



T.C.

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

FİZİK DOKTORA PROGRAMI

**ERİYİK EĞİRME VE SPARK PLAZMA SİNERLEME
TEKNİKLERİ İLE ÖTEKTİK ALTI AL-6Sİ-0.3CU-0.3X (X=BE, SC,
SB VE Tİ) ALAŞIMININ ÜRETİMİ VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Fatih YAŞAR

Danışman: Doç. Dr. Fikret YILMAZ

TOKAT- 2023

ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Fikret YILMAZ danışmanlığında hazırlamış olduğum “Eriyik eğirme ve spark plazma sinterleme teknikleri ile ötektik altı Al-6Si-0.3Cu-0.3X (X= Be, Sc, Sb ve Ti) alaşıımının üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi” adlı doktora tezinin bilimsel etik değere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

20/01/2023

İmza

Fatih YAŞAR

JÜRİ KABUL ve ONAY

Fatih YAŞAR tarafından hazırlanan “**Eriyik Eğirme ve Spark Plazma Sinterleme Teknikleri ile Ötektik Altı Al-6Si-0.3Cu-0.3X (X= Be, Sc, Sb ve Ti) Alaşımının Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 20/01/2023 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği / Oy Çokluğu ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı Soyadı)

İmzası

Üye (Başkan) : Prof. Dr. Uğur KÖLEMEN

.....

Üye : Prof. Dr. Yakup BUDAK

.....

Üye (Danışman): Doç. Dr. Fikret YILMAZ

.....

Üye : Doç. Dr. Necati BAŞMAN

.....

Üye : Dr. Cengiz TEMİZ

.....

ONAY

...../02/2023

Prof. Dr. Mehmet GÜNEŞ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

İTHAF

Annem Rabia,

Babam Süleyman,

Eşim Zeliha,

Kızım Elvin

ve

Oğlum Emir'e...

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Alüminyum, demir- çelikten sonra endüstride en çok tercih edilen metaldir. Alaşım yaparak kimyasal kompozisyonunu değiştirmek ve/ veya ısıtım işlem uygulamak alüminyumun birçok özelliği üzerinde olumlu etkiler ortaya çıkarabilmektedir. Özellikle de silisyum içerikli alüminyum alaşımları üstün akışkanlık özelliği ile dikkat çekmektedir.

Hem kimyasal kompozisyonu üzerinde hem de ısıtım işlem uygulayarak yapısal modifikasyonuna çalıştığımız 4xx.x gurubu alüminyum silisyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin incelendiği doktora tez çalışmamda;

Gerekli malzeme üretimi yapabilmek ve üretilen malzemelerin mekanik analizleri yapabilmek için Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği laboratuvarı alt yapısını kuran sayın Prof. Dr. Orhan UZUN'a,

Destekleri, tavsiyeleri ve bilgisiyle çalışmamda her zaman yanımda olan sayın Prof. Dr. Uğur KÖLEMEN'e,

Tez çalışmamın başlangıcından bitişine kadar yardım, destek ve tavsiyeleriyle ışıık tutmuş olan sayın Doç. Dr. Semra ERGEN'e,

Toz üretim safhasında bilgi, tecrübe ve yardımını esirgemeyen sayın Doç. Dr. Şükrü YILDIZ ve Ahi Evran Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü İleri Malzeme Araştırma Laboratuvarı çalışanlarına,

XRD, XRF ve SEM analizlerinin alınmasında yardımlarını esirgemeyen, önerileriyle farklı bakış açıları kazandıran sayın Dr. Cengiz TEMİZ ve Bülent Ecevit Üniversitesi Araştırma Laboratuvarı çalışanlarına,

Sadece tez çalışmamda değil hayatımın birçok noktasında engin tecrübe ve öngörülerini ile ışıık tutmuş, tavsiye ve yönlendirmelerde bulunmuş olan değerli tez danışmanım sayın Doç. Dr. Fikret YILMAZ'a,

Yine hayatımın birçok dönüm noktasında tecrübe, tavsiye ve yönlendirmeleriyle yolumu aydınlatmış ve daima desteklemiş olan kıymetli ablam Mine BUDAK ve eniştem Prof. Dr. Yakup BUDAK’a,

Doğumumdan bu zamana kadar gerek yaşadıkları süre içinde gerekse de vefatlarından sonra hep yanımda hissettim, annem Rabia YAŞAR ve babam Süleyman YAŞAR’a,

Hayatımın yaklaşık son 20 yılında daima yanımda ve omuz omuza verdiğimiz, sevgisi ve ilgisiyle her zaman desteklemiş olan en değerlim, eşim Zeliha YAŞAR ve en kıymetlilerim kızım Elvin YAŞAR ve oğlum Emir YAŞAR’a,

Sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Fatih YAŞAR

ÖZET

ERİYİK EĞİRME VE SPARK PLAZMA SİNERLEME TEKNİKLERİ İLE ÖTEKTİK ALTI AL-6Sİ-0.3CU-0.3X (X= BE, SC, SB VE Tİ) ALAŞIMININ ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Fatih Yaşar

Doktora Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Fikret Yılmaz

Ocak 2023, xx + 139 sayfa

Bu tezde, Al- ağ. %6Si- ağ. %0.3Cu- ağ. %0.3X (X= Be, Sb, Sc ve Ti) alaşımı önce indüksiyon ergitme yöntemi ile külçe olarak ve daha sonra eriyik eğirme yöntemi ile şerit olarak üretildi. Şerit alaşımların pekleştirilmesinde spark plazma sinterleme ve soğuk pres yöntemleri kullanıldı. SPS yönteminde şeritler doğrudan pekleştirilirken, soğuk pres yönteminde şeritler önce bilyeli öğütme ile toz formuna getirildi. Üretilen alaşımların, kristal yapı, mikro yapı ve mekanik özellikleri üretim yöntemi ve katkı elementleri açısından değerlendirildi. X-ışını kırınımı analizlerinden, külçe alaşımlarda Al ve Si'ye ait kırınım pikleri dışında herhangi bir safsızlık pikine rastlanmadı. Şerit alaşımlarda, Si pik genişliğinin artması nano-kristal yapı oluşumu olarak yorumlandı. Optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri, külçe alaşımlarda α -Al ve ötektik Si yapısının oluştuğunu gösterdi. Katkısız alaşımda, köşeli Si morfolojisi belirgin iken Be, Sb ve Ti katkılı alaşımlarda Si'nin ince lifsi yapıya dönüştüğü görüldü. Hızlı katılaştırılan şeritler ağsı homojen bir mikro yapı sergiledi. Pekleştirilen alaşımlarda ise Si'nin tekrar kabalaştığı ancak mikro yapı içerisinde daha homojen bir dağılım sergilediği görüldü. Vicker's sertlik analizlerinden, SPS yöntemiyle pekleştirilen şeritlerin, külçe alaşımlar ile şerit alaşımlar arasında bir sertlik değerine sahip olduğu görüldü. Sb katkılı alaşımın ise diğer katkılı alaşımlara kıyasla en yüksek sertlik değerine sahip olduğu saptandı.

Anahtar Kelimeler: Al- Si alaşımı, Eriyik eğirme, Spark plazma sinterleme, Kriyojenik öğütme, Soğuk pres.

ABSTRACT

PRODUCTION OF AL-6SI-0.3CU-0.3X (X=BE, SC, SB AND TI) ALLOY THROUGH MELT-SPINNING AND SPARK PLASMA SINTERING TECHNIQUES AND INVESTIGATION OF THEIR MECHANICAL PROPERTIES

Fatih Yasar

Doctorate Thesis, Tokat Gaziosmanpasa University Graduate School of Natural and Applied Science Department of Physics

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Fikret Yilmaz

January 2023, xx + 139 pages

In this study, Al- 6 wt. % Si- 0.3 wt. % Cu- 0.3 wt. % X (X= Be, Sb, Sc and Ti) alloy was first produced as ingot by induction melting method and as ribbon by melt spinning method. Melt-spun ribbons were consolidated by spark plasma sintering (SPS) and cold compaction methods. While the ribbons were consolidated directly in the SPS method, the ribbons were firstly brought into powder form by ball milling in the cold compaction method. The crystal structure, microstructure and mechanical properties of the produced alloys were evaluated in terms of production method and additive elements. From the X-ray diffraction analysis, no impurity peaks were found in the ingot alloys, except for the diffraction peaks of Al and Si. In ribbon alloys, the increase in Si peak width was interpreted as nano-crystal structure formation. Optical microscope and scanning electron microscope images showed that α -Al and eutectic Si structure were formed in the ingot alloys. While the acicular Si morphology was evident in the undoped alloy, it was observed that Si turned into a fine fibrous structure in Be, Sb and Ti doped alloys. Ribbon alloys exhibited a network like microstructure. In the consolidated alloys, Si was coarsened but exhibited a more homogeneous distribution in the microstructure. From Vicker's hardness analysis, it was seen that the SPS compacted ribbons have a hardness value between ingot alloys and ribbon alloys. Also, Sb doped alloy had the highest hardness value compared to the other doped alloys.

