Doğrusal Katılaştırılmış Yüksek Mg İçeren Al-Mg Esaslı Çoklu Ötektik Alaşımların Mekanik, Elektriksel ve Termal Özelliklerine Katılaşma Hızının Etkisinin İncelenmesi

Program Kodu: 3001

Proje No: 215M342

Proje Yürütücüsü:
Dr. Öğr. Üyesi Burak BİROL

Danışman:
Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI

Bursiyerler:
Fatih KILIÇ
Sercan BASİT

Haziran 2018
İSTANBUL

ÖNSÖZ

“Doğrusal Katılaştırılmış Yüksek Mg İçeren Al-Mg Esaslı Çoklu Ötektik Alaşımların Mekanik, Elektriksel ve Termal Özelliklerine Katılaşma Hızının Etkisinin İncelenmesi” isimli bu projede, doğrusal katılaştırma sistemlerinden biri olan Bridgman sistemi kurulmuş ve %30’un üzerinde magnezyum içeren bazı ötektik alaşımların doğrusal katılaştırma işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen numunelerin mikroyapı özellikleri, mekanik özellikleri (sertlik ve eğme) ile elektriksel öz direnç değerleri belirlenmiştir. Bunun sonucunda artan katılaştırma hızının mekanik özellikleri iyileştirdiği ancak, elektriksel özdirençlerini artırdığı belirlenmiştir. Bunun yanında yüksek magnezyum içeren alaşımların endüstriyel olarak kullanılamayacağı sonucuna varılmış ancak doğrusal katılaştırılmış yüksek magnezyum içeren ötektik alaşımların mikroyapı, mekanik ve elektriksel özellikleri hakkındaki veriler literatüre kazandırılmıştır.

215M342 no’lu bu proje TÜBİTAK tarafından desteklenmiştr.

TÜBİTAK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİL LİSTESİ iv
TABLO LİSTESİ vi
ÖZET vii
ABSTRACT viii
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR ÖZETİ 3
2.1 Al ve Alaşımları 3
2.1.1 Al-Mg Sistemi 3
2.1.2 Al-Mg-Si Sistemi 4
2.1.3 Al-Mg-Si-Fe ve Al-Fe-Mg Sistemi 6
2.1.4 Al-Mg-Zn Sistemi 7
2.1.5 Al-Mg-Ni ve Al-Mg-Ni-Si Sistemi 7
2.2 Kontrollü Katılaştırma 8
2.2.1 Doğrusal Katılaştırma Sistemleri 9
2.2.2 Bridgman Metodu 10
2.2.3 Doğrusal Katılaştırmanın Mikroyapı ve Fiziksel Özelliklere Etkisi 11
2.2.4 Alaşımların Ötektik Katılaştırılması 12
2.2.5 Ötektik Yapılar ve Ötektik Yapıların Sınıflandırılması 14
2.3 Katılaştırma Hızı ve Sıcaklık Gradyanının Mikroyapıya Etkisi 17
2.4 Katılaştırma Hızının Mekanik Özelliklere Etkisi 18
2.5 Elektriksel ve Termal Özelliklerin Belirlenmesi Üzerine Yapılan Bazı Deneysel Çalışmalar ve Katılaştırma Hızının Bu Özelliklere Etkisi 20
3. GEREÇ VE YÖNTEM 24
3.1 a) Alaşım Oluşturma ve Kalıp Doldurma Sisteminin Kurulumu ile Ötektik Alaşım Oluşturma ve Grafit Kalıpların Doldurulması 24
3.2 Doğrusal Katılaştırma İşlemi 27
3.2.1 Bridgman Sisteminin Optimizasyonu 30
3.2.2 Katılaştırma Hızı ve Sıcaklık Gradyanının Ölçülmesi 32
3.3 Numune Hazırlama ve Mikroyapı İncelemesi 33
3.4 Doğrusal katılaştırılmış alaşımların mekanik özelliklerin belirlenmesi 34
3.5 Doğrusal katılaştırılmış alaşımların elektriksel özelliklerin belirlenmesi 35
4. BULGULAR 36

4.1 Mikroyapı Analizleri 36
4.2 Doğrusal Katılaştırmanın Mekanik Özelliklere Etkisi 41
4.2.1 Doğrusal Katılaştırmanın Sertliğe Etkisi 41
4.2.2 Doğrusal Katılaştırmanın Eğme Dayanımına Etkisi 42
4.3 Doğrusal Katılaştırmanın Elektriksel Özelliklere Etkisi 43
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....45
KAYNAKLAR.....47

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Al-Mg Faz Diyagramı (Totten ve MacKenzie 2003; Zolotorevsky vd., 2007) 4
Şekil 2. Al-Mg-Si Sistemi faz diyagramı: (a) likidus, (b) solidus, (c) Al köşesindeki solidus detayı ve (d) Al-Mg_2Si ikili bölgesi(Belov vd., 2005) 5
Şekil 3. Al20Mg4Si alaşımının as-cast morfolojisi (Yan vd., 2012) 6
Şekil 4. a) Al-Fe-Mg-Si, b) Al-Fe-Mg faz sistemi (Belov vd., 2005) 6
Şekil 5. Al-Mg-Zn faz sistemi (Belov vd., 2005) 7
Şekil 6. a) Al-Mg-Ni, b) Al-Mg-Ni-Si faz sistemi (Belov vd., 2005). 8
Şekil 7. Çeşitli doğrusal katılaştırma teknikleri (Capper, 2010) 10
Şekil 8. Bridgman katılaştırma prensibinin şematik gösterimi (Boschert vd., 2003) 11
Şekil 9. Doğrusal katılaştırma yöntemiyle katılaştırılmış farklı alaşımlarda gözlemlenen mikroyapılar (Böyük, 2009).....12
Şekil 10. İki bileşenli ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı oluşumu (Böyük, 2009; Engin, 2013; Jaafar, 2013) 13
Şekil 11. Üç bileşenli ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı oluşumu (Böyük, 2009; Engin, 2013; Jaafar, 2013) 14
Şekil 12. Farklı ötektik yapıların şematik gösterimi (a) Lamelsel ötektik (Pb-Sn), (b) Çubuksal ötektik (Cu-Cr), (c) Küresel ötektik (Cu-CrO), (d) Karmaşık Düzenli ötektik (Al-Si). (e) Çin yazısı yapı (Al-Si-Mg) (Kaygısız, 2014).....16
Şekil 13. Doğrusal katılaştırılmış üçlü ötektiklerin sınıflandırılması (a-a*) Üçlü lamelsel büyüme, (b) Bir lifli, iki lamelsel büyüme, (c) İki lifli, bir lamelsel büyüme, (d) Bir ana faz, iki lifli büyüme, (e) Üçlü lifli büyüme. (Böyük, 2009; Engin, 2013; Jaafar, 2013) 16
Şekil 14. Ötektik mesafenin değişimi: (a) artan büyütme hızı ile, sabit sıcaklık gradyanında (G=7,8 K/mm), (b) artan sıcaklık gradyanı ile, sabit büyütme hızında (V= 8,3μm/s) (λM; maksimum ötektik mesafe, λc; kritik ötektik mesafe, λm; minimum ötektik mesafe, λa; ortalama ötektik mesafe.) (Gündüz vd., 2004).....17
Şekil 15. Mikrosertlik değişimi: (a) artan sıcaklık gradyanı ile, sabit büyütme hızında (V= 8,3μm/s), (b) artan büyütme hızı ile, sabit sıcaklık gradyanında (G=7,8 K/mm), (c) artan ötektik mesafe ile, sabit büyütme hızında (V= 8,3μm/s), (d) artan ötektik mesafe ile, sabit sıcaklık gradyanında (G=7,8 K/mm) (Hv*; boyuna kesitteki sertlik, Hv**; enine kesitteki sertlik, λ*; boyuna kesitteki ötektik mesafe, λ**; enine kesitteki ötektik mesafe) (Kaya vd., 2003b).....19
Şekil 16. G=9,39 K/mm sıcaklık gradyanında doğrusal katılaştırılmış Al-Si-Mg ötektik alaşımının (Al-%12.95Si-%4.96Mg (ağ.)) çekme-dayanım değerlerinin (a) katılaştırma hızı ve (b) ötektik mesafe ile değişimi (Kaygısız, 2014) 19

Şekil 17. G=9,39 K/mm sıcaklık gradyanında doğrusal katılaştırılmış Al-Si-Mg ötektik alaşımının (Al-%12.95Si-%4.96Mg (ağ.)) elektriksel öz direnç değerlerinin (a) katılaştırma hızı ve (b) ötektik mesafe ile değişimi (Kaygısız, 2014) 22
Şekil 19. Alaşımların hazırlandığı vakumlu ergitme fırını 25
Şekil 22. (a) Kılcal tüplü grafit kalıbın şematik çizimi (b) İçi metal doldurulmuş grafit numune, (c) kılcal tüplü olarak hazırlanmış numune 27
Şekil 23. Doğrusal katılaştırma sisteminin şematik görünümü 27
Şekil 24. Doğrusal katılaştırma sisteminin fotoğrafı 28
Şekil 25. Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırınının içyapısı (a) Fırının sıcak ve soğuk bölgeleri, (b) Numune kalıbı. 30
Şekil 26. Doğrusal katılaştırma işleminden sonra elde edilen ürünün (a) grafit tüpten çıkarıldıktan sonraki ve (b) bakalite alınıp metalografik hazırlıktan sonraki görüntüsü 31
Şekil 27. Doğrusal katılaştırılmış Al-33,2 Cu ötektik alaşımının 10, 20, 50 ve 100 büyütmelerdeki mikroyapıları 31
Şekil 29. Al-32,2Mg-0,37Si alaşımı için proses boyunca gerçekleşen sıcaklık farkları 33
Şekil 33. Al-32,2Mg-0,37Fe alaşımının (a) ani soğutulmuş, (b) 75 µm/s ve (c) 150 µm/s hızlarda katılaştırılmış mikroyapıları (10X) 37
Şekil 34. Al-32,2Mg-0,37Si alaşımının (a) ani soğutulmuş, (b) 75 µm/s ve (c) 150 µm/s hızlarda katılaştırılmış mikroyapıları (10X) 37
Şekil 35. Al-32Mg-1,7Ni alaşımının (a) ani soğutulmuş, (b) 15 µm/s (c) 75 µm/s ve (d) 150 µm/s hızlarda katılaştırılmış mikroyapıları (10X) 38
Şekil 36. Al-12.95Si-4.96Mg alaşımının (a) ani soğutulmuş (10X), (b) ani soğutulmuş (50X), (c)15 µm/s (10X), (d) 75 µm/s (10X), (e) 75 µm/s (50X), (f) 150 µm/s (10X) ve (f) 150 µm/s (50X) hızlarda katılaştırılmış mikroyapıları 38
Şekil 37. 15 µm/s hızla katılaştırılan Al-32,2Mg-0,37Fe alaşımının bölgesel EDS analizi.....39
Şekil 38. 150 µm/s hızla katılaştırılan Al-12.95Si-4.96Mg alaşımının noktasal EDS analizi...40
Şekil 39. Al-32,2Mg-0,37Fe, Al-32,2Mg-0,37Si, Al-32Mg-1,7Ni ile Al-12.95Si-4.96Mg alaşımlarının katılaştırma hızına göre sertlik değişimleri 41
Şekil 40. (a) Al-32,2Mg-0,37Fe, Al-32,2Mg-0,37Si, Al-32Mg-1,7Ni ile (b) Al-12.95Si-4.96Mg alaşımlarının katılaştırma hızına göre eğme dayancı (maksimum gerilim) değişimleri 43
Şekil 41. (a) Al-32,2Mg-0,37Fe, Al-32,2Mg-0,37Si, Al-32Mg-1,7Ni ile (b) Al-12.95Si-4.96Mg alaşımlarının katılaştırma hızına göre elektriksel özdirenç değişimleri 43

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Alüminyumda bazı alaşım elementlerinin etkileri..... 3
Tablo 2 Al-Mg-Si sistemindeki noktasal reaksiyonlar..... 5
Tablo 3. Mg-Al master alaşımı ve deneylerde kullanılan alaşımların, XRF analiziyle elde edilen ortalama kompozisyonları (% ağ.).....25

ÖZET

Ticari malzemelerin büyük bir kısmı çok bileşenli alaşımlardan oluşmakla beraber, özellikleri ise genellikle katılaşma ve diğer ara işlemler (ısıl işlem, vb.) sonucunda elde edilen mikroyapısal özellikleri ile belirlenmektedir. Malzeme bilimindeki en önemli problemlerden biri, çok fazlı mikroyapıların oluşumunu ve alaşım kompozisyonu ile proses parametrelerinin bu yapıya yaptığı etkileri belirlemektir. Çok bileşenli alaşımlarda çok fazlı katılaştırma işleminin parametreleri, birçok ticari malzeme ve endüstriyel proseslerde ürün kalitesi ve proses verimi açısından büyük önem arz etmektedir. Üçlü ve daha çok bileşenli alaşımların çok fazlı katılaştırılması konusundaki araştırmalar, son birkaç yıl içerisinde önemli bir artış göstermektedir.

Bu proje kapsamında doğrusal katılaştırma yöntemlerinden biri olan Bridgman doğrusal katılaştırma sistemi ve bu sisteme numune sağlayacak olan vakumlu alaşımlandırma ile kalıp doldurma sistemi kurulmuştur. Sistemin doğruluğunu test etmek amacıyla literatürde karşılaştırılabilecek verileri olan Al-12.95Si-4.96Mg ötektik alaşımı incelenmiş ve sonuçların literatürle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında daha önce doğrusal katılaştırılması çalışılmamış olan ve %30'un üzerinde Mg içeren Al-32,2Mg-0,37Si;; Al-32Mg-1,7Ni ve Al-32,2Mg-0,37Fe ötektik alaşımları 15, 75 ve 150 μm/s hızlarda doğrusal katılaştırılmıştır. Elde edilen numunelerin mikroyapı, mekanik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, Al-32,2Mg-0,37Si; Al-32Mg-1,7Ni ve Al-32,2Mg-0,37Fe 'nin benzer mikroyapı, mekanik ve elektriksel özelliklere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca artan katılaşma hızıyla tüm bu mekanik özelliklerinin (sertlik ve eğme mukavemeti) arttığı ve bununla beraber elektriksel özdirençlerinin azaldığı görülmüştür. Aynı zamanda bu alaşımların bünyelerinde kırılgan β-Al_3Mg_2 fazı olması ve doğrusal katılaştırma ile yeterince yüksek mukavemete çıkılamaması ve elektriksel iletkenliğinin de düşük olması nedeniyle ticari bir ürün olmaktan uzak görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Mg içeren çoklu Al alaşımları, Doğrusal katılaştırma, Mekanik Özellikler, Elektriksel iletkenlik

ABSTRACT

While most of the commercial materials are generally composed of multicomponent alloys, their properties are generally determined by the micro-structural properties obtained from solidification and some other processes (heat treatment, etc.). One of the most important problems in material science is to determine the formation of multiphase micro-structures and the effect of both alloy composition and process parameters on these structures. The multiphase solidification parameters of multicomponent has a crucial importance on product quality and process efficiency. The research on multiphase solidification of alloys containing three or more components shows a significant increase for the last few years.

In this project, one of the directional solidification methods, the Bridgman directional solidification system and additionally the vacuum alloying and the mold filling system, which will provide samples to this system, have been established. In order to test the accuracy of the system, Al-12.95Si-4.96Mg eutectic alloy, of which the comparable data is present in the literature, was examined and it was observed that the results were consistent with the literature. However, Al-32.2Mg-0.37Si, Al-32Mg-1.7Ni and Al-32.2Mg-0.37 Fe eutectic alloys, which has not been studied previously for directional solidification and contain more than 30% Mg; alloys were directionally solidified at 15, 75 and 150 μm/s. Microstructure, mechanical and electrical properties of the obtained samples were investigated.

According to the results obtained, It has been observed that Al-32.2Mg-0.37Si, Al-32Mg-1.7Ni and Al-32,2Mg-0.37Fe have similar microstructure, mechanical and electrical properties. In addition, with increasing solidification rate, all these mechanical properties (hardness and bending strength) increased and the electrical resistivities decreased. At the same time, these alloys have a brittle β-Al_3Mg_2 phase in their structure and are not considered to be a commercial product because of their inability to achieve sufficiently high strength by directional solidification and their low electrical conductivity.

Keywords: High Mg containing multicomponent Al alloys, Directional solidification, Mechanical Properties, Electrical conductivity

1. GİRİŞ

Kontrollü katılaştırma prosesi, homojen bileşim elde etme, tek kristal büyütme ve saflaştırma (bölgesel rafinasyon) gibi proseslerde kullanılmaktadır. Bu proses, ticari olarak çoğunlukla yarı iletken kristallerin büyütülmesi, oksit lazer sistemleri, termal ve mekanik dayanımı yüksek savunma sistemleri ile diğer optik uygulamalarda kullanılmaktadır. Aynı zamanda çoğu döküm alaşımının temeli ötektik alaşımlara dayanmaktadır. Ötektik mikroyapıyı kontrol eden en önemli iki parametre, katılaştırma parametreleri (sıcaklık gradyanı ve tane büyütme hızı) ile ötektik mesafedir. Ötektik alaşımların katılaştırma davranışı ve mikroyapı karakteristikleri, ötektik bileşimleri içeren alaşımların özellik ve performanslarına yaptığı etki nedeniyle ilgi çeken bir konudur.

Çok bileşenli ve çok fazlı sistemlerin katılaştırılma davranışları, bu malzemelerin çeşitli özelliklerinin belirlenmesi konusunda önemli bir parametredir. Bugüne kadar yapılan çalışmalar, çoğunlukla saf veya iki bileşenli alaşımların tek fazlı (katı çözelti) veya çift-fazlı alaşımların katılaştırılması üzerine yapılmıştır. Ancak çok bileşenli alaşımların katılaştırılması esnasında meydana gelen çok fazlı reaksiyonların ve mikroyapı oluşumu hakkında literatürde çok fazla bilgi bulunmamaktadır. Bu sebeple çok fazlı alaşımların mikroyapı oluşumu ve bu alaşımların termodinamiksel, termofiziksel ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi önem arz etmektedir.

Son yıllarda yüksek mukavemet ve düşük yoğunluğa sahip Al alaşımları hakkındaki çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle Al-Mg alaşımları, düşük yüzey pürüzlülüğü, kimyasal bitirmeye uygunluk, korozyon dayanımı ve süneklik ile mukavemetin bir arada bulunması gibi üstün özelliklere sahiptir. Normalde %4 ile 10 arasında Mg içeren alaşımlar hakkında birçok çalışma bulunmasına rağmen, magnezyumun kolay oksitlenmesi sebebiyle üretimi zor olmaktadır ve bu sebeple daha yüksek Mg içeren alaşımlar hakkında halen geniş kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır. Al alaşımları içerisinde Mg artışı ile birlikte özgül ağırlıkta azalma ve dayanımda ufak bir artış görülmekle beraber kırılgan β-Al_8Mg_5 fazının artmasıyla süneklilik düşüş göstermektedir. Bu sebeple yüksek Mg içeren alaşımların oluşturulması, özelliklerinin incelenmesi ve geliştirilmesi, yeni ileri mühendislik malzemelerinin üretilmesine önayak olacaktır.

Bu projenin özgün değeri, endüstriyel olarak üretimi zor olan ve yüksek Mg içeren (>%30 Mg) Al esaslı çoklu alaşımların vakum altında ergitilerek oluşturulması, kontrollü doğrusal katılaştırma sistem ile sabit bir sıcaklık gradyanında ve farklı büyütme hızlarında katılaştırılması ve katılaştırma hızı ile mikroyapı, mekanik, elektrik ve termal özellikler

arasındaki ilişkinin kurulmasıdır. Bu sebeple proje kapsamında literatürde daha önce çalışılmamış >%30 Mg içeren çeşitli üçlü Al alaşım bileşimleri belirlenmiş ve doğrusal katılaşma hızının bu alaşımların mekanik, elektriksel özelliklerine etkileri incelenmiştir.

Projenin öncelikli amacı; çok bileşenli alüminyum esaslı Al-32,2Mg-0,37Si; Al-30Mg-12Zn; Al-32Mg-1,7Ni; Al-32,2Mg-0,37Fe; (% Ağ.) ötektik alaşımlarının farklı hızlarda ve sabit sıcaklık gradyanında kontrollü doğrusal katılaştırılması ve katılaştırma hızının mikrosertlik, çekme dayanımı ve elektriksel iletkenliğe etkisinin araştırılması ve optimum proses parametrelerinin belirlenmesidir.. Bu sayede proje sürecinde ulaşılması amaçlanan 1. hedef doğrusal katılaşma uygulamalarında proses zamanını ve enerji harcamalarının indirgenmesini sağlamak, 2. hedef ise böylece doğrusal katılaşmanın endüstriyel uygulanabilirliğinin arttırılmasını sağlanmaktır.

Proje için seçilen alaşımlar yüksek magnezyum içeriği nedeniyle özellikle düşük yoğunlukları açısından teknolojik olarak önemli ancak yine yüksek magnezyum içeriği nedeniyle endüstriyel olarak üretimleri zor alaşımlardır. Bu sebeple 2. amaç yüksek magnezyum içeren alüminyum alaşımlarının üretiminde yenilikçi yollar ortaya koyulmasıdır. Proje süresince yüksek magnezyum içeren Al-Mg esaslı çok bileşenli alaşımların üretiminde hali hazırda kullanılmakta olan yöntemlerin yanında yeni geliştirilecek yöntemlerin uygulanmasının denenmesi ve sonuçlarının irdelenmesi de hedeflenmektedir. Böylece endüstriyel açıdan bu alaşımların, hem üretimlerinin kolaylaştırılmasını hem de yeni kullanım alanlarının oluşturulmasını sağlayacak yeni fonksiyonel bir üretim prosesinin ortaya konulması amaçlanmaktadır.

Proje tamamladığında literatüre yeni değerler kazandırılmasının yanı sıra bu malzemeleri kullanacak mühendis ve bilim adamlarına da Al-Mg esaslı bu alaşımların bilinmeyen özelikleri hakkında önemli bilgi ve veriler elde edilirken aynı zamanda katkı elementlerinin Al-Mg esaslı çoklu alaşımların mekanik ve elektriksel iletkenliğe ne tür bir katkı sağlayabileceği de belirlenmiş olacaktır. Proje çalışmaları sürecinde aktif olarak çalışacak olan personellerle akademi ve endüstri için deneyimli insan gücü de yetiştirilmesine katkı sağlanacaktır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Al ve Alaşımları

Dünyada en fazla mevcut metaller sıralamasında alüminyum ikinci sırayı almaktadır. Alüminyum metalinden muhtelif alaşımlama ve farklı ısıl işlem şartı ile çok farklı fiziksel ve mekanik özellikler elde etmek mümkün olmuştur. Endüstriyel uygulama amacı için dört yüze yakın sayıda alüminyum alaşımı geliştirilmiştir. Alüminyum alaşımlarının düşük yoğunluğu, kolay şekillendirilebilmesi, yüksek korozyon direnci, geliştirilebilen fiziksel ve mekanik özelliklerine sahip olması bu alaşımların kullanım alanını artırmaktadır. Tablo 1'de proje kapsamında çalışılması planlanan alaşım elementlerinin alüminyumun yapısına etkileri genel olarak verilmiştir.

Tablo 1. Alüminyumda bazı alaşım elementlerinin etkileri

Nitelikler	Mg	Si	Zn	Ni	Fe
Kopma mukavemeti	+	+	++	+	
Elastik sınır	-	+	+	-	
Sertlik	-		-	+	+
Isıl dayanıklılık	++			+	+
Kaynak kabiliyeti	+	++	-	-	
Talaş kaldırma ile işlenebilirlik	+	-	+	+	++
Elastik modülü	-	++	+	+	-
Döküm kabiliyeti	-	++	+		-
Süneklik	+	--			--
Korozyona Dayanım	++	+	+		--
Anadizasyona elverişsizlik	++	+	+		

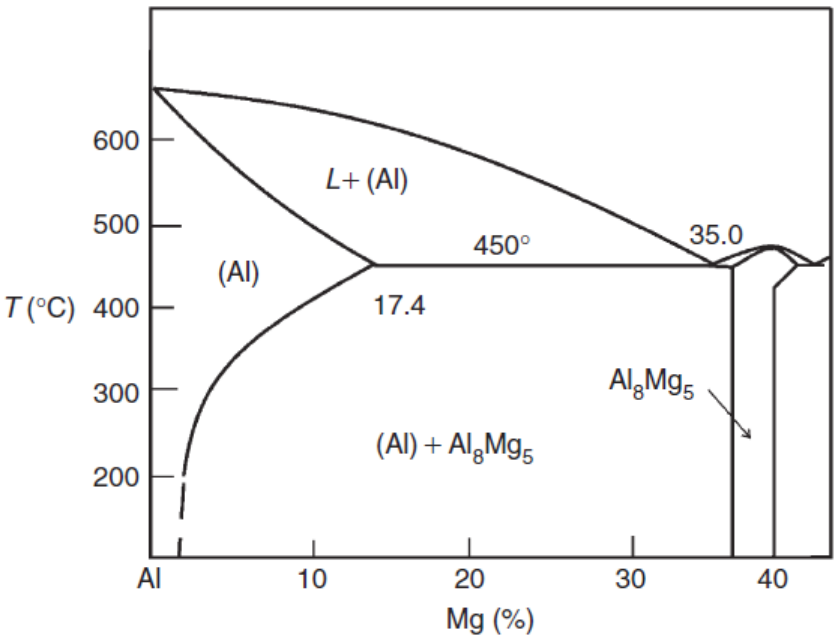
(+ + : önerilir + :iyi — — : kaçınılacak — : ortanın altında)

Alüminyumu sertleştirici bütün elementler ısıl ve elektriksel iletkenliği ile uzamayı azaltmaktadır, ancak Isıl işlemler ile şekil değiştirme ve sertlik özellikleri değiştirilebilmektedir. Çinko ise genellikle başka elementlerle birlikte % 10'a kadar, Mg_2Zn gibi sert ara fazlarının oluşmasıyla mekanik nitelikleri iyileştirmek için kullanım alanı bulabilmektedir (Totten ve Mackenzie 2003; Zolotorevsky vd., 2007).

