







Toz Metalurjisi Yöntemi İle Tane İnceltici Üretimi Ve Döküm Performansının İncelenmesi

Grain Refiners Production With Powder Metallurgy Method And Investigation Of Casting Performance

Ramazan Can¹ , Engin Kocaman^{2*} , Nazım Kunduracı¹ , Süleyman Can Kurnaz³ 

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 67100, Zonguldak, TÜRKİYE

²Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, 67100, Zonguldak, TÜRKİYE

³Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 54100, Sakarya, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 28/08/2022

Kabul / Accepted: 05/10/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Alüminyum ve alaşımlarına uygulanan tane inceltme işlemi özellikle döküm alüminyum alaşımların mekanik ve dökülebilirlik özelliklerini iyileştirmede kullanılan bir yöntemdir. Ticari olarak alüminyumun titanyum ve bor içeren halojenür tuzların ergitilmesi ile üretilen master alaşımlar kullanılmaktadır. Bu çalışmada toz metalürjisi yöntemi ile üretilen tane incelticilerin Etial 180 (LM2) alaşımının tane inceltme performansını üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ticari olarak kullanılan Al5Ti1B ve Al8B master alaşımına alternatif olabilecek tane incelticiler toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiş ve performansları karşılaştırılmıştır. Bu amaçla Al25Ti, Al25B, Al5Ti1B ve Al5Ti5B bileşimlerine sahip dört farklı tane inceltici geliştirilmiş ve farklı sıcaklıklarda atmosfer altında sinterlenmiştir. Akabinde üretilen tane incelticilerin performansı Etial 180 alaşımı kullanılarak kokil kalıba gerçekleştirilen döküm işlemi ile incelenmiştir. Çalışma sonucu toz metalürjisi ile üretilen tane incelticilerin alaşımın tane boyutunu önemli oranda azalttığı ve ticari olarak kullanılan tane inceltici kadar performans sağladığı tespit edilmiştir. Toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretilen tane incelticiler ile döküm alaşımın tane boyutunu başlangıç durumuna göre ~%80'e kadar azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca toz metalürjisi yöntemi ile üretilen tane incelticilerin döküm parçanın sertliğini %10 ile %15 arasında artırdığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Etial 180 (LM2), Tane İnceltme, Toz Metalürjisi, Döküm, Sertlik”

Abstract

Grain refinement applied to aluminum and its alloys is a process used to improve the mechanical and castability properties of cast aluminum alloys. Commercially, master alloys produced by melting aluminum halide salts containing titanium and boron are used. In this study, the effects of grain refiners produced by powder metallurgy method on grain refinement performance of Etial 180 (LM2) alloy were investigated. Grain refiners, which can be alternatives to commercially used Al5Ti1B and Al8B master alloys, were produced by powder metallurgy method and their performances were compared. For this purpose, four different grain refiners with Al25Ti, Al25B, Al5Ti1B and Al5Ti5B compositions were developed and sintered under atmosphere at different temperatures. Subsequently, the performance of the grain refiners produced was investigated by casting process in a permanent mold using Etial 180 alloy. As a result of the study, it has been determined that the grain refiners produced by powder metallurgy significantly reduce the grain size of the alloy and provide performance as much as the commercially used grain refiner. It has been observed that the grain refiners produced using the powder metallurgy method reduce the grain size of the cast alloy up to ~80% compared to the initial situation. In addition, it has been determined that the grain refiners produced by the powder metallurgy method increase the hardness of the cast part between 10% and 15%.

Key Words

“Etial 180 (LM2), Grain Refinement, Powder Metallurgy, Casting, Hardness”

1. Giriş

Alüminyum alaşımları düşük yoğunluğunun yanında sergilediği nispeten yüksek mukavemet, yüksek süneklik, iyi elektrik iletkenliği ve yüksek korozyon direnci sayesinde hayatımızın hemen her alanında kullanılan bir metal haline gelmiştir. Alüminyum ve alaşımlarına olan bu denli yüksek talep alüminyum ve alaşımlarının üretiminin artmasına neden olurken, üretim yöntemlerinin ve teknolojisinin de gelişmesine neden olmuştur. Günümüzde alüminyum alaşımlarının özellikleri ısıtma işlemi veya mekanik/termomekanik benzeri yöntemler ile artırılabilir. Bu yöntemlere ek olarak son 50 yıldır özellikle alüminyum döküm alaşımlarında çeşitli döküm hatalarının giderilmesine yardımcı olan ve alaşımların mekanik özelliklerini arttıran tane inceltme işlemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde tane inceltme işlemi çubuk veya tablet formundaki ön alaşımlandırılmış master alaşımların ergiyik içerisine ilavesi ile gerçekleştirilmektedir. Tane inceltmede etkili mekanizmanın ise sıvı metale ilave edilen master alaşımların ergiyik içerisinde heterojen çekirdeklenme için çekirdeklenme merkezleri oluşturduğu yönündedir. Alüminyumda tane inceltme işlemi ilk olarak 1930'lu yıllarda ergiyik alüminyum içerisine titanyum eklenerek gerçekleştirilmiştir (Eser, 2019). Tane inceltme işlemi sonucu malzemenin tane yapısında inceltme ve eş eksenli bir taneye dönüşüm söz konusudur bu durum döküm parçanın mekanik özellikleri önemli seviyede artırmaktadır. Ayrıca tane inceltme işlemi ikincil fazların dağılımını da homojen ve daha rafine hale getirmektedir. Bu durum mekanik özellikleri etkileyen diğer bir husustur (Sigworth & Kuhn, 2007; Teke et al., 2019). Alüminyum alaşımlarında tane inceltme işleminin ile kritik katılaşma oranını artırdığı, gözeneklerin boyutunda ve miktarında azaltma olduğu rapor edilmiştir (Kayıkci et al., 2015; Samuel et al., 2018). Bu sebeple tane inceltme işleminin yorulma dayanımını geliştirmede etkili olduğu bilinmektedir.

Geçmişte gerçekleştirilen uygulamalarda Al-Ti esaslı tane incelticilerin ergiyik içerisinde oluşturduğu $TiAl_3$ bileşiğinin tane inceltmede etkili olduğu düşünülmekteydi. Bu konuda çalışma yapan Davies ve arkadaşları (Davies et al., 1970) alüminyum içerisindeki $TiAl_3$ bileşiğini incelemiş ve çekirdeklenmeye katkı sağladığını belirtmişlerdir. 1950'li yıllarda ise borun tane inceltme etkileri araştırılmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmalarda, bor ve titanyumun içeren tane incelticilerin çok daha fazla tane inceltme etkisi oluşturduğu tespit edilmiştir. Al-Ti-B çubuğu, bu bulgunun ilk ürünü olmuştur. Bor içeren yeni tane incelticiler çok daha yüksek tane inceltme performansına sahip ve ekonomik oldukları için alüminyum alaşımlarında alüminyum-titanyum tane incelticilerin yerine Al-Ti-B içeren tane inceltici master alaşımlar kullanılmaya başlamıştır. İlk modern ticari Al-Ti-B alaşımı, 1970'li yılların başında geliştirilmiştir. Al-Ti-B esaslı tane incelticilerde borun alüminyum ile yaptığı AlB_2 ve titanyum ile yaptığı TiB_2 intermetalik bileşikler düşük çözünürlüğe sahiptirler ve döküm alaşımlarında oldukça etkili çekirdekleştirici maddeler olduğu tespit edilmiştir (Bahadır, 2021). Sonraları ise ağırlıkça %5 titanyumun ve %1 bor içeren Al_5Ti_1B tane incelticilerin sistemde daha verimli tane küçülttüğü belirtilmiştir ve bu üçlü alaşım bileşimlerinin içerdiği çok ince TiB_2 ve $TiAl_3$ kristalleri tane inceltmede etkili olduğu rapor edilmiştir (Gül, 2014). Şenel (Şenel, 2004) tarafından yapılan çalışmada ise TiB_2 ve $TiAl_3$ bileşiklerinin ikisinin de birlikte bulunduğu zaman $TiAl_3$ 'ün daha verimli bir çekirdekleştirici olduğu rapor edilmiştir. Murty (Murty et al., 2002) tarafından yapılan çalışmada alüminyum ile TiB_2 arasında hiçbir ilişki bulunamamış, alüminyum tanelerinin ortasında kaldıkları gözlemlenirken, borürlerin ise alaşımlarda tane sınırlarına doğru toplandıkları gözlemlenmiştir. Bununla birlikte son 20 yıl içerisinde yapılan çalışmalar Al-Si alaşımlarında silisyum oranının ağırlıkça % 3'ün üzerine çıkması ile $AlTiB$ tane incelticilerin tane inceltme performansının azaldığı rapor edilmiştir (Murat Çolak, 2020; Qiu et al., 2007; Quested et al., 2006). Balzoni ve Nadendla tarafından yapılan çalışmada Al-Si alaşımlarında tane inceltmede $AlTiB$ esaslı tane incelticilere nazaran $AlNbB$ esaslı tane incelticilerin tane inceltme performansının daha iyi olduğu bildirilmiştir (Bolzoni & Hari Babu, 2020).