Keywords: Al- Si alloy, Melt spinning, Spark plasma sintering, Cryogenic milling, Cold pres.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK SÖZLEŞME	i
JÜRİ KABUL ve ONAY	ii
İTHAF	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR	iv
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
TABLolar LİSTESİ	xviii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	8
2.1. Malzeme Biliminde Köşe Taşları.....	9
2.2. Malzemelerin Sınıflandırılması.....	10
2.2.1. Metaller	10
2.2.2. Polimerler (Plastikler).....	11
2.2.3. Seramikler	12
2.2.4. Kompozitler	12
2.3. Malzemelerin Özellikleri	13
2.4. Alüminyumun Kısa Bir Tarihi	14
2.4.1. Türkiye’de ve dünyada alüminyum yeri ve önemi	16
2.5. Alüminyum ve Özellikleri.....	19
2.5.1. Yüksek mukavemet- ağırlık oranı.....	21
2.5.2. İmalat kolaylığı	21
2.5.3. Korozyon direnci	21
2.5.4. Yüksek elektrik iletkenliği.....	22
2.5.5. Yüksek termal iletkenlik	22

2.5.6.	Kriyojenik sıcaklıklarda yüksek tokluk	22
2.5.7.	Yansıtıcılık.....	22
2.5.8.	Toksik olmaması.....	23
2.5.9.	Geri dönüştürülebilirlik.....	23
2.6.	Alüminyum Alaşımlarını Tanımlama Sistemi	23
2.6.1.	Dövme alaşımlar	24
2.6.2.	Dökme alaşımlar	27
2.6.3.	Alüminyum döküm alaşımlarında ısı işlemler.....	29
2.7.	Al- Si Döküm Alaşımları	30
2.8.	Alüminyum Alaşımlarında Modifiye Edici Elementler	33
2.8.1.	Antimon (Sb)	33
2.8.2.	Berilyum (Be)	34
2.8.3.	Bakır (Cu)	35
2.8.4.	Silisyum (Si)	35
2.8.5.	Skandiyum (Sc).....	36
2.8.6.	Titanyum (Ti).....	36
2.9.	Metallerin Üretimi ve Şekillendirilmesi.....	37
2.9.1.	Dövme yöntemleri	38
2.9.2.	Döküm yöntemleri	41
2.10.	Hızlı Katılaştırma (Rapid Solidification)	45
2.11.	Mekanik Alaşımlama.....	51
2.12.	Sinterleme.....	57
2.12.1.	Spark plazma sinterleme	59
3.	MATERYAL ve YÖNTEM.....	62
3.1.	Numunelerin Üretimi	62
3.2.	Külçe Numunelerin Kalıplanması.....	68
3.3.	Eriyik Eğirme Yöntemiyle Şeritlerin Üretimi.....	71

3.4.	Kriyojenik Öğütme ile Toz Üretimi	73
3.5.	Soğuk Presleme ile Malzemelerin Üretimi	75
3.6.	SPS ile Malzemelerin Üretimi	78
3.7.	XRD Analizleri	80
3.8.	XRF Analizleri	83
3.9.	SEM Analizleri.....	84
3.10.	Sertlik Analizi.....	86
4.	BULGULAR ve TARTIŞMA	89
4.1.	X-Işını Kırınımı Analizleri.....	90
4.2.	Optik Mikroskop Görüntüleri	95
4.3.	SEM ve EDX- Haritalama Görüntüleri.....	100
4.4.	Mekanik Özellikler.....	120
5.	SONUÇLAR.....	122
6.	KAYNAKÇA.....	124
7.	EKLER	131
8.	ÖZGEÇMİŞ	139

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Al- xSi alaşımı makro yapısı (a) x=0, (b) x=1, (c) x=3, (d) x=5, (e) x=7, (f) x=9 (Manani ve diğerleri, 2022)	2
Şekil 1.2. Ötektik altı Al-Si alaşımında uzun ince ötektik silisyumlar ve elektron hareketliği gösterimi (a) modifiye edilmemiş (b) Sb modifikasyonu (c) Sb + T6 modifikasyonu	4
Şekil 1.3. Atomizasyon yöntemiyle elde edilen ötektik Al- Si küresel toz taneciklerinin (a) alaşımlamadan önce, (b) 2 saat alaşımlama sonrası, (c) 4 saat alaşımlama sonrası görüntüleri (Milligan ve diğerleri, 2009)	5
Şekil 2.1. Boksit (Safon, 2007)	15
Şekil 2.2. Alümina (Aarius, 2021)	15
Şekil 2.3. Elektrolitik yöntemle saf alüminyumun eriyiğinin elde edildiği Hall- Heroult sürecinin şematik gösterimi (Çetin, 2017)	15
Şekil 2.4. Boksit cevherinden alüminyum üretim ana/ara ürün ve miktarsal gösterim ..	16
Şekil 2.5. Dünya birincil alüminyum üretimi (TALSAD, 2021)	17
Şekil 2.6. Dünya geneli çıkarılabilir boksit rezerv dağılımı (Survey, 2019)	18
Şekil 2.7. Alüminyum silisyum alaşımı (a) faz diyagramı, (b) ötektik altı, (c) ötektik, (d) ötektik üstü alaşım mikro yapısı (Warmuzek, 2004)	31
Şekil 2.8. Metallerin üretim teknikleri	37
Şekil 2.9. Dövme yöntemlerinin uygulanışı (a) kapalı dövme, (b) açık dövme uygulaması	38
Şekil 2.10. Haddeleme işlemi	39

Şekil 2.11. (a) Ekstrüzyon işlemi, (b) ekstrüze üretilen bazı parçalar	40
Şekil 2.12. Çekme yöntemiyle üretim modeli	40
Şekil 2.13. Alçak basınçlı döküm şeması	43
Şekil 2.14. A357.0 alaşımının yarı katı döküm yöntemiyle vites parçası üretimi	44
Şekil 2.15. İki akışkanlı atomizasyon tasarımları.	49
Şekil 2.16. İki akışkanlı sistemde malzemenin formasyonu.....	49
Şekil 2.17. Lazerli yüzey eritme yöntemin şematik gösterimi	50
Şekil 2.18. Hızlı katılaştırma tekniklerinden (a) eriyik eğirme, (b) düzlemsel akışla dökme tekniklerinin gösterimi	51
Şekil 2.19. Mekanik alaşımlama işlemi basamakları.....	52
Şekil 2.20. (a) Model 1-S attritor cihazı (b) Attritor bilyeli öğütme cihazının şematik gösterimi	54
Şekil 2.21. (a) Fritsch Pulverisette P-5 dört hazneli bilyeli öğütücü. (b) Bilyeli değirmen içindeki bilye hareketini gösteren şema (Suryanarayana, 2001)	55
Şekil 2.22. Toz üretim işleminde yararlanılan (a) kriyojenik öğütücü ve (b) öğütme işleminin gerçekleştiği haznenin şematik gösterimi	56
Şekil 2.23. Sinterlenmiş parçaların genel üretim şeması	57
Şekil 2.24. Sinterleme esnasında nokta teması bağlarının gelişimi	58
Şekil 2.25. Geleneksel ve mikro dalga sinterlemesinin malzemedeki etkileri	59
Şekil 2.26. Spark plazma sinterlemesinin şematik gösterimi	61
Şekil 3.1. Numunelerin tartıldığı 1/10000 hassaslıktaki Precisa marka XB 200A model terazi (TOGÜ FEF İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarı)	63

Şekil 3.2. Külçe malzeme üretimi için kullanılan grafit pota ve içerisine yerleştirilen cam boru	64
Şekil 3.3. İndüksiyonla eritme cihazı, su soğutma sistemi, vakum pompası. (TOGÜ FEF İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarı).....	65
Şekil 3.4. Taşlama makinesi (TOGÜ FEF İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarı)	66
Şekil 3.5. Grafit potadan çıkarılıp taşlama cihazında grafit kalıntıları temizlenen alaşımlar. (a) K_{Base} , (b) K_{Be} , (c) K_{Sb} , (d) K_{Sc} , (e) K_{Ti}	66
Şekil 3.6. Metkon marka Micracut 200 kesme cihazı (TOGÜ FEF İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarı)	67
Şekil 3.7. Metkon marka Micracut 200 kesme cihazında iki parçaya ayrılan külçe örnekler	67
Şekil 3.8. Tavlama ve Yaşlandırma işlemi için fırına yerleştirilen alaşımlar	68
Şekil 3.9. Külçe alaşımlardan kesme cihazıyla kesilen parçalar. (a) K_{Base} , (b) K_{Be} , (c) K_{Sb} , (d) K_{Sc} , (e) K_{Ti}	69
Şekil 3.10. Kalıplama işlemi için kullanılan EpoFix Resin, EpoFix Hardener, Silikon Kalıp ve kalıplanmış numune	69
Şekil 3.11. Kalıplama işlemine alınan alaşımlar (a) K_{Base} , (b) K_{Be} , (c) K_{Sb} , (d) K_{Sc} , (e) K_{Ti}	70
Şekil 3.12. Metkon marka Gripo-2V Parlatma cihazı (TOGÜ FEF İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarı)	70
Şekil 3.13. Disk şeklinde kesilen külçelerin kalıplanıp parlatılmış şekli (a) K_{Base} , (b) K_{Be} , (c) K_{Sb} , (d) K_{Sc} , (e) K_{Ti}	71
Şekil 3.14. Edmund Bühler Melt Spinner SC Eriyik eğirme cihazı pota ve bakır disk haznesi (TOGÜ FEF İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarı)	72

