespit edilen ortalama DAS boyutları ve ortalama porozite oranları Tablo 3.15’de verilmiştir.

- *Toz Formlu Tane İnceltici ile Gerçekleştirilen Üretimlere Ait İncelemeler*

Al+ağ%0,3 TiB<sub>2</sub> kompozit toz tane incelticilerin alüminyum folyoya sarılarak 720°C döküm sıcaklığında gerçekleştirilen üretime ait numunelerin 2.5X, 5X, 10X, 20X ve 50X objektif büyütmelerinde mikroskobik incelemeleri (Şekil 3.41) gerçekleştirilmiştir.

Mikroyapı incelemeleri sonucunda, mikroyapıda dentrit tanelerinin ve faz dağılımlarının homojen olduğu tespit edilmiştir. Blok formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> (Şekil 3.41 (f)) intermetalik fazları tespit edilmiştir.



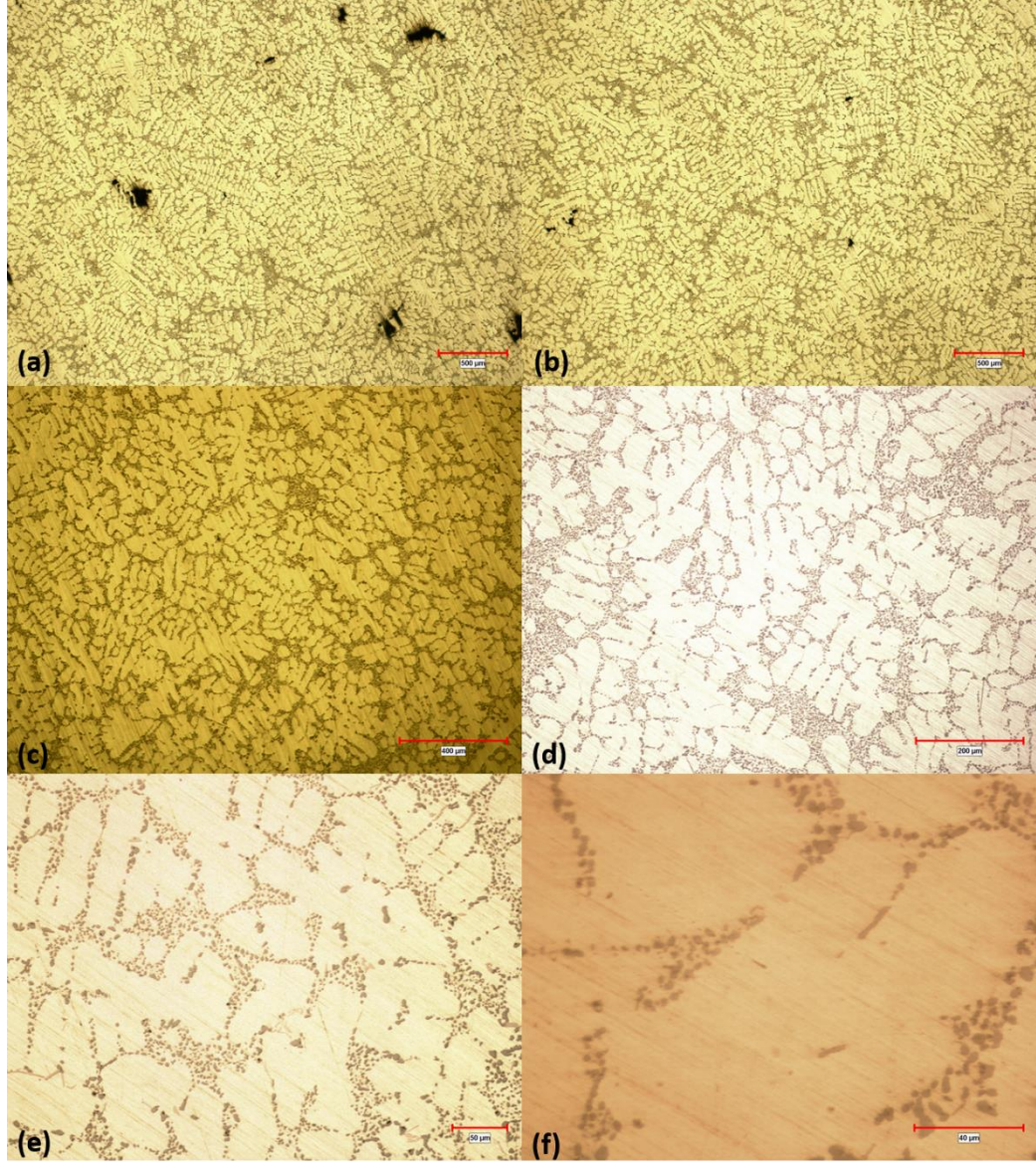


Şekil 3.41: 720°C’de toz formulu tane inceltici ile üretilen numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f)

- *Geleneksel Çubuk Formlu Tane İnceltici ile Gerçekleştirilen Üretimlere Ait İncelemeler*

Al<sub>5</sub>TiB geleneksel çubuk formlu tane inceltici ile 720°C döküm sıcaklığında gerçekleştirilen üretime ait numunelerin 2.5X, 5X, 10X, 20X ve 50X objektif büyütmelerinde mikroskopik incelemeleri (Şekil 3.42) gerçekleştirilmiştir. Büyütme oranları sırasıyla 25, 50, 100, 200 ve 500’dür.





Şekil 3.42: 720°C’de çubuk formulu Al<sub>5</sub>TiB tane inceltici ile üretilen numunelerinin farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemeleri. 2,5X (a,b), 5X (c), 10X (d), 20X(e), 50X(f)

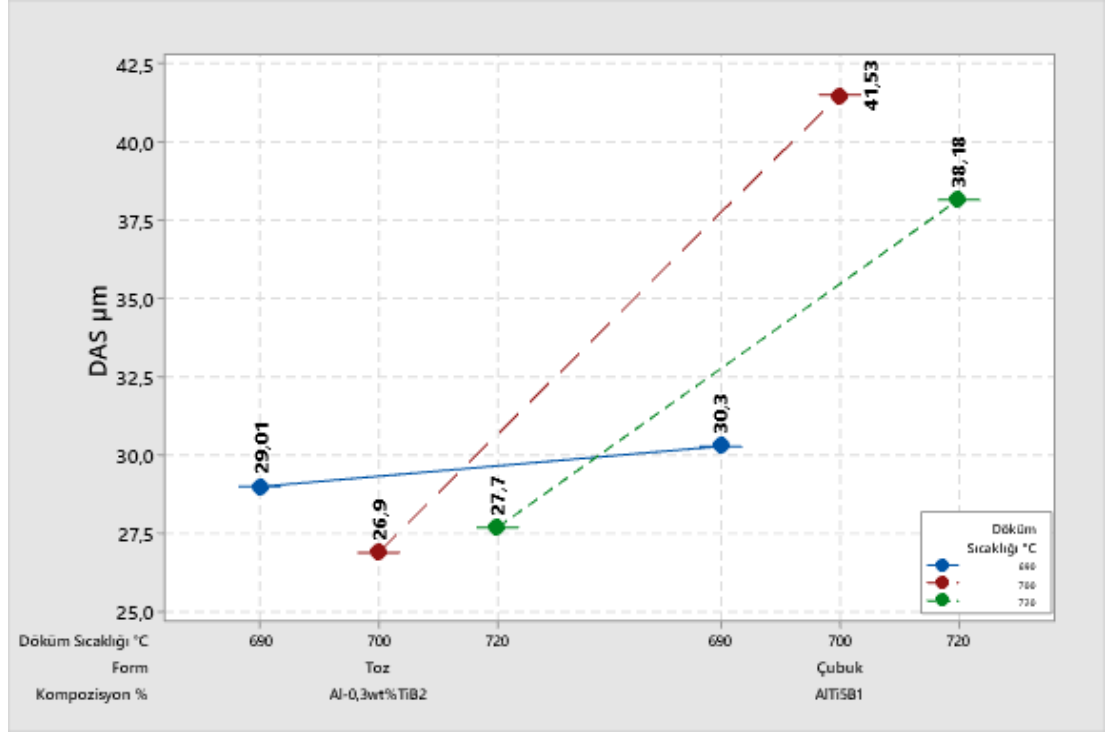
Mikroyapı incelemeleri sonucunda, mikroyapıda dentrit tanelerinin ve faz dağılımlarının homojen olduğu tespit edilmiştir. Blok formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> (Şekil 3.42 (f)) intermetalik fazları tespit edilmiştir.

Tablo 3.15: 720°C’de üretilen numunelerin DAS ve Porozite seviyeleri

Tane İnceltici	DAS (μm)	Porozite (%)
%0,3 Al+TiB <sub>2</sub>	27,70	0,78
Al <sub>5</sub> TiB	38,18	0,59



690, 700 ve 720°C döküm sıcaklıklarında gerçekleştirilen üretimlerde elde edilen DAS boyutları Şekil 3.43'teki grafikte özetlenmiştir. En küçük DAS değeri toz formulu tane inceltici kullanılarak 700°C döküm sıcaklığında gerçekleştirilen üretimde elde edilmiştir. Toz tane inceltici ile gerçekleştirilen üretimlerde elde edilen DAS değerleri birbirlerine yakın seviyelerde iken geleneksel tane inceltici ile gerçekleştirilen üretimlerde DAS değerleri değişkenlik göstermektedir.