Alüminyum alaşımlarında master alaşım kullanarak tane inceltme üzerine çok sayıda çalışma gerçekleştirilmekle birlikte özellikle tane inceltme mekanizması hakkında hala açıklığa kavuşturulamayan durumlar söz konusudur. Özellikle bu durum alüminyum-silisyum döküm alaşımlara uygulanan tane inceltme işleminde gizemini korumaktadır. Bu çalışmada ise tane inceltme işleminin mekanizması daha iyi anlamaya yönelik ve ticari olarak kullanılan mevcut tane incelticilere alternatif olarak toz metalürjisi yöntemi ile farklı oranlarda Al-Ti, Al-B ve Al-Ti-B içeren tane incelticiler üretilmiştir. Üretilen bu tane incelticilerin özellikle otomotiv sanayinde kullanılan bir basınçlı alüminyum döküm alaşımı olan ve ana alaşım elementi silisyum olan Etial 180 alaşımı üzerindeki tane inceltme performansı, mikroyapısal incelemeleri, tane boyutu ölçümü ve sertlik testi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular ticari olarak kullanılan Al_5Ti_1B tane inceltici ile tane inceltme işlemine tabi tutulan numune ile karşılaştırılmıştır.

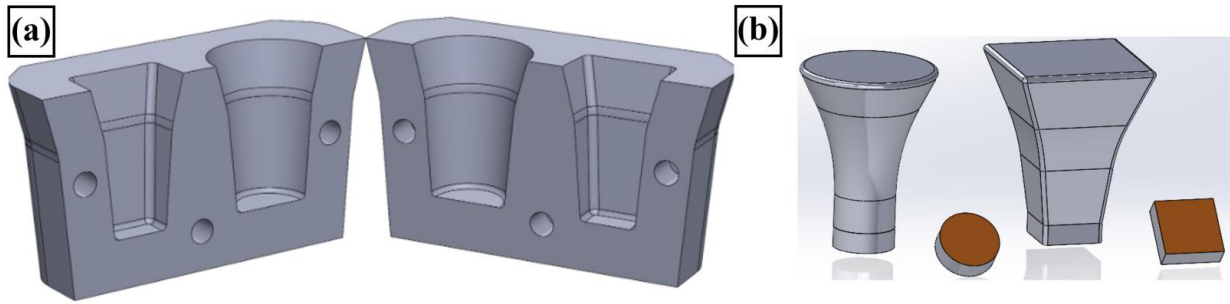
2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada toz metalürjisi (TM) yöntemiyle üretilen farklı Al-Ti-B içeriklerine sahip tane incelticilerin tane inceltme performansı incelenmiş ve ticari olarak kullanılan Al_5Ti_1B tane inceltici master alaşım ile karşılaştırılmıştır. TM yöntemi ile üretilen tane incelticiler için başlangıç malzemesi olarak Egenanotek firmasından temin edilen 45 mikron tane boyutuna sahip %99,99 saflıkta alüminyum tozu, Egenanotek firmasından temin edilen 45 mikron tane boyutuna sahip %99 saflıkta bor tozu, Egenanotek firmasından temin edilen 45 mikron tane boyutuna sahip %99,9 saflıkta titanyum tozu kullanılmıştır. Precisia marka 0,0001 hassasiyete sahip hassas terazi ile Tablo 1'de verilen bileşimlere göre tartılan tozlar hidrolik pres yardımıyla 120 Mpa basınç altında preslenmiştir. Akabinde atmosfer kontrollü fırın içerisinde 600 °C, 650 °C ve 700 °C olmak üzere üç farklı sinterleme sıcaklığında 360 dakika boyunca sinterlenmiştir.

Tablo 1. TM Tane İncelticilerin Kimyasal Bileşimleri (% Ağ.)

	Ti	B	Kal.
Al25Ti	25	-	Al.
Al25B	-	25	Al.
Al5Ti1B	5	1	Al.
Al5Ti5B	5	5	Al.

Üretilen tane incelticilerin tane inceltme performansının incelenmesi için Şekil 1’de şematik görünümü verilen kokil kalıp kullanılarak 250 °C’de ön ısıtılmış kalıp içerisine döküm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Döküm alaşımı olarak katılaşma aralığı geniş bir alaşım olan ve Tablo 2’de spektral analiz sonucu verilen Etial180 alaşımı tercih edilmiştir. Ergitme işlemi 2 kg kapasiteli SiC pota içerisinde elektrik direnç ocağı vasıtasıyla 740 °C’de gerçekleştirilmiştir. Ergiyik metal içerisine 740 °C’de ticari Al5Ti1B için % 0,02 Ti olacak şekilde TM hazırlanan tane incelticiler için %0.02 Ti veya B oranında tane inceltici ilave edilmiştir. Döküm pota içerisine ilave edilen tane incelticiler 15 dakika bekleme süresi sonunda 720 °C’de döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Döküm öncesi ergiyik metal bulunduğu pota içerisnde bir grafit çubuk yardımıyla 30 saniye süre ile karıştırılmış ve gaz alma tableti (ALDEGAS-NCL) kullanılarak gaz giderme işlemi gerçekleştirilmiştir.

**Şekil 1.** Kokil Kalıbın Şematik Gösterimi.

Dökülen numuneler standart metalografik işlemlere göre önce 240, 600, 1200, 2500 grid zımpara ile zımparalanmış sonrasında 1, 6 ve 0,05 µm solüsyon kullanılarak parlatılmış ve Keller (5 ml. HNO₃, 3 ml. HCl, 2 ml. HF ve 190 ml saf su) çözeltisiyle dağlanmıştır. Dağlanan numunelerin mikroyapısal incelemeleri Leica M 1750 optik mikroskop ve Jeol JSM-6060LV markalı taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu ölçümü ve mikroyapısal değerlendirmeler Image-J görüntü analiz yazılımı yardımıyla yapılmıştır. Sertlik ölçümleri Brinell sertlik modunda Bulut Makine marka DIGIROCK-RB model sertlik cihazı ile 2,5 mm çapında bilya ve 62.5 g yük uygulanarak ölçülmüştür. Ortalama brinell sertlik değerleri için bütün yüzey boyunca 5 mm aralıklarla ortalama 10 ölçüm alınarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada, kullanılan Etial 180 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimleri aşağıdaki Tablo 2’de verilmiştir. Alaşımın kimyasal bileşimini belirleme de, Türkiye Taş Kömürü Maden Makinaları Fabrikası’nda bulunan Oxford Foundry-Master marka spektral analiz cihazı kullanılmıştır.

Tablo 2. Etial 180 Kimyasal Bileşimi(%Ağ.)

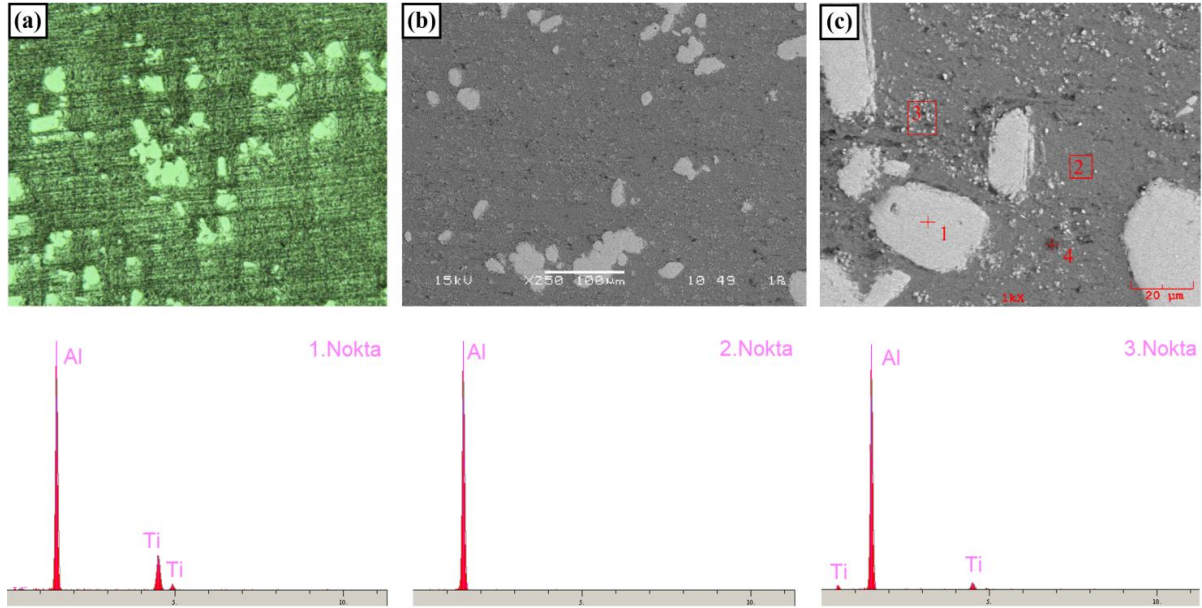
Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti	Al
%	9,95	0,994	2,37	0,160	0,274	2,28	0,010	0,107	0,036	Kalan