Şekil 3.15. Eriyik eğirme cihazı ile üretilen şeritler (a) Ş_{Base} , (b) Ş_{Be} , (c) Ş_{Sb} , (d) Ş_{Sc} , (e) Ş_{Ti}	72
Şekil 3.16. Eriyik eğirme yöntemiyle elde edilen şeritlerin kalıplara alınıp yüzeyi parlatıldıktan sonraki şekli (a) Ş_{Base} , (b) Ş_{Be} , (c) Ş_{Sb} , (d) Ş_{Sc} , (e) Ş_{Ti}	73
Şekil 3.17. Eriyik eğirilmiş şeritlerin kesit incelemesi için kalıplara alınmış ve parlatılmış hali (a) Ş_{Base} , (b) Ş_{Be} , (c) Ş_{Sb} , (d) Ş_{Sc} , (e) Ş_{Ti}	73
Şekil 3.18. Retsch marka CryoMill model kriyojenik öğütme cihazı (Ahi Evran Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği İleri Malzeme Araştırma Laboratuvarı)	74
Şekil 3.19. Kriyojenik öğütme ile üretilen toz numunesi	75
Şekil 3.20. Kriyojenik öğütme işleminden sonra elde edilen tozlar T_{Base} , (b) T_{Be} , (c) T_{Sb} , (d) T_{Sc} , (e) T_{Ti}	75
Şekil 3.21. Retsch PP25 soğuk pres makinesi ve kalıp takımları (TOGÜ FEF İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarı)	76
Şekil 3.22. Protherm marka yüksek sıcaklık fırını (TOGÜ FEF İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarı)	77
Şekil 3.23. Sinterleme sonrası elde edilen numunelerin görüntüleri (a) P_{Base} , (b) P_{Be} , (c) P_{Sb} , (d) P_{Sc} , (e) P_{Ti}	77
Şekil 3.24. Soğuk pres yöntemiyle üretilen peletlerin kesit görüntüleri (a) P_{Base} , (b) P_{Be} , (c) P_{Sb} , (d) P_{Sc} , (e) P_{Ti}	78
Şekil 3.25. Soğuk pres yöntemiyle elde edilen peletlerin kalıplanmış kesit görüntüleri (a) P_{Base} , (b) P_{Be} , (c) P_{Sb} , (d) P_{Sc} , (e) P_{Ti}	78
Şekil 3.26. SPS numunelerin kesme cihazıyla kesilerek elde edilen kesitlerin görüntüleri (a) S_{Base} , (b) S_{Be} , (c) S_{Sb} , (d) S_{Sc} , (e) S_{Ti}	79

Şekil 3.27. Kalıplanan ve parlatılan SPS numune görüntüleri (a) S_{Base} , (b) S_{Be} , (c) S_{Sb} , (d) S_{Sc} , (e) S_{Ti}	79
Şekil 3.28. Paralel düzlemler arasından x- ışınların kırınımına uğraması (Callister & Rethwisch, 2013)	80
Şekil 3.29. X- ışını difraktometresi şematik gösterimi. T, x- ışını kaynağı, S, numune, C, dedektör, O, numunenin ve dedektörün etrafında döndüğü eksen (Callister & Rethwisch, 2013)	81
Şekil 3.30. Örnek bir XRD grafiği.....	82
Şekil 3.31. XRD analiz cihazı (Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi ARTMER).....	82
Şekil 3.32. XRF analiz cihazı (Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi ARTMER)	84
Şekil 3.33. SEM analiz cihazı (Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi ARTMER).....	85
Şekil 3.34. Statik sertlik cihazı (TOGÜ FEF İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarı)	87
Şekil 4.1. İndüksiyon ergitme ile üretilen külçe alaşımlara ait XRD desenleri.....	90
Şekil 4.2. Eriyik eğirme yöntemi ile üretilen alaşımların XRD desenleri	91
Şekil 4.3. Kriyojenik bilyeli öğütme ile toz formuna getirilen şerit alaşımların XRD desenleri	93
Şekil 4.4. 560 °C’de sinterlenen tozların XRD desenleri	93
Şekil 4.5. Farklı yöntemlerle üretilen alaşımların Al (111) fazına ait XRD pikleri	94
Şekil 4.6. İndüksiyon fırınında üretilen külçe alaşımların optik mikroskop ile elde edilen fotoğrafları (a) Katkısız Al-6Si-0.3Cu ve katkılı alaşımlar (b) 0.3Be, (c) 0.3Sb, (d) 0.3Sc, (e) 0.3Ti	96
Şekil 4.7. Eriyik eğirme yöntemi ile üretilen şerit alaşımların optik mikroskop fotoğrafları	97

Şekil 4.8. SPS yöntemi ile külçe olarak üretilen şerit alaşımların optik mikroskop fotoğrafları	98
Şekil 4.9. Bilyeli öğütme + soğuk pres ile külçe olarak üretilen şerit alaşımların optik mikroskop fotoğrafları	99
Şekil 4.10. Al-6Si-0.3Cu külçe alaşımının EDX- haritalama görüntüleri	100
Şekil 4.11. Al-6Si-0.3Cu külçe alaşımının farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM görüntüleri (a) 200x, (b) 1000x, (c) 10000x	101
Şekil 4.12. Al-6Si-0.3Cu-0.3Be külçe alaşımının EDX- haritalama görüntüleri	102
Şekil 4.13. Al-6Si-0.3Cu-0.3Be külçe alaşımının farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM görüntüleri (a) 200x, (b) 1000x, (c) 10000x	103
Şekil 4.14. Al-6Si-0.3Cu-0.3Sb külçe alaşımının EDX- haritalama görüntüleri	104
Şekil 4.15. Al-6Si-0.3Cu-0.3Sb külçe alaşımının farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM görüntüleri (a) 200x, (b) 1000x, (c) 10000x	105
Şekil 4.16. Al-6Si-0.3Cu-0.3Sc külçe alaşımının EDX- haritalama görüntüleri	106
Şekil 4.17. Al-6Si-0.3Cu-0.3Sc külçe alaşımının farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM görüntüleri (a) 200x, (b) 1000x, (c) 10000x	107
Şekil 4.18. Al-6Si-0.3Cu-0.3Ti külçe alaşımının EDX- haritalama görüntüleri	108
Şekil 4.19. Al-6Si-0.3Cu-0.3Ti külçe alaşımının farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM görüntüleri (a) 200x, (b) 1000x, (c) 10000x	109
Şekil 4.20. Külçe alaşımların birlikte mikroyapı görüntüleri (2000x)	110
Şekil 4.21. Na ile modifiye edilen Al-Si alaşımının ötektik katılaşması (Makhlouf & Guthy, 2001)	111

Şekil 4.22. Eriyik eğirme yöntemi ile üretilen alaşımların mikroyapı fotoğrafları (a) Al-6Si-0.3Cu, (b) Al-6Si-0.3Cu-0.3Be, (c) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sb, (d) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sc, (e) Al-6Si-0.3Cu-0.3Ti (Büyütme: 10kx)	112
Şekil 4.23. Eriyik eğirme yöntemi ile üretilen alaşımların mikroyapı fotoğrafları (a) Al-6Si-0.3Cu, (b) Al-6Si-0.3Cu-0.3Be, (c) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sb, (d) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sc, (e) Al-6Si-0.3Cu-0.3Ti (Büyütme: 50kx)	113
Şekil 4.24. Eriyik eğirme ile üretilen alaşımların kesit görüntüleri (a) Al-6Si-0.3Cu, (b) Al-6Si-0.3Cu-0.3Be, (c) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sb, (d) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sc, (e) Al-6Si-0.3Cu-0.3Ti (Büyütme: 50kx)	114
Şekil 4.25. Kriyojenik öğütme + soğuk preslenen alaşımların SEM görüntüleri, (a) Al-6Si-0.3Cu, (b) Al-6Si-0.3Cu-0.3Be, (c) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sb, (d) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sc, (e) Al-6Si-0.3Cu-0.3Ti (Büyütme: 1000x)	115
Şekil 4.26. Kriyojenik öğütme + soğuk preslenen alaşımların SEM görüntüleri, (a) Al-6Si-0.3Cu, (b) Al-6Si-0.3Cu-0.3Be, (c) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sb, (d) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sc, (e) Al-6Si-0.3Cu-0.3Ti (Büyütme: 10 000x)	116
Şekil 4.27. SPS ile külçe olarak üretilen şerit alaşımların SEM görüntüleri, (a) Al-6Si-0.3Cu, (b) Al-6Si-0.3Cu-0.3Be, (c) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sb, (d) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sc, (e) Al-6Si-0.3Cu-0.3Ti (Büyütme: 1000x)	118
Şekil 4.28. SPS ile külçe olarak üretilen şerit alaşımların SEM görüntüleri, (a) Al-6Si-0.3Cu, (b) Al-6Si-0.3Cu-0.3Be, (c) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sb, (d) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sc, (e) Al-6Si-0.3Cu-0.3Ti (Büyütme: 10kx)	119
Şekil 4.29. Farklı yöntemler ile üretilen katkısız Al-6Si-0.3Cu alaşımının mikroyapı fotoğrafları, (a) Külçe alaşım, (b) şerit alaşım, (c) SPS alaşım ve (d) bilyeli öğütme + soğuk pres alaşım.....	120
Şekil 4.30. Farklı yöntemler ile üretilen alaşımların Vicker's sertlik değeri	121

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Saf alüminyum elementinin bazı fiziksel ve mekaniksel özellikleri	19
Tablo 2.2. HK'nin malzeme özellikleri üzerindeki etkileri.....	46
Tablo 2.3. Bazı hızlı katılaştırma teknikleri ve ürün boyutu, soğutma hız değerleri.....	46
Tablo 3.1. Alaşımı yapılan elementlerin ağırlıkça % değerleri	63
Tablo 3.2 Kullanılan malzemelerin üretim yöntemine göre sınıflandırılması.....	64
Tablo 3.3. Genel sertlik test teknikleri, karakteristikleri ve sertlik hesap formülleri (Kalpakjian & Schmid, 2010).....	88
Tablo 4.1. İndüksiyon fırınında külçe olarak üretilen alaşımların XRF yöntemi ile belirlenen bileşim değerleri	89
Tablo 4.2. Farklı tekniklerle üretimi yapılan alaşımlarda, Si (022) pikine ait FWHM değerleri	92