2.1.1 Al-Mg Sistemi

Magnezyum ilavesi alüminyumun özgül ağırlığını doğrusal olarak düşürmektedir (Her %1 Mg ilavesi için %0,5 düşüş).Aynı zamanda %35 oranında Mg, ötektik bir nokta oluşturmaktadır (Şekil 1). Ayrıca Mg, Al içerisinde 450 °C'de %14,9 oranında yüksek bir çözünürlük

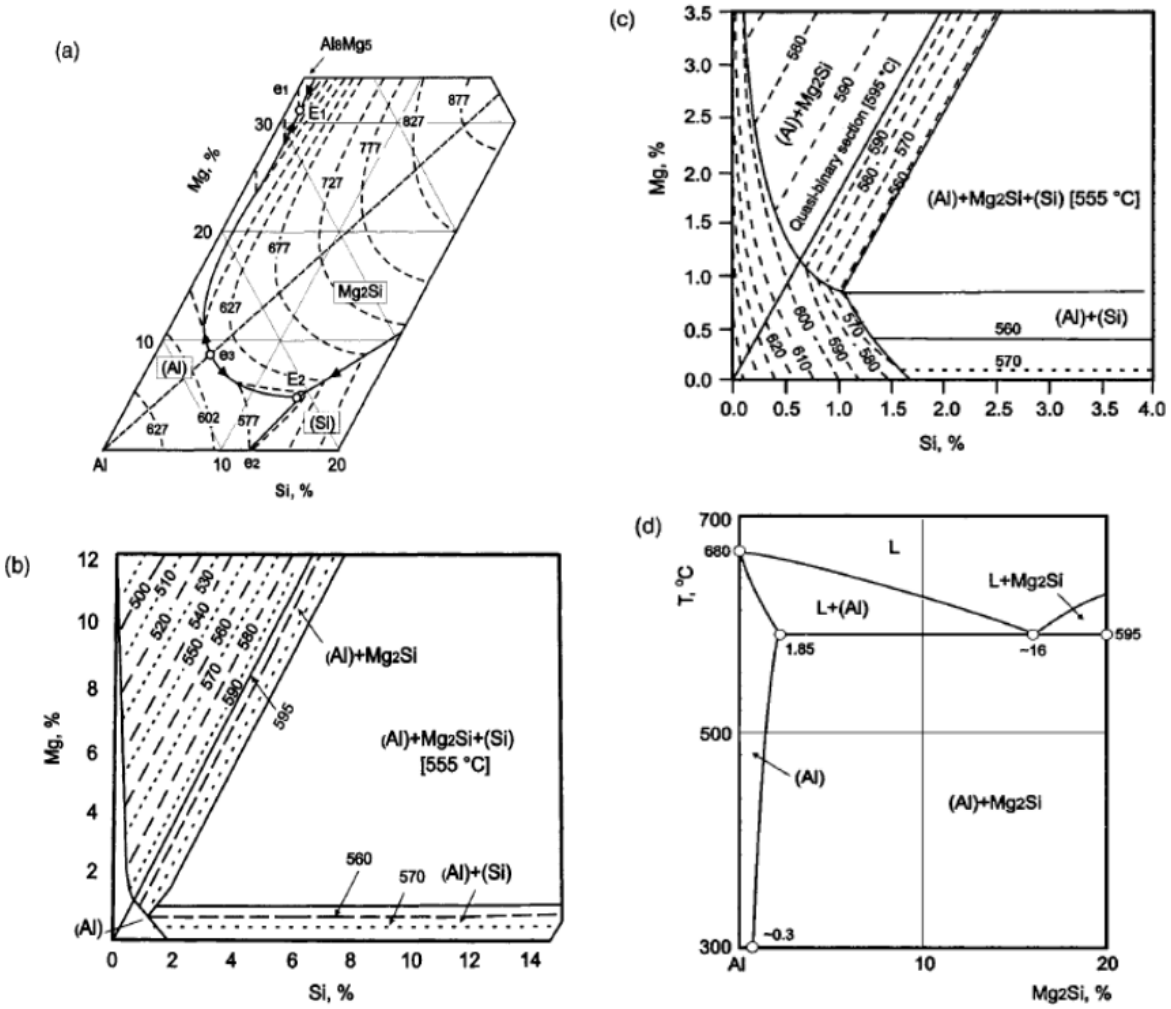
göstermekte iken oda sıcaklığında bu çözünürlük %1,7'ye kadar düşmektedir. Buna rağmen ikili Al-Mg alaşımı yaşlandırma sonunda çok düşük oranda mukavemet artışı göstermektedir. Ancak artan Mg miktarıyla akma ve çekme mukavemeti ile korozyon dayancı artmaktadır. İkili alaşımda oluşan kırılgan β-Al_8Mg_5 fazının artmasıyla süneklilik düşüş göstermektedir. Bu sebeple genellikle çeşitli alaşım elementleri ile üçlü veya dörtlü sistemler oluşturularak Al-Mg alaşımlarının özelliklerinden yararlanırken dezavantajları giderilmeye çalışılmaktadır (Yan vd., 2012; Totten ve MacKenzie 2003). Buna ek olarak ısıl işlem gibi mikroyapı değiştirecek işlemler de bu dezavantajları gidermede kullanılabilmektedir (Tie vd., 2015; Mrówka-Nowotnik ve Sieniawski 2005; Yan vd., 2012). Bazı durumlarda ise ısıl işlem, alaşım elementi ve/veya tane inceltici ilavesinde olduğu gibi kontrollü doğrusal katılaştırma işlemiyle de önceden belirlenmiş mikroyapıya ulaşılabilmektedir (Wang vd., 2013).



Şekil 1. Al-Mg Faz Diyagramı (Totten ve MacKenzie 2003; Zolotorevsky vd., 2007)

2.1.2 Al-Mg-Si Sistemi

Üçlü alüminyum alaşımlarında en çok karşılaşılan sistem Al-Mg-Si sistemidir (Şekil 2). Bu sistem ticari olarak düşük Mg ve düşük Si miktarlarıyla kullanılmakla beraber, genellikle Al ile Mg_2Si'den oluşan ikili bir sistem gibi davranmaktadır (Şekil 2 d, Tablo 2). Sistemde artan Mg miktarı ile de Al_8Mg_5 meydana gelmeye başlayacaktır (Belov vd., 2005).



Şekil 2. Al-Mg-Si Sistemi faz diyagramı: (a) likidus, (b) solidus, (c) Al köşesindeki solidus detayı ve (d) Al-Mg_2Si ikili bölgesi(Belov vd., 2005)

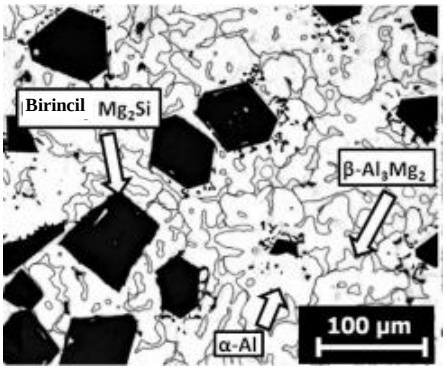
Tablo 2 Al-Mg-Si sistemindeki noktasal reaksiyonlar

Reaksiyon	Şekil 2 a'daki nokta	Ergime Sıcaklığı (°C)	Sıvı Fazdaki Konsantrasyonları (%Ağ.)	
			% Mg	% Si
L → (Al) + Mg_2Si	e_3	595	8,15	7,75
L → (Si) + Mg_2Si	E_2	555	4,96	12,95
L → Mg_2Si + Al_8Mg_5	E_1	449	32,2	0,37

Düşük Mg içeren bir Al-3Mg-1Si alaşımının doğrusal katılaştırılmasının yapıldığı bir çalışmada ise katılaştırma hızı ve uç soğutma sıcaklığının, diğer bir deyişle ısı gradyanının, son mikroyapıdaki ve dolayısıyla malzeme sertliğine etkisini ortaya koymuşlardır (Brito vd., 2015). Ötektik ve ötektik üstü Al-Mg_2Si içeren alaşım incelenen başka bir çalışmada ise artan katılaştırma hızının Mg_2Si çok düzlemli morfolojisinin dendritiğe döndüğü gözlemlenmiştir (Ourfali vd., 2005). %15 Mg_2Si içeren ötektik üstü bir Al-Mg-Si alaşımında

fazla Si'un etkilerini inceleyen çeşitli çalışmalarda %2 oranına kadar artan Si miktarının ötektikteki Mg_2Si boyutunu ve hacimsel α-Al oranını düşürdüğünü, bunun yanında %7'ye kadar arttıkça da birincil Mg_2Si boyutunu artırdığını gözlemlemişlerdir. Bu da uzama değerleri ve çekme mukavemetinin artması ile sonuçlanmıştır (Li vd., 2009; Nasiri vd., 2012; Zhang vd., 2000).

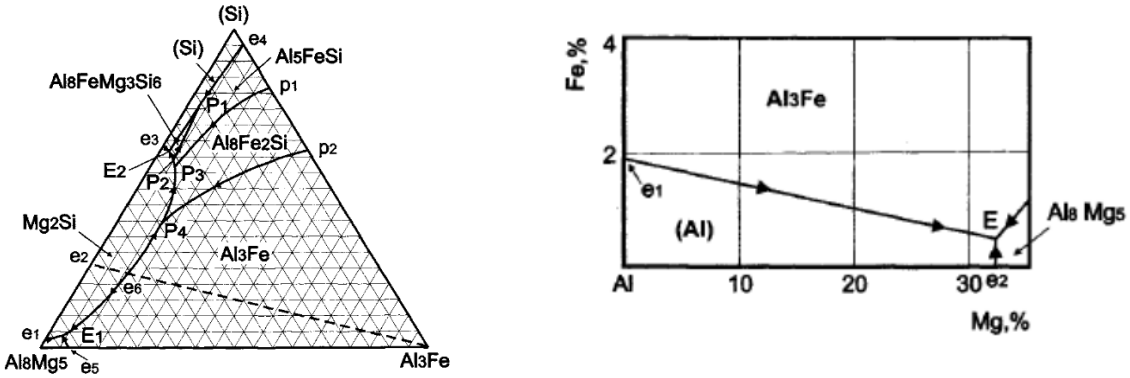
%20 Mg ve %4 Si içeren bir Al alaşımının as-cast morfolojisi incelendiğinde mikroyapıda α-Al dendritleri arasında β-Al_3Mg_2 ötektiğinden oluşan bir matriks içerisinde Mg_2Si büyük parçalar halinde (52 ± 4 μm) bulunduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3) (Yan vd., 2012). Literatürde yüksek Şekil 2a'da E_1 olarak gösterilen Al-32,2Mg-0,37Si ötektik alaşımının morfolojisinin ve özelliklerinin belirlenmemiş olması literatürde bir boşluk yaratmaktadır.



Şekil 3. Al20Mg4Si alaşımının as-cast morfolojisi (Yan vd., 2012)

2.1.3 Al-Mg-Si-Fe ve Al-Fe-Mg Sistemi

Demir, alüminyum alaşımlarında bulunması istenmeyen bir element olmasına rağmen, tane inceltici özelliklerinden dolayı düşük bir miktar bulunmasına izin verilmektedir. Ticari olarak en fazla %2 oranında Fe içeren Al alaşımları, nispeten düşük Mg ve Si içermektedir. Şekil 4a'da Al_8Mg_5, Al_3Fe ve Si üçlü faz diyagramı verilmektedir (Belov vd., 2005).



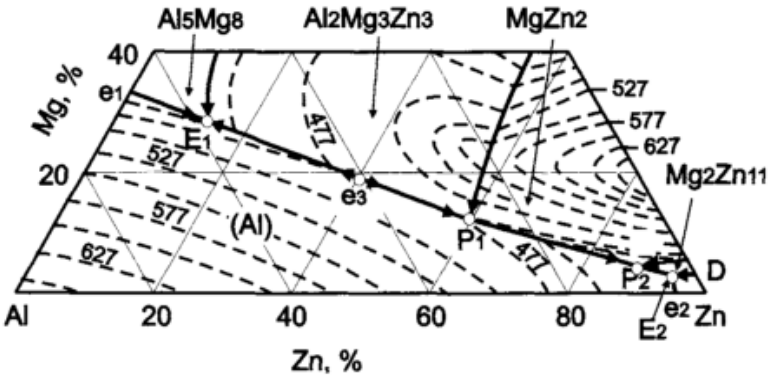
(a) (b)

Şekil 4. a) Al-Fe-Mg-Si, b) Al-Fe-Mg faz sistemi (Belov vd., 2005)

Şekil 4a'da verilen yüksek Mg içeren ötektik nokta E_1 ile verilmektedir. E_1 noktası katılaşırken, yapı içerisinde (Al), Al_3Fe, Al_8Mg_5 ve Mg_2Si fazları oluşmaktadır. Bu ötektik noktanın ergime sıcaklığı 448°C olup, sıvı haldeki bileşimi içerisinde %0,11 Fe, %33,3 Mg ve %0,35 Si içermektedir. Şekil 4 b'de ise Al-Fe-Mg sisteminin faz diyagramı verilmektedir. E ile gösterilen ötektik noktanın ergime sıcaklığı 449 °C olup %32,2 Mg ve %0,37 Fe içermektedir. Katılaşma esnasında ise oluşan fazlar ise Al_3Fe ve Al_8Mg_5'ten ibarettir (Belov vd., 2005).

2.1.4 Al-Mg-Zn Sistemi

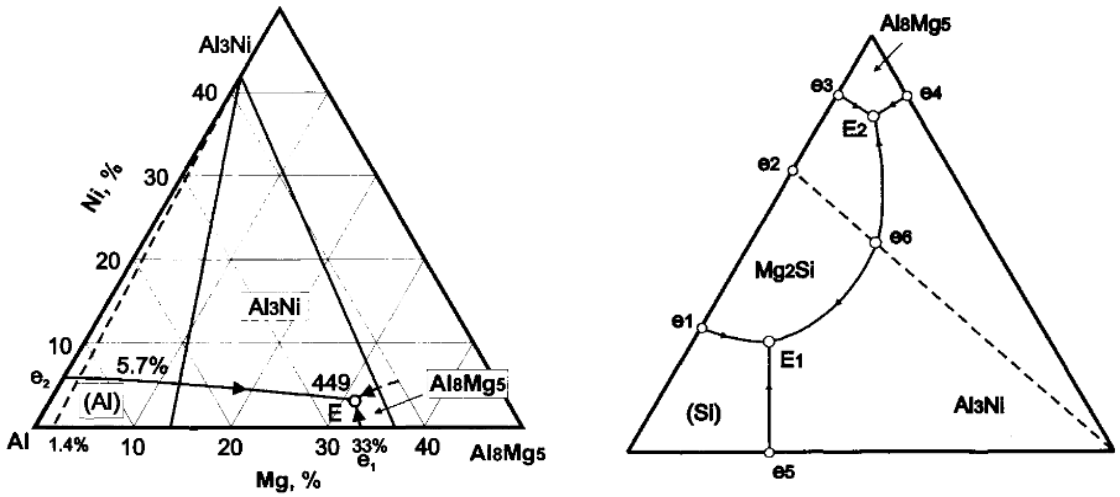
Alüminyuma eklenen çinko, dökülebilirği düşürmekle beraber, yüksek çinkolu alaşımlar sıcak çatlama ve soğuma çekmesi ve özellikle %10 Zn'dan yüksek gerilmeli korozyon çatlaması göstermektedir. Bu dezavantajlarının yanında diğer alaşım elementleriyle birlikte dayancı çok artırmaktadır.%3'ten daha az Zn ise ikili alüminyum alaşımlarda belirli bir etki göstermemektedir. Şekil 5'te Al-Mg-Zn sisteminin faz diyagramı verilmektedir. Şekilde belirtilen E_1 ötektik noktası, %30 Mg ve %12 Zn içermekle beraber ergime noktası 447 °C'dir. Bu faz katılaşırken (Al), Al_8Mg_5 ve $Al_2Mg_3Zn_3$ fazları oluşmaktadır. Bu fazlar sırasıyla %13 Mg, %2 Zn; %34 Mg, %10 Zn ve %30 Mg ve %26 Zn içerebilmektedirler (Belov vd., 2005).



Şekil 5. Al-Mg-Zn faz sistemi (Belov vd., 2005)

2.1.5 Al-Mg-Ni ve Al-Mg-Ni-Si Sistemi

Nikel alüminyum alaşımlarına yüksek olmayan yüzdelerde katıldığı takdirde dayanım ve sertliği artırır. Alaşıma parlaklık ve yansıtıcılık vererek yüzey kalitesini yükseltir. Yüksek demir yüzdelerinin olumsuz etkilerini dengeler. Genellikle yüksek sıcaklıklarda, yüksek dayanım ve sertlik istenen alaşımlara katılır. Alaşımlardaki nikel miktarı % 0.5-3.0 arasında değişir. Şekil 6a ve b'de sırasıyla Al-Mg-Ni ve Al-Mg-Ni-Si faz diyagramları verilmektedir. Al-Mg-Ni sisteminde 449 °C'de ergiyen tek bir ötektik bulunmakta (E) ve sıvı halde % 1.7 Ni ve %32 Mg içermektedir. Katılaştırma esnasında oluşacak fazlar ise (Al), Al_3Ni ve Al_8Mg_5 olmaktadır (Belov vd., 2005).



(a) (b)

Şekil 6. a) Al-Mg-Ni, b) Al-Mg-Ni-Si faz sistemi (Belov vd., 2005).

Şekil 6b'de verilen Al-Mg-Ni-Si faz sisteminde ise E_1 ve E_2 olmak üzere iki ötektik nokta bulunmaktadır. Yüksek Mg içeren E_2 noktasında ergime sıcaklığı yaklaşık olarak 447 °C olarak verilmektedir. Bu nokta, sıvı halde içerisinde yaklaşık %32 Mg, <%1,7 Ni ve <%0,4 Si içermektedir. Katı haldeyken ise içerisinde (Al), Mg_2Si ve Al_3Ni ve Al_8Mg_5 bulundurmaktadır (Belov vd., 2005).

2.2 Kontrollü Katılaştırma

İstenilen özelliklerde malzeme üretimi çalışmaları, malzemeleri kontrollü olarak katılaştırmayla başlar. Yapılan çalışmalarda farklı şartlar altında yapılan katılaştırmalar, farklı mikroyapı parametrelerine sahip malzeme üretilmesini, malzemelerin mikro yapılarının değiştirilmesi ise malzemenin fiziksel, mekaniksel, termal ve elektriksel özelliklerinin değişmesine yol açmaktadır. Son yıllarda, katılaştırma parametreleri ile mikroyapı parametreleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için saf maddeler ve ikili metalik alaşımların doğrusal katılaştırılması üzerine çok sayıda teorik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır (Çadirli ve Gündüz 2000; Norlund ve Trivedi 2000; Milenkovic vd., 2000; Chen ve Davis 2002; Gündüz vd., 2004; Cadirli vd., 2003; Kaya vd., 2003a).

Katılaştırmanın kontrollü yapılmasındaki amaç üretilen malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmek ve katılaştırma parametrelerinin fiziksel ve mekaniksel özelliklerine etkisini ortaya koymaktır. Son zamanlarda ise doğrusal katılaştırma deneyleri düşük katılaştırma hızlarında üçlü veya daha fazla bileşene sahip alaşımlar üzerine yoğunlaşmaya başlamıştır (Vetrano vd., 1997; Hu vd., 2012; Ding vd., 2005; Dzib-Pérez vd., 2006).

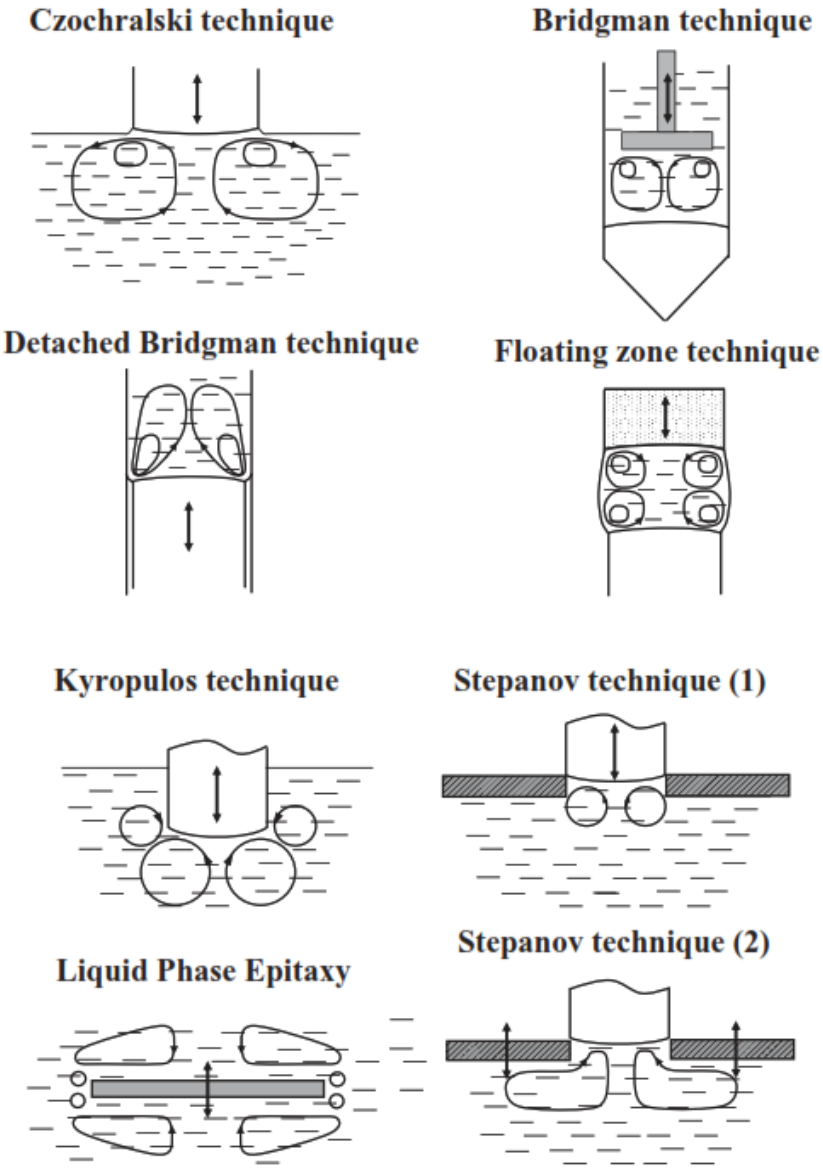
Katılaşma olayını açıklayabilmek, ötektik mesafe (λ_E) ile katılaştırma parametreleri olan sıcaklık gradyanı (G) ve katılaştırma hızı (V) arasındaki ilişkileri bulabilmek için, araştırmacılar tarafından teorik modeller geliştirilmiş ve birçok deneysel çalışmalar yapılmıştır (Zhang vd., 2010; Hekmat-Ardakan ve Ajersch 2010a; Fan vd., 2010; Fuller vd., 2003; Rios vd., 2002; Basavakumar vd., 2008; Souza vd., 2005; Wang vd., 2009; Hekmat-Ardakan ve Ajersch 2010b; Böyük vd., 2009; Ceschini vd., 2009). Alaşımların doğrusal katılaştırılmasında kontrol parametresi olarak alaşımın bileşimi, uygulanan sıcaklık gradyanı ve katılaştırma hızı olarak sıralanır. Ötektik alaşımların ötektik bileşimde katılaştırılması özellikle arzulan bir durumdur çünkü ötektik bileşimde katılaşma aralığı sıfıra yakın olup saf maddelerin katılaşma özelliğine benzer özellik gösterdiğinden katılaşma esnasında segregasyon olayı olmaz. Bu yüzden ötektik bileşimde çalışıldığı zaman bileşim sabitlenmiş olur. Dolayısıyla ötektik bileşimde katılaştırmada kontrol parametresi, uygulanan sıcaklık gradyanı ve katılaştırma hızıdır. Deneysel çalışmalarda numune üzerine uygulanan sıcaklık gradyanının değiştirilmesi pek fazla mümkün olmadığından gradyanın etkisini incelemek pek mümkün değildir. Dolayısıyla ötektik bileşimde alaşımların katılaştırılmasında en etkili parametre katılaştırma hızı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu konu üzerine yapılmış çok sayıda deneysel ve teorik çalışmalar bulunmaktadır. (Shabestari ve Shahri 2004; Sun vd., 2009; Kaya vd., 2003b; Liu vd., 1998; Yilmaz ve Elliott 1989; Jordan ve Hunt 1971; Piatti ve Pellegrini 1980; Wilde De vd., 2005; Gündüz ve Çadırlı 2002; Savaşkan ve Turhal 2003; Jain ve Gupta 2003; Bei ve George 2005; Gündüz vd., 2004).