3. Bulgular Ve Tartışma

3.1. Tane İncelticilerin Analizi

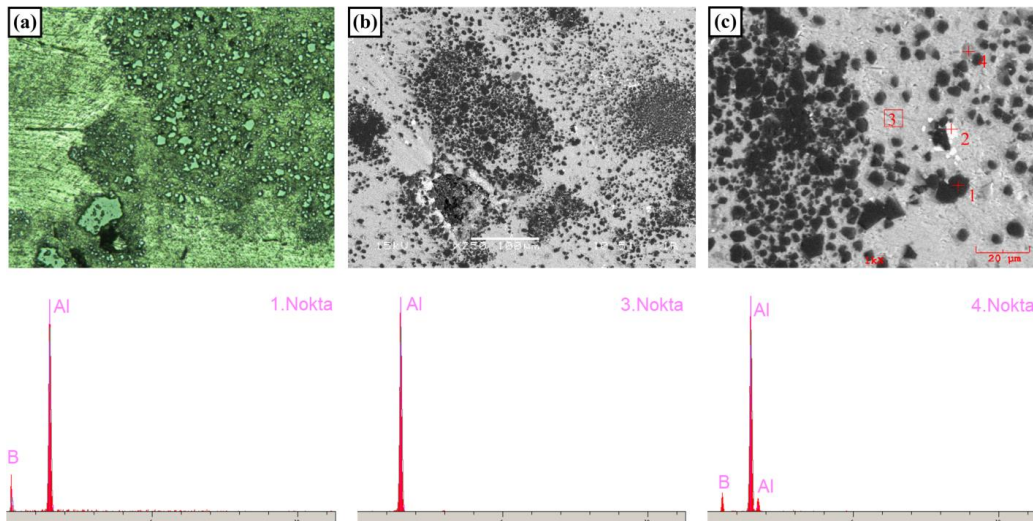
Günümüzde ticari alüminyum alaşımların dökümünde çok sayıda tane inceltici kullanılmakla birlikte en çok tercih edilen tane incelticiler Al5Ti1B ve Al8B master alaşımlardır. Çalışmanın genel hedeflerinden biri ticari olarak kullanılan tane incelticiye alternatif bir tane inceltici üretmektedir. Bu sebeple çalışmada ilk olarak ticari olarak kullanılan tane incelticiler ve mikroyapıları incelenmiştir.

Şekil 2-a'da ticari olarak kullanılan Al5Ti1B tane incelticinin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Ticari olarak kullanılan tane incelticilerin mikroyapı görüntülerinde blok yapılı partiküllerin yapı içerisinde bulunduğu görülmektedir. Matris faz içerisinde dağılan bu fazların $TiAl_3$ intermetalik fazları olması muhtemeldir. Bu partiküllerin yapı içerisindeki dağılımı genel olarak homojen olmayıp aynı zamanda boyutsal olarak da farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır. Şekil 2-b'de ticari Al5Ti1B master alaşımının SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmiştir. EDS analizinde bu partiküllerden alınan alüminyum ve titanyum sinyali bu partiküllerin $TiAl_3$ intermetalik yapıları olduğuna işaret etmektedir. Literatürde halojenür tuzlar kullanılarak yapılan veya toz başlangıç malzemeleri ile üretilen tane incelticilerde $TiAl_3$ intermetalik yapılarının baskın olarak bulunduğu rapor edilmiştir (Yücel Birol, 2008). Öte yandan blok yapılı fazlar arasında disperse olmuş ince küçük fazların bulunduğu görülmektedir. Bu noktalardan alınan EDS analizi sonucu Al, Ti ve B elementlerine ait pikler tespit edilmiştir. Bor elementinin EDS analizinde kantitatif olarak bir sayım vermediği fakat bor elementine ait sinyalleri gösterdiği bilinmektedir. Bu sebeple bu fazların yoğun olarak bulunduğu 3 numaralı EDS analizinde tespit edilen bor bu bölgelerde TiB_2 fazının olabileceğine işaret etmektedir. Yapılan benzer çalışmalarda TiB_2 fazının $TiAl_3$ ile birlikte çok küçük fazlar olarak katılaştığı belirtilmiştir (Nagliç et al., 2008).



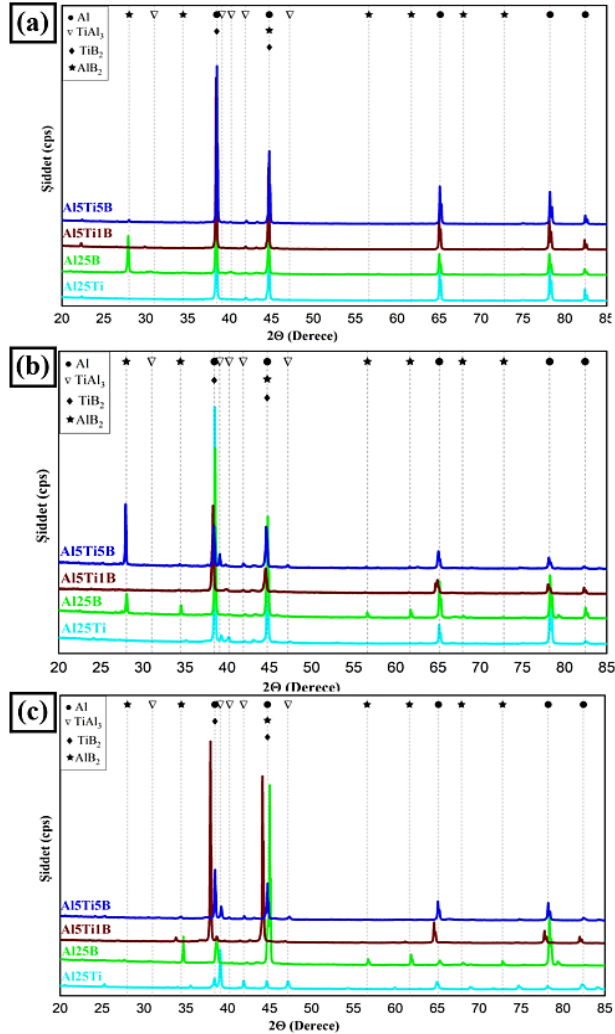
Şekil 2. Ticari Al5Ti1B a) OM görüntüsü b) SEM görüntüsü ve c) EDS analizi

Şekil 3'te Al8B tane incelticinin optik mikroskop görüntüsü SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmiştir. Mikroyapı görüntülerinde koyu renkli siyah blok yapılı fazlar olduğu görülmektedir. Ticari olarak kullanılan Al8B tane inceltici içerisinde AlB_2 ve eser miktarda AlB_{12} intermetalik yapılarının olduğu bilinmektedir (X. Wang, 2005). Literatürde yapılan çeşitli çalışmalarda B_2O_3 başlangıç malzemesi kullanılarak üretilen Al-B master alaşımında, mikroyapıda oluşan AlB_2 intermetalik yapılarının şeklinin soğuma hızı ve alaşım elementi ilavesine bağlı olarak değiştiği rapor edilmiştir (Ö Savaş et al., 2012; Ömer Savaş & Kayikci, 2013).