SİMGELER ve KISALTMALAR

ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
μm	Mikrometre
AA	Alüminyum Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AC	Alternatif akım
Al	Alüminyum
Be	Berilyum
C	Karbon
cal	Kalori
cm	Santimetre
Co	Kobalt
Cr	Krom
Cu	Bakır
d	Çap
DC	Doğru akım
Fe	Demir
FWHM	Yarı maksimum tam genişlik
g	Yerçekimi ivmesi
GPa	Giga paskal
H	Sertlik
HK	Hızlı katılaştırma
INCO	Uluslararası Nikel Şirketi
K	Kelvin
kg	Kilogram
kV	Kilo Volt
KYM	Kübik yüz merkezli
m	Metre
M.Ö.	Milattan önce
M.S.	Milattan sonra
MA	Mekanik Alaşımlama

mA	Mili amper
Mg	Magnezyum
Mn	Mangan
Mo	Molibden
MPa	Mega paskal
Ni	Nikel
O	Oksijen
ODS	Oksit dispersiyonu
OM	Optik Mikroskop
P	Maksimum yük
ppm	Milyonda bir parçacık
psi	İnç kare başına libre
s	Saniye
S	İzdüşüm alanı
Sb	Antimon
Sc	Skandiyum
SEM	İkincil Elektron Mikroskop
Si	Silisyum
Sn	Kalay
SPS	Spark plazma sinterleme
TALSAD	Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği
Ti	Titanyum
TM	Toz metalurjisi
XRD	X-Işını Kırınımı
XRF	X-Işını flüoresans
Zn	Çinko
Zr	Zirkonyum
ΔV	Hız farkı
λ	Dalga boyu
ρ	Yoğunluk
σ	Yüzey gerilim kuvveti

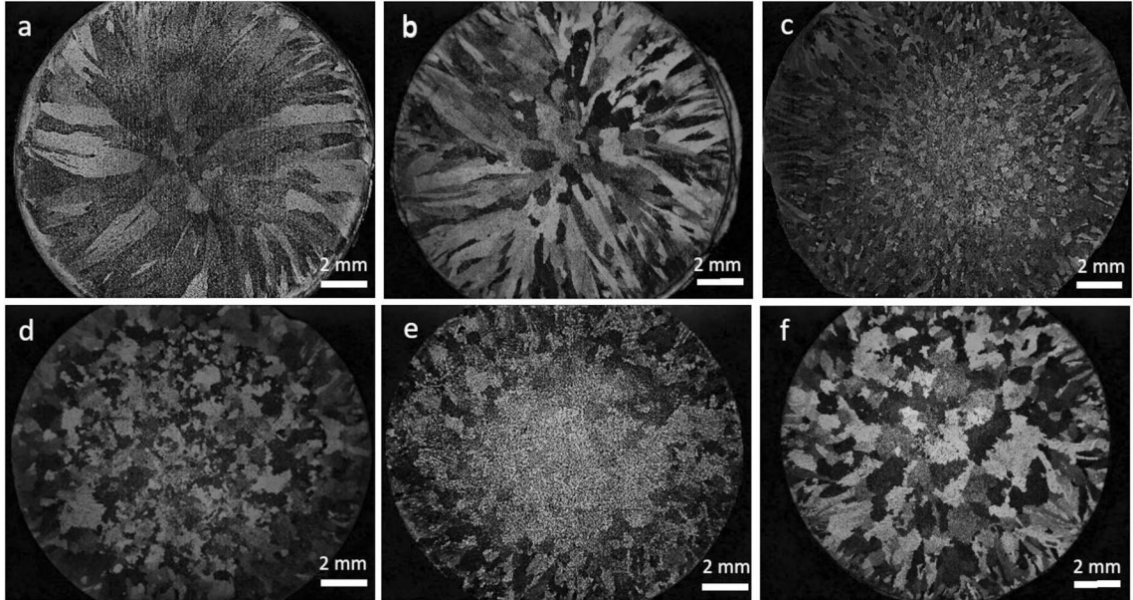
1. GİRİŞ

Jean-Marc Germain, Corrosion of Aluminium kitabının önsözüne “Geleceğin bir metali varsa o da alüminyumdur.” diye başlar. Bu sözü son 60 yıllık sürede iklim değişikliğini, sera gazı salınım miktarını azaltma çabalarını ve son 100 yılda alüminyum kullanımındaki artışı düşünerek söylemektedir. Çevresel şartların olumsuz gidişatının duraklatılması için alüminyum en iyi çözüm olarak öngörülebilir. Çünkü sera gazı emisyonu fosil yakıtları kullanımıyla artmaktadır. Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının 2020 yılı istatistik verilerine göre fosil yakıtı tüketimimiz 67 milyon ton/yıl olup bunun 25 milyon tonunu kara/ hava/ deniz/ demir yolu araçlarında tüketilen petrol ürünleri oluşturmaktadır (ETKB, 2020). Bu yüzden petrol ve ürünlerinin kullanımının azaltılması amacıyla hafif ve ağır vasıta araçlarının yakıt tüketimini azaltmak en ekonomik yöntem olarak akla gelmektedir. Ayrıca fosil yakıtlarındaki rezervlerin giderek azalması nedeniyle maliyetlerin artışı insanlığı bir taraftan yenilenebilir enerji kaynakları arayışının yolunu açarken diğer yandan da düşük yakıt tüketimli, düşük maliyetli ve çevreye duyarlı araçlar üretme ve geliştirme yoluna itmiştir. Bu çabada akla ilk gelen çözüm taşıt ağırlığının azaltılarak yakıt tüketimini ve emisyon oranlarını düşürmek olmuştur. İşte bu noktada alüminyum ve alaşımları devreye girerek daha hafif, daha dayanıklı, dökülebilirliği ve işlenebilirliği yüksek, korozyon ve aşınma direnci iyi, mükemmel dayanıklılık/ ağırlık oranına sahip, geri dönüşüm yoluyla tekrar üretimi mümkün ve çevre dostu parçalar üretimine olanak sağlamaktadır (Meenia ve diğerleri, 2016).

Endüstriyel alüminyum alaşımlarında genel olarak Al- Cu, Al- Mn, Al- Si, Al- Mg, Al- Si- Mg ve Al- Zn olmak üzere altı alaşımlama sistemi vardır. Ağırlıkça %1'in altında modifiye edici elementler kullanılarak alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri iyileştirilebilir. Örneğin; Mn ve Cr kaynak yapılabirliği, Ni yüksek sıcaklık direncini, Ti tanecik inceltici, Be, Zr ve Sn işlenebilirlik özelliklerini iyileştirmek için kullanılan elementlerden bazılarıdır (Vargel, 2020).

Alüminyum döküm alaşımları arasında, ana alaşım elementi olarak silisyum içeren alüminyum- silisyum (Al- Si) alaşımları, üretilen toplam alüminyum dökümlerin

%90'ından fazlasını oluşturur ve özellikle otomotiv ve havacılık endüstrisinde geniş kullanım alanına sahiptir (Vijeesh & Prabhu, 2014). Döküm yoluyla üretilen bu alaşımlar başlıca piston ve motor blokları gibi kritik parçaların üretiminde kullanılmaktadır (Rathod & Manghani, 2012). Saf alüminyum kaba ve sütunlu α - Al dendritlerden oluşur (Şekil 1.1.(a)). Ağırlıkça %3'e kadar Si katıldığında tane boyutu ve şeklinde önemli bir değişiklik gözlenmezken (Şekil 1.1.(b)) %3 Si ilavesiyle birincil α - Al tanelerinin şekli sütunlu yapıdan hücresel yapıya dönüştüğü (Şekil 1.1.(c)) ve artan Si miktarıyla saf alüminyuma göre tanelerin incelmeye eğiliminde olduğu (Şekil 1.1.(d), (e), (f)) tespit edilmiştir (Manani ve diğerleri, 2022). Al- Si alaşımların yorulma mukavemeti, tokluk ve sünekliği, kaba iğnemsil silisyum partikülleri, büyük alüminyum dendritleri ve gözenekliliği nedeniyle mekanik özellikleri nispeten zayıftır (Ye, 2003). Al- Si alaşımlarının bu zayıf mekanik özelliklerini iyileştirebilmek için birincil α - Al tanelerini inceltmek ve ötektik Si fazlarını değiştirmek gereklidir (Manani ve diğerleri, 2022). Dökme Al- Si alaşımlarının bu mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla çeşitli kimyasal modifikasyonlar ve ısıtım işlem teknikleri geliştirilmiştir (Atxaga ve diğerleri, 2001).