3.43: Farklı döküm sıcaklıklarında DAS değerleri

## 3.7.2 Makroyapı İncelemeleri

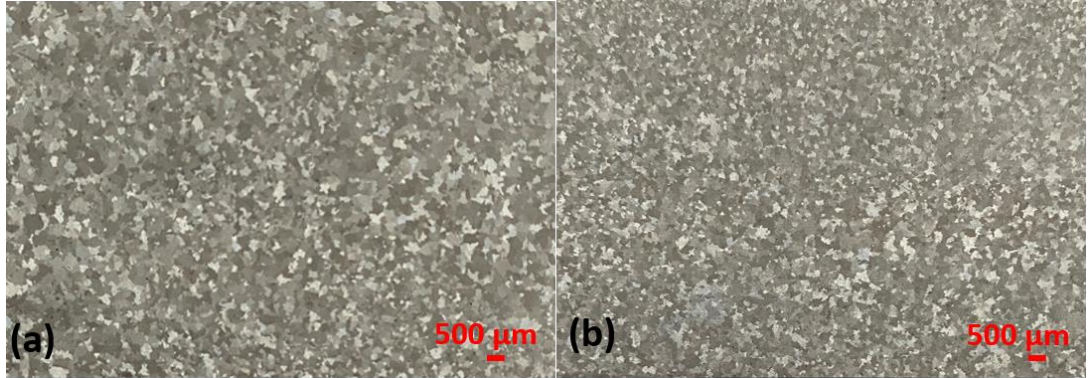
### 3.7.2.1 690°C Döküm Sıcaklığında Gerçekleştirilen Üretimlere Ait Numunelerin Makroyapı İncelemeleri

- *Toz Formlu Tane İnceltici ile Gerçekleştirilen Üretimlere Ait İncelemeler*

Al+ağ%0,3 TiB<sub>2</sub> kompozit toz tane incelticilerin alüminyum folyoya sarılması ile 690°C döküm sıcaklığında gerçekleştirilen üretime ait numunelerin makroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiş (Şekil 3.44) ve tane boyutu 615,35 µm olarak hesaplanmıştır.

- *Geleneksel Çubuk Formlu Tane İnceltici ile Gerçekleştirilen Üretimlere Ait İncelemeler*

Al<sub>5</sub>TiB geleneksel çubuk formlu tane inceltici ile 690°C döküm sıcaklığında gerçekleştirilen üretime ait numunelerin makroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiş (Şekil 3.44) ve tane boyutu 527,25 µm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.44: 690°C’de (a) toz formlu tane inceltici ile, (b) çubuk formlu tane inceltici ile gerçekleştirilen üretime ait numunelerin makroyapı görüntüleri

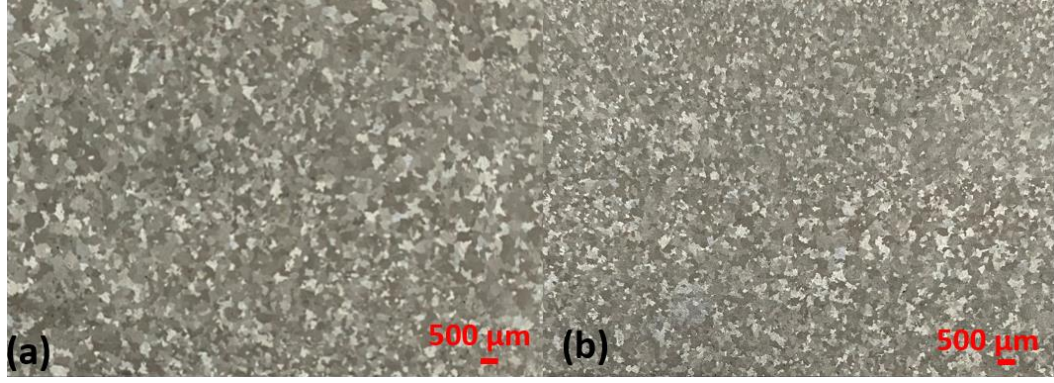
### 3.7.2.2 720°C Döküm Sıcaklığında Gerçekleştirilen Üretimlerin Makroyapı İncelemeleri

- *Toz Formlu Tane İnceltici ile Gerçekleştirilen Üretimlere Ait İncelemeler*

Al+ağ%0,3 TiB<sub>2</sub> kompozit toz tane incelticilerin alüminyum folyoya sarılması ile 720°C döküm sıcaklığında gerçekleştirilen üretime ait numunelerin makroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiş (Şekil 3.45) ve tane boyutu 636,63 µm olarak hesaplanmıştır.

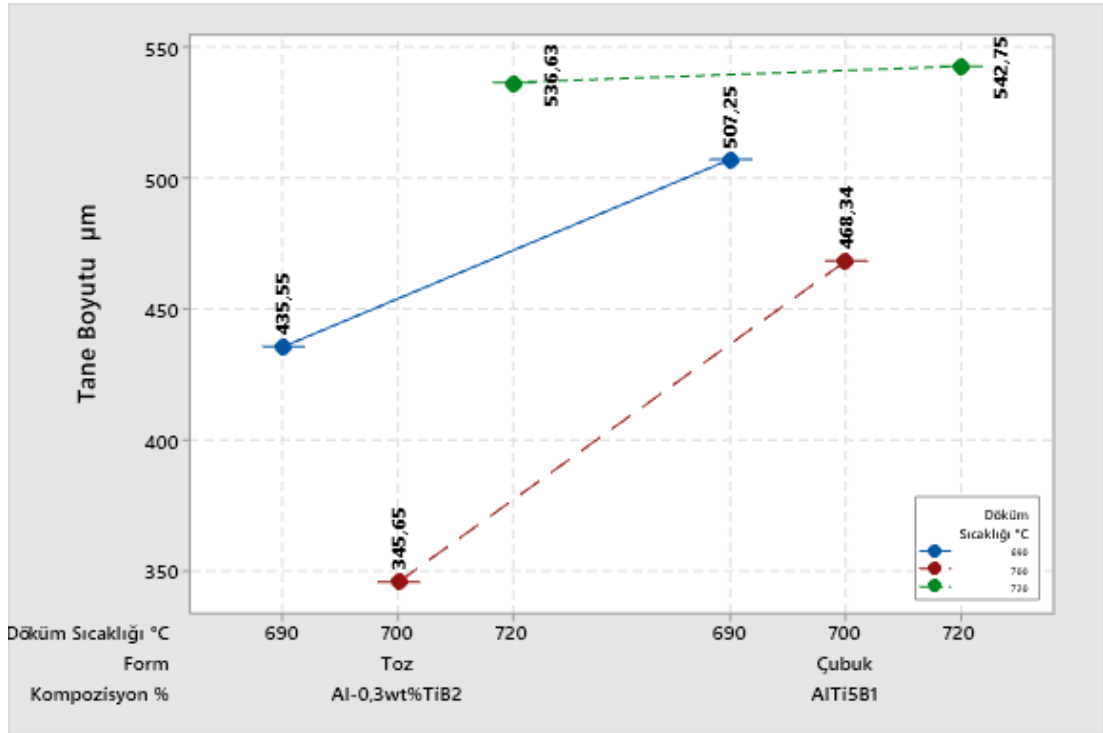
- *Geleneksel Çubuk Formlu Tane İnceltici ile Gerçekleştirilen Üretimlere Ait İncelemeler*

Al<sub>5</sub>TiB geleneksel çubuk formlu tane inceltici ile 720°C döküm sıcaklığında gerçekleştirilen üretime ait numunelerin makroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiş (Şekil 3.45) ve tane boyutu 579,75 µm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.45: 720°C’de (a) toz formu tane inceltici ile, (b) çubuk formu tane inceltici ile gerçekleştirilen üretime ait numunelerin makroyapı görüntüleri

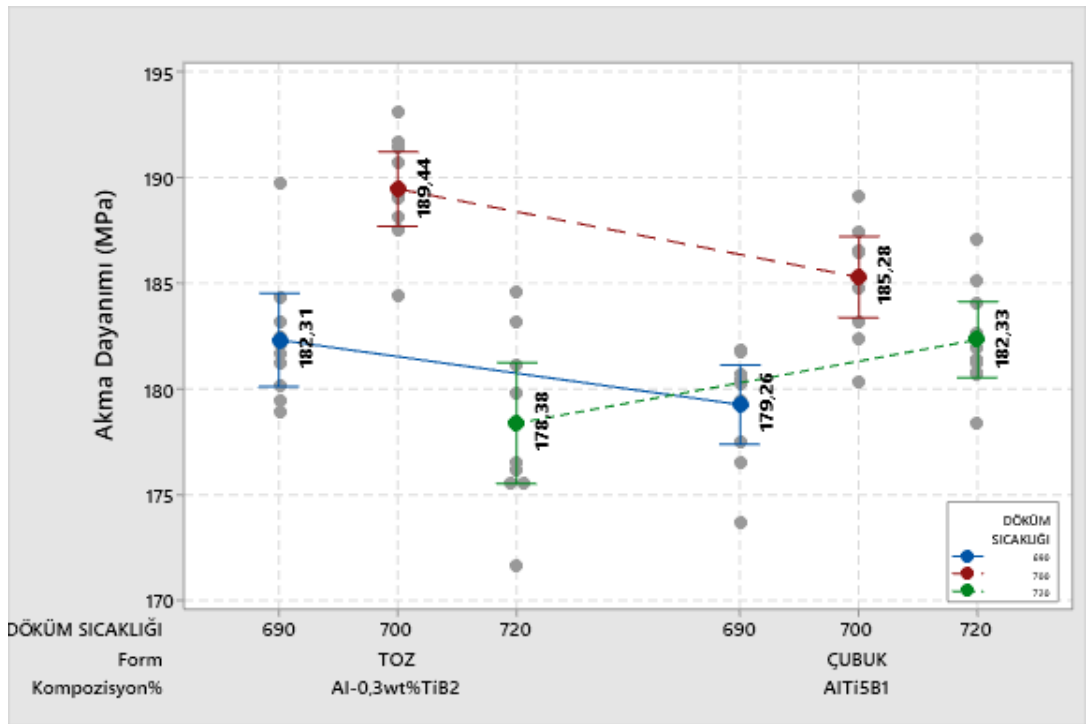
690, 700 ve 720°C döküm sıcaklıklarında gerçekleştirilen üretimlerde elde edilen tane boyutları Şekil 3.46’deki grafikte özetlenmiştir. En küçük tane boyutu toz formu tane inceltici kullanılarak elde edilmiştir. Döküm sıcaklığı yükseldikçe tane boyutları büyümektedir.