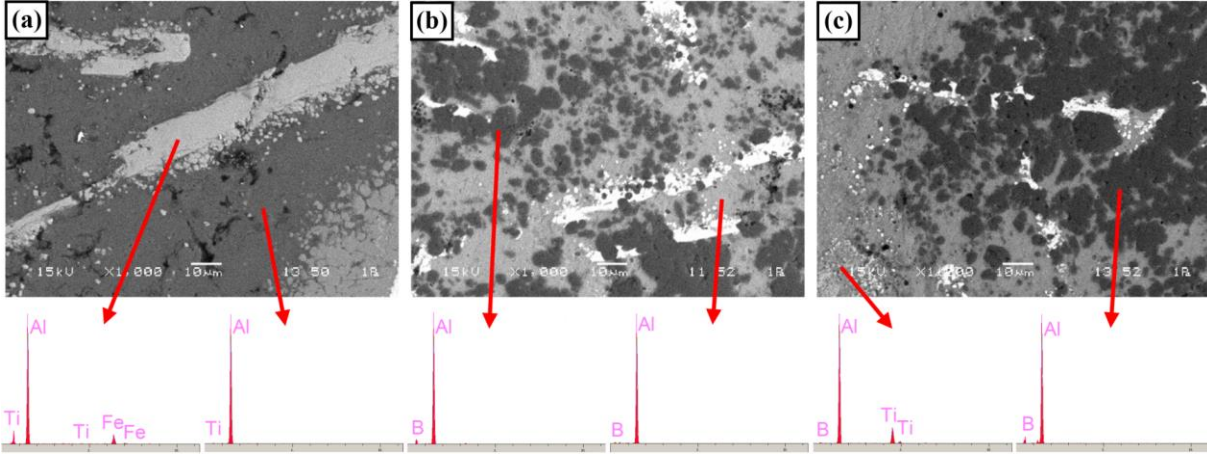
Şekil 3. Al8B Tane İncelticinin a) OM Görüntüsü b) SEM Görüntüsü ve c) EDS Analizi.

Şekil 4’te toz metalürjisi yöntemi ile üretilen ve farklı sıcaklıklarda sinterlenen tane incelticilere ait XRD analiz sonuçları verilmiştir. XRD analizine göre farklı oranlarda Al-Ti-B tozları kullanılarak üretilen numunelerde, numune bileşime bağlı olarak $TiAl_3$, TiB_2 ve AlB_2 fazları tespit edilmiştir. Şekil 4-a’da çalışmadaki en düşük sinterleme sıcaklığı olan $600\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta sinterlenen numunenin XRD analizi görülmektedir. XRD analizine göre en yüksek yoğunluğa sahip sinyallerin alüminyum elementinden alındığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte $600\text{ }^\circ\text{C}$ ’de sinterlenen $Al_{12}Ti$ bileşimli numunede Al ve $TiAl_3$ piklerinin bulunduğu görülmektedir. Yani Al-Ti tozları ile hazırlanan numunelerde $600\text{ }^\circ\text{C}$ ’de gerçekleştirilen sinterleme sıcaklığı için intermetalik oluşumunun gerçekleştiği söylenebilir. Al-Ti sisteminde bileşimin oranına bağlı olarak Ti_3Al , $TiAl$, Ti_2Al_5 , $TiAl_2$ ve $TiAl_3$ gibi çeşitli intermetalik fazlar oluşabilmektedir (Batalu et al., 2006). Bu çalışmada $Al_{12}Ti$ bileşimine sahip numunenin XRD analizi sonucu $TiAl_3$ dışında başka bir intermetalik bileşiğine rastlanmamıştır. Batool ve arkadaşlarının yaptığı benzer bir çalışmada %5 ve %10 titanyum içeren Al-Ti tozlarının sinterlenmesi sonucu $TiAl_3$ intermetalik bileşimini elde etmiş ve artan titanyum oranı ile $TiAl_3$ oranının arttığını rapor etmişlerdir (Batool et al., 2019). $600\text{ }^\circ\text{C}$ ’de sinterlenen $Al_{12}B$ bileşimine sahip numunenin XRD analizi sonucu alüminyum sinyali ve AlB_2 intermetalik faza karşılık gelen pikler tespit edilmiştir. Yine benzer çalışmalarda alüminyum ve bor elementinin sinterlenmesi sonucu AlB_2 intermetalik fazının elde edildiği bildirilmiştir (Yuan et al., 2016). $600\text{ }^\circ\text{C}$ ’de sinterlenen Al_5Ti_1B ve Al_5Ti_5B bileşimine sahip numunelerde Al, AlB_2 , $TiAl_3$ ve TiB_2 fazlarına ait pikler tespit edilmiştir. Birol (Yücel Birol, 2009) K_2TiF_6 ve KBF_4 başlangıç malzemelerini kullanarak yaptığı çalışmada $TiAl_3$ oluşumunun $220\text{ }^\circ\text{C}$ ’de başladığını $TiAl_3$, AlB_2 ve TiB_2 intermetaliklerinin alüminyumun ergime sıcaklığının altında in-situ olarak oluşabileceğini rapor etmiştir. Birol’un yaptığı çalışmadan farklı olarak bu çalışmada saf titanyum ve bor tozunun kullanılması sebebiyle reaksiyon sıcaklıklarının değişebileceği söylenebilir. Öte yandan alüminyum içerisinde hem titanyumun hem de borun çözünürlüğü oldukça düşüktür (Yücel Birol, 2008; Khaliq, 2015). Bununla birlikte $600\text{ }^\circ\text{C}$ ’de gerçekleştirilen XRD analizi sonucu eser miktarda dönüşmeden kalan elementel titanyum veya bor pikine rastlanmıştır. Şekil 4-b’de ise $650\text{ }^\circ\text{C}$ ’de gerçekleştirilen sinterleme sonrası numunelerden alınan XRD analizi görülmektedir. Sinterleme sıcaklığının $50\text{ }^\circ\text{C}$ artırılması ile intermetalik fazlara ait piklerin yoğunluğunda bir artış olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 4-c’de $700\text{ }^\circ\text{C}$ ’de sinterlenen numunelerin XRD analizinde intermetalik fazlara ait pik yoğunluklarının arttığı görülmektedir. Bu durum termodinamik açıdan artan sinterleme sıcaklıkları sonucu reaksiyon veriminin artmasından dolayı beklenen bir durumdur.



Şekil 4. Üretilen Tane İncelticilerin XRD Analizi a) 600 °c, b) 650 °c ve c) 700 °c.

Şekil 5'te toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretilen tane incelticilerin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 5-a'da Al₂5Ti bileşimine sahip tane inceltici, Şekil 5-b'de Al₂5B bileşimine sahip tane inceltici ve Şekil 5-c'de Al₂5Ti₁B bileşimine sahip tane incelticiler görülmektedir. Görüntülerde TiAl₃ bileşiklerinin çubuksu formda olduğu anlaşılmaktadır. Literatürde gerçekleştirilen benzer çalışmalarda düşük sentezleme sıcaklıklarında TiAl₃ oluşumunun blok yapıları olduğu fakat artan sentezleme sıcaklıklarında çubuksu formda bir oluşma gözlemlendiği belirtilmiştir (Gezer et al., 2010; Li et al., 2003). Yapılan XRD analizinde TiB₂ fazlarına ait pikler tespit edilmiştir. Fakat mikroyapı incelemelerinde bu fazlara ait görüntüler net bir şekilde ayırt edilememiştir. Peeratatsuwan ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada (Peeratatsuwan & Chowwanonthapunya, 2020), ticari olarak kullanılan Al₂5Ti₁B tane incelticilerin içerisinde çok ince olarak TiAl₃ fazları ile birlikte bulunan TiB₂ fazlarının tespit edildiğini rapor edilmiştir. Bu sebeple TiB₂ fazlarının mikroyapı içerisinde ayırt edilmesi oldukça zordur.

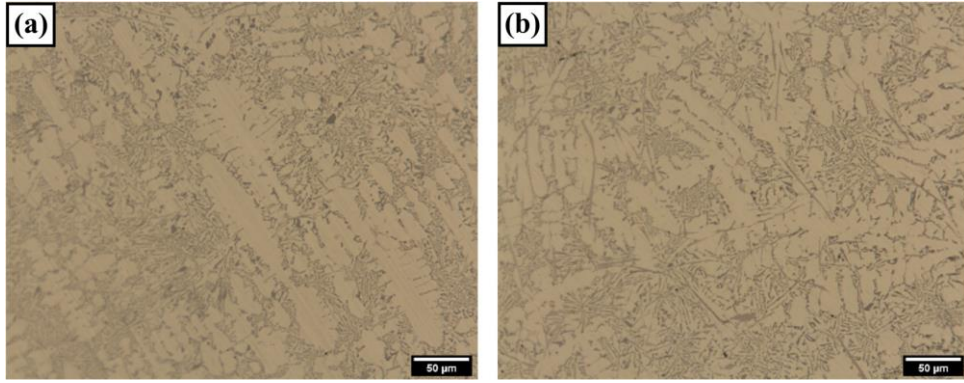
**Şekil 5.** Toz Metalürjisi Yöntemiyle Üretilen Tane İncelticilerin SEM Görüntüsü a) Al₂5Ti b) Al₂5B ve c) Al₂5Ti₁B.