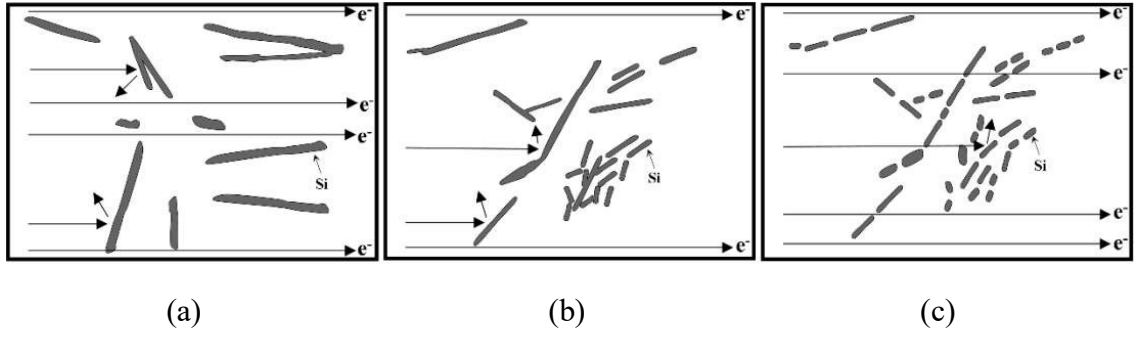
Şekil 1.1. Al- xSi alaşımı makro yapısı (a) x=0, (b) x=1, (c) x=3, (d) x=5, (e) x=7, (f) x=9 (Manani ve diğerleri, 2022)

Kimyasal modifikasyon için alüminyum- silisyum alaşım içerisine yirmiye yakın modifiye edici element kullanılmaktadır. Tez kapsamında Al- ağ. %6 Si alaşımının kimyasal modifikasyonu için Be, Cu, Sc, Sb ve Ti elementleri kullanılmıştır.

Al- Si alaşımlarında safsızlık elementi olarak Fe yaygın şekilde bulunur ve intermetalikler oluşturarak malzemenin özellikleri üzerine etkiler yapar. Genel olarak, normal dökümde Fe içeren fazlar iri dendritler şeklinde büyür ve ötektik silisyum partikülleri kalın iğnemsî yapılar sergiler. Bu durum Al- Si döküm alaşımlarının çekme özellikleri önemli ölçüde zayıflatır. Demiri alüminyumdan ekonomik olarak uzaklaştırmanın bilinen bir yolu olmamasına rağmen, ekonomik ve etkili bir modifikasyonun kimyasal modifikasyon olduğu kabul edilmektedir. Al₅FeSi β -fazı yerine α -fazının oluşması için Co, Mo, Cr, Ni ve Be katkı elementlerinin kullanımı popülerdir. Ağırlıkça %0.01, %0.03, %0.05 ve %0.1 Be katkı yapılarak üretilen Al- Si alaşımında berilyumun silisyum parçacıkları üzerinde tane inceltici etki yaptığı, Be miktarının arttığında alaşımın sertlik değerinin azaldığı, nihai çekme dayanımı ve uzaması üzerine olumlu katkılar yaptığı rapor edilmiştir. Ayrıca %0.05 içeren Be katkılı Al- Si alaşımının en iyi çekme dayanımı gösterdiği de belirtilmiştir (Rejaican ve diğerleri, 2015).

Ötektik silisyumun boyut, morfoloji ve dağılımının ağırlıkça %0.1, 0.3, 0.5 Sb elementi ile modifiye edilmesi ve T6 ısıtıl işlem uygulanması sonucu ötektik altı Al- Si alaşımında ötektik silisyumların incelik kırılıp küreselleştiği (Şekil 1.2.) bulunmuştur (Guo ve diğerleri, 2020) (Farahany ve diğerleri, 2013). Yapılan başka bir çalışmada ise Al- Si ötektik alaşımında artan büyüme oranında Sb katkısının Si flakelerini incelttiği ve flakeler arasındaki mesafenin azaldığı, buna bağlı olarak mikro sertlik ve çekme dayanım değerinin nispeten arttığı tespit edilmiştir (Kaya & Aker, 2017).

Döküm Al- Si alaşımına ağırlıkça %0.05, %0.1, %0.15, %0.2, %0.25, %0.3 ve %0.4 Sc katkısı ötektik Si morfolojisini plaka ve iğnemsî yapıdan yuvarlak ve lifli Çince yazı benzeri bir yapıya dönüştürdüğü, ötektik silisyumun ortalama uzunluğunu, 150'den 20 μ m'ye düşürdüğü tespit edilmiştir. Sc katkısının α - Al tanelerini incelttiği ve Al- Si alaşımlarında sürünme özelliğini önemli ölçüde geliştirdiği de bildirilmiştir. (Prukkanon ve diğerleri, 2009) (Zhang ve diğerleri, 2012) (Seensattayawong ve diğerleri, 2018).



Şekil 1.2. Ötektik altı Al-Si alaşımında uzun ince ötektik silisyumlar ve elektron hareketliği gösterimi (a) modifiye edilmemiş (b) Sb modifikasyonu (c) Sb + T6 modifikasyonu

Titanyumun tane inceltici etkisinin döküm alüminyum alaşımları üzerindeki etkisi 100 yıla yakın bir süredir bilinmektedir. Titanyumun ağırlıkça %0.15'in üzerinde eklenmesi $TiAl_3$ bileşiği oluşturarak heterojen çekirdeklenme mekanizması oluşturması ve bu sayede tane inceltici etkisinin ortaya çıktığı rapor edilmiştir (Sigworth & Kuhn, 2007).

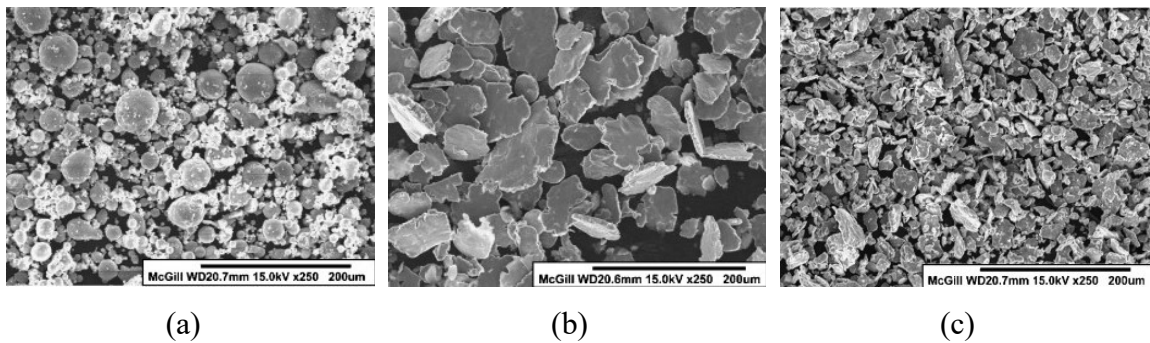
Ötektik altı Al- Si alaşımlarda bir başka modifiye edici element olarak ağırlıkça %0.1, %0.2, %0.5, %1.0 ve %1.5 bakır ilavesi yapılmış, alaşımdaki bakır miktarı arttıkça Vickers sertlik değerinde kısmi bir artma gözlenmiştir. En yüksek sertlik değeri %1.5 Cu katkısında meydana gelmiştir. Nihai çekme testinde en yüksek değer %1.0 Cu katkısında elde edilmiş, bakır miktarındaki artışla kopma uzamasının azaldığı tespit edilmiştir (Yamamoto ve diğerleri, 2021). Ayrıca %1.0 üzerindeki Cu modifikasyonunun alaşımın mukavemetini artırdığı ancak bakır içeriğinin artmasıyla kırılgan bakır fazlarından dolayı süneklikte azalma olduğu aynı çalışmada bildirilmiştir.

Eriyik haldeki Al- Si alaşımlarının katılaşması sonucunda meydana gelen yapı, malzemenin mekanik özellikleri üzerinde önemli etkiler meydana getirmektedir. Arzu edilen mekanik özelliklere sahip bir yapı elde edebilmek için katılaşma sürecindeki her parametre büyük öneme sahiptir. Geleneksel döküm yöntemleriyle elde edilen Al- Si alaşımındaki Si fazları, sıklıkla kaba mikro yapısal özellik göstermektedir. Bu yüzden geleneksel döküm yöntemleri yerine çeşitli hızlı katılaştırma yöntemleri geliştirilmiştir. Hızlı katılaştırma, mikro yapısal özelliklerde ve katılaşma morfolojisinde büyük ölçüde değişikliğe yol açar. Hızlı katılaştırma tekniklerini;

- (i) Soğuma sırasında su veya hava jetleri yardımıyla tanecik elde edilen püskürtme yöntemleri,
- (ii) Yüksek enerjili ışın yardımıyla malzemenin yüzeyinin eritilip hemen katılaştırıldığı yüzey yöntemleri ve
- (iii) Erimiş malzemenin sürekli soğuk bir yüzeye sürekli düşürülerek katılaştırıldığı soğutma yöntemleri olarak üç gruba ayırabiliriz (Jones, 1984).

Soğutma yöntemlerinden en yaygın olarak kullanılan yöntem soğutma hızının 10^6 K/s olduğu yarı kararlı kristal veya amorf şeritler üretilen eriyik eğirme (melt spinnig) yöntemidir. Soğuk bloklu eriyik eğirme yöntemiyle üretilen Al- Si alaşımlarında farklı soğuma hızları için şeritlerin hem hava hem de disk yüzeyi mikro yapıları farklıdır. Örneğin ağırlıkça %8, %12 ve %16 Si içeren alüminyum alaşımında disk yüzeyi hızlı soğumayla birlikte hücresel mikro yapıya sahip olurken hava yüzeyinde ince dentritik kollara ayrıldığı görülmüştür (Uzun ve diğerleri, 2001).