2.2.1 Doğrusal Katılaştırma Sistemleri

Ergiyikten malzeme üretiminin bir sonraki aşaması olan kristal büyümesi, birçok farklı şekilde gerçekleştirilebilmekte ve aynı malzeme farklı başarı seviyeleri ile farklı yöntemlerle büyütülebilmektedir. Bu prosesler, kolaylık sağlamak için iki ana kategoriye ayrılır;

- Stokiyometrik Ergiyiklerden Kristal Büyütme: Belirli stokiyometrik kompozisyonlu bileşiklerin ergitilip, aynı (veya hemen hemen aynı) kompozisyona sahip kristalin büyütülmesi işlemidir. (Bridgman Metodu, Gradyanal Dondurma, Czochralski Metodu, Bölgesel Ergitme)
-
- Stokiyometrik Olmayan Ergiyiklerden Kristal Büyütme: Büyütülmüş kristalle aynı kompozisyona sahip olmayan ergiyikten büyütme işlemi. Bu proses sonucunda stokiyometrik yada stokiyometrik olmayan kristal büyütme işlemi gerçekleştirilmektedir (Gradyanal Dondurma, Bölgesel Seviyelendirme, Sıvı Faz Biriktirme, Hareketli Çözelti Metodu) (Burkov vd., 1995).

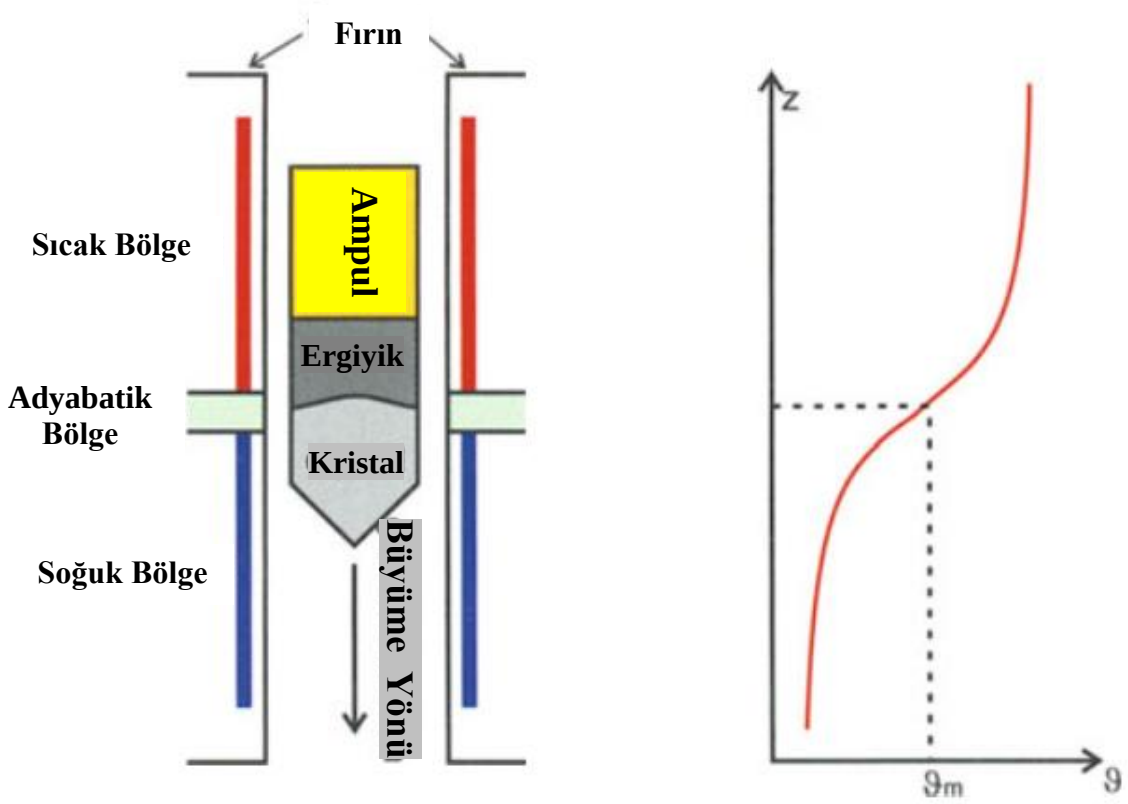
Bu tekniklerin bazıları Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. Çeşitli doğrusal katılaştırma teknikleri (Capper, 2010)

2.2.2 Bridgman Metodu

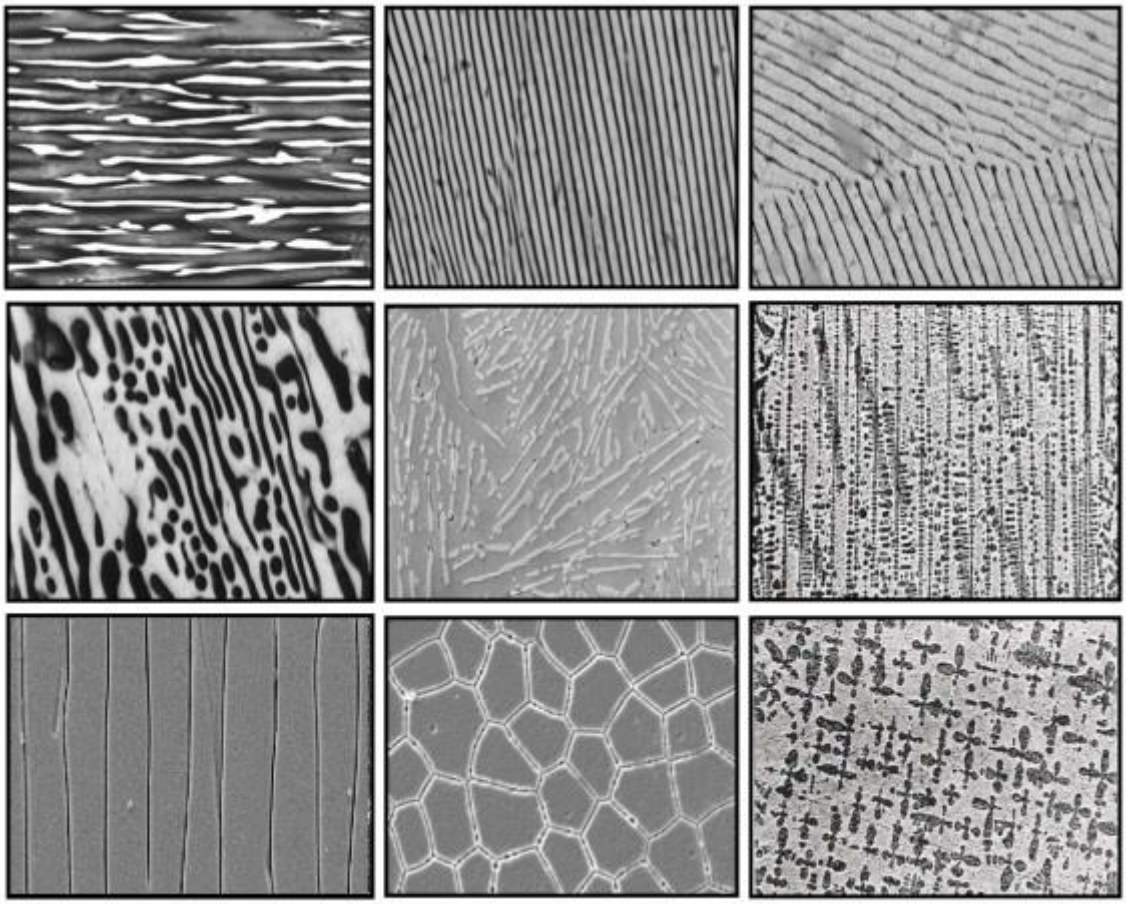
Klasik Bridgman metodu, yüksek sıcaklık bölgesinden eriyik içeren bir potanın, sıcaklık gradyanından, düşük sıcaklık bölgesine (Şekil 8) yavaşça indirilmesini içerir. Pota, zonlar arasındaki ergime noktasını geçerken, ergiyik yönelimli olarak kristalleşir ve belirli koşullar altında, tek bir kristal ile sonuçlanabilir. (Burkov, A. vd., 1995)



Şekil 8. Bridgman katılaştırma prensibinin şematik gösterimi (Boschert vd., 2003)

2.2.3 Doğrusal Katılaştırmanın Mikroyapı ve Fiziksel Özelliklere Etkisi

Malzemelerin mikroyapısındaki değişikliklerin (tane boyutları) mekanik özellikleri (mikrosertlik, gerilim gibi) ve diğer özellikleri (elektriksel iletkenlik, termal özellikler, korozyon) etkilediği bilinmektedir. Malzemelerde düzenli mikroyapıların oluşumu ve tane büyüklükleri (λ), bu malzemelerin katılaştırılması sırasında katılaşma parametrelerine bağlıdır, yani sıcaklık gradyanı (G), katılaşma hızı (V) ve alaşım bileşimi (C_0). Yani, katılaştırma parametreleri G, V ve C_0 birbirinden bağımsız kontrol edilerek malzemelerin tanecik boyutundaki mikroyapılarına, mekanik ve elektriksel özelliklerine etki etmek kontrollü (doğrusal) katılaştırma yöntemi ile mümkündür. Şekil 9'da bu yöntem ile değişik malzemelerden elde edilen farklı mikroyapılar verilmiştir. (Böyük, 2009)



Şekil 9. Doğrusal katılaştırma yöntemiyle katılaştırılmış farklı alaşımlarda gözlemlenen mikroyapılar (Böyük, 2009)

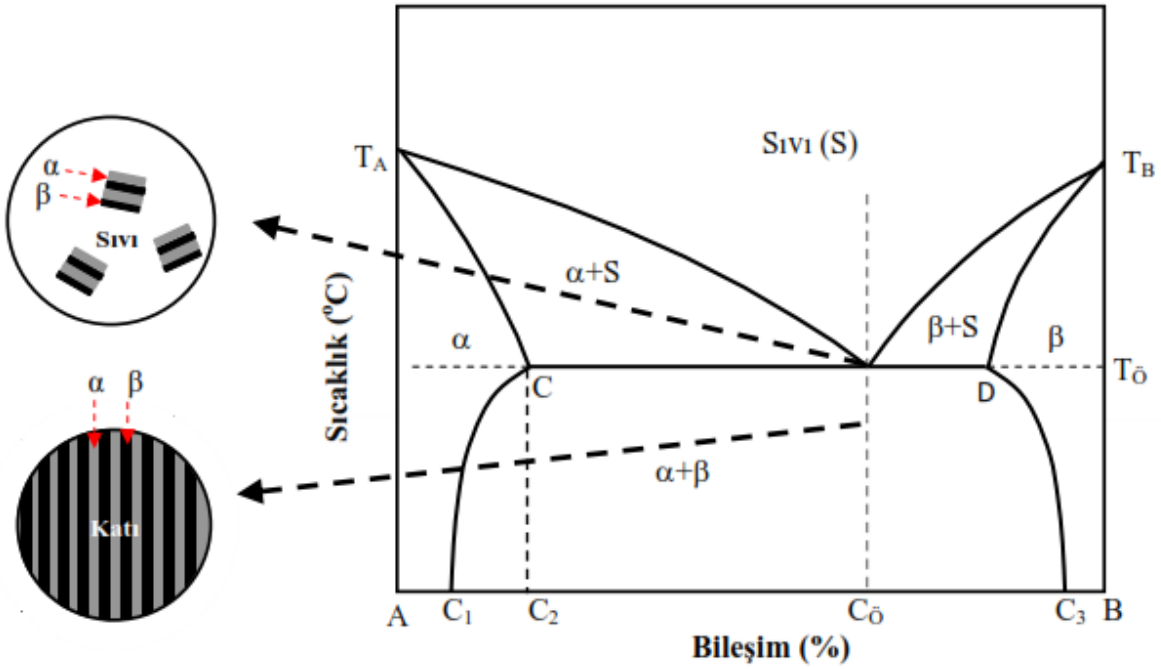
2.2.4 Alaşımların Ötektik Katılaştırılması

"*Ötektik*" kelimesi, Yunancada kolay eriyen anlamına gelmektedir. Ötektik bölge, bir alaşım sisteminde α ve β gibi katı fazlar ile sıvı fazın dengede olduğu üçlü bölgedir. Bu noktalardaki sıcaklığa *ötektik sıcaklık*, bileşime de *ötektik bileşim* denir. Ötektik alaşımı oluşturan iki bileşenli sistemlerde, bileşenler birbirinin erime sıcaklıklarını düşürür ve ötektik reaksiyon sonucu sıvı faz aynı anda iki farklı katı faza dönüşür. Dolayısıyla ötektik reaksiyon şu şekilde ifade edilir;

$$\text{Sıvı faz} \underset{\text{ısınma}}{\overset{\text{soğuma}}{\rightleftharpoons}} \text{Katı faz } (\alpha) + \text{Katı faz } (\beta) \qquad (1)$$

Bu tür reaksiyona sahip sistemlerede *ötektik sistemler* denir. Bu reaksiyon esnasında iki katı faz yan yana gelerek ince tabakalar halinde şekillenir ve ötektik yapı oluşur. Ötektik yapının oluşumu; katılaşma hızı, sıcaklık gradyenti ve alaşımın bileşimine göre değişim gösterir.

Şekil 10'da iki bileşenli bir ötektik sisteme ait faz diyagramı ve katılaşma yapısı verilmektedir. (Böyük, 2009; Engin, 2013; Jaafar, 2013)

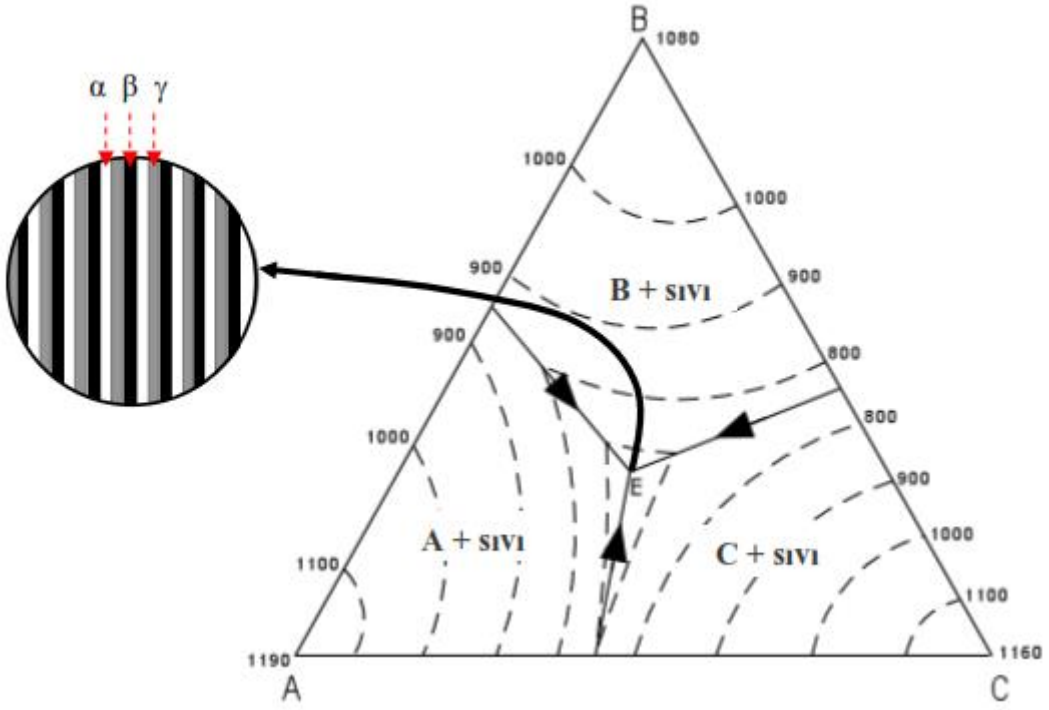


Şekil 10. İki bileşenli ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı oluşumu (Böyük, 2009; Engin, 2013; Jaafar, 2013)

Şekil 10'da verilen faz diyagramındaki sembollerden $C_Ö$; ötektik bileşim, $T_Ö$; ötektik sıcaklık, T_A ve T_B; A ve B bileşenlerin saf haldeki erime sıcaklıkları, C_1; oda sıcaklığında B metalinin α fazındaki çözünme sınırı, C_2; B metalinin α fazındaki en yüksek erime sınırı, C_3; A metalinin β fazındaki en yüksek erime sınırı anlamına gelmektedir. Faz diyagramında gösterilen $C_Ö$ ötektik bileşimindeki alaşım sistemi, sıvı halden soğuyarak, $T_{EÖ}$ ötektik sıcaklığa geldiğinde, ötektik reaksiyon sonucu α ve β fazları oluşur. Bu dönüşüm sırasında α ve β kristalleri yan yana, sık ve ince tabakalar halinde büyür ve katılaştırma şartlarına bağlı olarak ötektik yapı oluşur. (Böyük, 2009; Engin, 2013; Jaafar, 2013)

Benzer şekilde Şekil 11'de üç bileşenli bir ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı oluşumu verilmiştir. Üç bileşenli sistemlerde ise, ötektik reaksiyon sonucu sıvı faz aynı anda üç farklı katı faza (veya iki-üç intermetalik faza) dönüşür (Eşitlik 2).

$$\textit{Sıvı faz} \underset{\textit{ısınma}}{\overset{\textit{soğuma}}{\rightleftharpoons}} \textit{Katı faz } (\alpha) + \textit{Katı faz } (\beta) + \textit{Katı faz } (\gamma) \qquad (2)$$



Şekil 11. Üç bileşenli ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı oluşumu (Böyük, 2009; Engin, 2013; Jaafar, 2013)

2.2.5 Ötektik Yapılar ve Ötektik Yapıların Sınıflandırılması

Ötektik alaşımların kontrollü katılaştırılması ile oluşan mikroyapıların sınıflandırılması konusunda değişik görüşler ileri sürülmüştür. Bu sınıflandırmalar çoğunlukla mikroyapıların morfolojik görünümlerine bağlı olarak yapılmıştır.

Normal ötektiklerde, her faz düşük bir dönüşüm entropisine sahip olup, çekirdeklenmeden sonra pürüzlü bir katı-sıvı arayüzeyi boyunca büyüme görülür. Çok az bir alt soğuma ile α ve β lamelleri veya ana faza çökelmiş çubuksal yapılar oluşur. Bu yapılar normal ötektiklerin en genel özelliğidir. Denge şartlarında, sıvıda bir bileşim gradyenti vardır. Bu bileşim gradyenti katı-sıvı arayüzeyinden yayılan A ve B atomlarınca oluşturulur. Bu yüzden lamelsel veya çubuksal kristaller arası mesafe (λE) korunur. Normal ötektik mikroyapılar kendi içerisinde ikiye ayrılır (Kaygısız, 2014). Bunlar;

a) <u>Lamelsel</u>; Uzun mesafeler boyunca uzanan düzenli fakat kristal hatalarıyla kesilen birbirine paralel lameller şeklindeki kristallerden oluşan mikroyapıdır.

b) Çubuksal; Uzun mesafeler boyunca uzanan ve katılaşma yönü doğrultusunda birbirine paralel olarak yönelmiş düzenli fiber şeklindeki kristallerden oluşan levhasal mikroyapıdır. Yapı düzenlidir fakat ana faz içerisinde dik kesiti çok köşeli veya çubuksaldır (Kaygısız, 2014).

Anormal ötektik yapı, ticari bakımdan çok önemli olan Al-Si ve Fe-C alaşımlarında görülür. Fazlardan biri düzlemli karaktere sahip olduğundan, normal ötektiğe göre çok farklı ve karmaşık mikroyapısal özellik gösterir. Düzlemli fazlarda kinetik alt soğuma ΔT_k büyük olduğundan ötektik büyüme yavaş olur. Dolayısıyla sıcaklık dalgalanmaları dengelenemez. Kinetik engelin aşılmasındaki zorluklardan dolayı düzensiz ve farklı yapılar oluşur. Düzlemli fazın büyümesi için katı-sıvı arayüzeyinde büyüme tabakalarının oluşması gerekir. Bu tabakalar ve iki boyutlu çekirdeklenme, yüzeyde oluşan düzensizliklerden kaynaklanır. Bu düzensizliklerin oluşumu ise büyük ölçüde alt soğumaya bağlıdır. Düzlemli fazın farklı kristal büyüme özelliği, anizotropik karakteri, diğer faz ile eş-zamanlı büyümemesi, anormal ötektiklerin çok farklı yapılara sahip olmasına neden olur (Kaygısız, 2014).

Anormal ötektik mikroyapılar kendi içerisinde altıya ayrılır. Bunlar;

a) Flake Yapı; Uzun mesafeler boyunca düzenli olmayan, dallanmış veya dallanmamış levhasallardan oluşan kuru yaprak veya 'mısır gevreği' şeklindeki kristallerden oluşan mikroyapılardır.

b) Kesikli Lamelsel (Broken Lamellar) Yapı; Kesikli levhaların oluşturduğu düzenli sayılabilecek mikroyapılardır.

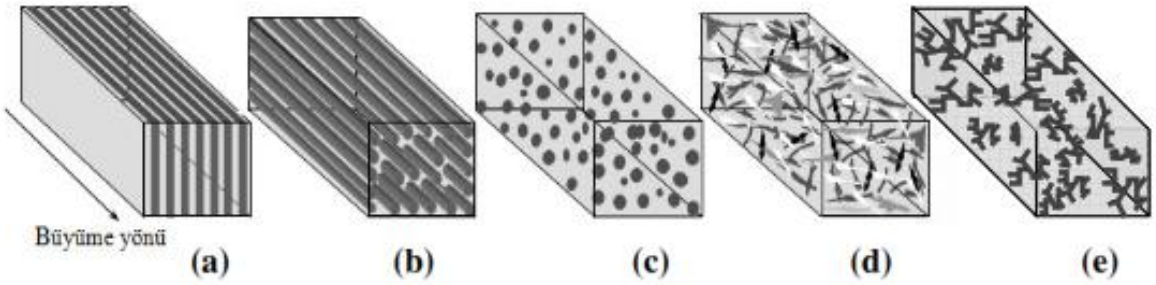
c) Lifli (Fibrous) Yapı; Uzun mesafeler boyunca düzensiz olarak uzanan ve birbiri ile bağlantılı çok ince fiberlerden oluşan mikroyapılardır.

d) Karmaşık Düzenli (Complex Regular) Yapı; Çok küçük bir hacim içerisinde ve genellikle spiral biçimli birbirine paralel düzenli levhalardan oluşan mikroyapılardır.

e) Çin Yazısı (Chinese Script) Yapı; Birbirinden ayrı, küçük ve ince bir şekilde dallanmış mikro düzlemli levhalardan oluşan mikroyapılardır.

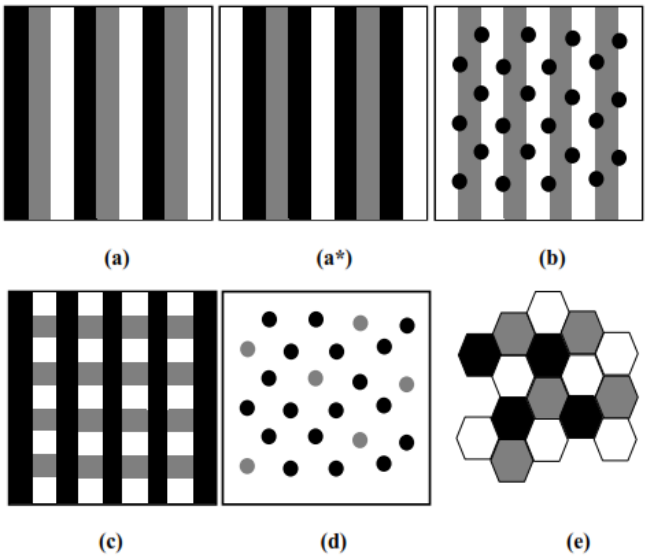
f) Yarı Düzenli (Quasi Regular) Yapı; Erime entropisi yüksek bir ana faz içindeki düzlemsiz fazın levha veya fiber şeklindeki kristallerinden oluşmuş mikroyapılardır. Bu yapı, üçüncü bileşen ilavesi ile veya özel katılaştırma şartlarında elde edilebilir. (Kaygısız, 2014).

Bu yapılar, Şekil 12'de verilmektedir.



Şekil 12. Farklı ötektik yapıların şematik gösterimi (a) Lamelsel ötektik (Pb-Sn), (b) Çubuksal ötektik (Cu-Cr), (c) Küresel ötektik (Cu-CrO), (d) Karmaşık Düzenli ötektik (Al-Si). (e) Çin yazısı yapı (Al-Si-Mg) (Kaygısız, 2014).