Şekil 3.46: Farklı döküm sıcaklıklarında tane boyutu değerleri

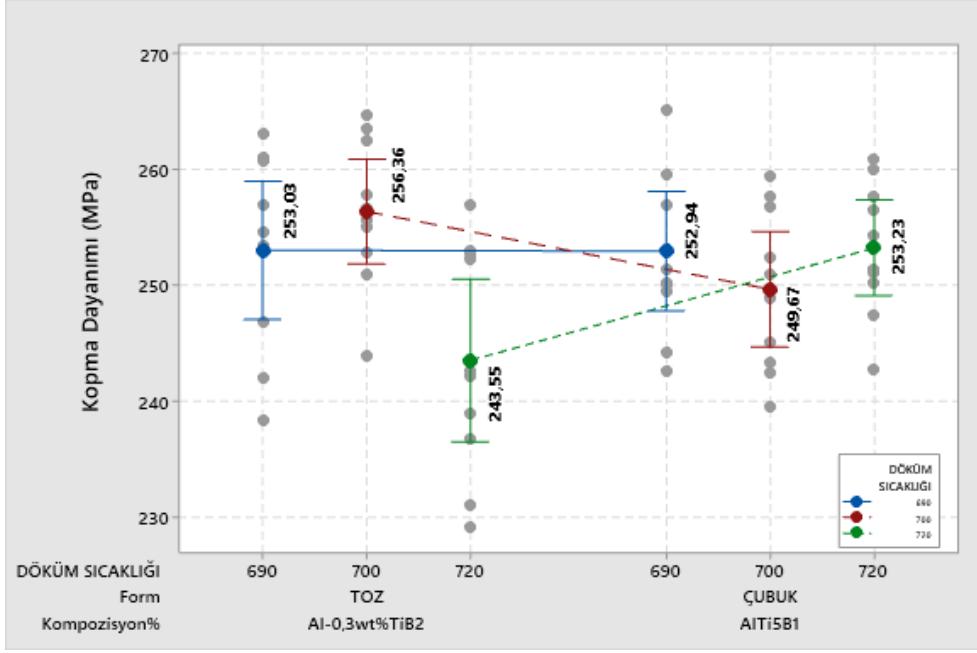
### 3.7.3 Çekme Test Sonuçları

690°C, 700°C ve 720°C'lerde toz formu Al+ağ%0,3 TiB<sub>2</sub> kompozit tane inceltici ve geleneksel çubuk formu AlTi5B master alaşımı ile gerçekleştirilen üretimlerin sonucunda elde edilen numunelerden çekme test çubukları hazırlanmış ve testler gerçekleştirilmiştir. Akma, Kopma Dayanım değerleri ile %uzama değerleri incelendiğinde en yüksek akma dayanım değerinin (Şekil 3.47) 700°C döküm sıcaklığında toz formu tane inceltici ile gerçekleştirilen üretimde elde edildiği tespit edilmiştir.



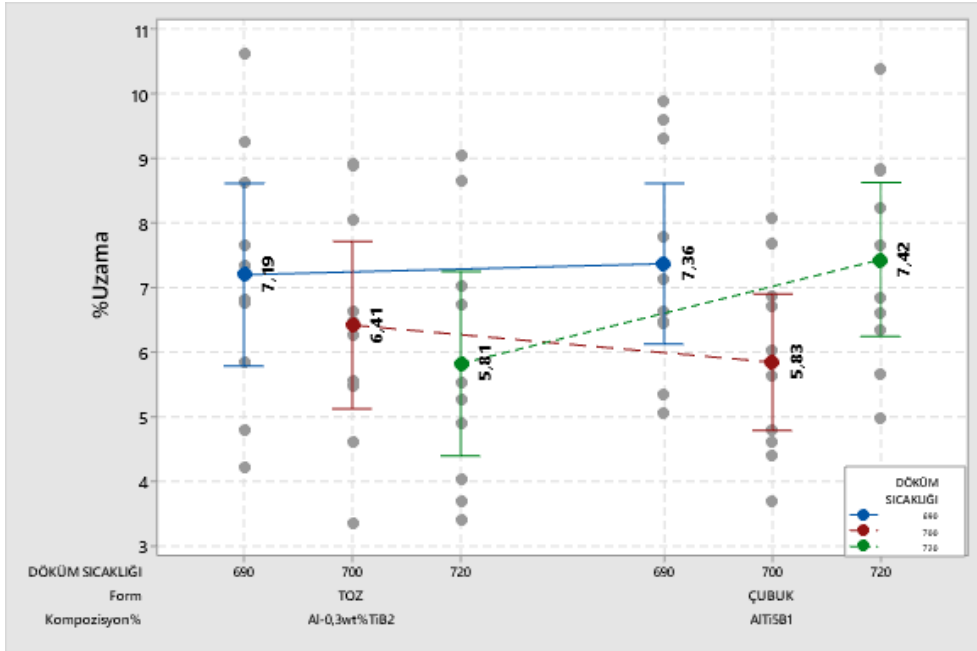
Şekil 3.47: Farklı döküm sıcaklıklarında akma dayanım değerleri

Kopma dayanım değerleri (Şekil 3.48) incelendiğinde tüm üretimlerde birbirlerine yakın değerler elde edildiği tespit edilmiştir. En yüksek kopma dayanım değeri 700°C döküm sıcaklığında toz formu tane inceltici ile gerçekleştirilen üretimde elde edilmiştir.



Şekil 3.48: Farklı döküm sıcaklıklarında kopma dayanım değerleri

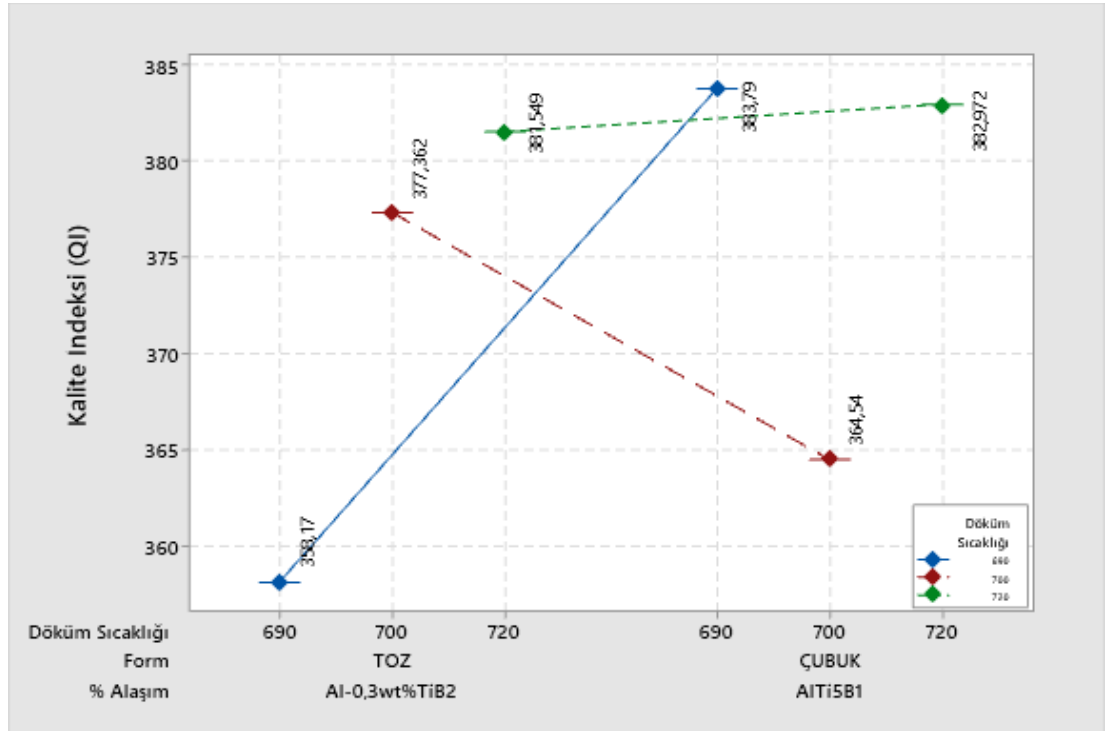
% Uzama değerleri (Şekil 3.49) incelendiğinde değerlerin genel olarak birbirlerine yakın seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. En yüksek %uzama değeri 720°C döküm sıcaklığında çubuk formulu tane inceltici ile gerçekleştirilen üretimde elde edilmiştir. 690°C'de toz ve çubuk formulu tane incelticiler ile gerçekleştirilen üretimlerde birbirlerine yakın %uzama değerleri elde edilmiştir.