Son yirmi yılda hem akademik hem de endüstriyel alanda malzemelerin öğütülmesinde oda sıcaklığında öğütme yerine kriyojenik sıcaklıkta öğütülme yöntemlerinin tercih edilmesinin başlıca nedenleri düşük maliyetli oluşu, hızlı tane inceltmesi, yeniden kristalleşmenin önlenmesi, düşük oksitlenme ve kirlenme olarak sıralanabilir (Katiyar ve diğerleri, 2021).



Şekil 1.3. Atomizasyon yöntemiyle elde edilen ötektik Al- Si küresel toz taneciklerinin (a) alaşımlamadan önce, (b) 2 saat alaşımlama sonrası, (c) 4 saat alaşımlama sonrası görüntüleri (Milligan ve diğerleri, 2009)

Atomizasyon yöntemiyle elde edilmiş ötektik Al- Si alaşımlarının -190° C sıcaklıkta mekanik alaşımlamanın yapıldığı bir çalışmada, başlangıçta 32 µm boyutunda küresel formda olan tozlarının (Şekil 1.3.(a)) kriyojenik alaşımlama esnasında sürekli olarak düzleşip soğuk kaynak oluşturduğu ve kırıldığı tespit edilmiştir. Yaklaşık 2 saatlik kriyojenik alaşımlama sonunda 61 µm boyutunda flakeler (Şekil 1.3.(b)), 4 saatlik kriyojenik alaşımlama sonunda ise 18 µm boyutunda kırıntılar (Şekil 1.3.(c)) gözlenmiştir. Öğütme süresinin artmasıyla XRD spektrumunda Al piklerinin yarı maksimum tam genişlik (FWHM) değerlerinde artış meydana geldiği belirlenmiştir (Milligan ve diğerleri, 2009).

Eriyik eğerme yöntemi kullanılarak elde edilen şeritler bir taraftan kriyojenik ortamda öğütülerek toz haline getirilip soğuk pres için uygun hale getirilirken diğer taraftan yeni bir sinterleme yöntemi olan ve eş zamanlı olarak uygulanan mekanik yük altında DC gerilimle yüksek sıcaklıkta plazma ortamında gerçekleştirilen spark plazma sinterleme (SPS) işlemine tabi tutulmuştur. Spark plazma, numune taneleri arasındaki boşluklarda büyük bir akım darbesiyle tetiklenen elektrik boşalması aracılığıyla anlık olarak oluşturulur. SPS, atmosferik veya kontrollü atmosferik fırınlarda gerçekleştirilen sıcak presleme, sıcak izostatik presleme ve basınçsız sinterleme gibi geleneksel yöntemlere kıyasla, yüksek hızlarda, daha kısa sürelerde ve nispeten daha düşük sıcaklıklarda yüksek kalitede sinterlenmiş peletler üretimini mümkün kılar (Ağaoğulları, 2019).

ZrC parçacık takviyeli ötektik altı Al₇Si kompozitinde mekanik alaşımlanmış 450 °C'de 210 s. SPS yapılmış numunenin, mekanik alaşımlama yapılmamış SPS yapılmış numunelerine göre daha yüksek sertlik ve dayanıklılık gösterdiği tespit edilmiştir (Ağaoğulları, 2019). Ayrıca gaz atomizasyon yöntemi ve spark plazma sinterleme tekniği ile üretilen ötektik üstü Al- Si ve Al- Si- Sc alaşımlarının mikro yapıları incelendiğinde geleneksel döküm alaşımlarındaki tanecik boyutu olan 100 µm'den büyük silikon parçacıklarının aksine, Al-Si için 0.38– 3.5 µm ve Al-Si-Sc için 0.35– 1.16 µm boyut aralığında silikon parçacıklarına sahip olduğu gözlenmiştir. Sinterlenmiş bu alaşımlar için artan Si miktarında bile süneklik değerinde %85'e varan iyileşmeler tespit edilmiştir (Raghukiran & Kumar, 2016).

Yapılan literatür taramasından elde edilen veriler ışığı altında hazırlanan bu doktora tez çalışması, gerek seçilen numune ve kompozisyona sahip alalım grubu gerek üretim tekniği gerekse de üretimde izlenen süreçlerle ilgili bir çalışma olmadığından bilimsel açıdan var olan eksikliği giderici ve bilim dünyasına olumlu katkılar sağlayacak bir çalışma olarak görölmektedir.



2. GENEL BİLGİLER

İnsanoğlu günlük yaşamında kullandığı kıyafet ve aksesuarlardan yiyecek- içecek kaplarına, kullandığı seyahat araçlarından oturduğu binaya kadar birçok malzemeye ihtiyaç duyar. Gün içerisinde yemek pişirme esnasında sıcaklığa, inşaat ve köprü gibi yapılarda yüke, cep telefonu kasa ve ekranlarında darbelere, pantolon ve tişört benzeri kıyafetlerde esnemeye dayanıklı malzemeler gibi örneklerini daha da artırabileceğimiz sayısız ürün kullanılmaktadır. Bu malzemelerin amacına hizmet edebilmesi için bazı özelliklere sahip olması kaçınılmaz bir gerçektir. Malzeme bilimi, tüm bu koşulları yerine getirecek ürünler üretmek amacıyla gelişen bir bilimdir.

Tez çalışmasına konu olan alüminyum ve alaşımları da her gün temas halinde olduğumuz birçok ürün içeriğinde az veya çok miktarda bulunmaktadır. Alüminyum folyolar, içecek kapları, tepsi, çaydanlık, tava ve tencereler, pencere ve korkuluk iskeletleri, kapı ve paneller, bisiklet, otomobil ve uçak parçaları ve dahası.

Saf alüminyumun yumuşak doğası gereği her yerde kullanılması mümkün değildir. Bu yüzden alüminyumu diğer elementlerle alaşım yapıp mekanik, termal, optik, elektrik ve manyetik özelliklerinde değişiklik yapılmaktadır.

Bu amaçla teorik bilgilerin verileceği bu bölümde önce malzeme biliminin tarihsel serüvenine kısa bir bakış atıp, malzeme türleri ve özelliklerinden bahsedilecektir. Daha sonra malzeme bilimi özelinde alüminyumun dönemsel gelişimine değinilip onun alaşım çeşitleri, yöntemleri, kullanım ve üretim safhası alanlarından bahsedilip bölüm sonlandırılacaktır.

Bu bölümü inceleyen bir araştırmacı, tez çalışmasında neden alüminyum ve alaşımlarının seçildiği, alaşım gruplarından niçin Al-Si döküm alaşımının seçildiği, üretim yöntemlerinden eriyik eğirme, kriyojenik öğütme, soğuk pres ve spark plazma sinterlemenin teorik alt yapısı ve neden bu yöntemlerin tercih edildiği sorularına cevap bulacaktır.

2.1. Malzeme Biliminde Köşe Taşları

Modern çağda, yaygın olarak kullanılan çok sayıda malzemeye sahibiz. Eski çağlarda bu kadar büyük bir çeşitlilik bulunmamaktaydı. İnsanlık tarihini, ağırlıklı olarak kullanılan malzemelere göre adlandırılan dönemlere ayırabiliriz (Bolton & Higgins, 2021);

Taş Devri (yaklaşık M.Ö. 10000- 3000). İnsanlar sadece etraflarında buldukları taş, tahta, kil, hayvan postu, kemik gibi malzemeleri kullanabiliyorlardı.

Bronz Çağı (M.Ö. 3000- 1000). M.Ö. 3000 civarında, insanlar cevherinden bakır çıkarabildiler. Bakıra kalay eklendiğinde, bir alaşım olan bronzun üretildiği bulundu.

Demir Çağı (M.Ö. 1000-M.S. 1620). MÖ 1000 civarında, saf haliyle demir, bronzdan daha değersizdi. Ancak demirden yapılan eşyaların kömürde ısıtılması ve dövülmesiyle çelik adı verilen daha sert bir malzeme üretildi.

Dökme Demir Çağı (1620-1850). İlk kok kömürü yakıtlı yüksek fırın ile büyük ölçekli demir üretimi 1709'da başladı. Dökme demirin yapılar ve makine parçaları için kullanımı, 1750'den sonra hızla arttı. 1777'de ilk dökme demir köprü inşa edildi.

Çelik Çağı (1860'tan itibaren). Çelik, on dokuzuncu yüzyılın ilk yarısında özel amaçlı bir malzeme iken, 1860 yılında bir yapı malzemesi olarak kullanılmaya başlandı.

Hafif Alaşımlar Çağı (1900'lerin başında üretilen ancak 1940'tan itibaren yaygın olarak kullanılan alaşımların çağı). Alüminyum ilk kez 1825'te H.C. Oersted tarafından çok küçük miktarlarda üretilmesine rağmen ticari olarak 1886'ya kadar üretilmedi. Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımı duralumin (alüminyumun sert ve hafif, bakır ve diğer elementlerle alaşımı) 1909'da, yüksek sıcaklıkta kullanım için yüksek mukavemetli nikel- krom alaşımları 1931'de geliştirildi ve titanyum ticari olarak ilk kez 1948'de üretildi.

Plastik Çağı (1930'dan itibaren). İlk üretilen plastik, selüloit, 1862'de geliştirildi. 1906 yılında bakalit geliştirildi. 1933'te polietilen dediğimiz malzeme geliştirildi. Polietilenin

ticari üretimi 1941'de İngiltere'de başladı. 1940'ta az miktarda PVC üretildi ve 1945'te PVC'nin ticari üretimi başladı.