Benzer şekilde TM yöntemi ile üretilen ve bor içeren tane incelticilerde siyah blok yapıları fazların olduğu görülmektedir. Öte yandan toz metalürjisi ile üretilen tane incelticilerde yer alan partiküllerin ticari olarak kullanılan Al₂8B tane incelticinin mikroyapısına benzer olduğu görülmektedir. Bu fazlar üzerinden alınan EDS sonuçlarında yoğun miktarda bor sinyali alındığı görülmektedir. Bu durum blok yapıları koyu renkli fazların XRD analizinde tespit edilen AlB₂ olduğuna işaret etmektedir. Literatürde benzer çalışmalar halojenür tuzların ve B₂O₃'ün çeşitli reaksiyonları sonucu AlB₂ oluşumu gözlenmiştir (Yücel Birol, 2007). TM yöntemi kullanılarak üretilen tane incelticilerin ticari olarak üretilen tane incelticinin mikroyapı görüntülerine benzer şekilde partiküllerin olduğu görülmektedir. Öte yandan yapılan EDS analizinde matris fazda alınan sinyaller, sinterleme sonrası mikroyapıda dönüşmeden kalan elementel tozların varlığını göstermektedir. Bu durum ticari olarak kullanılan tane incelticiye göre başlangıç malzemelerin farklı olmasından ve sinterleme sıcaklıklarının nispeten ticari olarak kullanılan tane incelticinin üretim yöntemine göre düşük olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

3.2. Mikroyapısal İncelemeler

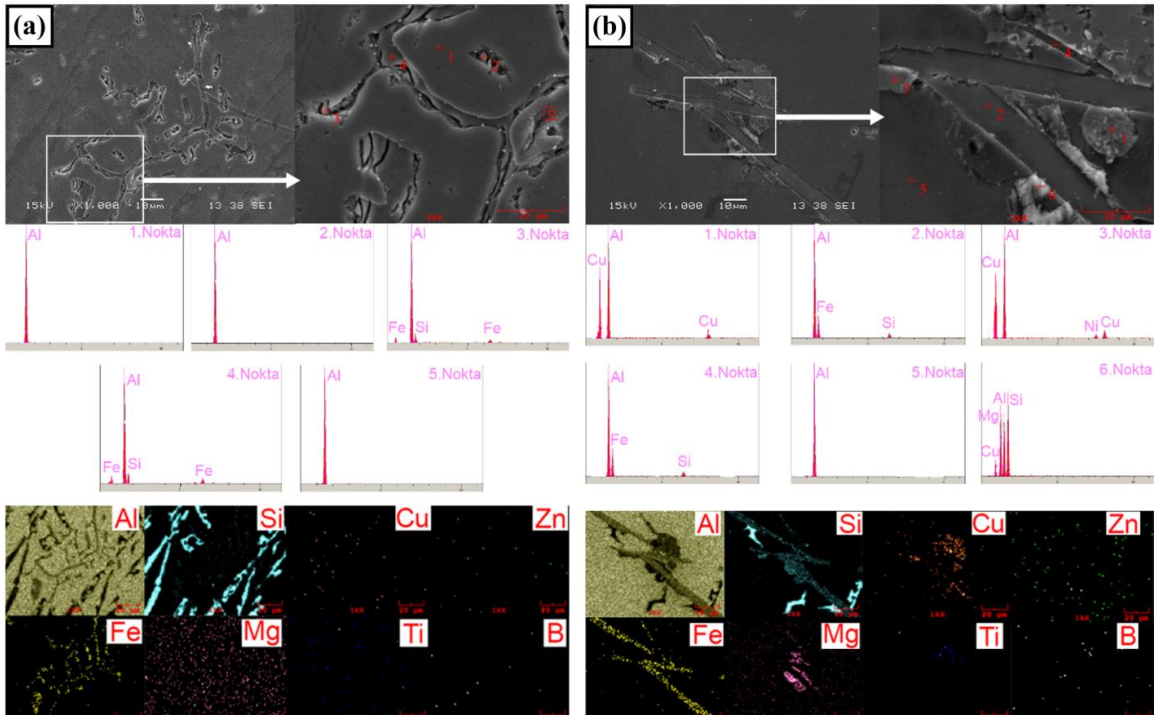
Şekil 6'da referans numunesi olan Etial 180 alaşımına ait optik mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Şekil 6-a'da verilen Etial 180 döküm yapısının dentritik bir katılma sergilediği ve mikroyapı içerisinde çubuksu formda ve blok formda çeşitli yapıların olduğu görülmektedir. Tablo 2'de verilen spektral analiz sonucuna göre alaşımın %9.95 oranında silisyum içerdiği görülmektedir. Ana alaşım elementi silisyum olan Etial180 alaşımında yan alaşım elementleri olarak Zn, Cu, Fe olduğu ve eser miktarda Mg ve Mn olduğu bulunmaktadır. Görüntüde matris faz α -Al+Si, ötektik öncesi silisyum partiküllerine benzer kaba silisyum partikülleri ve ötektik Al-Si olduğu düşünülen fazların bulunduğu görülmektedir. Normalde ağırlıkça %10 silisyum içeren Al-Si alaşımının ötektik öncesi primer silisyum partikülü içermesi beklenmez bununla birlikte katılma şartlarına bağlı bölgesel olarak bu fazlar görülebilmektedir (S. R. Wang et al., 2012). Ayrıca literatürde çin yazısı olarak bilinen ve demir içeren Al-Fe-Si intermetalik yapısı olduğu daha önce çeşitli çalışmalarda rapor edilen mikroyapı görüntülerinin var olduğu anlaşılmaktadır (Başaranel et al., 2015). Yine blok yapıları fazların ise çinko ve bakırın alüminyum ile oluşturduğu intermetalik yapıları olduğu düşünülmektedir. Şekil 7-a'da Etial 180 alaşımın döküm SEM görüntüsü ve aynı bölgenin MAP analizi verilmiştir. SEM görüntüsünde ince uzun çubuksu formdaki fazlardan yoğun silisyum içerdiği anlaşılmaktadır. Bu bölgelerin ötektik silisyum olduğu söylenebilir. Orta bölgede kalan çin yazısı şeklindeki yapıdan ise yoğun demir sinyali ve eser miktarda silisyum sinyali alındığı görülmektedir. Literatürde AlFeSi olarak tanımlanan çin yazısı şekilli intermetaliklerin içerisinde mangani çözebileceği ve eser miktarda mangan içerebileceği rapor edilmiştir (Başaranel et al., 2015). MAP analizinde bakır ve çinkoyu daha kaba partiküllerden aldığı ve bu intermetalik bileşiklerin mikroyapı içerisinde dağıldığı görülmektedir. Yine alaşımın spektral analiz sonucu bileşiminde bulunduğu anlaşılan eser miktardaki magnezyumun bütün mikroyapı içerisinde dağıldığı

görülmektedir. Literatürde Al-Si alaşımları içerisinde bulunan magnezyumun Mg_2Si bileşimini oluşturacağı bildirilmiştir (Başaranel & Saklakoğlu, 2012).