Şekil 3.49: Farklı döküm sıcaklıklarında %uzama değerleri

### 3.7.4 Kalite İndeksi (QI) Değerlendirmesi

Tüm üretimler sonucunda elde edilen verilerle kalite indeksi (Şekil 3.50) hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. En yüksek kalite indeksi değeri geleneksel çubuk formu tane inceltici ile 690°C’de gerçekleştirilen üretimde elde edilmiştir. Toz formu tane inceltici ile 720°C’de gerçekleştirilen üretim ile çubuk formu tane inceltici ile 690°C ve 720°C’lerde gerçekleştirilen üretimlerde birbirlerine yakın değerler elde edilmiştir.

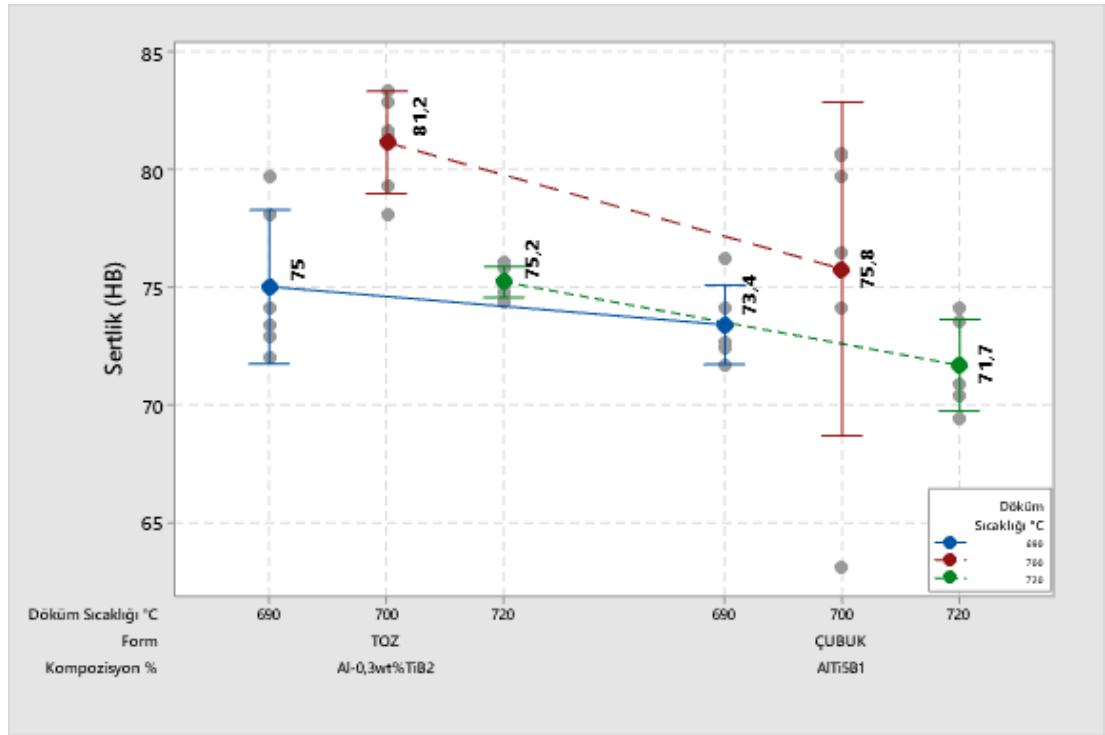


Şekil 3.50: Farklı döküm sıcaklıklarında kalite indeksi (QI) değerleri

### 3.7.5 Sertlik Test Sonuçları

690°C, 700°C ve 720°C’lerde toz formu Al+ağ%0,3 TiB<sub>2</sub> kompozit tane inceltici ve geleneksel çubuk formu AlTi5B master alaşımı ile gerçekleştirilen üretimlerin sonucunda elde edilen numunelerin sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiş ve Şekil 3.51’deki grafikte verilmiştir. Sertlik değerleri çubuk formu tane inceltici ile gerçekleştirilen üretimlerde birbirlerine yakın seviyelerdedir. En yüksek sertlik değeri 700°C döküm sıcaklığında, toz formu tane inceltici kullanılarak gerçekleştirilen dökümde elde edilmiştir. Çubuk ve toz formu tane incelticiler kullanılarak

gerçekleştirilen üretimlerde, en yüksek sertlik değerleri 700°C döküm sıcaklığında elde edilmiştir.



Şekil 3.51: Farklı döküm sıcaklıklarında sertlik değerleri

### 3.7.6 SEM-EDS Analizleri

Farklı döküm sıcaklıklarında gerçekleştirilen üretime ait numunelere SEM-EDS analizleri gerçekleştirilmiştir.

#### 3.7.6.1 690°C Döküm Sıcaklığında Gerçekleştirilen Üretim

- *Toz Formlu Tane İnceltici ile Gerçekleştirilen Üretime Ait İncelemeler*

Al+ağ%0,3 TiB<sub>2</sub> kompozit toz tane incelticilerin alüminyum folyoya sarılmasıyla 690°C döküm sıcaklığında gerçekleştirilen üretime ait numunelerde iğnesel  $\beta$ -Al<sub>3</sub>FeSi (Şekil 3.52, 3) ve blok formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> (Şekil 3.52, 1-2) intermetalik bileşikler tespit edilmiştir.

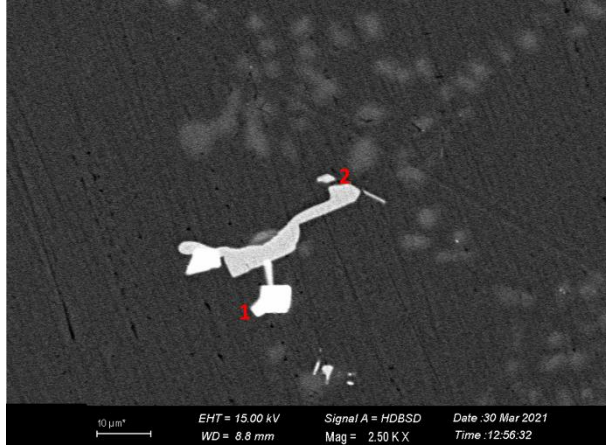




Şekil 3.52: Al+ağ%0,3 TiB<sub>2</sub> ile üretilen numunelerin SEM görüntüsü-690°C

- *Geleneksel Tane İnceltici ile Gerçekleştirilen Üretimlere Ait İncelemeler*

Geleneksel çubuk formulu tane inceltici alaşımı ile 690°C döküm sıcaklığında gerçekleştirilen üretime ait numunelerde kristal yapıları Sr taneleri (Şekil 3.53, 1) ve blok formulu  $\pi$ -Al<sub>3</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> (Şekil 3.53, 2) intermetalik bileşikler tespit edilmiştir.

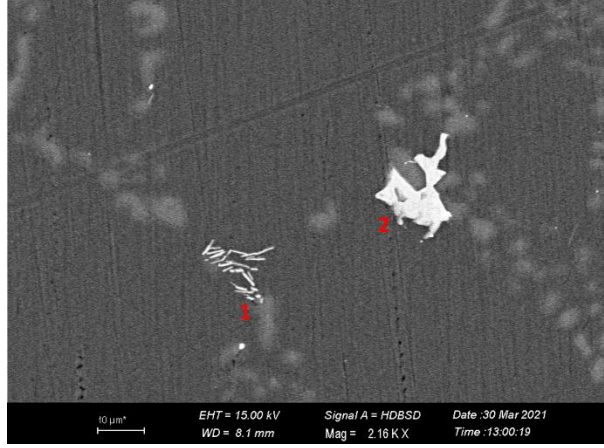


Şekil 3.53: AlTi<sub>5</sub>B ile gerçekleştirilen üretim SEM görüntüsü-690°C

### 3.7.6.2 720°C Döküm Sıcaklığında Gerçekleştirilen Üretim

- *Toz Formulu Tane İnceltici ile Gerçekleştirilen Üretimlere Ait İncelemeler*

Al+ağ%0,3 TiB<sub>2</sub> kompozit toz tane incelticilerin alüminyum folyoya sarılmasıyla 720°C döküm sıcaklığında gerçekleştirilen üretime ait numunelerde iğnesel  $\beta$ -Al<sub>3</sub>FeSi (Şekil 3.54, 1) ve çin yazısı formulu  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(Fe,Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> (Şekil 3.54, 2) intermetalik bileşikler tespit edilmiştir.



Şekil 3.54: Al+ağ%0,3 TiB<sub>2</sub> ile üretilen numunelerin SEM görüntüsü-720°

▪ *Geleneksel Tane İnceltici ile Gerçekleştirilen Üretimlere Ait İncelemeler*

Geleneksel çubuk tane inceltici ile 720°C döküm sıcaklığında gerçekleştirilen üretime ait numunelerde kristal yapılı Sr taneleri (Şekil 3.55, 1) ve blok formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> (Şekil 3.55, 2) intermetalik bileşikleri tespit edilmiştir.



Şekil 3.55: AlTi<sub>5</sub>B ile gerçekleştirilen üretim SEM görüntüsü-720°C

SEM incelemeleri sonucunda tüm üretimlerde birbirlerine benzer yapılar görülmüştür.