Kompozit Çağı (yaklaşık 1950'den itibaren). Kompozitler yeni olmasa da sentetik kompozitlerin yaygın olarak kullanılmaya başlaması ancak yirminci yüzyılın ikinci yarısındadır. Güçlendirilmiş plastikler artık yaygın olarak kullanılmakta ve karbon elyaf takviyeli kompozitler, 1960'lardan itibaren, halk tarafından bilinir hale gelmiştir.

Tüm bu tarihsel süreçlere bakıldığında 1900'lü yıllardan sonra malzeme alanında, özellikle de hafif alaşım malzemelerde ciddi çalışmalar yapılmış ve önemli gelişmeler elde edilmiştir. Bu çalışmaların yapılmasındaki en önemli düşünce: insan nüfusuyla beraber enerji talebindeki artış, bu enerji artış talebini karşılayabilmek amacıyla daha hafif ve mukavemeti yüksek parçalar üretmek, malzemelerin üretilebilme kolaylığı ve geri dönüştürülebilme özelliğidir (Davis, 2001). Bu etmenler, alüminyum demir- çelik endüstrinden sonra en çok üretilen metal durumuna getirmiştir (Eroğlu & Şahiner, 2018).

2.2. Malzemelerin Sınıflandırılması

Malzemeler, içyapılarına ve nihai özelliklerine göre belirlenen dört ana grupta incelenebilir (Bolton & Higgins, 2021);

2.2.1. Metaller

Bunlar metalik kimyasal elementlere dayalıdır. Mühendislik metalleri, genellikle iki veya daha fazla elementin karıştırılmasıyla oluşan alaşımlardır. Örneğin, yumuşak çelik, bir demir- karbon alaşımı, paslanmaz çelik ise demir, krom, karbon, manganez ve diğer elementlerin bir alaşımıdır. Bu tür eklemelerin nedeni, metalin bazı özelliklerini iyileştirmektir. Karbon, demirin dayanımını artırırken krom, paslanmaz çelikteki korozyon direncini artırır. Genel olarak, metaller yüksek elektriksel ve ısı iletkenliğe ve

nispeten yüksek bir sertlik ve mukavemete sahiptirler. Esnek olabilirler ve ürünlerin bükülerek şekillendirilmesine izin verirler. Örneğin, bir arabanın karoseri genellikle, gerekli şekle getirilmek için yeterince sünek ve bu şekli korumak için yeterli sertliğe ve dayanıklılığa sahip olan metalden yapılır. Metal alaşımları da aşağıdaki gibi sınıflandırılır:

i. Demir bazlı alaşımları: Çelikler ve dökme demirler gibi.

ii. Demir içermeyen alaşımlar: Alüminyum ve bakır bazlı alaşımlar gibi.

2.2.2. Polimerler (Plastikler)

Bunlar, genellikle karbon temelli uzun zincirli moleküllere dayanır. Genel olarak, polimerler düşük elektriksel iletkenliğe ve düşük ısı iletkenliğe sahiptir (dolayısıyla elektrik ve ısı yalıtımı için kullanılırlar). Metallerle karşılaştırıldığında daha düşük yoğunluklara sahiptirler. Sıcaklıkta bir değişiklik olduğunda daha fazla genişirler ve genellikle korozyona dayanıklılığı yüksektir. Daha düşük sertlik, daha fazla esneme özelliğine sahiptir. Polimerler de şu şekilde sınıflandırılabilirler:

i. Termoplastikler: Bunlar ısıtıldığında yumuşar ve soğuduğunda tekrar sertleşir. Böylece, gerekli şekilleri oluşturmak için ısıtılabilir ve bükülebilirler. Polietilen, torbalar, 'sıkmalı' şişeler ve tel ve kablo yalıtımı gibi öğeler için yaygın olarak kullanılan bir termoplastik örneğidir.

ii. Termosetler: Bunlar ısıtıldıklarında yumuşamazlar, kömürleşir ve ayrışırlar. Katı, sert ve termoplastikler gibi şekillendirilemezler. Bakalit olarak bilinen fenol formaldehit bir termosettir ve yaygın olarak elektrik fişi muhafazaları, kapı kolları ve kulplarda kullanılmıştır.

iii. Elastomerler: Yapıları gereği tersine çevrilebilir polimer yapılardır. Lastik bantlar gibi önemli uzamalara izin verirler.

2.2.3. Seramikler

Bunlar, aslen kil temelli inorganik malzemelerdir. Kırılgan, nispeten sert, kimyasal olarak inert, elektrik ve ısıyı kötü iletirler. Cam olmayanlar iyi ısı ve aşınma direncine sahip olup yüksek sıcaklık dayanımı sergilerler. Seramikler:

i. Camlar: Soda kireç camları, borosilikat camlar, pirosesamikler.

ii. Ev seramikleri: Porselen, vitrifiye çini, çanak çömlek, seramik, çimento.

iii. Mühendislik seramikleri: Alümina, karbürler, nitrürler. Sertlikleri ve aşınma dirençleri nedeniyle bu tür seramikler, aletlerin kesici kenarları olarak yaygın olarak kullanılmaktadır.

iv. Doğal seramikler: Kayalar.

2.2.4. Kompozitler

Bunlar plastik ve cam elyafındaki partiküller, metallerde seramik partiküller (sermetler) ve betonda çelik çubuklar (betonarme) gibi birbirine yapıştırılmış iki farklı malzemeden oluşan yapılardır. Odun, lignin olarak adlandırılan bir polimerde selüloz tüplerinden oluşan doğal bir kompozittir.

Akıllı malzemeler, artan ışık seviyelerine tepki olarak koyulaşan reaktif gözlük camlarında kullanılan fotokromik malzemeler gibi etraflarındaki çevreyi algılayabilen ve tepki verebilen malzemeler için kullanılır.

Nanomalzeme terimi ise metaller, polimerler, seramikler veya nanometre boyutunda elementler ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) içeren kompozitler için kullanılır.

2.3. Malzemelerin Özellikleri

Bir malzemenin sahip olduğu özellikler genellikle maruz kaldıkları işlemlerle önemli ölçüde değişir. Örneğin karbon çeliği, kalıcı olarak deforme olursa, bu deformasyondan önce var olanlardan farklı mekanik özelliklere sahip olacaktır. Bu yüzden malzeme seçiminde malzemenin cinsi, üretim yöntemleri, üretim esnasında maruz kaldığı işlemler çok önem arz etmektedir. Ham malzemelerden ürün üretmek için kullanılan süreçler şu şekilde gruplandırılabilir: (Higgins & Bolton, 2021)

- i. Şekillendirme: Bu süreçler döküm, kalıplama, toz yöntemleri, sac şekillendirme ve işlemeyi içerir.
- ii. Birleştirme: Bunlara kaynak, yapıştırıcı ve bağlayıcı elemanlarının kullanımı dahildir.
- iii. Yüzey işlemleri: Bunlara cilalama, fiziksel kaplama (coating), elektrolitik kaplama (plating), dağlama ve baskı dahildir.

Proses seçimi, kullanılacak malzemeye, şekil ve boyut gibi ürünün şekline ve sürecin ekonomisine bağlıdır. Bu nedenle, bazı prosesler yüksek kurulum maliyetlerine sahiptir ve bu maliyetler yalnızca çok büyük üretim işlemlerinde karşılanabilirken, yüksek çevrim sürelerinin gerekli olmadığı küçük işlemler için kurulum daha ekonomiktir. Örneğin, kalıba döküm, kuma dökümden daha iyi boyutsal doğruluk ve bütünlük sağlar. Ayrıca parça başına daha düşük işçilik maliyetine sahiptir. Ancak, daha yüksek kurulum ve donanım maliyetlerine sahiptir. Bununla birlikte, kum dökümü daha düşük bir kurulum maliyetine sahiptir. Ancak her döküm yapıldığında işçilik maliyetleri ortaya çıkar. Böylece yapılan parça sayısı arttıkça, işçilik maliyetleri de artar ve nihayetinde kalıba dökümü, kum dökümden parça başına daha ucuza gelir.

Bir ürün için malzeme seçimi yapılırken ‘seçilen malzemede bulunması gereken ne gibi özellikler vardır?’ sorusuna kısaca şu şekilde cevap verilebilir; mekanik özellikler (yoğunluk ve akma dayanımı, dayanıklılık, katılık, sertlik, tokluk, yorulma mukavemeti, sünme dayanımı gibi), elektriksel özellikler (direnc, özdirenc, iletkenlik), manyetik özellikler (manyetik alınganlık gibi), termal özellikler (genleşme, ısı kapasitesi gibi),

optik özellikler (saydamlık gibi), yüzey özellikleri (aşınma, korozyon ve solvent direnci gibi) ve estetik özellikler (dış görünüş, doku, malzemenin verdiği his gibi) olarak özetlenebilir (Davis, 2001).

2.4. Alüminyumun Kısa Bir Tarihi

1884 yılında tamamlanan Washington Anıtı'nın tepesine 2,72 kg'lık bir alüminyum piramit yerleştirildiği tarihte alüminyum o kadar nadir bulunan bir elementti ki çok değerli bir metal olarak kabul edilmekteydi (Çetin, 2017). Ancak 100 yıldan daha kısa bir süre içerisinde alüminyum, demirden sonra en yaygın şekilde kullanılan bir metal haline geldi. Alüminyum endüstrisinde yeni gelişmeler ve uygulamalar demir, bakır, kurşun ve kalay gibi metallerle kıyaslandığında daha yoğun bir şekilde devam etmektedir (Kissell ve diğerleri, 2004).