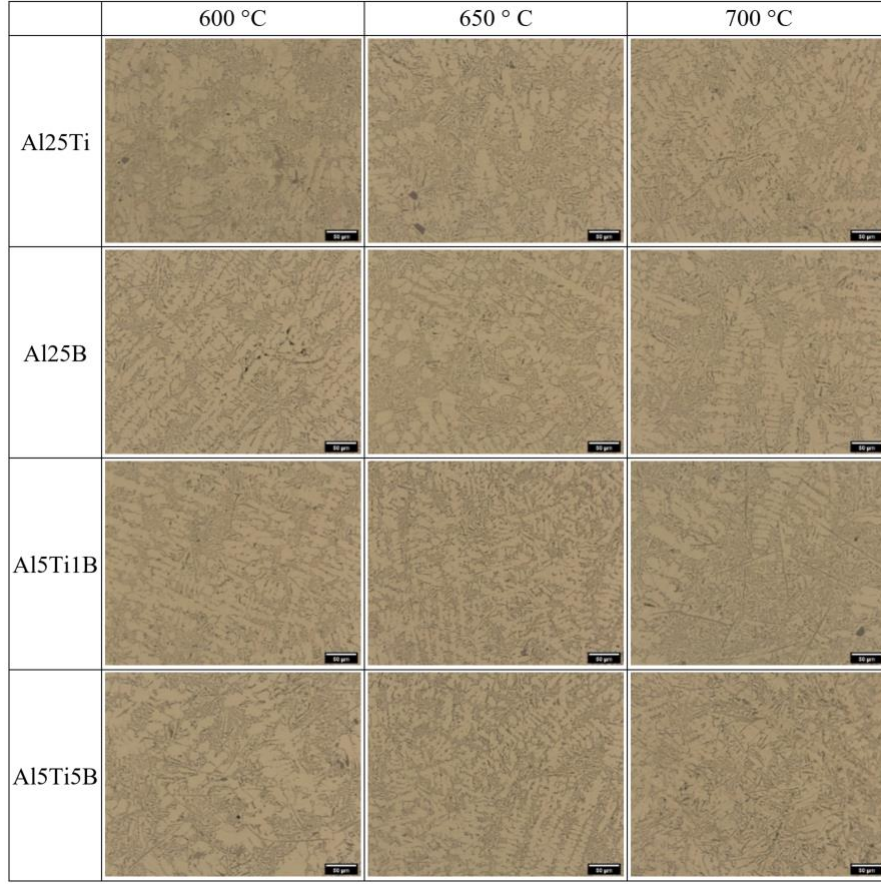
Şekil 6. a)Referans Etial 180 OM Görüntüsü b) Ticari Al5Ti1B İlaveli Numunenin OM Görüntüsü

Şekil 6-b'da Al5Ti1B bileşimine sahip ticari tane inceltici kullanılarak gerçekleştirilen Etial 180 alaşımının optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Tane inceltici ilave edilmeyen Etial 180 döküm mikroyapısına göre ticari olarak kullanılan Al5Ti1B tane incelticinin ilave edilmesi sonrası mikroyapının rafine bir hal aldığı tane boyutunun azaldığı ve aynı zamanda intermetalik yapıların rafine olarak incelendiği anlaşılmaktadır. Ayrıca bu fazların mikroyapı içerisinde dağılımının daha homojen bir görünüm sergilediği görüntüden anlaşılmaktadır. Şekil 7-b'de Al5Ti1B bileşimine sahip ticari tane inceltici kullanılarak gerçekleştiren numunenin SEM görüntüsü, EDS ve MAP analizi verilmiştir. Öte yandan mikroyapı görüntülerinde intermetalik ara fazlar olduğu düşünülen çeşitli morfolojide fazlar bulunmaktadır. Bu fazlar kimyasal bileşime bağlı olarak alüminyum içerisinde oluşması beklenen Al-Fe ve Al-Mg-Si sistemlerine ait intermetalik yapılar olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte tane inceltici ilavesi sonucu SEM görüntüsünde verilen mikroyapıdaki fazlarda önemli bir değişiklik olmadığı ve tane inceltici ilavesi sonucu yapıda çözünmeden kalan TiB_2 gibi fazlar tespit edilememiştir. Döküm mikroyapısında bu fazların ergiyük içerisinde ince boyutlu olarak dağılması bu duruma neden olduğu söylenebilir.



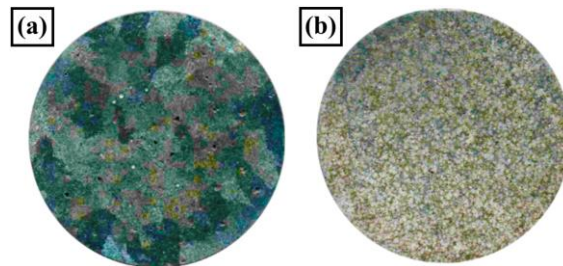
Şekil 7. a) Referans Etial 180 SEM Görüntüsü b) Al5Ti1B Ticari İlaveli SEM Görüntüsü

Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen tane incelticiler ile gerçekleştirilen döküm mikroyapı görüntüleri Şekil 8’de verilmiştir. Görüntülerde mikroyapıların referans numunenin mikroyapısına göre bir miktar daha ince ve daha homojen bir şekilde katlaştığı söylenebilir. Öte yandan mikroyapı görüntülerinde dentrit boylarında kısmi bir azalma ile birlikte dentritler arası ikincil kol mesafesinde bir azalma olduğu görülmektedir. Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen tane incelticiler ile gerçekleştirilen numunelere ait mikroyapı görüntülerinde sinterleme sıcaklığına bağlı olarak mikroyapıdaki fazların daha rafine ve homojen bir yapı oluşturduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 8. Toz metalürjisiyle üretilen tane incelticilerle gerçekleştirilen döküm OM görüntüsü

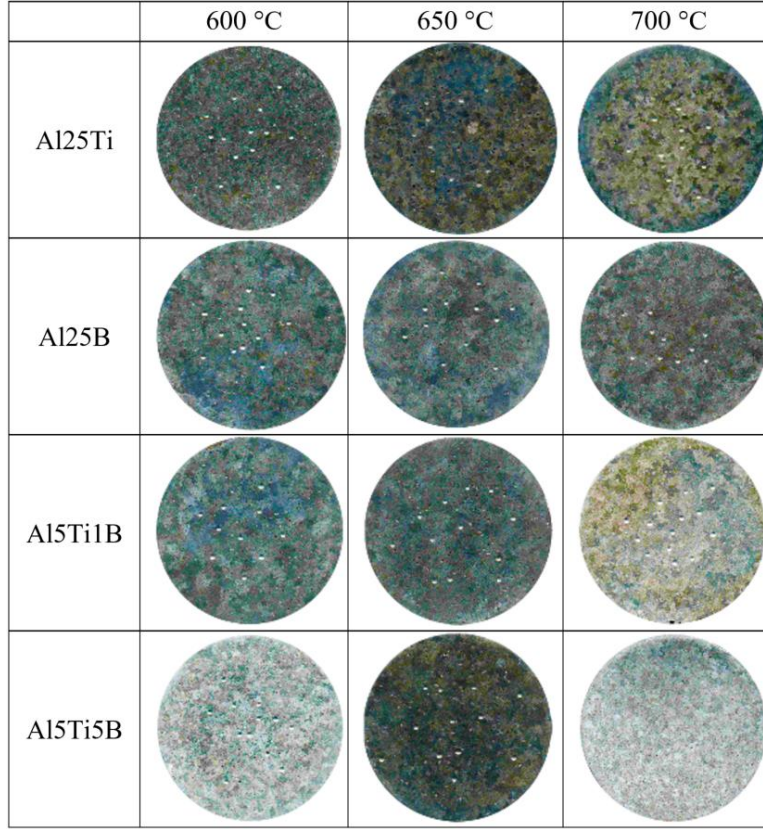
Şekil 9’da tane inceltici ilave edilmeyen referans numune ve ticari olarak kullanılan Al5Ti1B ilave edilmiş dökümlerin kesit tarama görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerdeki tanelerin ortaya çıkması için dağlama gerçekleştirilmiş ve sonrası imaj analiz yöntemi ile taneler renklendirilmiştir. Görüntülerde referans numunenin tane yapısının oldukça büyük olduğu ticari olarak kullanılan Al5Ti1B ilavesi sonrası tanelerin büyük oranda küçüldüğü görülmektedir.



Şekil 9.a) Etial 180 alaşımı mikroyapı görüntüsü **b)** Al5Ti1B ticari tane inceltici ilave edilmiş mikroyapı görünümü

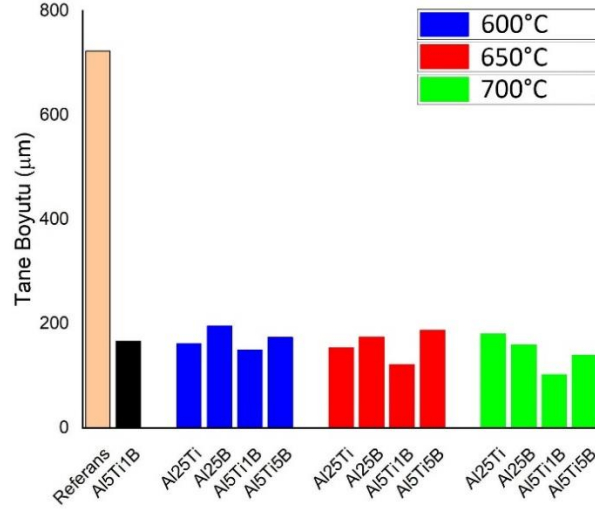
Şekil 10’da toz metalürjisi yöntemi ile üretilen tane incelticilerin döküm sonrası kesit tarama görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde toz metalürjisi yöntemi ile üretilen tane incelticilerin tane inceltme performansının oldukça iyi olduğu ve Şekil 9-a’da verilen referans numuneye ait tarama kesit görüntüsüne nazaran tane boyutunda önemli seviyede azalma olduğu anlaşılmaktadır. Ergiyik alaşım

içerisine tane inceltici ilavesi sonrası Tane incelticinin mikroyapısında bulunan $TiAl_3$, AlB_2 ve TiB_2 gibi intermetalik partiküller heterojen çekirdeklenme merkezi olarak davranarak alaşımın daha ince taneli olarak katılaşmasına neden olmaktadır (M. Çolak & Dışınar, 2017).