Üçlü ötektik alaşımların sınıflandırılması ikili ötektik alaşımlara göre oldukça zor ve karmaşıktır. Üçlü ötektik alaşımların bileşen sayısının ikili sistemlere göre daha fazla olması katılaştırma neticesinden sayıca fazla yapıların oluşmasına neden olmaktadır. Literatürde bulunan sınıflandırma türleri Şekil 13'te verilmektedir. Bu ötektik şekillenim türleri üçlü alaşımı meydana getiren tüm bileşenlerin arayüzey enerjilerin eşit olduğu kabul edilerek oluşturulmuştur. Ayrıca ikili sistemlere benzer olarak, üçlü ötektik alaşımlarda da ötektik yapıyı oluşturan her bir fazın arayüzey enerjisinin eşit ve hacim kesirlerinin küçük olması durumunda çubuksal (rod-like) ötektik yapı ifade edilmektedir. (Böyük, 2009; Engin, 2013; Jaafar, 2013)



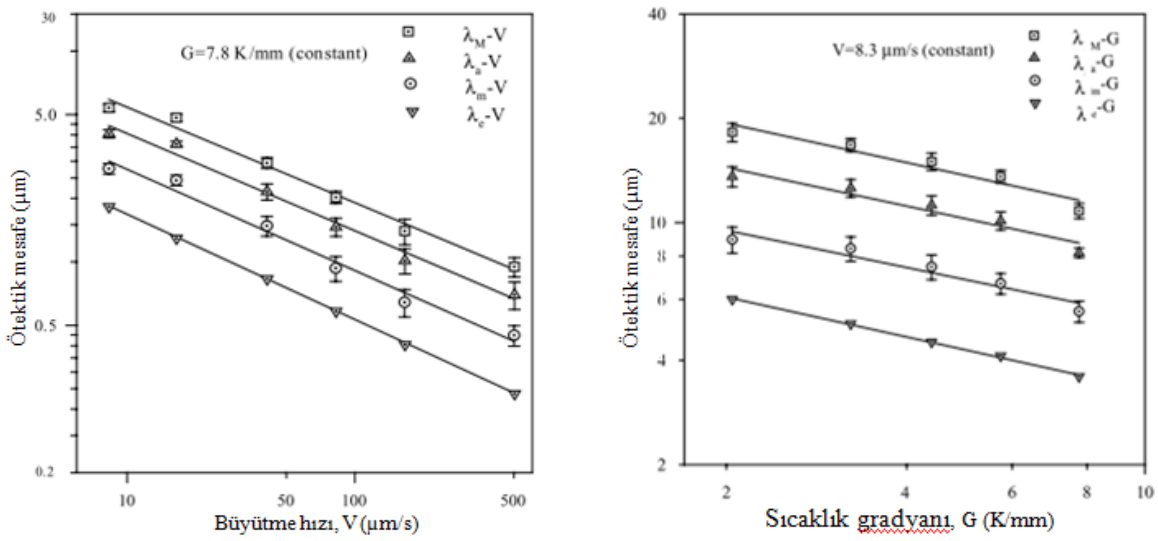
Şekil 13. Doğrusal katılaştırılmış üçlü ötektiklerin sınıflandırılması (a-a*) Üçlü lamelsel büyüme, (b) Bir lifli, iki lamelsel büyüme, (c) İki lifli, bir lamelsel büyüme, (d) Bir ana faz, iki lifli büyüme, (e) Üçlü lifli büyüme. (Böyük, 2009; Engin, 2013; Jaafar, 2013)

Ötektik alaşımların özelliklerinden en iyi şekilde yararlanabilmek için, alaşımlar sabit katılaştırma hızı farklı sıcaklık gradyentlerinde ve sabit sıcaklık gradyenti farklı katılaştırma hızlarında tek yönlü olarak katılaştırılırlar. Ötektik alaşımların tek yönlü katılaştırılması, mekanik ve elektronik özelliklere sahip mikron düzeyinde yapılar oluşmasına sebep olduğu için makine parçasından, elektronik elemanlara kadar teknolojinin birçok alanda uygulanmaktadır (Engin, 2009)

Literatürde katılaştırma hızının doğrusal katılaştırılmış alaşımların fiziksel özelliklere etkisini inceleyen birçok araştırma bulunmaktadır. Bu araştırmalar genellikle ikili ve/veya üçlü ötektik alaşımlarda katılaştırma, diğer bir deyişle tane büyütme hızının ve sıcaklık gradyanının mikroyapıya etkileri; katılaştırma hızının mekanik özelliklere (sertlik, çekme dayanımı vb.) etkileri ve katılaştırma hızının elektriksel iletkenlik ve ısıl iletkenlik katsayılarına etkileri olarak özetlenmektedir.

2.3 Katılaştırma Hızı ve Sıcaklık Gradyanının Mikroyapıya Etkisi

Al–Si ötektik alaşımları için mikroyapı parametresi olan λ_E' nin sabit sıcaklık gradyanı, farklı büyütme hızlarında ve sabit büyütme hızı, farklı sıcaklık gradyanlarında değişimini incelemek üzere yapılan iki farklı çalışmada da, yüksek saflıktaki (>%99) metallerden hazırlanan Al–Si ötektik alaşımın Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırının yardımıyla doğrusal katılaştırılması sonucu elde edilen deneysel bağıntılar ötektik mesafenin artan hız ile azaldığını göstermiştir (Gündüz vd., 2004; Kaya vd., 2003b) (Şekil 14).



(a) (b)

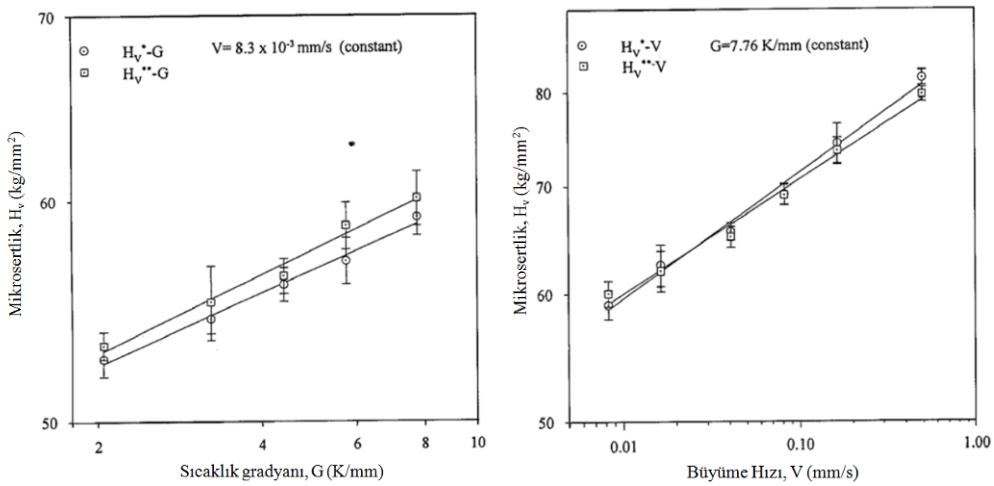
Şekil 14. Ötektik mesafenin değişimi: (a) artan büyütme hızı ile, sabit sıcaklık gradyanında (G=7,8 K/mm), (b) artan sıcaklık gradyanı ile, sabit büyütme hızında (V= 8,3µm/s) (λM;

maksimum ötektik mesafe, λc; kritik ötektik mesafe, λm; minimum ötektik mesafe, λa; ortalama ötektik mesafe.) (Gündüz vd., 2004)

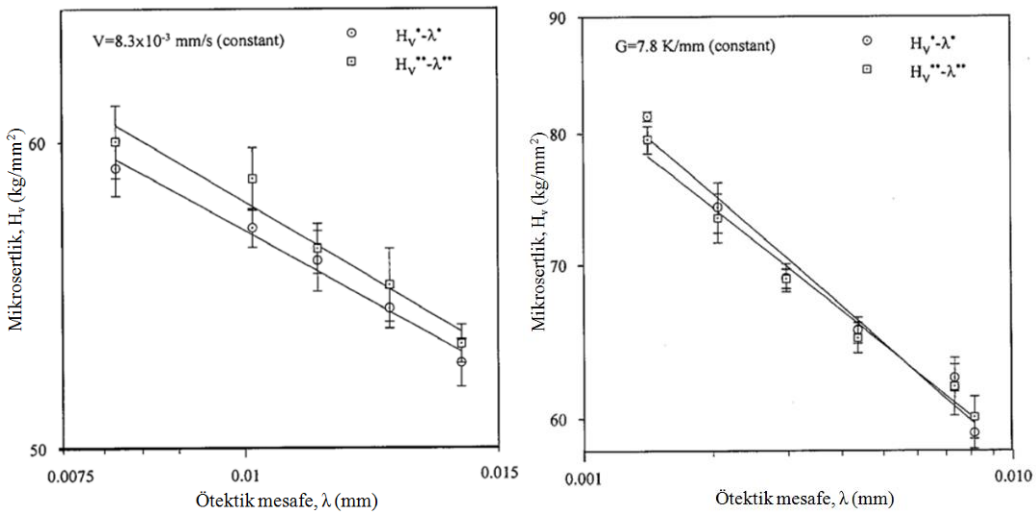
Sabit sıcaklık gradyanı, farklı büyütme hızlarında ve/veya sabit büyütme hızı, farklı sıcaklık gradyanlarında Al–Si (Yilmaz ve Elliott 1989), Al–Cu (E. Çadırlı, A. Ülgen, 1999), Al-Pt (Piatti ve Pellegrini 1980), Zn–Mg, Zn–Al (Liu vd., 1998), Pb–Sn, Al–CuAl2 (Jordan ve Hunt 1971), Al–Cu–Ag (Wilde De vd., 2005), Sn–Ag–Cu (Böyük ve Maraşlı 2009), gibi farklı ikili ve üçlü metalik alaşım sistemlerinde yapılan çalışmaların tamamında mikroyapı parametresinin (λ) katılaştırma parametrelerine (V, G) göre üstel olarak azaldığı görülmektedir. Genellikle elde edilen bağıntılar birbirleriyle uyum içerisinde olup, üstel değerlerde katılaştırma şartlarına ve malzemenin yapısına bağlı olarak küçük farklılıklar görülmektedir. Bu sonuçlar katılaştırma parametreleri ile mikroyapı parametresi arasında belirgin bir ilişkinin olduğunu göstermektedir. Bu çalışmaların çoğunda metalik malzemelerin katılaştırılmasında "Bridgman tipi" kontrollü katılaştırma fırını kullanılmış ve numuneler düşey doğrultuda katılaştırılmıştır.

2.4 Katılaştırma Hızının Mekanik Özelliklere Etkisi

Mikrosertlik değerleri ile katılaştırma parametreleri ve mikroyapı parametresi arasında da bir ilişkinin olduğu çeşitli çalışmalar tarafından kanıtlanmaktadır. (Yilmaz and Elliott, 1989; Liu et al., 1998; Gündüz et al., 2004; Kaya et al., 2003a; Kaygısız, 2014). Çalışmalardan, büyütme hızı arttıkça mikrosertlik değerinin de artmakta olduğu görülmektedir. Yani malzemelerin artan katılaştırma parametrelerinden (G, V) dolayı yapı parametresinde meydana gelen küçülme, mikrosertlik değerlerini artırmaktadır (Şekil 15). Mikrosertlik ölçüm deneyleri neticesinde elde edilen üstel değerlerin tam bir tutarlılık gösterdiğini söylemek zordur. Yapılan mikrosertlik ölçüm çalışmalarında farklı katılaştırma şartlarında farklı üstel değerler (0.04–0.30) elde edilmiştir.



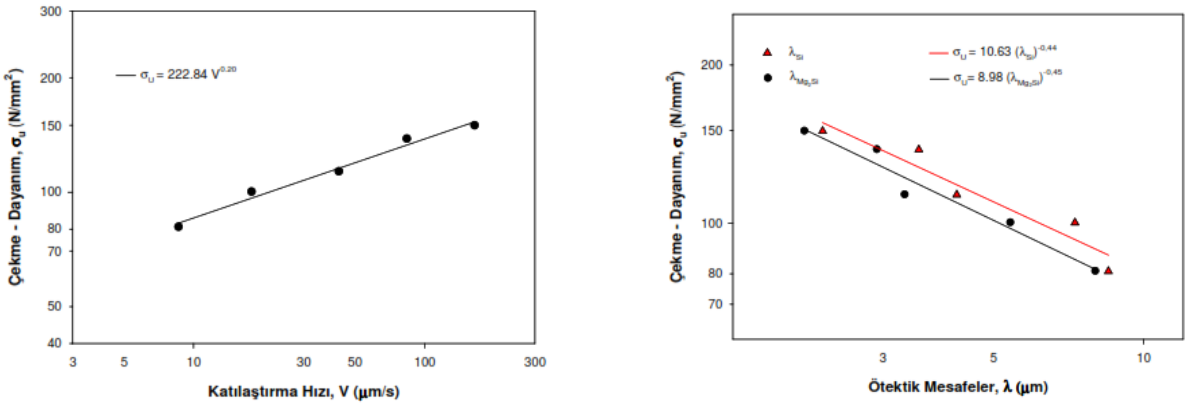
(a) (b)



(c) (d)

Şekil 15. Mikrosertlik değişimi: (a) artan sıcaklık gradyanı ile, sabit büyütme hızında (V= 8,3μm/s), (b) artan büyütme hızı ile, sabit sıcaklık gradyanında (G=7,8 K/mm), (c) artan ötektik mesafe ile, sabit büyütme hızında (V= 8,3μm/s), (d) artan ötektik mesafe ile, sabit sıcaklık gradyanında (G=7,8 K/mm) (Hv*; boyuna kesitteki sertlik, Hv**; enine kesitteki sertlik, λ*; boyuna kesitteki ötektik mesafe, λ**; enine kesitteki ötektik mesafe) (Kaya vd., 2003b)

Aynı zamanda katılaştırma hızı ile çekme dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Kaygısız (2014), yaptığı çalışmada G=9,39 K/mm sıcaklık gradyanında doğrusal katılaştırılmış Al-Si-Mg ötektik alaşımının (Al-%12.95Si-%4.96Mg (ağ.)) çekme-dayanım değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimini Şekil 16'daki gibi vermiştir.



(a) (b)

Şekil 16. G=9,39 K/mm sıcaklık gradyanında doğrusal katılaştırılmış Al-Si-Mg ötektik alaşımının (Al-%12.95Si-%4.96Mg (ağ.)) çekme-dayanım değerlerinin (a) katılaştırma hızı ve (b) ötektik mesafe ile değişimi (Kaygısız, 2014)

Bunun yanında literatürde karşılaşılan ve farklı birçok ötektik bileşimin doğrusal katılaştırılması çalışmasında artan katılaştırma hızının çekme ve basma dayanımını pozitif yönde etkilediği gözlemlenmiştir (Engin vd., 2016; Böyük, 2012; Kaygisiz ve Maraşli, 2015; Şahin vd., 2018; Karamazi, 2015).

2.5 Elektriksel ve Termal Özelliklerin Belirlenmesi Üzerine Yapılan Bazı Deneysel Çalışmalar ve Katılaştırma Hızının Bu Özelliklere Etkisi

Metallerin ve alaşımların termofiziksel özelliklerinin (viskozite, elektriksel özdirenç ve iletkenlik, yoğunluk, termal iletkenlik vs.) bilinmesi özellikle amaca uygun malzeme üretimi için yapılan çalışmalarda oldukça önemlidir. Malzemeler için önemli termofiziksel özelliklerden biri olan elektriksel özdirenç ve iletkenlik değerleri özellikle metalurjik çalışmalarda (örneğin elektromanyetik uygulama alanlarında) sıklıkla kullanılır. Bu nedenle metallerin ve özellikle son yıllarda alaşımların elektriksel özdirenç (veya iletkenlik) değerlerinin ölçülmesiyle ilgili bazı çalışmalar yapılmıştır (He vd., 2009; Brandt ve Neuer 2003; Cook vd., 2003; Brandt ve Neuer 2007; Cook vd., 2002; Dutta vd., 2009; Çadırlı vd., 2006).

Sıcaklığın değişmesi malzemenin elektriksel özdirenç değerini doğrudan etkilediği için araştırmalar sıcaklığa bağlı elektriksel özdirenç değişimlerinin belirlenmesi üzerine yoğunlaşmaya başlamıştır. Elektriksel özdirenç ölçümlerinde genellikle iki farklı ölçüm tekniği kullanılır. Bu teknikler; kontak uçları kullanarak doğrudan direnç ölçülmesi ve kontaksız indüksiyon ölçümleridir. Katı malzemeler için özdirenç ölçümlerinde genellikle Ohm kanununun bir uygulaması olan ve kontak uçları kullanılarak yapılan dört–nokta d.c tekniği kullanılır. Bu teknik erime noktasının altındaki sıcaklıklardaki numuneler üzerine voltaj uygulanarak oluşan akım değeri ölçümüne dayanmaktadır.

He vd. (2009) $NbCo_2Al_8$ alaşımını 5–300 K arasında sıcaklığa bağlı olarak elektriksel iletkenlik değerlerini ölçmüş ve 8 K'de meydana gelen anormallik dışında bu alaşımın elektriksel açıdan metalik özellik gösterdiğini tespit etmişlerdir. Yaptıkları ölçüm sonucunda $NbCo_2Al_8$ alaşımının 5–300 K sıcaklık aralığında elektriksel özdirenç değerinin 20.5–180.2 μΩ cm arasında değişen değerler aldığını tespit etmişlerdir (He vd., 2009).

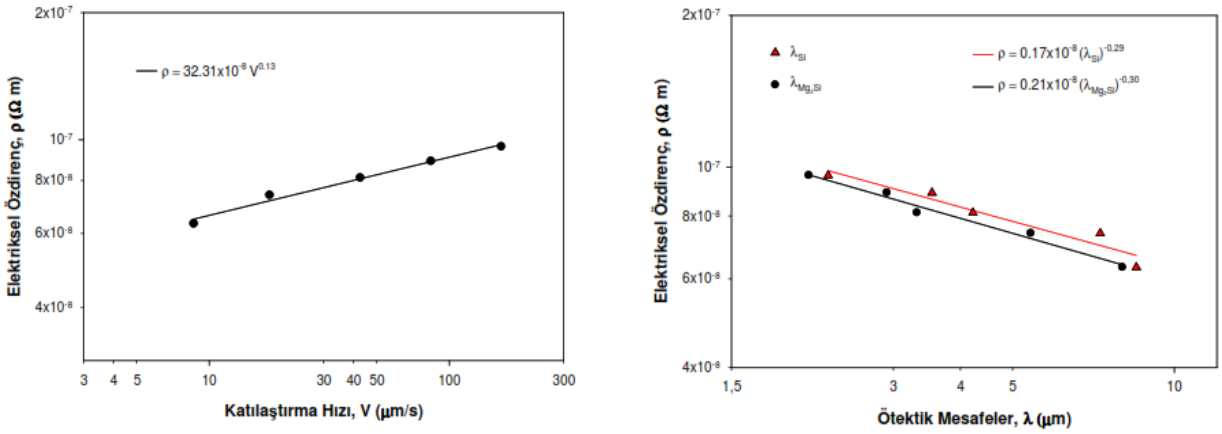
Brandt ve Neuer (2003). saf Sn, Zn ve Al metallerinin elektriksel özdirençlerini hem erime sıcaklığının altında hem de erime sıcaklığının üstünde ölçmüşlerdir. Ölçümlerini hem ısınma

esnasında hem de soğuma esnasında kaydederek elektriksel özdirenç eğilimlerini incelemişlerdir. Ölçüm sonuçlarından Sn metali için elektriksel özdirencin 25–220 °C (katı faz) sıcaklık aralığında 11.3–21.6 μΩ cm arasında ve 220–250 °C (sıvı faz) sıcaklık aralığında 21.6–46.9 μΩ cm arasında değiştiğini, Zn metali için elektriksel özdirencin 20.7–421.4 °C (katı faz) sıcaklık aralığında 5.96–16.67 μΩ cm arasında ve 421–445 °C (sıvı faz) sıcaklık aralığında 16.67–36.08 μΩ cm arasında değiştiğini, Al metali için elektriksel özdirencin 27.91–661.26 °C (katı faz) sıcaklık aralığında 2.96–10.65 μΩ cm arasında ve 661.25–674.11 °C (sıvı faz) sıcaklık aralığında 10.65–25.02 μΩ cm arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca farklı oranlarda Si katkılayarak oluşturdukları Al–Si alaşımlarının elektriksel özdirençlerini ve bu alaşımlara ekledikleri üçüncü bir bileşenin elektriksel özdirence etkisini araştırmışlardır (Brandt ve Neuer 2003).

Cook vd. (2003) tel şeklinde hazırladıkları Sn–Ag, Sn–Ag–Cu ve Sn–Ag–Cu–X (burada X; Co, Fe ve Bi) alaşımların elektriksel özdirençlerini mikroyapıların bir fonksiyonu olarak dört–nokta (d.c.) ölçüm tekniği ile tespit etmişlerdir (Cook vd., 2003).

Çadırlı vd. (2006). Cd–Sn, Bi–Cd ve Al–Si ötektik ve Al–%3Si (ağ) ötektik üstü alaşımlarını vakum ortamında %99.99 saflıkta metaller kullanarak hazırlamışlardır. Ürettikleri alaşımların 100–475 K sıcaklık aralığında akım–voltaj karakteristiklerini, elektriksel özdirenç değerlerini ve sıcaklık katsayılarını incelemişlerdir. Her bir alaşım için sıcaklık arttıkça elektriksel özdirenç değerlerinin arttığını, elektriksel özdirenç artışları 350 K'e kadar kararlı, bu sıcaklığın üstünde çok hızlı bir artış olduğunu tespit etmişlerdir. Sıcaklığın artmasıyla Cd–Sn ötektik alaşımının elektriksel iletkenliğinin 14.5'den 18.6 μΩcm kadar arttığını, Bi–Sn ötektik alaşımı için 37.6'dan 42.6 μΩ cm kadar arttığını, Al–Si ötektik alaşımı için 2.8'den 3.8 μΩ cm kadar arttığını ve Al–Si ötektik üstü alaşımı için 2.5'ten 3.8 μΩ cm kadar artığını ölçmüşlerdir (Çadırlı vd., 2006).

Ayrıca Kaygısız (2014), yaptığı çalışmada elektriksel özdirenç değerlerinin, G=9,39 K/mm sıcaklık gradyanında doğrusal katılaştırılmış Al-Si-Mg ötektik alaşımının (Al-%12.95Si-%4.96Mg (ağ.)) katılaştırma hızıyla değişimini incelemiş ve Şekil 17'deki sonuçlara ulaşmıştır.

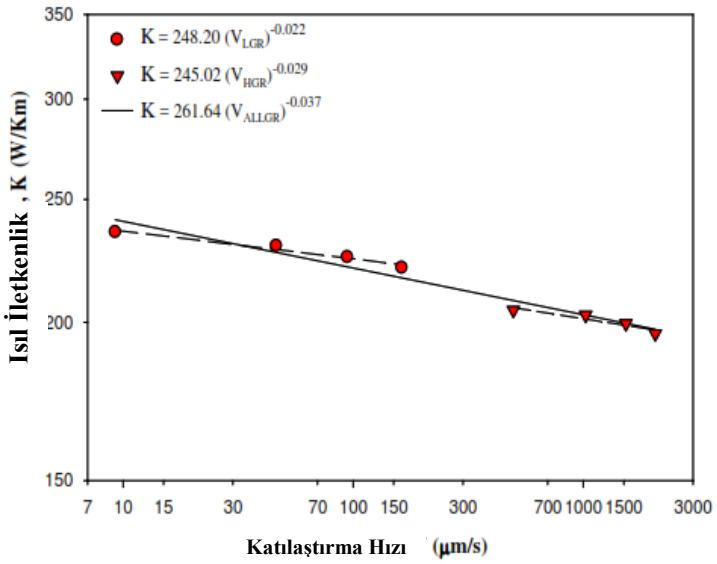


(a) (b)

Şekil 17. G=9,39 K/mm sıcaklık gradyanında doğrusal katılaştırılmış Al-Si-Mg ötektik alaşımının (Al-%12.95Si-%4.96Mg (ağ.)) elektriksel öz direnç değerlerinin (a) katılaştırma hızı ve (b) ötektik mesafe ile değişimi (Kaygısız, 2014)

Farklı ötektik alaşımların farklı gradyan ve katılaştırma hızlarıyla yapılan çalışmalarda artan katılaştırma hızının elektriksel özdirenci artırdığı ve elektriksel iletkenliği düşürdüğü verilmektedir (Kaygısız, 2014; Karamazi, 2015; Jaafar, 2013; Engin, 2013; Kaygisiz ve Maraşli, 2015; Engin vd., 2016; Aker ve Kaya, 2016; Bayram ve Maraşlı, 2018)

Bunun yanında Bayram ve Maraşlı (2018), doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımında (Al-%32,5Cu-%1Ni (ağ.)) katılaştırma hızının ısıl iletkenliğe etkisini incelemiş ve katılaştırma hızı arttıkça ısıl iletkenliğin düştüğünü Şekil 18'deki gibi göstermiştir.



Şekil 18. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımında (Al-%32,5Cu-%1Ni (ağ.)) katılaştırma hızının ısıl iletkenliğe etkisi (Bayram ve Maraşlı, 2018)

Yapılan güncel çalışmalar göz önüne alınarak proje kapsamında; yüksek Mg içeren Al-Mg temelli çoklu ötektik metalik alaşımlar geniş hız aralığında (10-250 μm/s) ve sabit sıcaklık gradyanında kontrollü doğrusal olarak katılaştırılması ve katılaştırılmış numunelerden mikroyapı parametreleri (λ_E) ile mekaniksel özellikler (sertlik, çekme dayanım), termal ve elektriksel iletkenliklerinin hıza bağlılığını lineer regresyon analizi ile ortaya konulması planlanmaktadır. Ayrıca elde edilen sonuçlar, ilgili teorik modellerle ve literatürde yer alan benzer deneysel çalışmaların sonuçları ile de karşılaştırılacaktır. Bu projenin kapsamı genel olarak şöyle sıralanabilir;

a) Al-Mg esaslı çoklu ötektik metalik alaşımları geniş hız aralığında (10-250 μm/s) ve sabit sıcaklık gradyanında kontrollü doğrusal olarak katılaştırılması,
b) Katılaştırılmış numunelerden çekilen mikroyapı fotoğrafları yardımıyla elde edilen ötektiklerin belirlenmesi,
c) Katılaştırılmış numunelerin oda sıcaklığındaki mikrosertlik ve çekme değerlerini ölçerek, mikrosertlik ve çekme değerlerinin büyütme hızına bağlılığının belirlenmesi,
d) Katılaştırılmış numunelerin oda sıcaklığındaki termal iletkenliklerini lineer ısı akışı metodu ile ölçmek ve büyütme hızının termal iletkenliğe etkilerinin incelenmesi,
e) Elde edilen sonuçlar mevcut teorik modeller ve diğer benzer deneysel çalışmalarla karşılaştırılmasıdır.