Analiz sonucunda elde edilen bilgiler aşağıdaki gibidir;

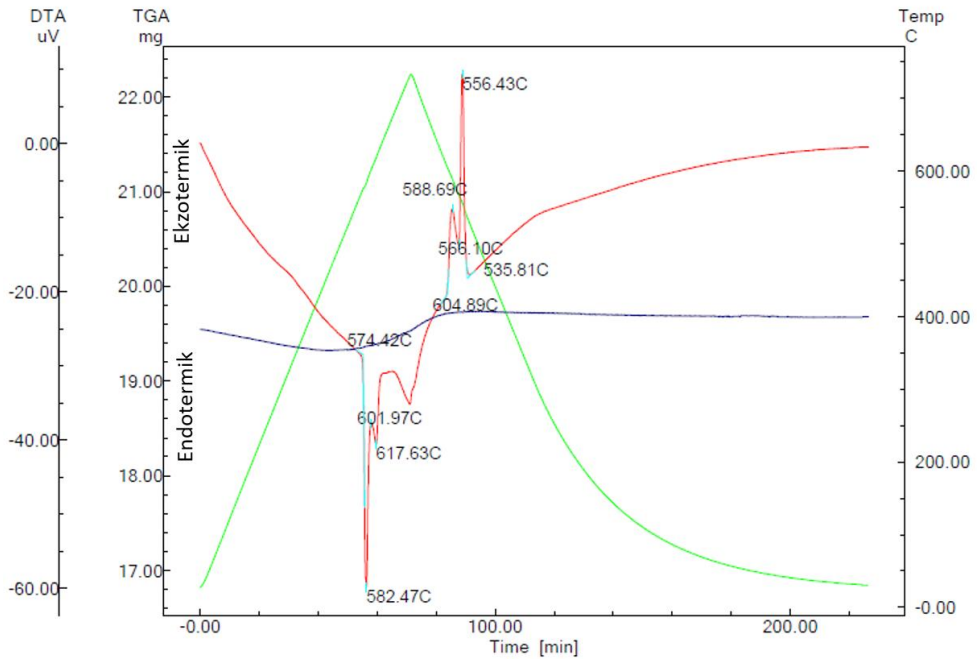
- Toz tane incelticiler ile gerçekleştirilen üretimlere ait numunelerde toz aglomerasyonu tespit edilmemiştir. Toz kompozit tane incelticiler yapıya homojen olarak dağılmıştır.
- Sr taneleri tespit edilmiştir.

- Tüm üretimlerde genellikle iğnesel  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi ve blok formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> intermetalik bileşikleri ile nadiren çin yazısı formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> intermetalik bileşiği tespit edilmiştir.

### 3.7.7 Diferansiyel Termal Analiz (DTA)

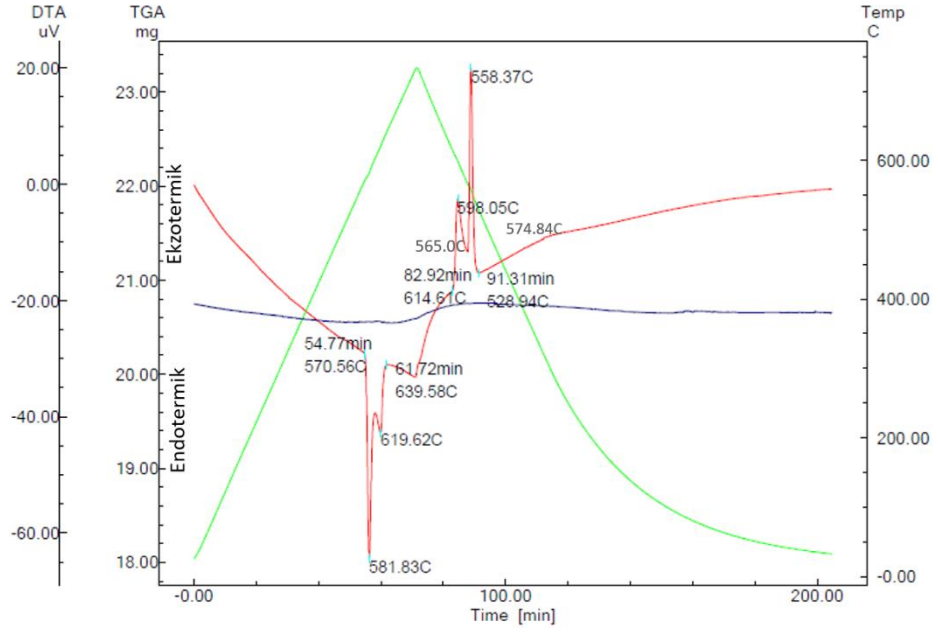
Al+ağ%0,3TiB<sub>2</sub> kompozisyonlu kompozit toz tane inceltici ve geleneksel çubuk formulu tane inceltici ile 690°C, 700°C ve 720°C döküm sıcaklıklarında gerçekleştirilen üretimlerde elde edilen numunelerin DTA analizleri gerçekleştirilmiştir. DTA analizleri, numunelerin 740°C sıcaklığa 10°C/dk hızla ısıtılıp 10°C/dk hızla soğutulmasıyla gerçekleştirilmiştir. DTA analizleri azot gazı atmosferinde gerçekleştirilmiş ve  $\alpha$ -Al taneleri ile ötektik Si partiküllerinin katılma prosesleri incelenmiştir.

690°C döküm sıcaklığında, Al+ağ%0,3TiB<sub>2</sub> kompozit toz tane inceltici ile gerçekleştirilen üretime ait numunenin DTA analiz sonucu Şekil 3.56’da verilmiştir.



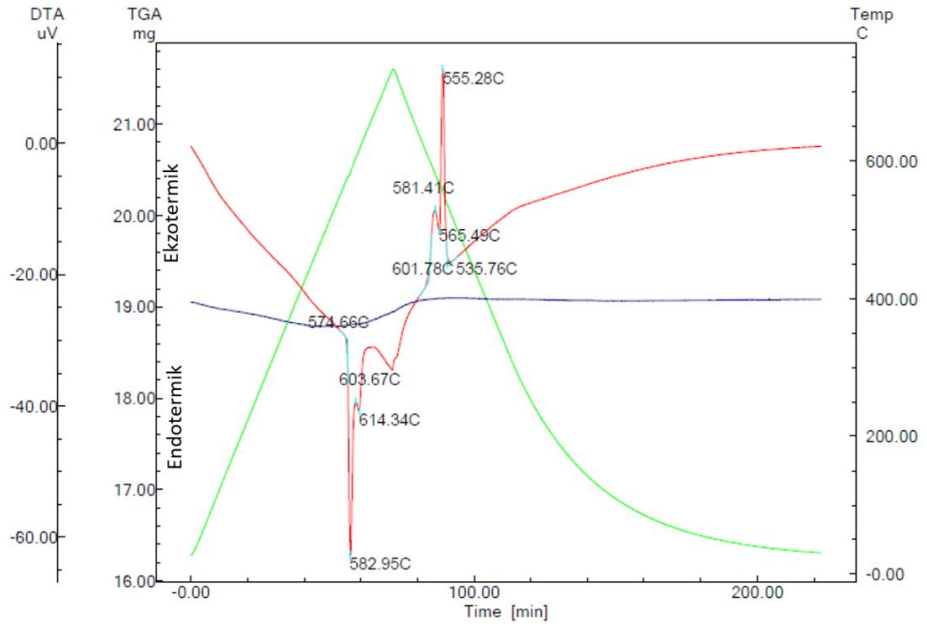
Şekil 3.56: 690°C döküm sıcaklığında Al+ağ%0,3TiB<sub>2</sub> ile gerçekleştirilen üretime ait DTA analiz sonucu

690°C döküm sıcaklığında, Al5TiB alaşımı ile gerçekleştirilen üretime ait numunenin DTA analiz sonucu Şekil 3.57’de verilmiştir.



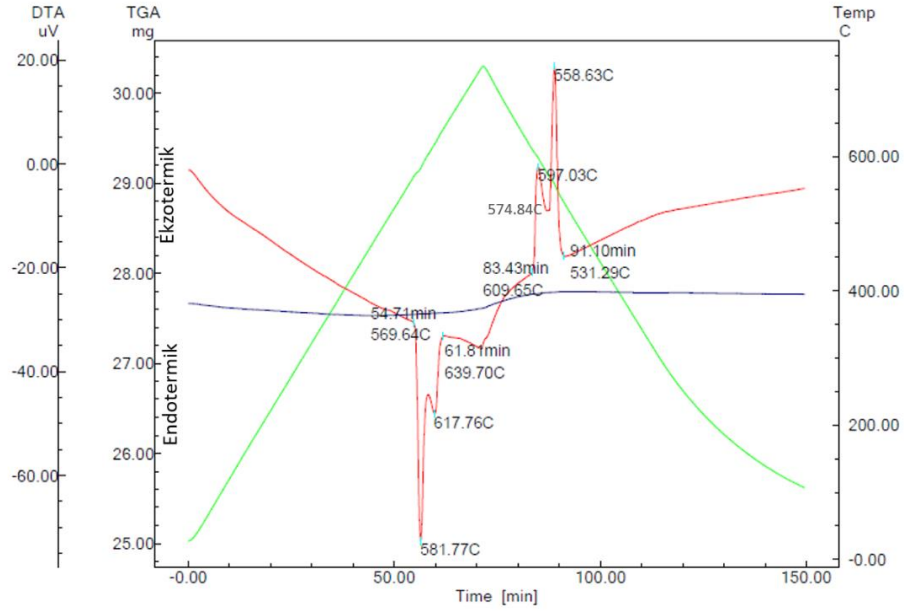
Şekil 3.57: 690°C döküm sıcaklığında Al5TiB ile gerçekleştirilen üretime ait DTA analiz sonucu

700°C döküm sıcaklığında, Al+ağ%0,3TiB<sub>2</sub> kompozit toz tane inceltici ile gerçekleştirilen üretime ait numunenin DTA analiz sonucu Şekil 3.58’de verilmiştir.