Şekil 10. Toz Metalürjisi Yöntemi İle Üretilen Tane İncelticilerin Döküm Sonrası Kesit Tarama Görüntüleri.

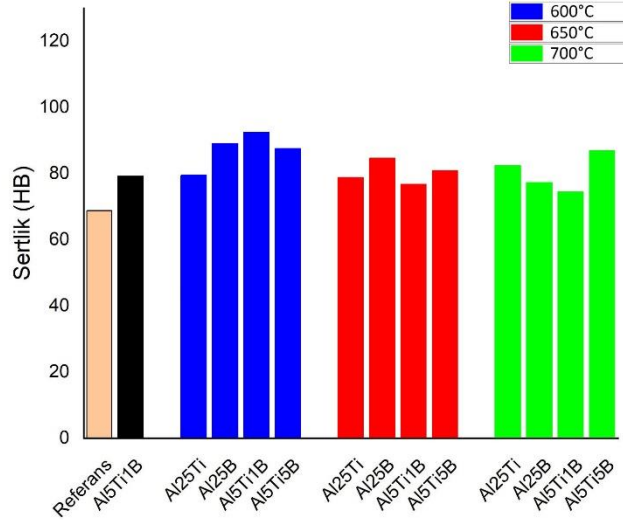
Şekil 11’de döküm parçalara gerçekleştirilen tane boyut ölçüm sonuçları verilmiştir. Referans numunenin tane boyutu ergiyik alaşıma ticari tane inceltici ilavesi sonrası yaklaşık ~%80 oranında azalmıştır. Toz metalürjisi ile üretilen numunelerin tane boyutu ise ticari olarak kullanılan Al5Ti1B tane incelticiye benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Çalışmada en düşük tane boyutu 700 °C’de sinterlenen Al5Ti1B bileşime sahip tane inceltici ile elde edilmiştir. Öte yandan sinterleme sıcaklığının tane inceltme üzerinde kısmen etkili olduğu ve artan sinterleme sıcaklığı ile tane inceltme performansının arttığı söylenebilir. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen tane incelticilerde Al25Ti bileşimine sahip tane incelticinin düşük sinterleme sıcaklıklarında tane inceltme performansının artan sinterleme sıcaklığında ise tane inceltme performansının nispeten azaldığı söylenebilir. Bu durum Al25Ti bileşimli tane incelticinin sinterlenmesi sonucu oluşan $TiAl_3$ bileşiklerinin sıvı metal içerisinde çözünebilir (Murat Çolak & Kayıkcı, 2009; McCartney, 1989) olmasından ileri geldiği ve yüksek sıcaklıklarda sinterlenen tane incelticilerin çözünmeye daha elverişli olabileceği şeklinde yorumlanabilir. Al25B bileşimli tane incelticilerin ise tane inceltme performansının daha zayıf olduğu görülmektedir. AlB_2 intermetalik fazı ergiyik içerisinde çözünmeyen kalmaktadır. Bununla birlikte artan sinterleme sıcaklığı ile tane incelticilerde bulunan AlB_2 fazı artmaktadır ve tane incelticide artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak tane boyutunda azalma olduğu anlaşılmıştır. AlB_2 ’nin özellikle silisyum içeren alaşımlarda SiB_6 adında bir ara tabaka oluşturarak çekirdeklenmeyi kolaylaştırdığı bilinmektedir (Yağcı et al., 2021). Çalışmada ki en düşük tane boyutu bütün sinterleme sıcaklıkları için Al5Ti1B esaslı tane inceltici ile elde edilmiştir. Bu durum Al5Ti1B esaslı tane incelticilerde rastlanan $TiAl_3$, AlB_2 ve TiB_2 intermetalik bileşiklerinin hepsinin tane inceltmede rol almasından ileri geldiği söylenebilir. Öte yandan Al5Ti5B bileşimli tane incelticilerde ise artan bor miktarı sonucu TiB_2 intermetalik bileşiğinin arttığı Şekil 4’te verilen XRD analizi sonucu anlaşılmaktadır. Bu durum TiB_2 ’nin tane inceltme performansının nispeten diğer intermetalik bileşiklere göre daha zayıf olduğuna işaret etmektedir. Ayrıca sıvı metal içerisinde çözünmeyen kalan TiB_2 intermetalik bileşiklerinin ergiyik içerisinde yüzebileceği bilinmektedir ve bu durum homojen olmayan bir tane inceltici dağılımına neden olabilecektir. Literatürde intermetalik fazların homojen bir şekilde dağılım göstermesi etkili bir tane inceltme sağlayacağı rapor edilmiştir (Arslan et al., 2019).



Şekil 11. Döküm Parçalara Gerçekleştirilen Tane Boyutu Ölçüm Sonuçları.

3.3. Sertlik İncelemeleri

Şekil 12’de döküm numunelerin kesitlerinden alınan Brinell sertlik ölçüm sonuçları görülmektedir. Sonuçlara toz metalürjisi ile üretilen tane incelticilerin sertlik değerini referans numune kadar artırdığı ve ticari olarak kullanılan Al5Ti1B ile benzer sertlik değerleri elde edildiğini göstermektedir. Sertlik sonucu döküm alaşımın hem tane boyutu hem de oluşan intermetalik faz yoğunluğu ile ilgilidir. Bu sebeple sertlik sonuçlarında doğrusal bir değişim elde edilememiştir. Bununla birlikte sıvı alaşım içerisinde çözülmemeyen AlB₂ tip intermetalik içeren tane incelticilerin döküm sonrası sertlik değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca Toz metalürjisi ile üretilen numunelerde AlB₂ intermetalik yoğunluğu fazla olan Al25B bileşimine sahip tane incelticilerin sertlik değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Cibula (Cibula, 1972) tane inceltici alaşımların kullanılması ergiyik alümiyum içerisinde intermetalik fazların oluştuğunu tespit etmiştir. Ergiyik içerisinde AlB₂, TiB₂ and TiAl₃ intermetalikleri sertlik değerini arttırdığını savunmuştur. Bu durum Şekil 11’de verilen nsertlik değerleri ile paralellik göstermekle birlikte çözünen veya yarı çözünen intermetalik bileşiklerin sertlik sonuçlarında dalgalanmalara sebep olabileceğine işaret etmektedir.



Şekil 12. Döküm Numunelerin Kesitlerinden Alınan Brinell Sertlik Ölçüm Sonuçları.

4. Sonuç

Çalışmada toz metalürjisi yöntemi ile farklı bileşimlere sahip tane incelticiler üretilmiş ve farklı sıcaklıklarda sinterlenmiştir. Etial180 alaşımı üzerindeki tane inceltme performansı incelenmiş ve ticari olarak kullanılan Al5Ti1B tane inceltici ile kıyaslanmıştır. Sonuçlar toz metalürjisi yöntemi ile tane incelticinin üretililebileceğini ve tane inceltmede etkili bir performans sergileyeceğini göstermiştir. Toz metalürjisi ile üretilen tane incelticilerin tane boyutunu alaşımın döküm durumuna göre yaklaşık ~%80 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Toz metalürjisi üretilen tane incelticilerin içerisinde en düşük tane boyutu 700 °C’de sinterlenen Al5Ti1B bileşimine sahip tane inceltici olduğu görülmüştür. Ölçülen bu tane boyutu değerlerinin, döküm alaşım içerisine ilave edilen ticari Al5Ti1B tane inceltici ile elde tane boyutu ile paralellik gösterdiği anlaşılmıştır. Ayrıca toz metalürjisi yöntemi ile üretilen tane incelticilerin döküm alaşımın sertliğini referans numuneye göre artırdığını ve ticari olarak kullanılan tane inceltici ile benzer sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir. Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen tane incelticiler içerisinde en yüksek sertlik değeri 700 °C’de sinterlenen Al5Ti1B bileşimine sahip tane incelticide ölçülmüştür.

5. Teşekkür Bölümü

Bu çalışmayı finansal olarak destekleyen Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü 2019-733386352019-73338635 nolu projesine teşekkürlerimizi sunarız.