Proje sonucunda elde edilecek sonuçlarla, yüksek oranda Mg (>%30) kullanılarak elde edilen düşük yoğunluklu çeşitli Al alaşımlarda oluşan Al_8Mg_5 fazından kaynaklanan olumsuz özelliklerin (kırılganlık vs.), kontrollü doğrusal katılaştırma yöntemiyle azaltılması planlanmaktadır. Ayrıca, yüksek Mg içeriğinden dolayı literatürde ayrıntılı şekilde incelenmemiş Al-Mg-Si, Al-Mg-Fe ve Al-Mg-Ni sistemlerin de çalışılarak bu sistemlerin endüstriyel olarak da üretimine ışık tutacak veri elde edilmesi planlanmaktadır. Projede çalışılacak olan ötektik alaşımlarının doğrusal katılaştırma sonucu elde edilen mikroyapı, mekanik, termal ve elektriksel özelliklerinin proses parametreleriyle değişimi incelenerek optimum üretim şartları belirlenecektir. Bunun yanında doğrusal katılaştırma işleminin geniş hız aralığında (50-2500 μm/s) gerçekleştirilmesi ile endüstriyel olarak daha fonksiyonel hale getirilmesi hedeflenmektedir.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu çalışmada, yüksek magnezyum içeren (>%30 ağ.) Al-Mg-Si, Al-Mg-Fe ve Al-Mg-Ni ötektik alaşım sistemleri ile düşük Mg içeren (% 4,96) Al-Mg-Si üç farklı hızda katılaştırılmış ve katılaştırma hızının malzemelerin mikroyapı, mekanik özelliklerden mikrosertlik, eğme ve elektriksel özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Böylece ele alınan ötektik alaşım sistemlerinin birçok fiziksel özelliği bir bütün olarak tanımlanmıştır.

Proje kapsamında yapılan çalışmalar beş ana başlıkta incelenebilir;

a) Alaşım oluşturma ve kalıp doldurma sisteminin kurulumu ile ötektik alaşım oluşturma ve grafit kalıpların doldurulması,

b) Bridgman sisteminin kurulumu ve optimizasyonu

c) Çeşitli hızlarda doğrusal katılaştırma işlemleri,

d) Doğrusal katılaştırılmış alaşımların mikroyapı incelemesi,

e) Doğrusal katılaştırılmış alaşımların mekanik özelliklerin belirlenmesi

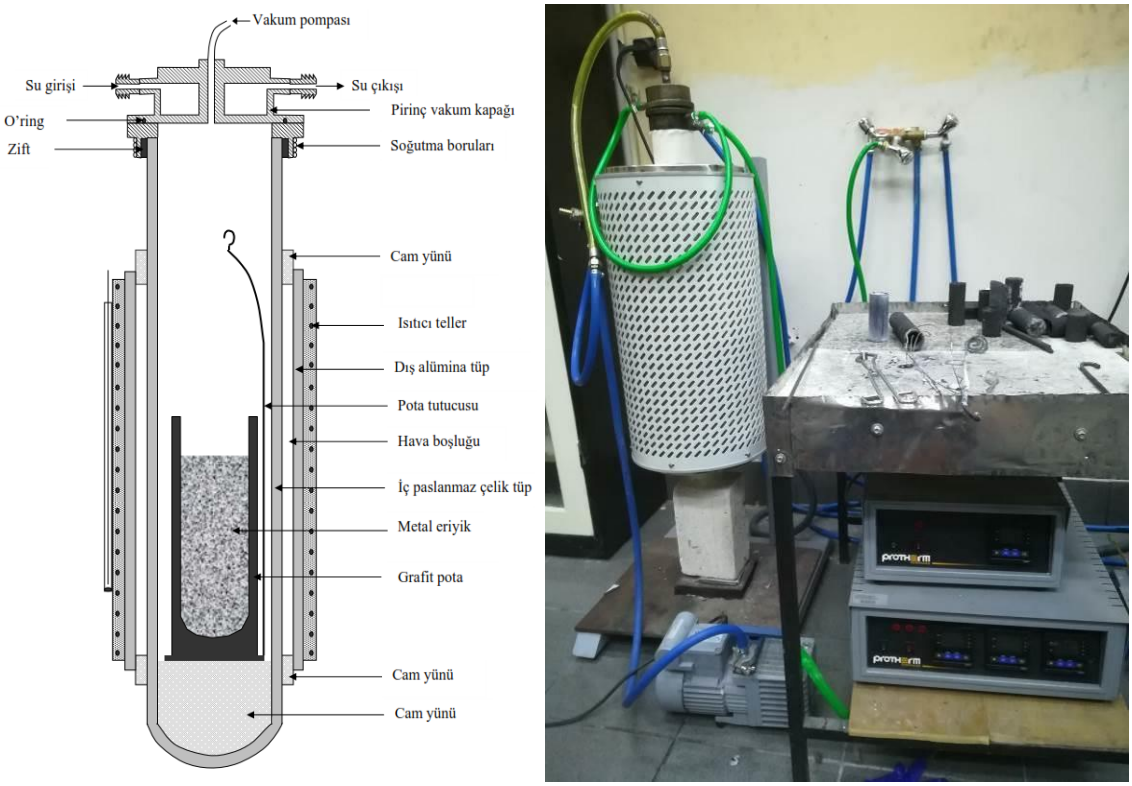
f) Doğrusal katılaştırılmış alaşımların elektriksel özelliklerinin incelenmesi.

3.1 a) Alaşım Oluşturma ve Kalıp Doldurma Sisteminin Kurulumu ile Ötektik Alaşım Oluşturma ve Grafit Kalıpların Doldurulması

Alaşımlar, ticari saflıkta temin edilmiş Al, Si, Fe, Ni ve Mg kullanılarak oluşturulması denenmiş ancak, alaşım oluşturma esnasında magnezyumun hızlı oksitlenerek istenilen alaşımların oluşturulabilmesi için vakum altında ergitme yapılması ve alaşımlama için %50 Mg içeren master alaşım kullanılmasının daha uygun sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu nedenle Şekil 19'da verilen 1100°C sıcaklıkta çalışılabilen Protherm PTF 12/75/600 model dikey tüp vakum ergitme fırını kullanılmıştır. Hammaddeler karıştırılarak elde edilecek alaşım bileşimine göre toplam 50 gr. olacak şekilde pota içerisine yerleştirilmiş, ardından 800°C sıcaklığa ısıtılmış fırının içerisine yerleştirilmiştir. Bileşimin 30 dk. boyunca vakum altında ergimesi beklenmiş ve ardından vakum kaldırılarak fırın açılmış ve grafit çubukla karıştırma yapılmıştır. Tekrar vakum altında ergimeye bırakılan pota, 15'er dakika arayla iki kez daha karıştırıldıktan sonra vakum altında 5 dakika daha beklenmiş ve kalıba dökülmüştür. Elde edilen alaşımların kompozisyonları, Rigaku marka XRF cihazıyla belirlenmiş ve Tablo 3'te verilmiştir.

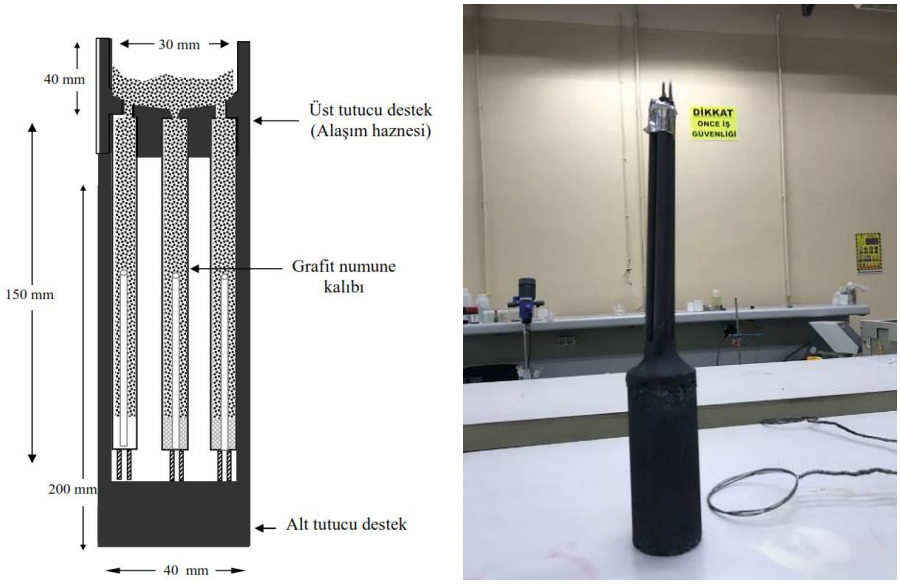
Tablo 3. Mg-Al master alaşımı ve deneylerde kullanılan alaşımların, XRF analiziyle elde edilen ortalama kompozisyonları (% ağ.)

	Al	Mg	Si	Fe	Ni	Zn	Cu	Diger
Mg-Al master	48,0	51,8	0,112	0,058	-	-	-	Eser
Al-32,2Mg-0,37Si	67,5	32,1	0,372	0,037	-	-	-	Eser
Al-32,2Mg-0,37Fe	66,9	32,3	0,058	0,374	-	-	-	Eser
Al-30Mg-12Zn	58,7	29,3	0,175	0,039	-	11,8	-	Eser
Al-32Mg-1,7Ni	66,4	31,7	0,079	0,030	1,8	-	-	Eser
Al-12.95Si-4.96Mg	82,1	4,93	12,94	0,016	-	-	-	Eser
Al-33,2Cu	66,8	33,17	0,027	0,013	-	-	-	Eser

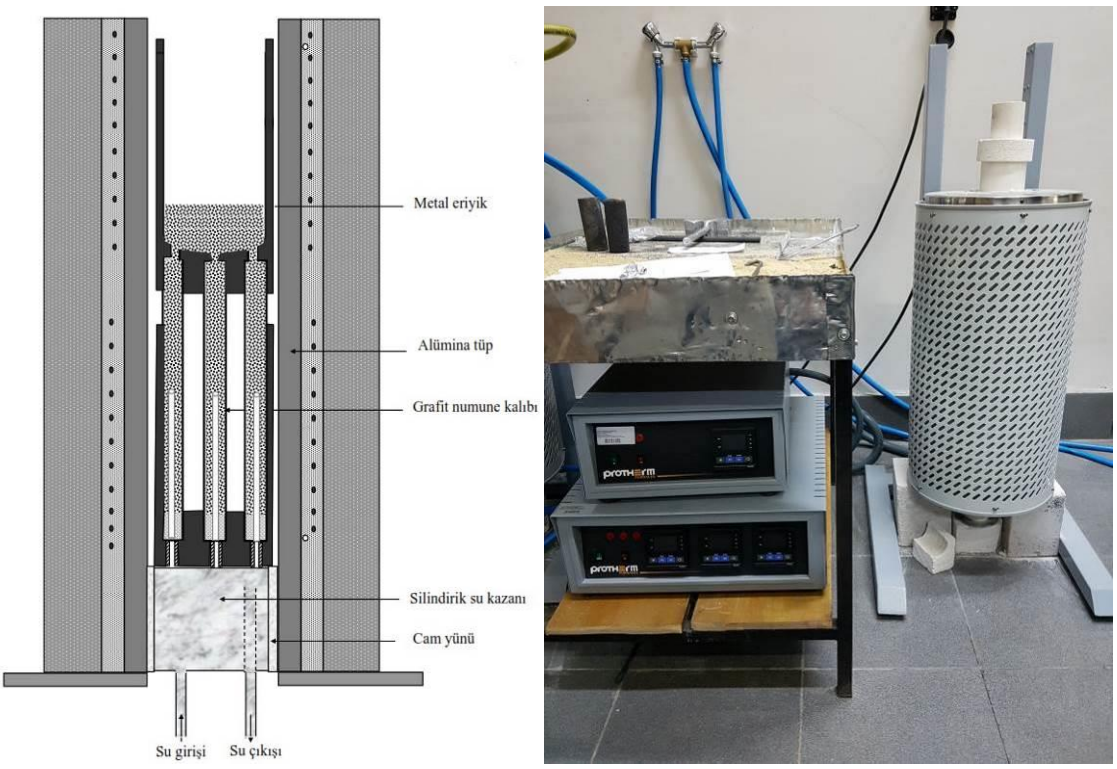


Şekil 19. Alaşımların hazırlandığı vakumlu ergitme fırını

Elde edilen alaşımlar, ilk aşamada katı halde Şekil 20'de verilen grafit kalıp doldurma sistemine beslenmiş ve fırın içerisinde vakum yardımıyla 40 dakika beklenerek doldurulmuştur. Ardından Şekil 21'de verilen Protherm PTZ 12/75/600 model üç zonlu fırında alttan su soğutma ile katılaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

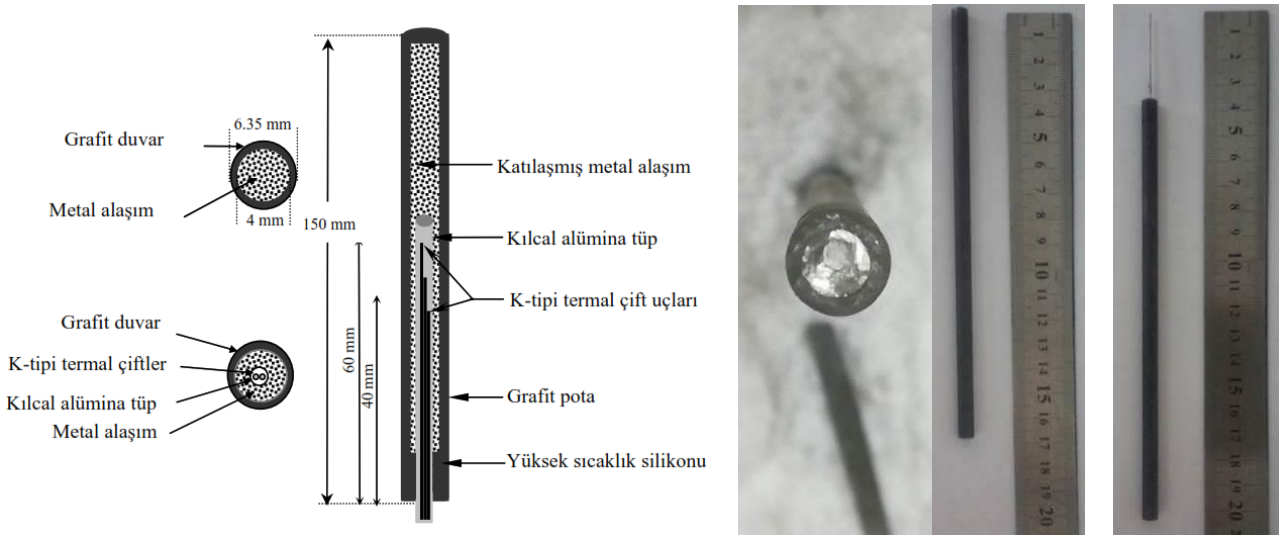


Şekil 20. Kalıp doldurma sistemi



Şekil 21. Üç zonlu kalıp doldurma fırını

Ayrıca Şekil 22'de içi yalnızca metal doldurulmuş ve kılcal alümina tüp yerleştirilmiş numunelerin şematik görünümü ile fotoğrafları verilmektedir.

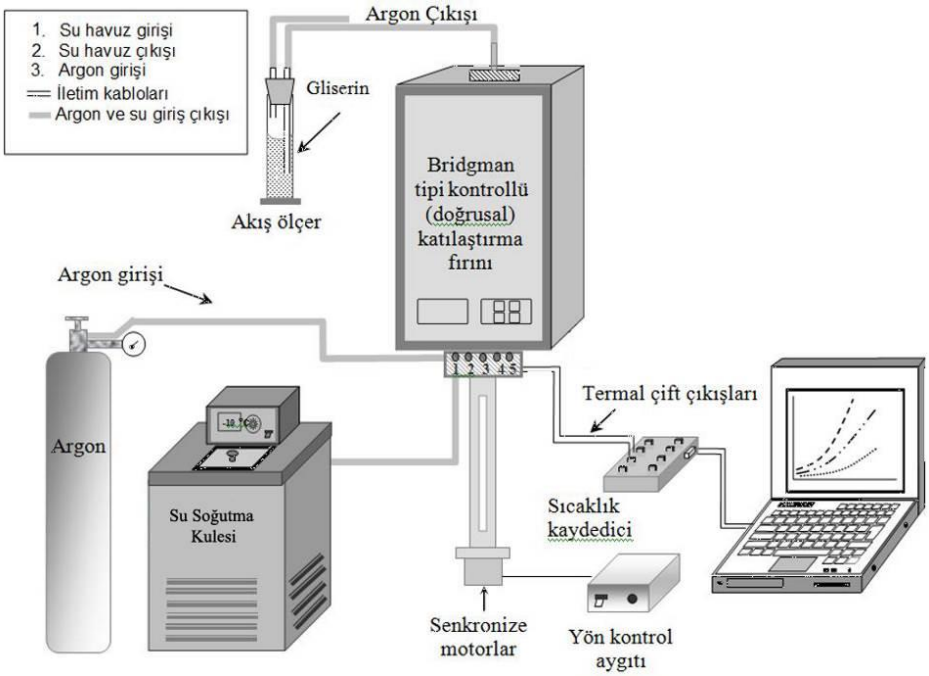


(a) (b) (c)

Şekil 22. (a) Kılcal tüplü grafit kalıbın şematik çizimi (b) İçi metal doldurulmuş grafit numune, (c) kılcal tüplü olarak hazırlanmış numune

3.2 Doğrusal Katılaştırma İşlemi

Doğrusal katılaştırma deney düzeneği; bileşimi belirlenmiş alaşımla doldurulan grafit numune kalıplarının, kontrollü olarak düşey doğrultuda katılaştırıldığı Protherm PTF 12/75/600 model katılaştırma fırını, senkronize motor, yön kontrol ünitesi, argon pozitif basınç ünitesi, akış ölçer (flowmeter), su dolanım sistemi, sıcaklık kaydedicisi (data logger) ve bilgisayardan oluşmaktadır. Doğrusal katılaştırma sisteminin şematik görünümü ve sistemin fotoğrafı Şekil 23 ve 24'te sırasıyla verilmektedir.



Şekil 23. Doğrusal katılaştırma sisteminin şematik görünümü

Şekil 24. Doğrusal katılaştırma sisteminin fotoğrafı

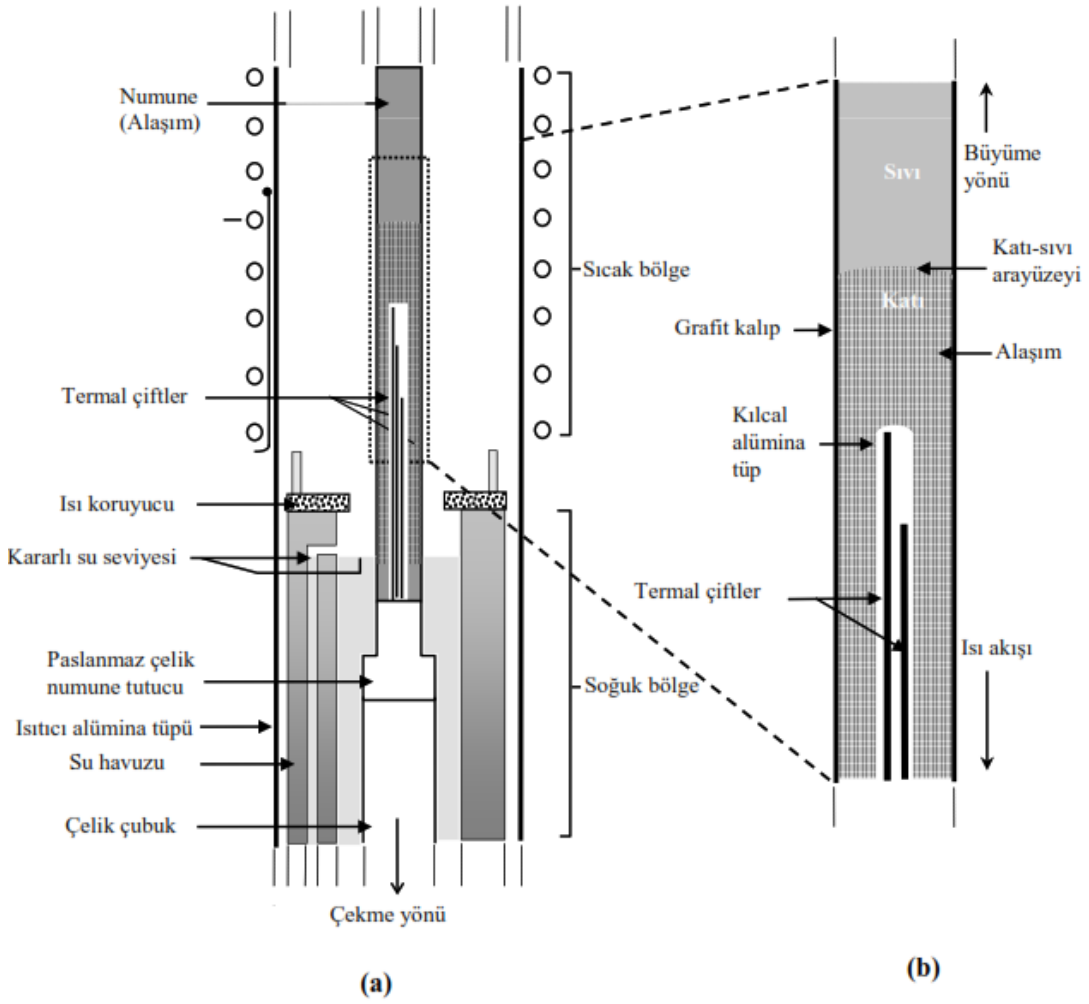
Dökümü yapılan içi dolu grafit çubuklardan biri kontrollü katılaştırma fırınının numune tutucusuna yerleştirilir. Numune uçları, içerisinde etil alkolün bulunduğu cam tüp borular içerisine konularak içerisinde antifrizli su bulunan analog dolanım sisteminin tankının

içerisine sabitlenmiştir. Soğutma tankı, su sıcaklığını 15°C'de sabit olarak tutulmaktadır. Bu sayede deney boyunca sabiti ısı gradyanı oluşması sağlanmaktadır.

Bu işlemden sonra soğutma havuzu giriş ve çıkış hortumlarının bağlantıları ve istenilen hızdaki senkronize motor bağlantıları yapılarak deney düzeneği kurulmuştur. Soğutma havuzundaki akışkanın sıcaklığı istenen düzeye geldikten sonra, yüksek Mg içeren alaşımın kolay oksidasyon potansiyeli nedeniyle sisteme argon gazı verilir. Bu sayede, sıvı haldeki alaşımın katılaşma sürecinde herhangi bir oksidasyona maruz kalmaması sağlanmıştır. Bu aşamadan sonra kontrollü katılaştırma fırını istenilen sıcaklığa ayarlanarak fırının istenilen sıcaklığa gelişi, sıcaklık kaydedici ve bilgisayar bağlantısı yardımıyla kontrol edilmiş ve. numune üzerindeki sıcaklık akışının kararlı hale gelmesi için yaklaşık 30 dk. kadar beklenmiştir. Daha sonra sürücü motor çalıştırılarak doğrusal katılaştırma deney başlatılmıştır. Numune yaklaşık 8 cm katılaştıktan sonra ani soğutma (quench) yapılarak katılaştırma durdurulur ve bu sayede numune hızla soğuk su havuzuna çekilerek o anki haliyle katılaştırılmıştır.

Bu noktada numuneyi havuza çekme işleminin hızının yüksek olması ve havuzdaki suyun sıcaklığının numune üzerinde denge durumunu bozabilecek bir osilasyon oluşturmaması gereklidir. Bu nedenle ani soğutmanın etkin olabilmesi için çekme işlemi çok hızlı yapılır ve iç havuzun sıcaklığı soğutucu sistem sayesinde hassas bir şekilde kontrol edilmektedir.

Bu işlem 3 faklı katılaşma hızında üçer adet olmak üzere her bir ötektik sistem için tekrarlanmıştır. Üçer adet yapılmasının nedeni ise ilk yapılan deneylerde katılaştırma hızlarını ve malzemenin sıcaklık gradyanını belirlemek için içine termal çiftlerin yerleştirileceği alimüna tüpler konulmasıdır. İçine alümina tüp konulan numunelerden çekme-dayanım testi güvenilir sonuçlar vermeyecektir. Aynı zamanda yüksek Mg (>%30 Mg) içeren numunlerin çok kırılgan olmaları nedeniyle grafit kalıptan çıkarma sırasında parçalanmalarıdır. Bu nedenle de metalografik inceleme için bir set numune gafit kalıp içerisinde monteye alınarak zımparalanmış ve mikroyapı incelemesi ile sertlik için kullanılmış, bir set numune, monteye alınmadan mümkün olduğunca katılaştırılmış bölgeden büyük parçalar alınarak (<20 mm) eğme deneyi için kullanılmış, bir set numune de içi kılcal tüplü olarak katılaştırılmıştır. Bu yüzden her bir alaşım için aynı şartlar altında üçer deney yapılmıştır. Kontrollü katılaştırma fırınının içi ve içine yerleştirilen numunenin şematik ayrıntıları Şekil 25'te verilmiştir.