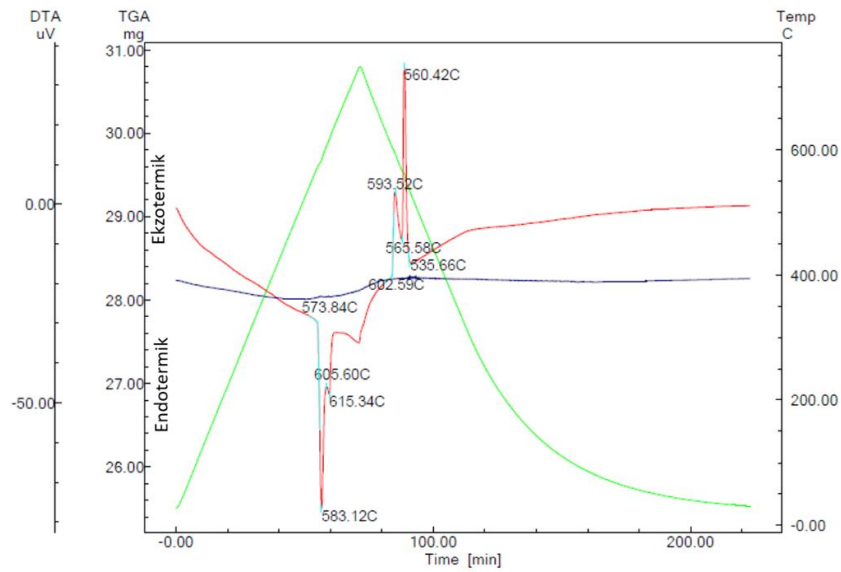
Şekil 3.58: 700°C döküm sıcaklığında Al+ağ%0,3TiB<sub>2</sub> ile gerçekleştirilen üretime ait DTA analiz sonucu

700°C döküm sıcaklığında, Al5TiB ile gerçekleştirilen üretime ait numune ile gerçekleştirilen DTA analiz sonucu Şekil 3.59'da verilmiştir.



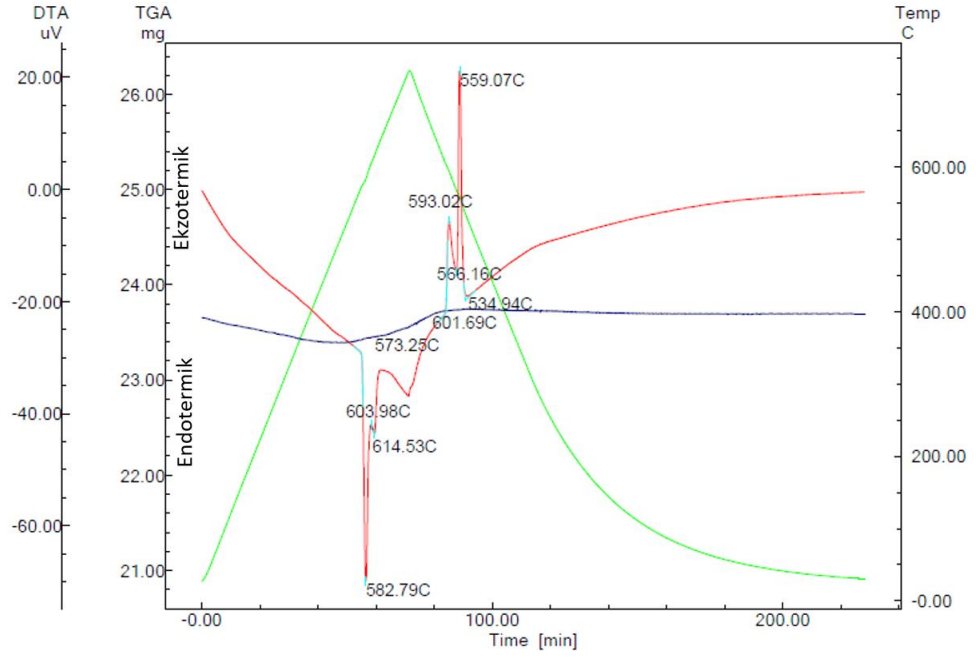
Şekil 3.59: 700°C döküm sıcaklığında Al5TiB ile gerçekleştirilen üretime ait DTA analiz sonucu

720°C döküm sıcaklığında, Al+ağ%0,3TiB<sub>2</sub> kompozit toz tane inceltici ile gerçekleştirilen üretime ait numune ile gerçekleştirilen DTA analiz sonucu Şekil 3.60'da verilmiştir.



Şekil 3.60: 720°C döküm sıcaklığında Al+ağ%0,3TiB<sub>2</sub> ile gerçekleştirilen üretime ait DTA analiz sonucu

720°C döküm sıcaklığında, Al5TiB ile gerçekleştirilen üretime ait numune ile gerçekleştirilen DTA analiz sonucu Şekil 3.61’de verilmiştir.



Şekil 3.61: 720°C döküm sıcaklığında Al5TiB ile gerçekleştirilen üretime ait DTA analiz sonucu

Farklı döküm sıcaklıklarında Al+ağ%0,3TiB<sub>2</sub> kompozit toz tane inceltici ile üretilen numunelerin DTA analizi sonucunda elde edilen karakteristikleri Tablo 3.16’da özetlenmiştir. Endotermik reaksiyonun gerçekleşmesiyle oluşan 1. Pik sıcaklığı birincil  $\alpha$ -Al dentritlerinin oluştuğu sıcaklığı, 2. Pik sıcaklığı ise Al-Si ötektik faz sıcaklığını göstermektedir. Katılma likidus sıcaklığında başlamakta ve  $\alpha$ -Al dentritleri oluşmaktadır.



Tablo 3.16: Farklı döküm sıcaklıklarında Al+ağ%0,3TiB<sub>2</sub> ve Al5TiB tane incelticileri ile üretilen numunelerin DTA soğuma karakteristikleri

Alaşım	Döküm Sıcaklığı / °C	1. Pik Sıcaklığı / °C (Birincil α-Al dentritleri)		2. Pik Sıcaklığı / °C (Al-Si ötektik)		Solidus, Ts
		Onset-Likidus T / °C	Pik T / °C	Onset T / °C	Pik T / °C	
Toz Form Al+ağ%0,3TiB <sub>2</sub>	690°C	605	589	566	556	536
	700°C	602	581	565	555	536
	720°C	603	594	566	560	536
Çubuk Form Al5TiB	690°C	615	598	565	558	529
	700°C	610	597	575	559	531
	720°C	602	593	566	559	535

DTA grafikleri incelendiğinde (Şekil 3.56-Şekil 3.61), en yüksek likidus sıcaklığı toz ve çubuk formu her iki tane inceltici için de 690°C ile gerçekleştirilen döküme aittir. Toz formu tane inceltici ile gerçekleştirilen dökümlerde, 690°C, 700°C ve 720°C döküm sıcaklıklarında, likidus sıcaklığı sırasıyla 3°C (605°C-602°C=3°C) ve 2°C (605°C-603°C=2°C) değişmiştir. Çubuk formu tane inceltici ile gerçekleştirilen dökümlerde ise sırasıyla 5°C (615°C-610°C=5°C) ve 13°C (615°C-602°C=13°C) değişmiştir. Solidus sıcaklıkları, toz formu tane inceltici kullanılarak gerçekleştirilen dökümlerde, tüm döküm sıcaklıkları için aynı değerdedir. Çubuk formu tane inceltici kullanılarak gerçekleştirilen dökümlerde, en yüksek solidus sıcaklığı 720°C'de gerçekleştirilen döküme aittir. Likidus ve solidus sıcaklıklarındaki değişiklikler katılaşma performansı ile ilişkilidir. Tüm değerler incelendiğinde, en yüksek likidus sıcaklığı ise çubuk formu tane inceltici ile 690°C'de gerçekleştirilen döküme aittir.

Aşırı soğuma (undercooling) derecesi, katılaşma reaksiyonu sırasında kaydedilen sıcaklık kaybını ifade etmektedir. Katılaşma esnasında, sıcaklığın sürekli düşmesi gerekirken duraklama noktaları oluşmaktadır ve alaşım teorik katılaşma sıcaklığının altındaki sıcaklığa soğumakta ve sıcaklık tekrar yükselmektedir. Bu noktada ısı kaybı oluşmaktadır. Aşırı soğuma derecesi, katılaşmanın gerçekleşmesi gereken teorik sıcaklık ile katılaşmanın gerçekleştiği sıcaklık arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Ötektik dönüşümün gerçekleştiği en yüksek ve en düşük sıcaklıklar arasındaki fark yeniden ısınma sıcaklığını ifade etmektedir [46].

690°C, 700°C ve 720°C döküm sıcaklıklarında, Al+ağ%0,3TiB<sub>2</sub> kompozit tane inceltici alaşım ile gerçekleştirilen üretilere ait numunelerin aşırı soğuma dereceleri sırasıyla 10°C (566°C-556°C = 10°C), 10°C (565°C-555°C = 10°C) ve 6°C (566°C-560°C = 6°C) olarak hesaplanmıştır. En düşük aşırı soğuma derecesi 720°C döküm sıcaklığında elde edilmiştir. En yüksek ötektik sıcaklık 720°C’de gerçekleştirilen dökümdedir.

690°C, 700°C ve 720°C döküm sıcaklıklarında, geleneksel çubuk formu Al5TiB tane inceltici alaşım ile gerçekleştirilen üretilere ait numunelerin aşırı soğuma dereceleri sırasıyla 7°C (565°C-558°C =7°C), 16°C (575°C-559°C = 16°C) ve 7°C (566°C-559°C = 7°C) olarak hesaplanmıştır. En düşük aşırı soğuma derecesi 690°C ve 720°C döküm sıcaklıklarında elde edilmiştir.

DTA analizleri sonuçlarına göre; toz ve çubuk formu tane incelticiler ile gerçekleştirilen üretimlerde, en düşük aşırı soğuma derecesi 6°C olup 720°C döküm sıcaklığında toz formu tane incelticiler ile elde edilmiştir.