Referanslar

- Arslan, İ., Gavgalı, E., & Çolak, M. (2019). Kum Kalıba Dökülen Farklı Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Al5Ti1B ve AL10SR İlavesinin Mikroyapı Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7(2), 237–244. <https://doi.org/10.21541/apjes.424920>
- Bahadır, A. (2021). *Ötektik Alüminyum-Silisyum Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Titanyum-Bor İlavesinin Etkisi*. Karabük Üniversitesi.
- Başaranel, M., & Saklakoğlu, N. (2012). Eser Miktarda Mg ve Sn İlavesinin Etial 180 Alüminyum Alaşımına Etkilerinin İncelenmesi. *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 1(8), 61–65.
- Başaranel, M., Saklakoğlu, N., & İrizalp, S. G. (2015). Etial 180 Alüminyum Alaşımına İlave Edilen Mg ve Sn Elementlerinin İntermetalik Fazlara Etkisi - The Influence of Sn And Mg Contents on the Intermetallic Phases of Etial 180 Alloy. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 17–24. <http://dergipark.gov.tr/cbayarfb/issue/4056/53423>
- Batalu, D., Coşmeleață, G., & Aloman, A. (2006). Critical analysis of the Ti-Al phase diagrams. *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, 68(4), 77–90.
- Batool, S. A., Wadood, A., & Rehman, M. A. U. (2019). Comparison of aluminum based alloys reinforced with intermetallic developed by powder metallurgy and arc melting routes. *Soldagem e Inspecao*, 24, 1–11. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI24.19>
- Birol, Yücel. (2009). Al–Ti–B grain refiners via powder metallurgy processing of Al/K2TiF6/KBF4 powder blends. *Journal of Alloys and Compounds*, 480(2), 311–314. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.01.091>
- Birol, Yücel. (2007). Production of Al–Ti–B grain refining master alloys from B2O3 and K2TiF6. *Journal of Alloys and Compounds*, 443(1), 94–98. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.10.009>
- Birol, Yücel. (2008). Production of Al-Ti-B grain refining master alloys from Na2B4O7 and K2TiF6. *Journal of Alloys and Compounds*, 458(1–2), 271–276. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.04.036>
- Bolzoni, L., & Hari Babu, N. (2020). On the grain refining efficacy of Ti-free hypoeutectic AlSi via AlTiB, AlB and AlNbB chemical inoculation. *Journal of Alloys and Compounds*, 817, 152807. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152807>
- Cibula, A. (1972). Discussion of “the mechanisms of grain refinement in dilute aluminum alloys”*. *Metallurgical Transactions*, 3(3), 751–753. <https://doi.org/10.1007/BF02642770>
- Çolak, M., & Dışpınar, D. (2017). Taguchi Approach for Optimization of Parameters that Effect Grain Size of Cast A357 Alloy. *Archives of Foundry Engineering*, 17(4), 35–42. <https://doi.org/10.1515/afe-2017-0127>
- Çolak, Murat. (2020). Tane İnceltici ve Modifiye Edici İlaveli Ötektik Al-Si Alaşımının Kum Kalıba Dökümünde Modelleme Teknikleri İle Kritik Katı Oranının Belirlenmesi. *TURAN : Stratejik Arastirmalar Merkezi*, 12(48), 541–548.

<https://doi.org/DOI:10.15189/1308-8041>

- Çolak, Murat, & Kayıkcı, R. (2009). Alüminyum Dökümlerinde Tane İnceltme. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(1.Sayı), 11–17.
- Davies, I. G., Dennis, J. M., & Hellawell, A. (1970). The nucleation of aluminum grains in alloys of aluminum with titanium and boron. *Metallurgical Transactions*, 1(1), 275–280. <https://doi.org/10.1007/BF02819272>
- Eser, U. A. (2019). *Alümiyum ve Silisyum Alaşımlarında Bor İle Tane İnceltme*. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Gezer, B. T., Toptan, F., Daglılar, S., & Kerti, I. (2010). Production of Al–Ti–C grain refiners with the addition of elemental carbon. *Materials & Design*, 31, S30–S35. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.09.002>
- Gül, F. (2014). AlSi10Mg Döküm Alaşımlarının Bazı Mekanik Özellikleri Üzerine İkincil Yaşlandırma İşleminin Etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18(1), 30–37.
- Kayıkcı, R., Colak, M., Sirin, S., Kocaman, E., & Akar, N. (2015). Determination of the critical fraction of solid during the solidification of a PM-cast aluminium alloy. *Materiali in Tehnologije*, 49(5), 797–800. <https://doi.org/10.17222/mit.2014.266>
- Khaliq, A. (2015). Analysis of Boron Treatment using AlB₂ and AlB₁₂-based Alloys. *Light Metals*, January.
- Li, P., Kandalova, E. G., Nikitin, V. I., Luts, A. R., Makarenko, A. G., & Zhang, Y. (2003). Effect of fluxes on structure formation of SHS Al–Ti–B grain refiner. *Materials Letters*, 57(22), 3694–3698. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00163-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00163-0)
- McCartney, D. G. (1989). Grain refining of aluminium and its alloys using inoculants. *International Materials Reviews*, 34(1), 247–260. <https://doi.org/10.1179/imr.1989.34.1.247>
- Murty, B. S., Kori, S. A., & Chakraborty, M. (2002). *Grain refinement of aluminium and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying*. 1, 3–29.
- Naglič, I., Smolej, A., Doberšek, M., & Mrvar, P. (2008). The influence of TiB₂ particles on the effectiveness of Al–3Ti–0.15C grain refiner. *Materials Characterization*, 59(10), 1458–1465. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matchar.2008.01.008>
- Peeratatsuwana, C., & Chowwanonthapunya, T. (2020). Investigation of the grain refining performance of Al-5Ti-1B master alloy on the recycling process of A356 alloy. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 51(10), 1346–1352. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/mawe.201900210>
- Qiu, D., Taylor, J. A., Zhang, M. X., & Kelly, P. M. (2007). A mechanism for the poisoning effect of silicon on the grain refinement of Al–Si alloys. *Acta Materialia*, 55(4), 1447–1456. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.09.046>
- Quested, T. E., Dinsdale, A. T., & Greer, A. L. (2006). Thermodynamic evidence for a poisoning mechanism in the Al–Si–Ti system. *Materials Science and Technology*, 22(9), 1126–1134. <https://doi.org/10.1179/174328406X114234>
- Samuel, A. M., Mohamed, S. S., Doty, H. W., Valtierra, S., & Samuel, F. H. (2018). Effect of melt temperature on the effectiveness of the grain refining in Al–Si castings. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/7626219>
- Savaş, Ö., Kayıkcı, R., & Köksal, S. (2012). Application of Taguchi Method to Investigate the Effect of Some Factors on In-Situ Formed Flake Structures of AL/ALB₂ Composite. *Advanced Composites Letters*, 21(2), 096369351202100202. <https://doi.org/10.1177/096369351202100202>
- Savaş, Ömer, & Kayıkcı, R. (2013). A Taguchi optimisation for production of Al–B master alloys using boron oxide. *Journal of Alloys and Compounds*, 580, 232–238. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.05.112>
- Şenel, L. (2004). *Al-Si döküm alaşımlarının sıkıştırma döküm yöntemi ile mikroyapı ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi*. Gazi Üniversitesi.
- Sigworth, G. K., & Kuhn, T. A. (2007). *Grain refinement of aluminum casting alloys*.
- Teke, Çolak, M., Taş, M., & İpek, M. (2019). Modeling of the impact of initial mold temperature, Al5Ti1B and Al10Sr additions on the critical fraction of solid in die casting of aluminum alloys using fuzzy expert system. *Acta Physica Polonica A*, 135(5), 1105–1107. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.135.1105>

Wang, S. R., Ma, R., Wang, Y. Z., Wang, Y., & Yang, L. Y. (2012). Growth mechanism of primary silicon in cast hypoeutectic Al-Si alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 22(6), 1264–1269. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61314-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61314-9)

Wang, X. (2005). The formation of AlB₂ in an Al–B master alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 403(1), 283–287. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.04.204>

Yağcı, T., Cöcen, Ü., Çulha, O., & Korkmaz, A. (2021). Alüminyum Döküm Alaşımına Dair Son Yillardaki Akademik ve Endüstriyel Gelişmelere Genel Bakış ve Değerlendirme. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 1191–1210. <https://doi.org/10.17482/uumfd.882586>

Yuan, L., Han, J., Liu, J., & Jiang, Z. (2016). Mechanical properties and tribological behavior of aluminum matrix composites reinforced with in-situ AlB₂ particles. *Tribology International*, 98, 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.01.046>