Şekil 25. Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırınının içyapısı (a) Fırının sıcak ve soğuk bölgeleri, (b) Numune kalıbı.

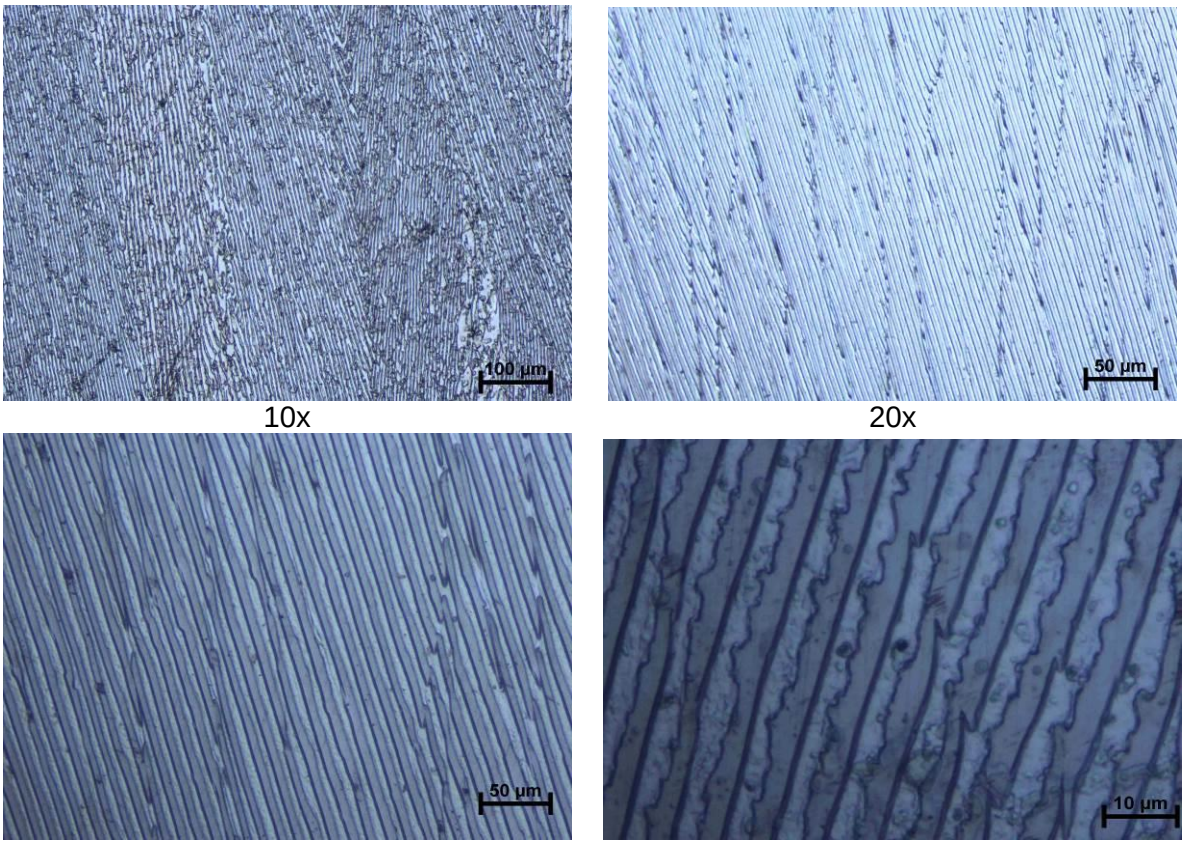
3.2.1 Bridgman Sisteminin Optimizasyonu

Bridgman sistemi, ince kesitli alaşımların doğrusal katılaştırılması için kullanılan bir sistem olup, ısıtma bölgesi ile suyla ani soğutma bölgesinin iyi tasarlanması gerekmektedir. Katılaştırma sisteminin optimizasyonu için, daha önce çalışılmış bir alaşım olan Al-33,2 Cu (%Ağ.) alaşımı belirlenmiştir. Bu alaşım oluşturulup ince grafit tüplere doldurularak katılaştırma sistemine uygun numune haline getirilmiş ve 15 μm/s hızla katılaştırılarak doğrusal katılaştırılmış ürün elde edilmiştir. Bu ürünün grafit tüpten çıkarıldıktan sonra Şekil 26 (a) ve (b)'deki gibi soğuk bakalite montelenmiş ve zımparalanmış, sonra da sırasıyla 6, 3, 1, 0,25, 0,05 μm'lik tane boyutlarına sahip elmas pastalarla 300-350 rpm dönüş hızlarıyla parlatılmıştır. Ardından Keller dağlayıcı (%1HF, %1,5HCl %2,5HNO_3 ve %95 Saf Su) ile dağlanmış ve image analyzer cihazında mikroyapıları incelenmiştir.

(a) (b)

Şekil 26. Doğrusal katılaştırma işleminden sonra elde edilen ürünün (a) grafit tüpten çıkarıldıktan sonraki ve (b) bakalite alınıp metalografik hazırlıktan sonraki görüntüsü

Doğrusal katılaştırılmış Al-33,2 Cu ötektik alaşımının çeşitli büyütmelerdeki mikroyapıları Şekil 27'de verilmektedir.



10x 20x

50x 100x

Şekil 27. Doğrusal katılaştırılmış Al-33,2 Cu ötektik alaşımının 10, 20, 50 ve 100 büyütmelerdeki mikroyapıları

Şekil 27'de verilmiş mikroyapılara göre Al-33,2 Cu ötektik alaşımının optimum Bridgman sistem şartlarıyla doğrusal katılaştırılabildiği belirlenmiştir ve sistemin hareketli parçaları bu sonuçları verecek şekilde sabitlenmiştir. Elde edilen mikroyapılara göre Al-33,2 Cu Ötektik alaşımının Şekil 2 (b)'de verilen çubuksal ötektik yaptığı gözlemlenmektedir.

Bridgan sistemi, ince kesitli alaşımların doğrusal katılaştırılması için kullanılan bir sistem olup, ısıtma bölgesi ile suyla ani soğutma bölgesinin iyi tasarlanması gerekmektedir. Bunun için fırının alt bölgesine Şekil 28 (a)'da gösterilen bir sabit tutucu sistemi yaptırılmıştır. Şekil 28 (b)'de gösterilen ani soğutma kazanının fırının doğru bölgesine yerleştirilebilmesi için yapılan ön çalışmalar sonucu sistem nihai haline getirilmiştir.

(a)

(b)

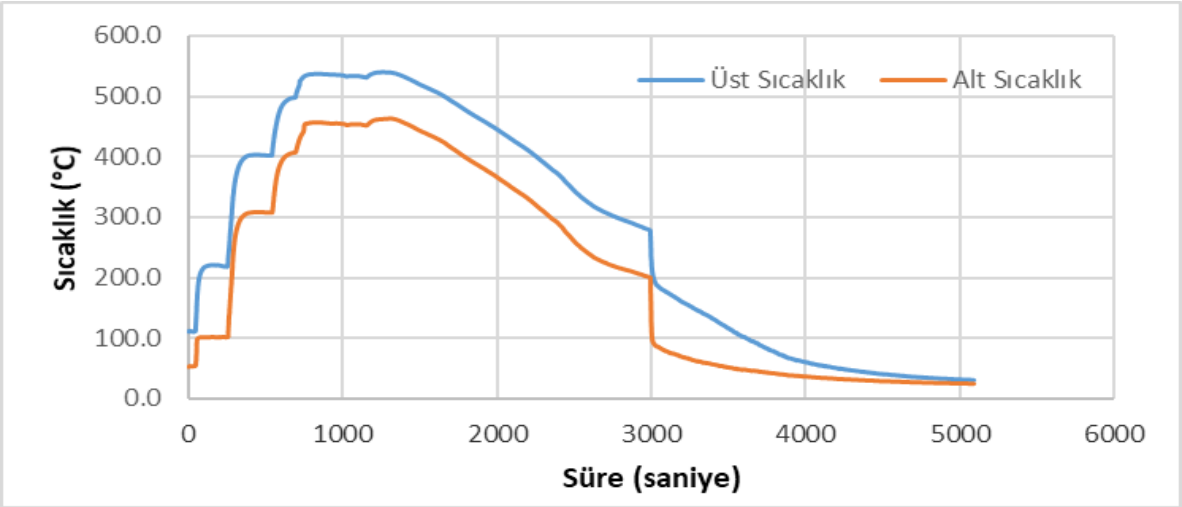
Şekil 28. a) Bridgman sistemi sabit tutucu ve b) Bridgman ani soğutma kazanı

3.2.2 Katılaştırma Hızı ve Sıcaklık Gradyanının Ölçülmesi

Kontrollü katılaştırma deneylerinde kontrol parametrelerden birisi sıcaklık gradyanıdır. Kontrollü katılaştırma fırınına yerleştirilen numune içerisindeki sıcaklık akışı kararlı hale geldikten sonra sürücü motor çalıştırılarak katılaştırma başlatıldıktan sonra. Deney sisteminde kullanılan Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırını düşey olarak tasarlandığından içerisindeki numune aşağıdan yukarıya doğru katılaşmaktadır. Numune içerisindeki kılcal alümina tüpün içerisine yerleştirilen ve aralarında 5 mm mesafe olarak sabitlenmiş iki adet K tipi ısıl çiftler ile proses boyunca sürekli ölçüm alınmıştır. Elde edilen eğride ısıl farkların sabit olduğu bölge tespit edilerek ısıl çiftler arasındaki sıcaklık farkları ve arasındaki mesafelerden

eşitlik (3)'teki formülden ısı gradyanı hesaplanmıştır. Şekil 29'da, Al-32,2Mg-0,37Si alaşımı için katılaştırma süresinde oluşan sıcaklık farklılıkları verilmektedir.

$$G = \frac{\Delta T}{\Delta x} \tag{3}$$



Şekil 29. Al-32,2Mg-0,37Si alaşımı için proses boyunca gerçekleşen sıcaklık farkları

Katılaştırma hızının, sürücü motorların numuneyi çekme hızıyla aynı olduğu varsayılarak Δx/Δt formülünden belirlenmiştir. Sürücü motorlar, 2, 10 ve 20 rpm'lik hızlarda numuneyi çekecek şekilde bağlanmıştır. Bu hızlar da sırasıyla 15, 75 ve 150 µm/s'lik katılaştırma hızlarına tekabül etmektedir.

Aynı zamanda farklı katılaştırma hızlarında elde edilen ısı gradyanları her bir alaşım için farklılık gösterip, farklı katılaştırma hızlarında önemli bir değişiklik göstermemiş ve her alaşımın ısı gradyanı ortalama olarak alınmıştır. Bu sebeple tüm deneyler için Al-32,2Mg-0,37Si, Al-32,2Mg-0,37Fe, Al-32Mg-1,7Ni, Al-12.95Si-4.96Mg alaşımlarının ısı gradyanları sırasıyla; 9,10; 9,12; 8,97 ve 9,55 olarak belirlenmiştir.

3.3 Numune Hazırlama ve Mikroyapı İncelemesi

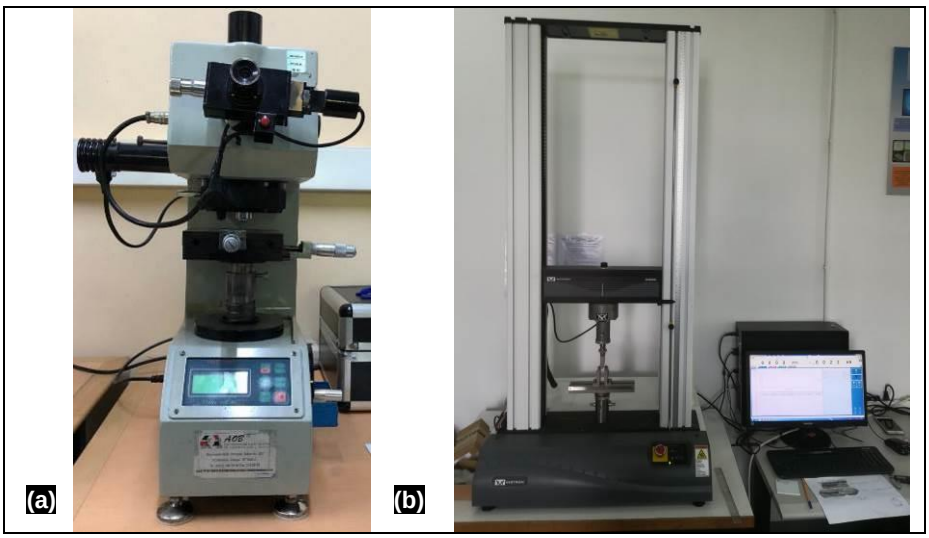
Doğrusal katılaştırma işleminden sonra numuneler, kesilerek grafit kalıptan çıkarılmaya çalışılmış, ancak yüksek Mg içeren alaşımların çok kırılgan olup ufalanması nedeniyle grafit kalıptan ya ufak parçalar halinde çıkarılmış veya grafit kalıpla birlikte soğuk bakalit monteye alınarak (Şekil 30 (a)) 60, 220, 400, 600, 800 ve 1500 µm'lik zımparalarla zımparalanmış, sonra da sırasıyla 6, 3, 1, 0,25, 0,05 µm'lik tane boyutlarına sahip elmas pastalarla 300-350 rpm dönüş hızlarıyla parlatılmıştır. Ardından Keller dağlayıcı (%1HF, %1,5HCl %2,5HNO_3 ve

%95 Saf Su) ile dağlanmış ve Şekil 30 (b)'de gösterilen Nikon Eclipse MA100 image analyzer cihazında mikroyapıları incelenmiştir.

Şekil 30. (a) Grafiti ile montelenen numune ve (b) mikroyapı incelenen image analyzer cihazı

3.4 Doğrusal katılaştırılmış alaşımların mekanik özelliklerin belirlenmesi

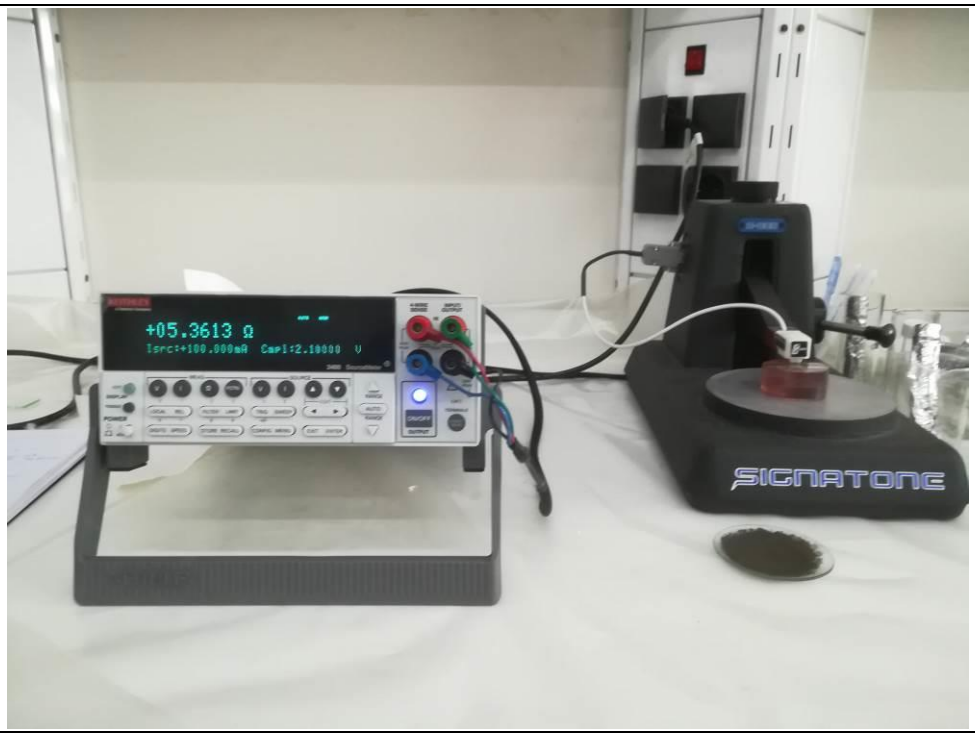
Doğrusal katılaştırılmış numuneler, mikroyapı analizinden sonra, Bulut Makina HVS 1000 model mikrovikers sertlik ölçme cihazında (Şekil 31 (a)) sertlik değerleri incelenmiştir. Sertlik değerleri 200 gr. yük altında 10 sn bekleyip, çıkan izlere 40X mikroskopla bakılarak ölçümler alınmıştır. Bakalite alınmayıp grafitten parçalar halinde çıkarılan numuneler ise INSTRON 3369 model üniversal eğme cihazında 5 mm/dk. hızla ve 20 mm mesnet aralığı ile (Şekil 31 (b)) eğme testine tabi tutulmuştur. Numunelerin hem kırılgan hem de küçük boyutta olmaları nedeniyle çekme testi yerine mekanik özelliklerini belirlemek için eğme testi kullanılmıştır.



Şekil 31. (a) Mikrovikers ve (b) eğme testi cihazları

3.5 Doğrusal katılaştırılmış alaşımların elektriksel özelliklerin belirlenmesi

Doğrusal katılaştırılmış numuneler, mikroyapı analizinden sonra, her bir alaşımın elektriksel özdirenç değerlerinin ölçümünde dört nokta iletkenlik ölçüm metodu kullanılmıştır. Ölçümler için Keithley 2400 marka programlanabilir güç kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. (Şekil 32).



Şekil 32 Elektriksel özdirenç ölçüm sistemi

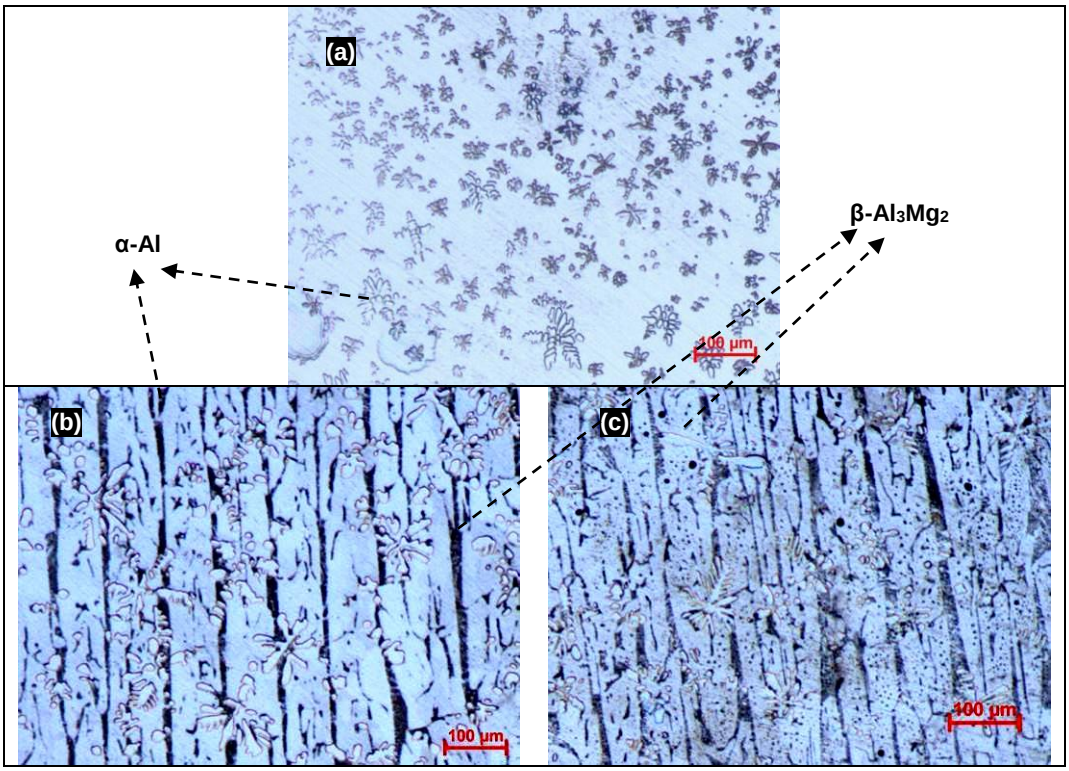
Ölçümler, her bir numune için oda sıcaklığında 0.1 s'de bir kez olmak üzere 100 defa ölçüm alınarak yapılmıştır. Özdirenç değerlerinin belirlenmesi için V=I x R eşitliğinden yararlanılmıştır.

4. BULGULAR

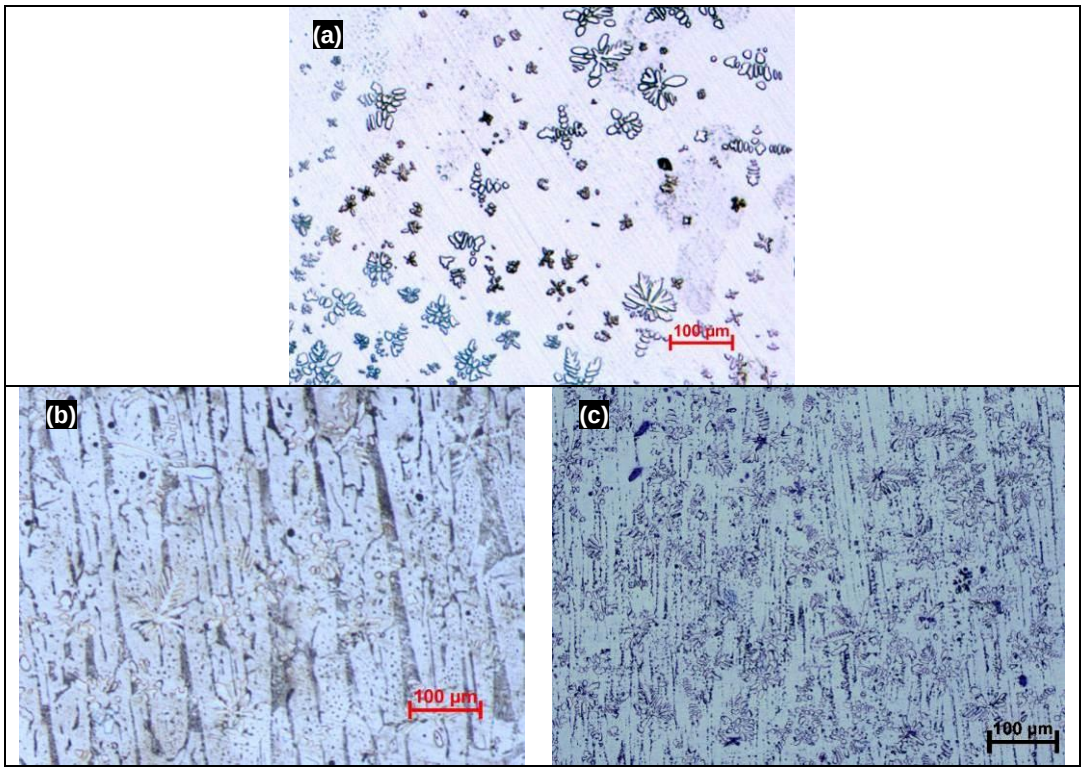
Sistemin optimizasyonu sonrası literatürde verileri bulunmayan ve yüksek magnezyum içeren (>%30 ağ.) Al-32,2Mg-0,37Fe, Al-32,2Mg-0,37Si, Al-32Mg-1,7Ni ötektik alaşım sistemleri, üç farklı hızda katılaştırılmış ve katılaştırma hızının malzemelerin mikroyapı, mikrosertlik, eğme ve elektriksel özdirenç üzerine etkileri araştırılmıştır. Ayrıca hem deneysel metod, hem de analiz metodlarını doğrulamak ve karşılaştırmak için literatürde bulunan Al-12.95Si-4.96Mg alaşımı da aynı şartlarda katılaştırılarak analizleri yapılmıştır. Çalışma sırasında Al-30Mg-12Zn sisteminin de çalışılması planlanırken alaşımın katılaştırma esnasında grafit kalıbı sürekli kırarak deneyleri engellemesi nedeniyle veri alınamamıştır. Bunun sebebinin alaşımın buhar basınçları nispeten yüksek olan ve yüksek oranlarda Zn ve Mg içermesi veya bu alaşımın hızlı genleşmesi olduğu tahmin edilmektedir. Ayrıca numunelerin çok kırılgan olması sebebiyle kılcal alümina tüplü numuneler grafit kalıplardan tek parça halinde ayrılamadığı için termal özellikler incelenememiştir.