Deepak Kumar ve arkadaşları [45] gerçekleştirdikleri çalışmada, farklı oranlarda TiB<sub>2</sub> kullanılarak, A356-xTiB<sub>2</sub> (x = 2.5ağ% and 5ağ%) kompozit alaşımı elde ederek DTA analizleri gerçekleştirmişlerdir. TiB<sub>2</sub> oranının artışı ile aşırı soğuma derecesinin arttığını tespit etmişlerdir. Gerçekleştirdiğimiz çalışmada da en yüksek TiB<sub>2</sub> oranı ile ürettiğimiz numunelerde en ince tane boyutları elde edilmiş ancak aşırı soğuma sıcaklıkları arasında Deepak Kumar ve arkadaşlarının çalışması ile karşılaştırıldığında daha yüksek farklılıklar tespit edilmiştir.

## Bölüm 4.

### Genel Sonuçlar

Çalışma kapsamında geleneksel çubuk formulu tane incelticilere alternatif olarak toz formulu tane incelticiler yüksek enerjili bilyeli öğütme methodu ile homojen karıştırılarak üretilmiş ve tane boyutları, mekanik test sonuçları değerlendirilmiştir.

Bu amaçla oluşturulan deney tasarımları ile ilk olarak 700°C döküm sıcaklığında dört farklı kompozisyonda toz tane inceltici kompozitler üretilmiş ve sıvı metale üç farklı ilave yöntemi ile eklenmiştir. Aynı zamanda referans olarak kullanılacak olan çubuk formulu tane inceltici ile üretimler gerçekleştirilmiştir. Bu üretimler sonucunda en iyi mekanik özellikleri sergileyen ve en iyi tane inceltici özelliğine sahip olan tane inceltici alaşımı tespit etmek amaçlanmıştır.

Dört farklı kompozisyon ile gerçekleştirilen üretilere ait genel sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Genel olarak tüm üretimlerde dentrit tane dağılımları homojendir, mikroyapıda silisyum modifikasyonu gerçekleşmiş ve Si tanelerinin küresellikleri sağlanmıştır.
- Mikroyapı ve SEM incelemelerinde blok formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub>, iğnesel  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi yapılı, çin yazısı formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> intermetalik bileşikler tespit edilmiştir.
- En küçük DAS ve en ince tane boyutu, alüminyum folyoya sarılarak ilave edilen üretimlerde ve TiB<sub>2</sub> toz miktarının alaşım içerisinde artmasıyla elde edilmiştir.
- En yüksek akma dayanımı değeri Al folyoya sarılarak eklenen Al+ağ%0,3 TiB<sub>2</sub> alaşımlı toz tane inceltici ile 189 MPa olarak ve en yüksek kalite indeksi (QI) değeri aynı kompozisyonda 377,36 olarak elde edilmiştir. Çekme özellikleri açısından da referans çubuk formulu tane incelticinin sonuçlarından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

- Toz formulu tane inceltici alaşımlar ile gerçekleştirilen üretimlerin sertlik değerleri geleneksel çubuk formulu tane inceltici ile gerçekleştirilen üretimden yüksektir. En yüksek sertlik değeri Al+ağ%0,3 TiB<sub>2</sub> alaşımlı toz tane inceltici ile 81,61HB olarak ölçülmüştür.

Dört farklı kompozisyon ve üç farklı ilave şekli ile gerçekleştirilen üretimlerin çıktıları değerlendirildiğinde, en ince tane boyutunun, en yüksek mekanik özelliklerin elde edildiği üretimin alüminyum folyoya sarılı olarak sıvı metale ilave edilen Al+ağ%0,3 TiB<sub>2</sub> kompozisyonuna ait toz tane inceltici olduğu belirlenmiştir. Böylece çalışmanın ikinci kısmı olan farklı döküm sıcaklıklarında gerçekleştirilecek üretimler için optimum kompozisyon Al+ağ%0,3 TiB<sub>2</sub> ve optimum ilave şekli alüminyum folyoya sarılı toz tane inceltici olarak belirlenmiştir.

690°C, 700°C ve 720°C olmak üzere üç farklı döküm sıcaklığında gerçekleştirilen üretilere ait genel sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Tüm sıcaklıklar için dentrit tane dağılımları homojendir, mikroyapıda silisyum modifikasyonu gerçekleşmiş ve Si tanelerinin küresellikleri sağlanmıştır.
- Mikroyapı ve SEM incelemelerinde blok formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub>, iğnesel  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi yapılı, çin yazısı formulu  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> intermetalik bileşikler tespit edilmiştir. İntermetalik bileşiklerin formundaki değişiklikler metal ve döküm sıcaklıkları ile katılma süreçlerindeki farklılıklar kaynaklıdır.
- En küçük DAS değeri ve en ince tane boyutunun elde edildiği toz formulu tane inceltici kullanılarak 700°C döküm sıcaklığında gerçekleştirilen üretim en yüksek akma ve kopma dayanım değerlerine sahiptir. Yine sertlik değeri olarak toz tane incelticinin 700°C’ deki dökümü en yüksek sertliği sunmaktadır. Döküm sıcaklığı 720°C’ ye yükseldikçe tane boyutları ve DAS değerleri büyümekte iken akma ve kopma dayanım değerleri ile sertlik değerleri düşmektedir.
- En yüksek kalite indeksi değerlerini her iki formdaki tane inceltici için 720°C’de gerçekleştirilen üretimler vermektedir. Toz formulu tane inceltici ile 720°C’de gerçekleştirilen üretim ile çubuk formulu tane inceltici ile 690°C ve 720°C’lerde gerçekleştirilen üretimlerde birbirlerine yakın değerler elde edilmiştir.
- 690°C, 700°C ve 720°C döküm sıcaklıklarında, Al+ağ%0,3TiB<sub>2</sub> kompozit tane inceltici ile gerçekleştirilen üretilere ait numunelerin DTA analizleri sonrası

hesaplanan aşırı soğuma dereceleri sırasıyla 10°C, 10°C ve 6°C olarak hesaplanmıştır. En düşük undercooling derecesi 720°C döküm sıcaklığında elde edilmiştir. En yüksek ötektik sıcaklık 720°C'de gerçekleştirilen dökümdedir. En yüksek likidus sıcaklığı toz ve çubuk formlu her iki tane inceltici için de 690°C'de gerçekleşen döküme aittir. En yüksek solidus sıcaklığı toz formlu tane incelticiler ile elde edilmektedir.

Bu şartlarda geleneksel çubuk formlu tane inceltici ile toz tane incelticilerin tane inceltme performansları değerlendirildiğinde, toz formlu tane inceltici ile sırasıyla DAS değerlerinde %35,2 ve tane boyutlarında %26,2 oranında inceltme sağlanmıştır. Sertlik değerleri toz tane inceltici ile %7,08 oranında artmıştır. Akma dayanımı, kopma dayanımı ve %uzama değerleri karşılaştırıldığında, toz tane inceltici ile sırasıyla %2,25, %2,68 ve %9,85 oranında artış sağlanmıştır.

Sonuç olarak, en iyi özelliklerin 700°C' de yapılan döküm işlemi ile toz formlu tane inceltici kullanılarak elde edileceği görülmüştür. Toz tane incelticiler ile tane boyutlarında hedeflenen %20 ve üzeri inceltme elde edilmiştir. Mekanik test sonuçları kapsamında, 700°C' de yapılan döküm işleminde toz tane incelticiler her yönden daha avantajlı olurken, 720°C' de döküm yapıldığı takdirde toz tane inceltici daha yüksek mukavemet daha düşük süneklik, çubuk formlu referans tane inceltici ise daha düşük mukavemet fakat daha yüksek süneklik sağlayacaktır.

# Kaynaklar

- [1] Totten GE, Mackenzie DS. (ed.) Handbook of Aluminum, Physical Metallurgy and Process, Volume 1. Marcel Dekker, INC; 2003. ISBN: 0-8247-0494-0
- [2] Davis JR. (ed.) Aluminum and Aluminum Alloys, Materials Park, OH, ASM International; 1993.
- [3] Ahmad Z. (ed.) Aluminium Alloys, New Trends in Fabrication and Applications; 2013. ISBN 978-953-51-0861-0
- [4] Zhang M, Liu K, Han J, Qian F, Wang J, Guan S. Investigating the role of Cu, Zr and V on the evolution of microstructure and properties of Al-Si-Mg cast alloys. ELSEVIER-Materials Today Communications; 2021. doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102055
- [5] Manente A, Timelli G. Optimizing the heat treatment process of cast aluminium Alloys; 2021. doi:10.572/21659
- [6] Colley, LJ. Microstructure-Property Models For Heat Treatment of A356 Aluminum Alloy (Doktora Tezi). The University of British Columbia; 2011.
- [7] Gruzleski JE, Closset BM. The Treatment of Liquid Aluminum Silicon Alloys. The American Foundryman's Society, Inc; 1990. ISBN 0-87433-121-8
- [8] Wu JH, Zhao H, Zhou J, Li WH, Wang JW, Zhang LL. Effects of Al-Ti-B-Sr master alloy on the microstructure and mechanical properties of A356 alloy. Materials Science Forum; 2017; 898: 131-136. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.898.131
- [9] Kısaoğlu, A. K. Alüminyum alaşımlarının dökümünde kritik katı oranı faktörünün kalıp sıcaklığına bağlı olarak modellenmesi (YL Tezi). Ankara: Gazi Üniversitesi; 2011.



- [10] Fan JZ, Wang Y, Zhang Y, Qin T, Zhou XR, Thompson G, Pennycook T, Hashimoto T. Grain refining mechanism in the Al/Al–Ti–B system. *Acta Materialia*; 2015, 84: 292-304. doi.org/10.1016/j.actamat.2014.10.055
- [11] Sheasby, P.G. & Pinner R. Introduction: Aluminium, its properties, alloys and finishes. In the surface treatment and finishing of aluminum and its alloys, 6th ed. Materials Park, OH: ASM International; 2001.
- [12] Devis J.R. Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys. ASM International; 1999. ISBN 0-87170-629-6
- [13] Verma RP, Lila MK. A short review on aluminium alloys and welding in structural applications, *Materialstoday; Proceeding*; 2021. doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.447
- [14] Kaufman JG. Introduction to Aluminum Alloys and Tempers, ASM International; 2000. ISBN: 978-0-87170-689-8
- [15] Kaufman JG, Rooy EL. Aluminum alloy castings: Properties, Processes and Applications. Materials Park, OH: ASM International; 2004. ISBN 0 -87170-803-5
- [16] Muşdal E. Alüminyum-Silisyum alaşımlarında demir intermetaliklerinin etkisi. (YL Tezi). İstanbul: İstanbul Üniversitesi; 2018.
- [17] Warmuzek M. Aluminum-Silicon casting alloys. Atlas of Microfractographs. Materials Park; 2004. ISBN 0-87170-794-2
- [18] Xu J, Chen G, Zhang Z, Zhao Y, Zhang T, Zhang C ve diğerleri. Effect of Al-3 ağı% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> master alloy fabricated by calcined kaolin on grain refinement and mechanical properties of A356 alloy. *Journal of Alloys and Compounds*; 2021; 862: 158512.
- [19] Zhu M, Jian Z, Yang G, Zhou Y. Effects of T6 heat treatment on the microstructure, tensile properties, and fracture behavior of the modified A356 alloys. *Materials and Design*; 2012; 36: 243-249.

- [20] R. Podprocká, D. Bolibruchová, M. Chalupová. Reducing the negative of the iron in the alloy based on Al-Si-Mg by manganese. Archives of Foundry Engineering; 2017; 212 – 216. doi: 10.1515/afe-2017-0077
- [21] John AT. Iron-containing intermetallic phases in Al-Si based casting alloys. Procedia Materials Science; 2012; 19-33. doi: 10.1016/j.mspro.2012.06.004
- [22] Mohamed F. Ibrahim, Emad M. Elgallad, Salvador Valtierra, Herbert W. Doty and Fawzy H. Samuel. Metallurgical parameters controlling the eutectic silicon characteristics in Be-treated Al-Si-Mg alloys. Materials; 2016. doi:10.3390/ma9020078
- [23] Shabestari SG, Shahri F. Influence of modification, solidification conditions and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy. Journal of Materials Science. Kluwer Academic Publishers; 2004. 39: 0022-2461.
- [24] Abdelaziz MH, Samuel AM, Doty HW, Samuel FH. Effect of morphological changes of eutectic Si particles on the ambient and high temperature tensile properties of Zr containing Al–Si alloys. Journal of Materials Research and Technology; 2020; 9(3):5962–5981.
- [25] Shan D., Zhen L. Aging behavior and microstructure evolution in the processing of aluminum alloys. Harbin Institute of Technology, China; 2012.
- [26] ASM International. Heat Treating; 2015 [erişim tarihi:28.03.2021]. [https://www.asminternational.org/documents/10192/23555666/ASM+Subject+Guide\\_HeatTreating.pdf](https://www.asminternational.org/documents/10192/23555666/ASM+Subject+Guide_HeatTreating.pdf).
- [27] Bursa Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Deney Föyü, 2017 [erişim tarihi:28.03.2021]. Çökelme Sertleşmesi (Yaşlandırma) Deneyi. <https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/metalurji/Dosyalar/%c3%87%c3%b6kelme%20Sertle%c5%9fmesi%20Deneyi.pdf>.

- [28] Engineering Archives. Internet. [erişim tarihi:28.03.2021].  
[http://www.engineeringarchives.com/les\\_matsci\\_liquidussolidussolvuseutectic.html](http://www.engineeringarchives.com/les_matsci_liquidussolidussolvuseutectic.html).
- [29] P. Ma, C.M. Zou, H.W. Wang, S. Scudino, K.K. Song, M. Samadi Khoshkhoo, Z.J. Wei, U. Kühn, J. Eckert. Structure of GP zones in Al–Si matrix composites solidified under high pressure. *Materials Letters*; 2013; 109: 1-4.
- [30] Güneren A. T6 Heat treatment optimization of A356 alloy (Yüksek Lisans Tezi) İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi; 2019.
- [31] Chen Z, Wang T, Gao L, Fu H, Li T. Grain refinement and tensile properties improvement of aluminum foundry alloys by inoculation with Al–B master alloy. *Materials Science and Engineering A*; 2012. 553: 32–36.
- [32] Grobner J, Mirkovi D, Schmid-Fetzer R. Thermodynamic aspects of grain refinement of Al–Si alloys using Ti and B. *Materials Science and Engineering A*; 2015; 395: 10–21.
- [33] R.J. Immanuel, S.K. Panigrahi, G. Racineux, S. Marya. Investigation on crashworthiness of ultrafine grained A356 sheets and validation of Hall-Petch relationship at high strain-rate deformation. *Materials Science & Engineering A*; 2017; 701: 226–236.
- [34] Gürsoy Ö, Erzi E, Dışpınar D. The Minerals, Metals & Materials Society. Shape Casting; 2019. doi.org/10.1007/978-3-030-06034-3\_12
- [35] Birol Y. Effect of silicon content in grain refining hypoeutectic Al–Si foundry alloys with boron and titanium additions. *Materials Science and Technology*; 2012; 28(4), 385-389. doi:10.1179/1743284711Y.0000000049
- [36] Liu Z, Cheng N, Zheng Q, Wu J, Han Q, Huang Z ve diğeri. Processing and tensile properties of A356 composites containing in situ small-sized Al<sub>3</sub>Ti particulates. *Materials Science and Engineering A*; 2018; 710: 392-399. doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.005

- [37] C. Suryanarayana. Mechanical alloying and milling. *Progress in Materials Science*; 2001. doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00010-9
- [38] Suprianto, Chen CL. Study of (Ni,Cr) Pre-Milling for synthesis of CoFe(NiCr)Mn high entropy alloy by mechanical alloying. *Materials Science & Engineering A*; 2021; 807: 140810.
- [39] Liu Z, Wang X, Han Q, Li J. Effects of the addition of Ti powders on the microstructure and mechanical properties of A356 alloy. *Powder Technology*; 2014; 253: 751-756. doi.org/10.1016/j.poağec.2013.12.052.
- [40] Gürsoy Ö, Erzi E, Dışpınar D. Ti grain refinement myth and cleanliness of A356 melt. *Shape Casting. The Minerals, Metals & Materials Series*; 2019. 125-130. doi: 10.1007/978-3-030-06034-3\_12
- [41] Li P, Liu S, Zhang L, Liu X. Grain refinement of A356 alloy by Al–Ti–B–C master alloy and its effect on mechanical properties. *Materials and Design*; 2013; 47: 522-528. doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.033
- [42] Wang M, Chen D, Chen Z, Wu Y, Wang F, Wang H ve diğerleri. Mechanical properties of in-situ TiB<sub>2</sub>/A356 composites. *Materials Science & Engineering A*; 2014; 590: 246–254. doi.org/10.1016/j.msea.2013.10.021
- [43] Zhang H, Chen G, Zhang G, Zhao Y, Mu S, Xu J, Zhang T. Study on the grain refinement of A356 alloy by Al–3 ağ-% VN master alloy. *Materials Science and Technology*; 2020; 36:7, 819-826, doi:10.1080/02670836.2020.1743925
- [44] Zhu M, Jian Z, Yang G, Zhou Y. Effects of T6 heat treatment on the microstructure, tensile properties, and fracture behavior of the modified A356 alloy. *Materials and Design*; 2012; 36: 243–249. doi:10.1016/j.matdes.2011.11.018
- [45] Kumar SD, Mandal A, Chakraborty M. Solid fraction evolution characteristics of semi-solid A356 alloy and in-situ A356–TiB<sub>2</sub> composites investigated by differential thermal analysis. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*; 2015. 22(4):389-394. doi:10.1007/s12613-015-1084-0

[46] Dökümhane.net. İnternet. [erişim tarihi: 20.01.2022]  
<https://dokumhane.net/kutuphane/aluminyum-alasimlarinin-dokum-surecinde-soguma-egrilerinin-kullanimi/>

# Ekler



# Ek A

## Tezden Üretilmiş Yayınlar

### **Konferans Bildirileri**

1. Increasing the Mechanical Properties of Al A356 Alloy Parts By Ball Milled Al-TiB<sub>2</sub> Powder Mixture As a Grain Refiners. IMSMATEC'2021, 4. International Conference On Materials Science, Mechanical And Automotive Engineerings And Technology, May 28-30 /2021.

# Özgeçmiş

Adı Soyadı: Makbule Pozan

Eğitim:

2012–2018 İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği

2019–2021 İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği

Ana Bilim Dalı

İş Deneyimi:

04.2019 – 10.2019 Kalite Güvence Mühendisi - Erdal Etiket Matbaa Ambalaj  
San. Tic. Ltd. Şti.

10.2019 – 06.2021 Laboratuvar Mühendisi – CMS Jant Makine Sanayii

06.2021- --- Proses Tasarım Analiz Mühendisi – CMS Jant Sanayii