4.1 Mikroyapı Analizleri

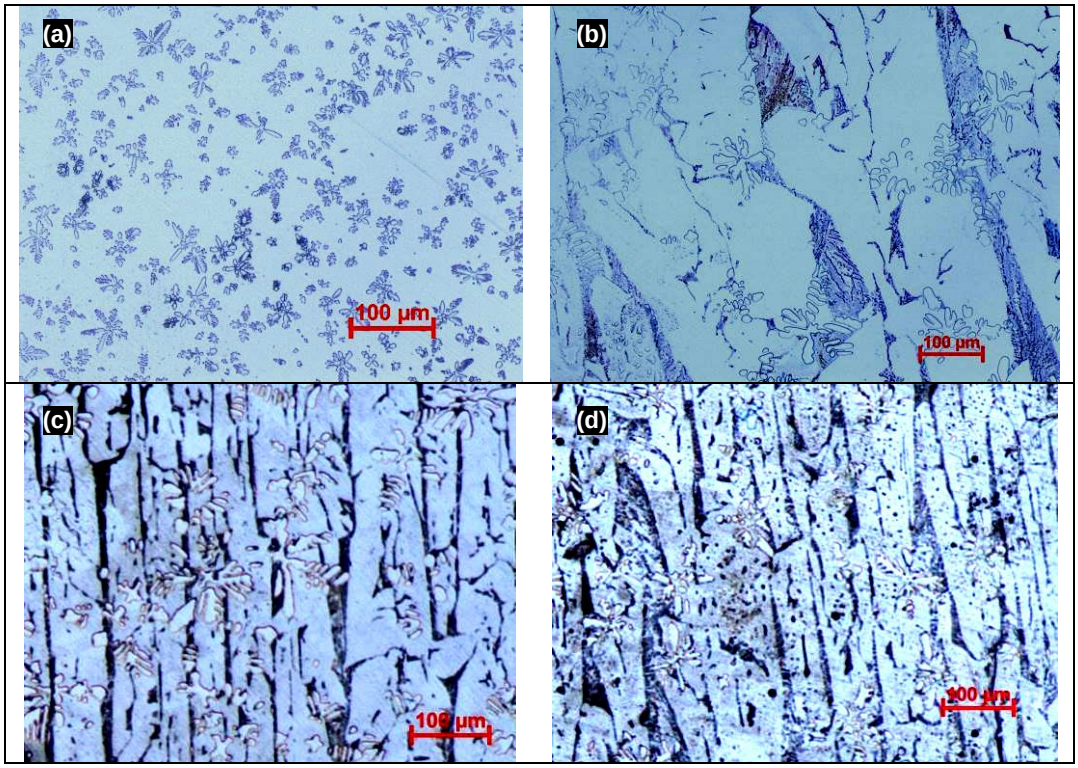
Doğrusal katılaştırma işlemi sonrası Al-32,2Mg-0,37Fe, Al-32,2Mg-0,37Si ve Al-32Mg-1,7Ni ötektik alaşım sistemleri için elde edilen mikroyapılarda benzer yapılarda göründükleri belirlenmiştir. Alaşımların 15, 75 ve 150 μm/s'lik hızlarda ve ani katılaştırılmış mikroyapıları, Şekil 33, 34 ve 35'te verilmiştir. Ayrıca Şekil 36'da Al-12.95Si-4.96Mg alaşımının da farklı hızlarda katılaştırılmış numunelerinin mikroyapıları verilmektedir.



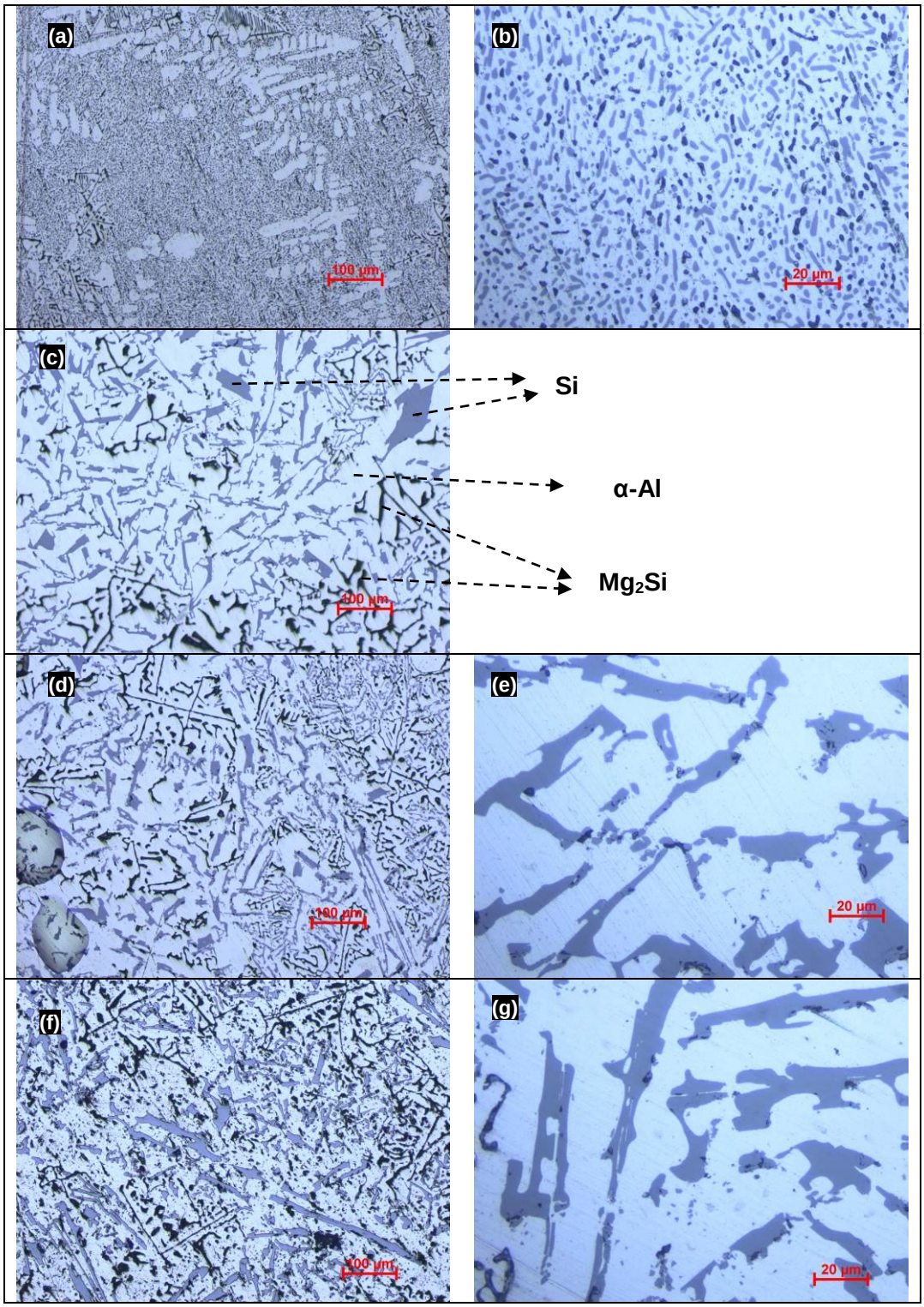
Şekil 33. Al-32,2Mg-0,37Fe alaşımının (a) ani soğutulmuş, (b) 75 µm/s ve (c) 150 µm/s hızlarda katılaştırılmış mikroyapıları (10X)



Şekil 34. Al-32,2Mg-0,37Si alaşımının (a) ani soğutulmuş, (b) 75 µm/s ve (c) 150 µm/s hızlarda katılaştırılmış mikroyapıları (10X)

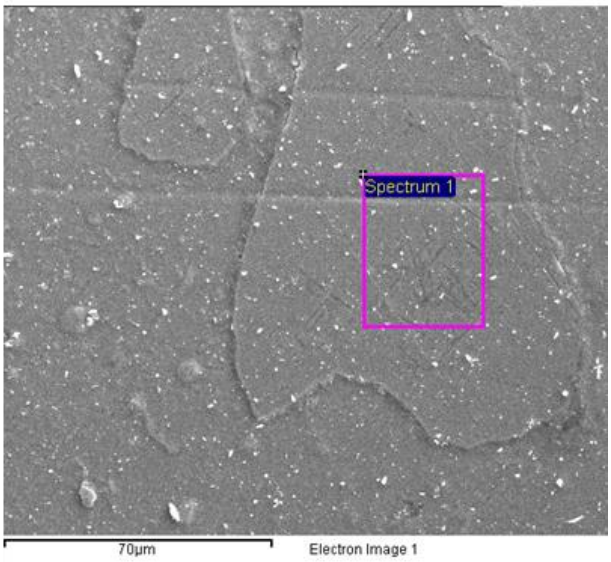


Şekil 35. Al-32Mg-1,7Ni alaşımının (a) ani soğutulmuş, (b) 15 µm/s (c) 75 µm/s ve (d) 150 µm/s hızlarda katılaştırılmış mikroyapıları (10X)

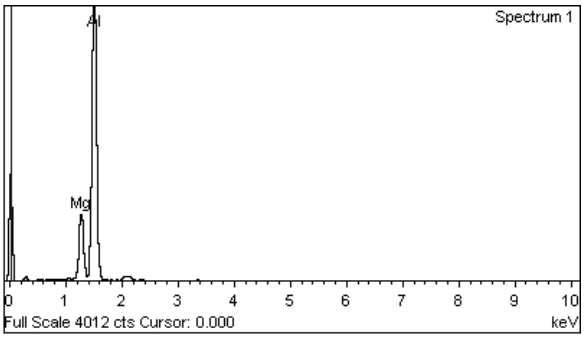


Şekil 36. Al-12.95Si-4.96Mg alaşımının (a) ani soğutulmuş (10X), (b) ani soğutulmuş (50X), (c)15 µm/s (10X), (d) 75 µm/s (10X), (e) 75 µm/s (50X), (f) 150 µm/s (10X) ve (f) 150 µm/s (50X) hızlarda katılaştırılmış mikroyapıları

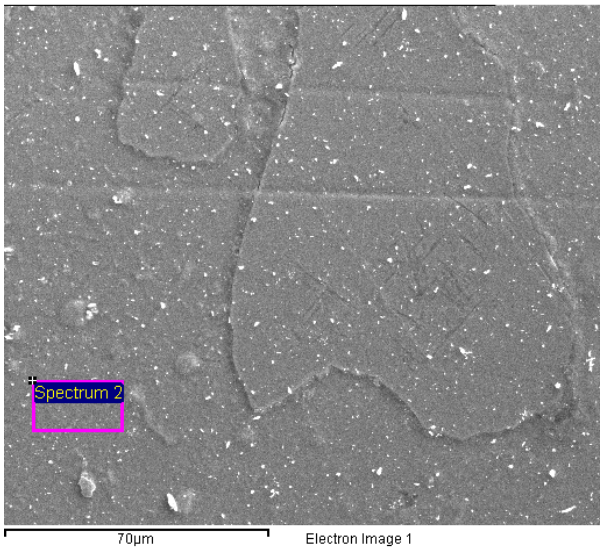
Elde edilen mikroyapı analizlerine göre yüksek magnezyum içeren Al-32,2Mg-0,37Fe, Al-32,2Mg-0,37Si ve Al-32Mg-1,7Ni alaşımlarının tümünde çok benzer mikroyapılar görülmektedir. Bileşimin kontörlü ve fazların anlaşılması amacıyla 15 µm/s hızla katılaştırılan Al-32,2Mg-0,37Fe alaşımına Şekil 37'de görülen SEM analizleri yapılmıştır.



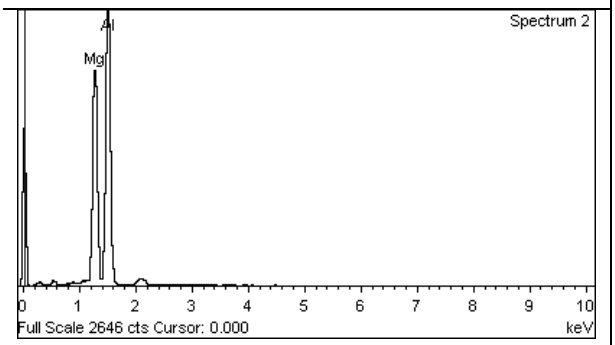
Element	% Ağ.	% Atom
Mg	15.45	16.86
Al	84.55	83.14
Toplam	100.00	



(a)



Element	% Ağ.	% Atom
Mg	33.85	36.22
Al	66.15	63.78
Toplam	100.00	

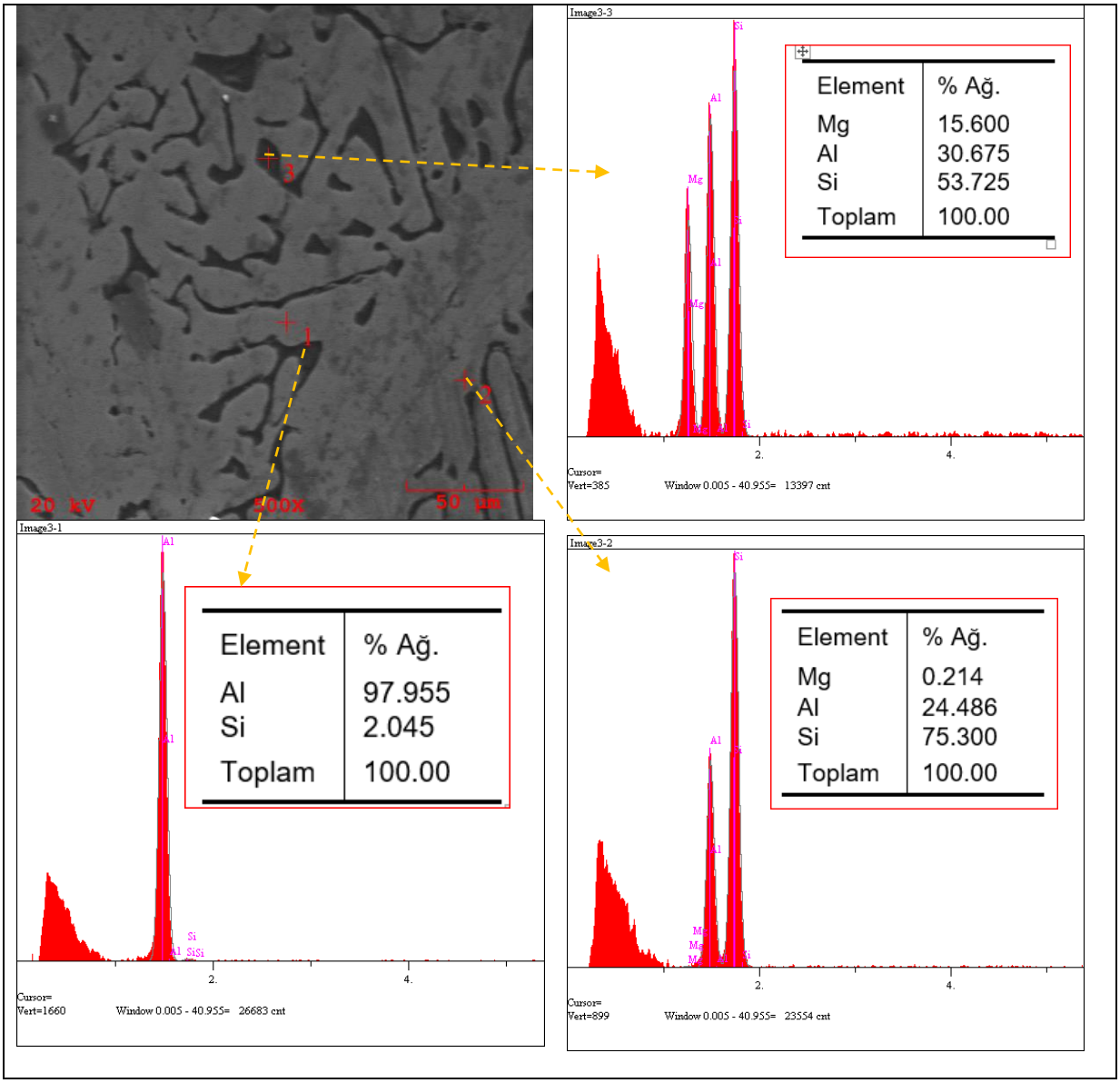


(b)

Şekil 37. 15 µm/s hızla katılaştırılan Al-32,2Mg-0,37Fe alaşımının bölgesel EDS analizi

Şekil 37 (a)'daki EDS analizine göre, çubuksal olan bölgelerin kompozisyonu doymuş α-Al'a benzemektedir. Aynı zamanda diğer bölgelerin analizi ise β-Al_2Mg_3 (Al_8Mg_5) kompozisyonuna uymaktadır. Ancak Fe fazının çok düşük olması nedeniyle SEM analizlerinde rastlanmamıştır.

Düşük Mg içeren Al-12.95Si-4.96Mg alaşımının 150 µm/s hızında katılaştırılan numunenin EDS analizi Şekil 38'de gösterilmektedir.



Şekil 38. 150 µm/s hızla katılaştırılan Al-12.95Si-4.96Mg alaşımının noktasal EDS analizi

Şekil 36 ve 38'deki verilere göre, mikroyapıları ve katılaştırma hızına göre dendritler arasındaki mesafe değişimi ile kimyasal analizleri teorik verilerle uyum sağlamaktadır (Kaygisiz ve Maraşli, 2015).

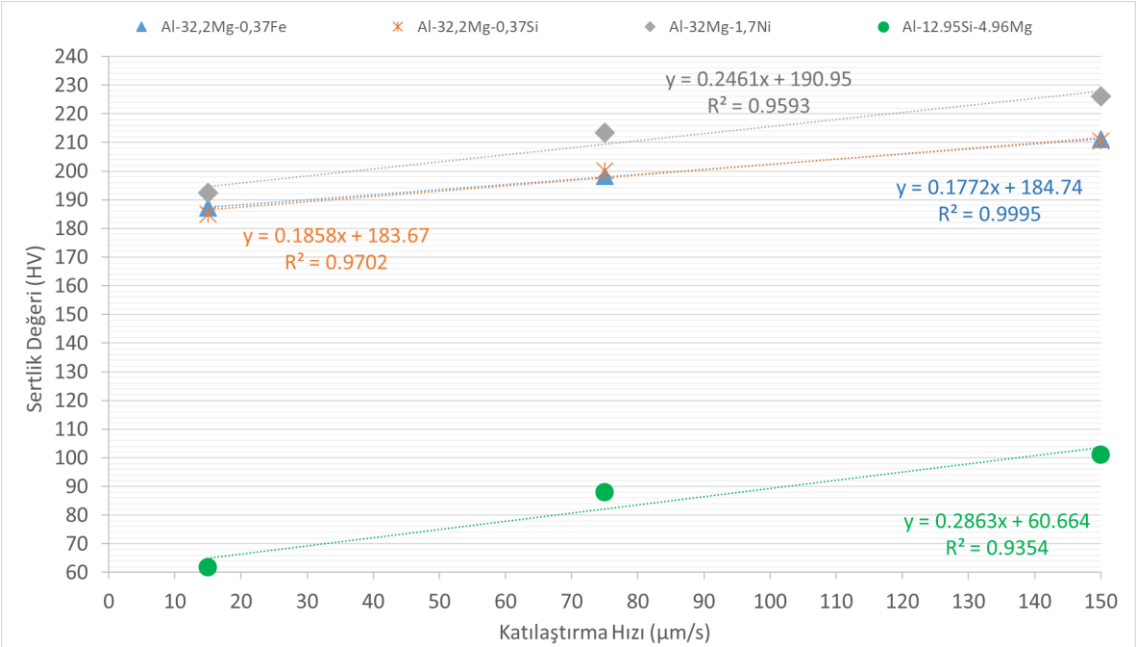
Genel olarak yüksek Mg içeren mikroyapıların katılaştırma hızı arttıkça daha ince taneler oluştuğu görülmektedir. Bu da doğrusal katılaştırma işleminin doğru çalıştığını göstermektedir.

4.2 Doğrusal Katılaştırmanın Mekanik Özelliklere Etkisi

Proje kapsamında yüksek Mg içeren Al-32,2Mg-0,37Fe, Al-32,2Mg-0,37Si, Al-32Mg-1,7Ni ile literatürle karşılaştırmak amacıyla düşük Mg içeren Al-12.95Si-4.96Mg alaşımlarının doğrusal katılaştırma ile mekanik özellikler arasındaki ilişki incelenmiştir. Bunun için numunelere sertlik ve eğme testleri uygulanmıştır.

4.2.1 Doğrusal Katılaştırmanın Sertliğe Etkisi

Doğrusal katılaştırılmış silindirik numuneler, eğer yüksek Mg içeriyorsa grafitli, diğer numuneler ise grafitsiz şekilde monteye alınıp mikroyapı incelemesi yapıldıktan sonra sertlikleri ölçülmüştür. Sertlikler, hızlı soğutulmuş bölgeden başlayarak doğrusal katılaştırılmış bölgenin sonuna kadar 1'er cm. arayla ölçüm alınmış ve doğrusal katılaştırma ile hızlı soğuma geçiş bölgesi atlanarak ölçüm alınmıştır. Ölçüm sonucunda elde edilen veriler, doğrusal katılaştırma veya hızlı soğutma bölgesine göre ortalama alınarak verilmiştir. Şekil 39'da Al-32,2Mg-0,37Fe, Al-32,2Mg-0,37Si, Al-32Mg-1,7Ni ile Al-12.95Si-4.96Mg alaşımlarının katılaştırma hızına göre sertlik değerleri verilmiştir.

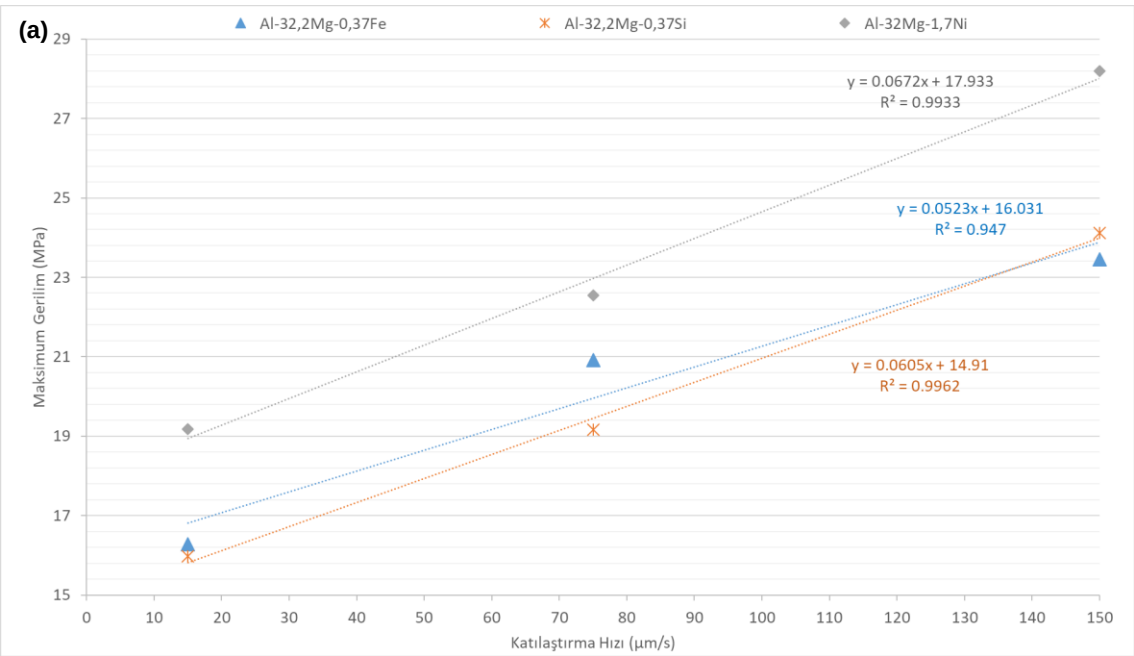


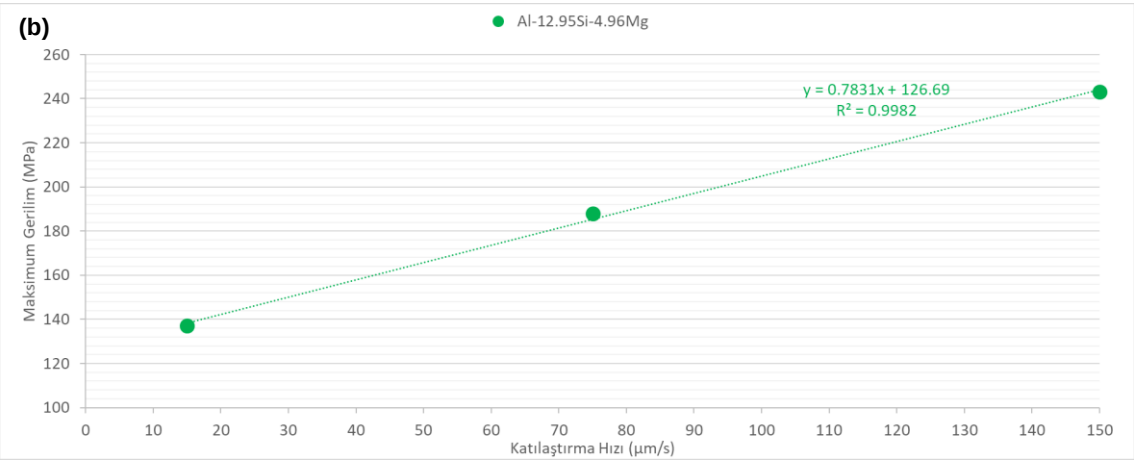
Şekil 39. Al-32,2Mg-0,37Fe, Al-32,2Mg-0,37Si, Al-32Mg-1,7Ni ile Al-12.95Si-4.96Mg alaşımlarının katılaştırma hızına göre sertlik değişimleri

Şekil 39'da verildiği üzere, Fe ve Si içeren alaşımların sertlik değerleri birbirilerine çok yakın çıkmıştır. Diğer yandan Ni'li alaşımın sertliği diğerlerine göre nispeten daha yüksektir. Düşük Mg içeren alaşımın ise sertliği diğerlerinden oldukça düşük çıkmakla beraber literatürdeki değerlere göre de düşük çıkmaktadır. Genel olarak artan katılaştırma hızı ile birlikte alaşımların sertlikleri de artış göstermekte ve doğrusal bir regresyona oturtulabilmektedir.

4.2.2 Doğrusal Katılaştırmanın Eğme Dayanımına Etkisi

Doğrusal katılaştırılmış silindirik numuneler, yüksek kırılganlıklarından dolayı (özellikel yüksek Mg içeren numuneler) mümkün olduğunca büyük parçalar halinde grafit kalıptan çıkarılmaya çalışılmış ve doğrusal katılaştırma bölgesinde bulunup 20 mm'den büyük numuneler, eğme testine tabi tutulmuştur. Şekil 40 (a)'da Al-32,2Mg-0,37Fe, Al-32,2Mg-0,37Si, Al-32Mg-1,7Ni'in, (b) de ise Al-12.95Si-4.96Mg alaşımlarının katılaştırma hızına göre maksimum gerilim (eğme dayancı) değerleri verilmiştir.



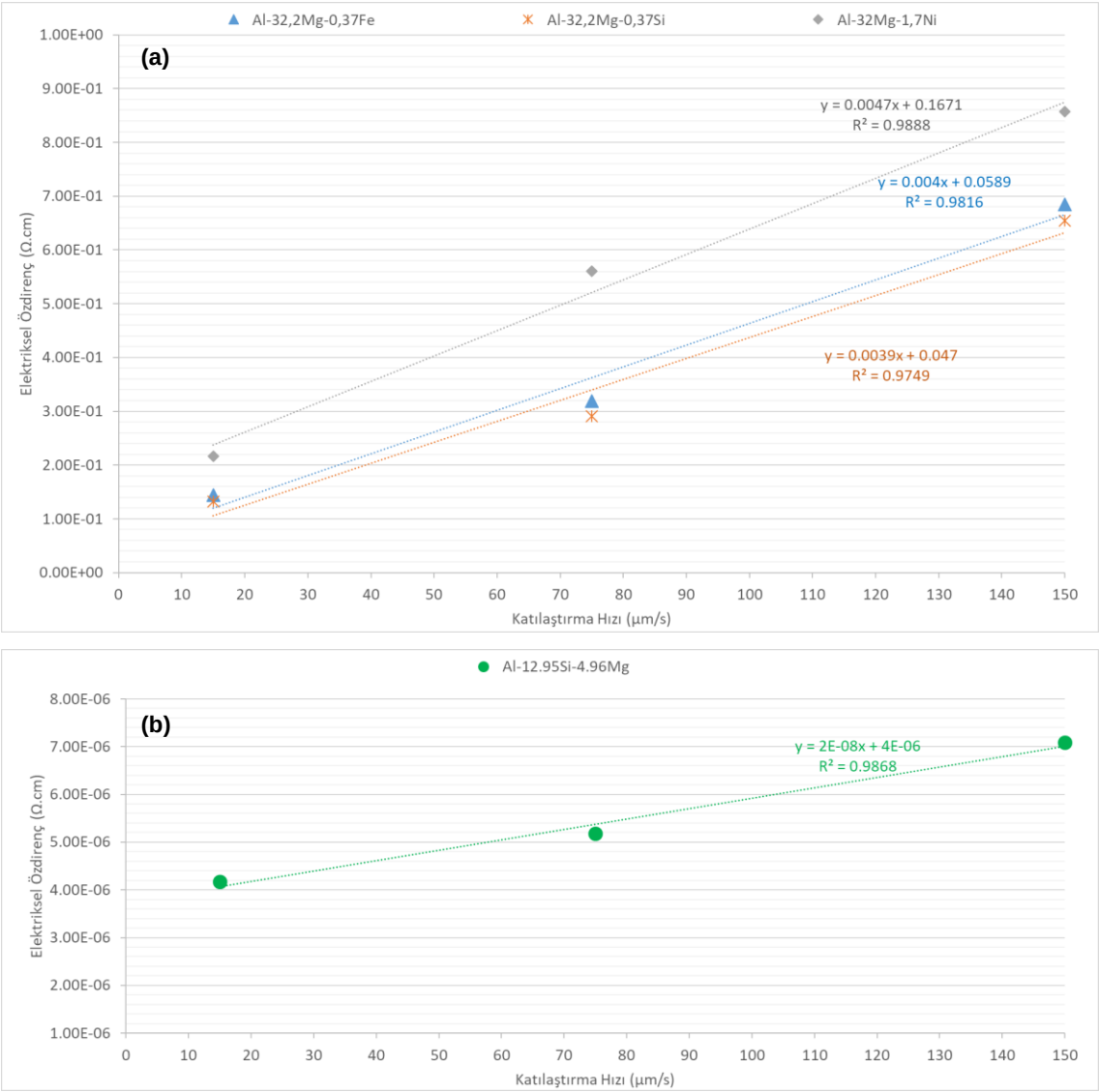


Şekil 40. (a) Al-32,2Mg-0,37Fe, Al-32,2Mg-0,37Si, Al-32Mg-1,7Ni ile (b) Al-12.95Si-4.96Mg alaşımlarının katılaştırma hızına göre eğme dayancı (maksimum gerilim) değişimleri

Şekil 40'ta verilen sonuçlara göre eğme dayanımı, artan katılaştırma hızıyla birlikte artış göstermektedir. Ancak yüksek Mg içeren alaşımların eğme dayanımları çok düşükken Al-12.95Si-4.96Mg alaşımının dayanımı çok yüksektir.

4.3 Doğrusal Katılaştırmanın Elektriksel Özelliklere Etkisi

Doğrusal katılaştırılmış monteli numunelerin yüzeyi parlatılıp metalografik incelenmesinden sonra 4 prob tekniğiyle elektriksel özdirençleri ölçülerek hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlerin katılaştırma hızına göre değişimi Şekil 41'de verilmektedir.



Şekil 41. (a) Al-32,2Mg-0,37Fe, Al-32,2Mg-0,37Si, Al-32Mg-1,7Ni ile (b) Al-12.95Si-4.96Mg alaşımlarının katılaştırma hızına göre elektriksel özdirenç değişimleri

Elde edilen sonuçlara göre, katılaşma hızının artışı, özdirencin artışına neden olmaktadır. Tanelerin incelmesiyle beraber, numunelerin mekanik özelliklerinin artmasına neden olmuştur. Ancak tane küçülmesi aynı zamanda tanelerin süreksizliğinin ve gerilmelerin artış anlamına geldiğinden aynı zamanda da elektriksel direncinin artışına neden olmaktadır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, özellikle son yıllarda hem tek kristal büyütme hem de doğrusal katılaştırma sistemi olan Bridgman sisteminin kurulumu ve literatürde henüz bir çalışma olmayan yüksek magnezyum (>%30 Mg) içeren bazı alüminyum alaşımları incelenmiştir. Bunun için Al-32,2Mg-0,37Fe, Al-32,2Mg-0,37Si, Al-32Mg-1,7Ni ötektik alaşım sistemleri ile yapılan deneylerin kontrolünü sağlamak amacıyla literatürde verileri bulunan Al-12.95Si-4.96Mg alaşımı hazırlanmıştır. Bu alaşımlar, 15, 60 ve 150 μm/s hızlarda doğrusal katılaştırılmıştır. Çalışılması düşünülen Al-30Mg-12Zn alaşımı her seferinde kalıba hasar verdiği için incelenememiştir. Ayrıca bu alaşımların kırılgan yapıları nedeniyle numuneler grafit kalıptan tek parça halinde ayrılamadığı için termal özellikleri incelenememiştir. Bu sebeple elde edilen numunelerin mikroyapı, mekanik özellikler ve elektriksel özellikleri incelenerek katılaştırma hızıyla ilişkileri irdelenmiş ve şu sonuçlar elde edilmiştir;

1) Katılaştırma hızının artışıyla birlikte mikroyapılarda yönlenmiş tanelerin küçüldüğü görülmektedir. Bunun yanında 32,2Mg-0,37Fe, Al-32,2Mg-0,37Si ve Al-32Mg-1,7Ni'in benzer mikroyapılara sahip oldukları ve yapılan SEM analizlerinde yapıların α-Al ve β-Al_3Mg_2'den oluştuğu gözlemlenmiştir.

2) Al-12.95Si-4.96Mg ötektik alaşımının kontrollü katılaştırılması sonucunda yapılan SEM analiziyle ana (matrix) Al fazı üzerinde gri levhasal Si fazı ve siyah çin yazısı yapıda Mg_2Si fazı olmak üzere üç farklı fazın olduğu görülmüş ve bu mikroyapı ve fazların literatürle uyuştuğu görülmüştür. Bu da proje kapsamında kurulan Bridgman sistemiyle yapılan doğrusal katılaştırmanın güvenilir olduğunu göstermektedir.

3) Artan katılaştırma hızı ile birlikte yüksek magnezyum içeren alaşımların mekanik özelliklerini artmaktadır. Her ne kadar yüksek Mg içeren alaşımların mekanik özellikleri artsa bile yine de sertlikleri yüksek ve mukavemetleri düşüktür. Bu sebeple kırılganlığı çok yüksek bir yapı elde edilmektedir.

4) Düşük Mg içeren Al-12.95Si-4.96Mg ötektik alaşımı, 240 MPa'a ulaşan eğme dayanımı vermekte ve artan katılaştırma hızıyla birlikte mekanik özelliklerinde artış göstermektedir.

5) Katılaşma hızının artışıyla mekanik özelliklerle ters orantılı olarak elektriksel iletkenlik düşmekte ve özdirenç artmaktadır. Özellikle yüksek magnezyum içeren alaşımların elektriksel iletkenlikleri çok düşük bulunmuştur.

6) Yüksek magnezyum içeren alaşımlardaki β-Al_3Mg_2 fazı alaşımın mukavemetini düşürmekle beraber, doğrusal katılaştırma işlemi bile mukavemeti yeterli oranda artıramamaktadır. Bu da bu alaşımların ürün olarak kullanılmasını engellemektedir. Ancak düşük magnezyum içeren Al-12.95Si-4.96Mg ötektik alaşımının mekanik özellikleri doğrusal katılaştırma yöntemi ile geliştirilerek endüstriyel olarak kullanımı mümkün görünmektedir.

KAYNAKLAR

Aker, A., Kaya, H. 2016. "Determination of Microstructure, Mechanical, Electrical and Thermal Properties of The Directionally Solidified Al-Si-Co Ternary Alloy", Materials Research, 19(1), 243–251.

Basavakumar, K. G., Mukunda, P. G., Chakraborty, M. 2008. "Influence of grain refinement and modification on microstructure and mechanical properties of Al-7Si and Al-7Si-2.5Cu cast alloys", Materials Characterization, 59(3), 283–289.

Bayram, Ü., Maraşlı, N. 2018. "Thermal conductivity and electrical resistivity dependences on growth rate in the directionally solidified Al–Cu–Ni eutectic alloy", Journal of Alloys and Compounds, 753, 695–702.

Bei, H., George, E. P. 2005. "A Microstructures and mechanical properties of a directionally solidified NiAl-Mo eutectic alloy", Acta Materialia, 53(1), 69–77.

Belov, N. A., Eskin, D. G., Aksenov, A. A. 2005. Multicomponent Phase Diagrams: Applications for Commercial Aluminum Alloys: Applications for Commercial Aluminum Alloys. İngiltere: Elsevier.

Boschert, S., Schmidt, A., Siebert, K. G., Benz, K., Dziuk, G., Kaiser, T. 2003. Simulation of Industrial Crystal Growth by the Vertical Bridgman Method. *Mathematics — Key Technology for the Future: Joint Projects between Universities and Industry*, W. Jäger and H.-J. Krebs, Eds., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 315–331.

Böyük, U. 2009. Üçlü Metalik Alaşımların Kontrollü Doğrusal Katılaştırılması ve Mikrosertliğinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.

Böyük, U. 2012. "Physical and mechanical properties of Al-Si-Ni eutectic alloy", Metals and Materials International, 18(6), 933–938.

Böyük, U., Maraşlı, N. 2009. "The microstructure parameters and microhardness of directionally solidified Sn–Ag–Cu eutectic alloy", Journal of Alloys and Compounds, 485(1–2), 264–269.

Böyük, U., MaraşlI, N., Kaya, H., ÇadIrlI, E., Keşlioğlu, K. 2009. "Directional solidification of Al-Cu-Ag alloy", Applied Physics A: Materials Science and Processing, 95(3), 923–932.

Brandt, R., Neuer, G. 2003. "Electric resistivity and thermal conductivity of aluminium alloys up to and above the melting temperature", Advanced Engineering Materials, 5(1), 52–55.

Brandt, R., Neuer, G. 2007. "Electrical resistivity and thermal conductivity of pure aluminum and aluminum alloys up to and above the melting temperature", International Journal of Thermophysics, 28(5), 1429–1446.

Brito, C., Costa, T., Vida, T., Bertelli, F., Cheung, N., Spinelli, J. E., Garcia, A. 2015.

"Characterization of Dendritic Microstructure, Intermetallic Phases, and Hardness of Directionally Solidified Al-Mg and Al-Mg-Si Alloys", Metallurgical and Materials Transactions A, 46(8), 3342–3355.

Burkov, A., Kishimoto, K., Ravich, Y., Fedorov, M., Ktitorov, S., Anatychuk, L., Slack, G., Burke, E., Harringa, J., Han, S., Koyanagi, T., Nagao, K., Studd, R., Trimmer, D., Bennett, G., Hall, W., Borshchevsky, A., Cassart, M., Redstall, R., Hartman, R., N. 1995. “CRC Handbook of Thermoelectrics.” 1st Editio. Boca Raton, Florida, United States,: CRC Press, Boca Raton, Florida, United States,.

Cadirli, E., Kaya, H., Gündüz, M. 2003. "Effect of growth rates and temperature gradients on the lamellar spacing and the undercooling in the directionally solidified Pb-Cd eutectic alloy", Materials Research Bulletin, 38(9–10), 1457–1476.

Çadirli, E., Gündüz, M. 2000. "Dependence of lamellar spacing on growth rate and temperature gradient in the lead-tin eutectic alloy", Journal of Materials Processing Technology, 97(1–3), 74–81.

Çadırlı, E., Kaya, H., Gümüş, a., Yılmazer, I. 2006. "Temperature-Dependence of Electrical Resistivity of Cd-Sn, Bi-Sn, and Al-Si Eutectic and Al-3wt.%Si Hypoeutectic Alloys", Journal of Materials Engineering and Performance, 15(4), 490–493.

Capper, P. 2010. “Crystal Growth Technology: Semiconductors and Dielectrics.” Weinheim, Almanya: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Almanya.

Ceschini, L., Morri, A., Morri, A., Gamberini, A., Messieri, S. 2009. "Correlation between ultimate tensile strength and solidification microstructure for the sand cast A357 aluminium alloy", Materials & Design, 30(10), 4525–4531.

Chen, Y. J., Davis, S. H. 2002. "Dynamics and instability of triple junctions of solidifying eutectics: Flow-modified morphologies", Acta Materialia, 50(9), 2269–2284.

Cook, B., Anderson, I. E., Harringa, J. L., Terpstra, R. L. 2002. "Effect of heat treatment on the electrical resistivity of near-eutectic Sn-Ag-Cu Pb-Free solder alloys", Journal of Electronic Materials, 31(11), 1190–1194.

Cook, B., Anderson, I. E., Harrigan, J. L., Kang, S. K. 2003. "Isothermal aging of near-eutectic Sn-Ag-Cu solder alloys and its effect on electrical resistivity", Journal of Electronic Materials, 32(12), 1384–1391.

Ding, H., Chen, R., Guo, J., Bi, W., Xu, D., Fu, H. 2005. "Directional solidification of titanium alloys by electromagnetic confinement in cold crucible", Materials Letters, 59(7), 741–745.

Dutta, S., Shubha, V., Ramesh, T. G., D’Sa, F. 2009. "Thermal and electronic properties of Bi1−xSbx alloys", Journal of Alloys and Compounds, 467(1–2), 305–309.

Dzib-Pérez, L., González-Sánchez, J., Pérez, T., Bartolo-Pérez, P., Juárez, A. 2006. "The role of solidification rate in the corrosion resistance of a directionally solidified novel

aluminium-lanthanum alloy", Scripta Materialia, 55(3), 255–258.

E. Çadırlı, A. Ülgen, M. G. 1999. "Directional Solidification of the Aluminium-Copper Eutectic Alloy.pdf", Materials Transaction, JIM, 40(9), 989–996.

Engin, S. 2009. Metalik Alaşımların Katı-Sıvı Arayüzey Enerjilerinin Doğrusal Büyütme Tekniği İle Ölçümü. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.

Engin, S. 2013. Kontrollü Katılaştırılan Çok Bileşenli Ötektik Alaşımların, Mekanik ve Elektriksel Özelliklerinin Katılaştırma Parametrelerine Bağlılığının İncelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.

Engin, S., Büyük, U., Maraşlı, N. 2016. "The effects of microstructure and growth rate on microhardness, tensile strength, and electrical resistivity for directionally solidified Al–Ni–Fe alloys", Journal of Alloys and Compounds, 660, 23–31.

Fan, J., Li, X., Su, Y., Guo, J., Fu, H. 2010. "The microstructure parameters and microhardness of directionally solidified Ti-43Al-3Si alloy", Journal of Alloys and Compounds, 506(2), 593–599.

Fuller, C. B., Seidman, D. N., Dunand, D. C. 2003. "Mechanical properties of Al(Sc,Zr) alloys at ambient and elevated temperatures", Acta Materialia, 51(16), 4803–4814.

G.E. Trotten, D. S. M. 2003. Handbook of Aluminum Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes. CRC Press.

Gu, M. 2002. "Directional solidification of aluminium – copper alloys", Materials Science and Engineering A, 327, 167–185.

Gündüz, M., Kaya, H., Çadirli, E., Özmen, A. 2004. "Interflake spacings and undercoolings in Al-Si irregular eutectic alloy", Materials Science and Engineering A, 369(1–2), 215–229.

He, W., Zhong, H., Liu, H., Zhang, J., Zeng, L. 2009. "Crystal structure and electrical resistivity of NdCo2Al8", Journal of Alloys and Compounds, 467(1–2), 6–9.

Hekmat-Ardakan, A., Ajersch, F. 2010a. "Thermodynamic evaluation of hypereutectic Al-Si (A390) alloy with addition of Mg", Acta Materialia, 58(9), 3422–3428.

Hekmat-Ardakan, A., Ajersch, F. 2010b. "Effect of conventional and rheocasting processes on microstructural characteristics of hypereutectic Al-Si-Cu-Mg alloy with variable Mg content", Journal of Materials Processing Technology, 210(5), 767–775.

Hu, L., Hu, W., Gottstein, G., Bogner, S., Hollad, S., Bührig-Polaczek, A. 2012. "Investigation into microstructure and mechanical properties of NiAl-Mo composites produced by directional solidification", Materials Science and Engineering A, 539, 211–222.

Jaafar, S. 2013. Kontrollü Katılaştırılmış Al-Co ve Sn-Zn Ötektik Alaşımlarının Ötektik Mesafe, Mikrosertlik ve Elektriksel Özdirenç Değerlerinin Büyütme Hızına Bağlılığının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.

Jain, M., Gupta, S. P. 2003. "Formation of intermetallic compounds in the Ni-Al-Si ternary system", Materials Characterization, 51(4), 243–257.

Jordan, R. M., Hunt, J. D. 1971. "The growth of lamellar eutectic structures in the Pb−Sn and Al−CuAl2 systems", Metallurgical and Materials Transactions B, 2(12), 3401–3410.

Karamazi, Y. 2015. Doğrusal Katılaştırılmış Çinko-Alüminyum Esaslı Üçlü Ötektik Alaşımların Yapı Parametreleri ile Mekanik ve Elektriksel Özelliklerinin Katılaştırma Hızına Bağlılıklarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.

Kaya, H., Çadrli, E., Gündüz, M., Ulgen, A. 2003a. "Effect of the Temperature Gradient, Growth Rate, and the Interflake Spacing on the Microhardness in the Directionally Solidified Al-Si Eutectic Alloy", Journal of Materials Engineering and Performance, 12(5), 544–551.

Kaya, H., Cadurli, E., Gunduz, M. 2003b. "Effect of Growth Rates and Temperature Gradients on the Spacing and Undercooling in the Broken-Lamellar Eutectic Growth (Sn-Zn Eutectic System)", Journal of Materials Engineering and Performance, 12(4), 456–469.

Kaygisiz, Y., Maraşli, N. 2015. "Microstructural, mechanical and electrical characterization of directionally solidified Al-Si-Mg eutectic alloy", Journal of Alloys and Compounds, 618, 197–203.

Kaygısız, Y. 2014. Doğrusal Katılaştırılmış Alüminyum Esaslı Ötektik Çoklu Alaşımlarda Yapı Parametreleri, Mekanik ve Elektriksel Özelliklerinin Katılaştırma Hızına Bağlılığının İncelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.

Li, C., Wu, Y., Li, H., Liu, X. 2009. "Microstructural formation in hypereutectic Al-Mg2Si with extra Si", Journal of Alloys and Compounds, 477(1–2), 212–216.

Liu, H. Y., Li, Y., Jones, H. 1998. "Thermal stability of the alpha Zn Mg2Zn11 and alpha Zn beta Al eutectics obtained by Bridgman growth", Journal Of Materials Science, 33(5), 1159–1164.

Milenkovic, S., Coelho, A. A., Caram, R. 2000. "Directional solidification processing of eutectic alloys in the Ni-Al-V system", Journal of Crystal Growth, 211(1), 485–490.

Mrówka-Nowotnik, G., Sieniawski, J. 2005. "Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys", Journal of Materials Processing Technology, 162–163, 367–372.

Nasiri, N., Emamy, M., Malekan, A. 2012. "Microstructural evolution and tensile properties of the in situ Al-15%Mg2Si composite with extra Si contents", Materials and Design, 37, 215–222.

Norlund, C. A., Trivedi, R. 2000. "Eutectic interface configurations during melting", Metallurgical and Materials Transactions A, 31(4), 1261–1269.

Ourfali, M. F., Todd, I., Jones, H. 2005. "Effect of solidification cooling rate on the morphology and number per unit volume of primary Mg2Si particles in a hypereutectic Al-Mg-Si alloy", Metallurgical and Materials Transactions A, 36(5), 1368–1372.

Piatti, G., Pellegrini, G. 1980. "The structure of the unidirectionally solidified Al-Al21Pt5 eutectic alloys", Journal of Materials Science, 15(9), 2403–2408.

Rios, C. T., Milenkovic, S., Gama, S., Caram, R. 2002. "Influence of the growth rate on the microstructure of a Nb-Al-Ni ternary eutectic", Journal of Crystal Growth, 237–239(1–4 I), 90–94.

Şahin, M., Şensoy, T., Çadırlı, E. 2018. "Microstructural evolution and mechanical properties of Sn-Bi-Cu ternary eutectic alloy produced by directional solidification", 21(2).

Savaşkan, T., Turhal, M. Ş. 2003. "Relationships between cooling rate, copper content and mechanical properties of monotectoid based Zn-Al-Cu alloys", Materials Characterization, 51(4), 259–270.

Shabestari, S. G., Shahri, F. 2004. "Influence of modification, solidification conditions and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy", Journal of Materials Science, 39(6), 2023–2032.

Souza, S., Rios, C. T., Coelho, A. A., Ferrandini, P. L., Gama, S., Caram, R. 2005. "Growth and morphological characterization of Al-Cr-Nb eutectic alloys", Journal of Alloys and Compounds, 402(1–2), 156–161.

Sun, Y. P., Yan, H. G., Chen, Z. H. 2009. "Microstructure and mechanical properties of Al - Zn - Mg - Cu/SiC composite after heat treatment", Metal Science and Heat Treatment, 51(7–8), 394–397.

Tie, D., Guan, R., Guo, N., Zhao, Z., Su, N., Li, J., Zhang, Y. 2015. "Effects of Different Heat Treatment on Microstructure, Mechanical and Conductive Properties of Continuous Rheo-Extruded Al-0.9Si-0.6Mg (wt%) Alloy", Metals, 5(2), 648–655.

Totten, G. E., Mackenzie, D. S. 2003. Handbook of Aluminum Vol. 2: Alloy Production And Materials Manufacturing. New York: CRC Press.

Vetrano, J. S., Bruemmer, S. M., Pawlowski, L. M., Robertson, I. M. 1997. "Influence of the particle size on recrystallization and grain growth in Al-Mg-X alloys", Materials Science and Engineering: A, 238(1), 101–107.

Wang, F., Zou, J. T., Wang, X. H., Fan, Z. K. 2009. "Effect of melt superheat on microstructure of Al4Fe2Mn1.5 Monel alloy", Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), 19(1), 19–25.

Wang, X. J., Luo, X. X., Cong, F. G., Cui, J. Z. 2013. "Research progress of microstructure control for aluminium solidification process", Chinese Science Bulletin, 58(4–5), 468–473.

Wilde De, J., Nagels, E., Lemoisson, F., Froyen, L. 2005. "Unconstrained growth along a

ternary eutectic solidification path in Al–Cu–Ag: Preparation of a MAXUS sounding rocket experiment", Materials Science and Engineering: A, 413–414, 514–520.

Yan, F., McKay, B. J., Fan, Z., Chen, M. F. 2012. "Preliminary study of the characteristics of a high Mg containing Al-Mg-Si alloy", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 27, 1–6.

Yilmaz, F., Elliott, R. 1989. "The microstructure and mechanical properties of unidirectionally solidified Al−Si alloys", Journal of Materials Science, 24(6), 2065–2070.

Zhang, J., Fan, Z., Wang, Y. Q., Zhou, B. L. 2000. "Microstructural evolution of the in situ Al-15wt.%Mg2Si composite with extra Si contents", Scripta Materialia, 42(11), 1101–1106.

Zhang, X. H., Su, G. C., Ju, C. W., Wang, W. C., Yan, W. L. 2010. "Effect of modification treatment on the microstructure and mechanical properties of Al-0.35%Mg-7.0%Si cast alloy", Materials and Design, 31(9), 4408–4413.

Zolotorevsky, V. S., Belov, N. A., Glazoff, M. V. 2007. Casting Aluminum Alloys. *Casting Aluminum Alloys*, İngiltere: Elsevier.