Alüminyum doğada, dünya yüzeyine yakın bölgelerde kırmızı kil benzeri boksit yataklarında, başta oksijen ve silikon olmak üzere diğer elementlerle sıkı şekilde birleşmiş halde bulunmaktadır. Tarihsel ve arkeolojik kazılarda elde edilen bilgiler ışığında milattan önce 7000'li yıllara kadar uzanan bir geçmişe sahip olan alüminyum, "alum", "alumine", "aluminum" gibi isimlerle adlandırılmıştır.

1825 yılında Danimarkalı Hans Oersted, potasyum amalgamı alüminyum klorür ile ısıtarak küçük bir parça alüminyum üretti. 1854'te Sainte-Claire Deville, Güney Fransa'daki Les Baux yakınlarında bulunan alüminyumca zengin yatakları "bauxite" (boksit) olarak isimlendirerek 1807'de İngiliz Sir Humphry Davy'in "aluminum" yazımını "aluminium" olarak değiştirdi. "Aluminium" ismi tüm dünyada kabul görmesine rağmen günümüzde Amerika ve Kanada bu metali hala "aluminum" olarak adlandırmaktadır (Kissell ve diğerleri, 2004).

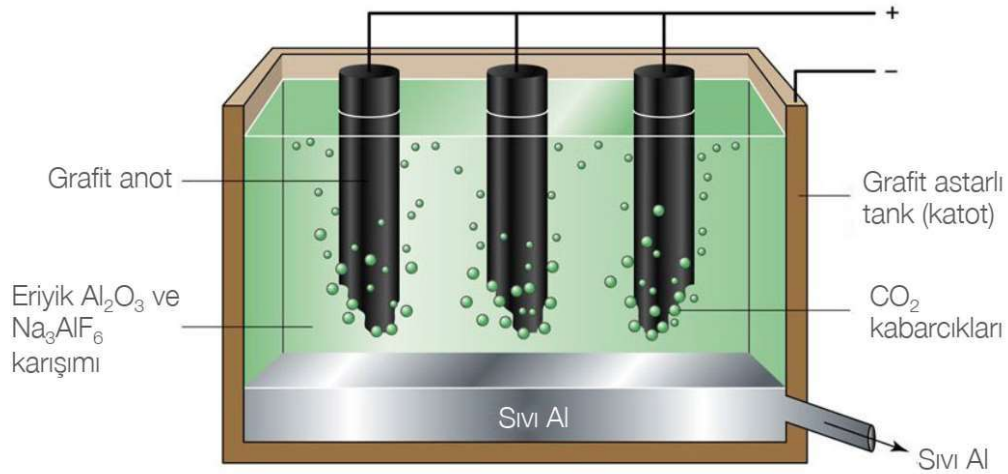


Şekil 2.1. Boksit (Safon, 2007)



Şekil 2.2. Alümina (Aariuser, 2021)

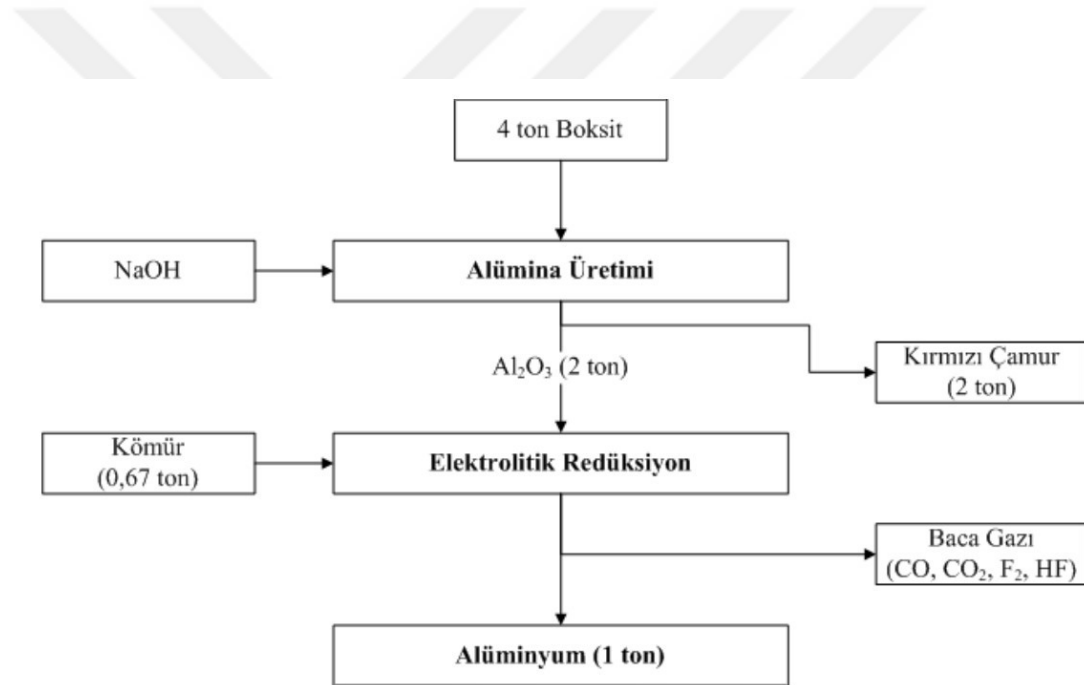
1886 yılında Paris'te Paul L. T. Heroult ve Amerika'da Charles Martin Hall, birbirlerinden tamamen habersiz olarak geliştirdikleri, günümüzde Hall- Heroult süreci olarak adlandırılan işlem, alüminyumun ticari olarak üretimine fırsat veren elektrolitik bir yöntemdir (Çetin, 2017).



Şekil 2.3. Elektrolitik yöntemle saf alüminyumun eriyiğinin elde edildiği Hall- Heroult sürecinin şematik gösterimi (Çetin, 2017)

Bu yöntemde boksit madeninden Bayer işlemi adı verilen yöntem kullanılarak boksit kimyasal olarak rafine edilir. Bu sayede ince beyaz bir malzeme görünümünde olan

alümina'yı (Al_2O_3) elde edilir. Daha sonra alüminayı elektrolitik olarak çözebilen eriyik haldeki kriyolit (Na_3AlF_6) kullanılır. Eriyik içerisine daldırılan grafit çubuklara akım verilir. Kriyolit içerisinde çözünen alümina akım etkisiyle indirgenerek ($2\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{C} \rightarrow 4\text{Al} + 3\text{CO}_2$) erimiş haldeki alüminyum hücre tabanında birikir. İndirgenme esnasında ortaya çıkan oksijen, karbon elektrot ile tepkimeye girerek karbondioksit oluşturur. Bu sayede yüksek tonajlı alüminyum üretimi gerçekleştirilmiş olur. Hücre tabanında biriken metalik alüminyum dökümhanelerde eritilerek alaşımlama yapılır. Cevherden alüminyumun saflaştırılması sürecinde elde edilen ana, yan ürün ve miktar olarak yaklaşık değerler Şekil 2.4.'de gösterilmektedir (Eroğlu & Şahiner, 2018).

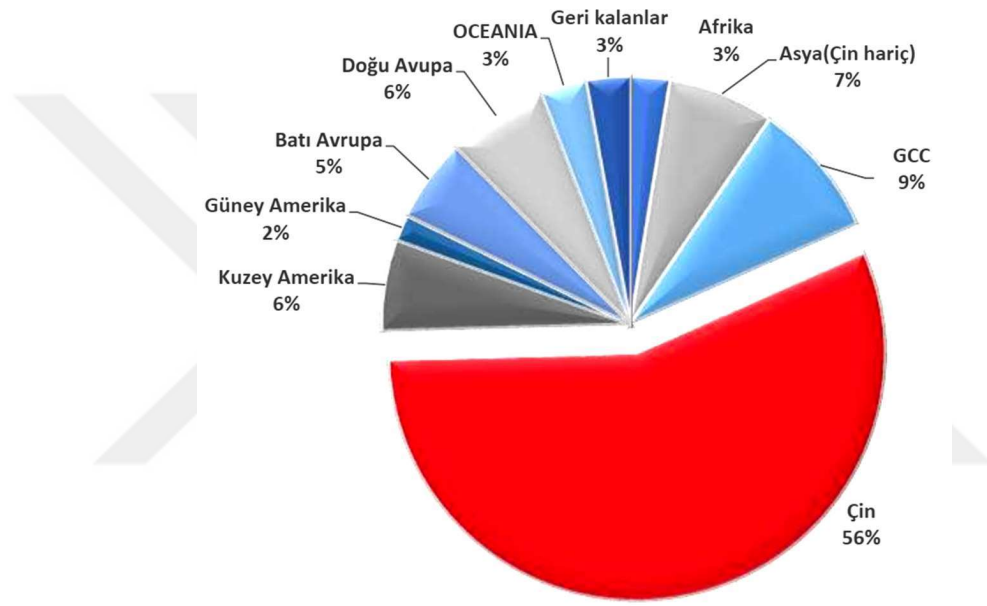


Şekil 2.4. Boksit cevherinden alüminyum üretim ana/ara ürün ve miktarsal gösterim

2.4.1. Türkiye’de ve dünyada alüminyum yeri ve önemi

Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği (TALSAD)’ın 2020 yılı raporuna göre tüm dünyada alüminyum ihtiyacı son çeyrek yılda ortalama %5.4 büyümüş, 2020 yılında birincil alüminyum üretimi küresel salgın tedbirleri kapsamında %2.6 artarak yıllık 65.3 milyon ton olarak gerçekleştirilmiştir. Tekrar kullanım yoluyla elde edilen ikincil

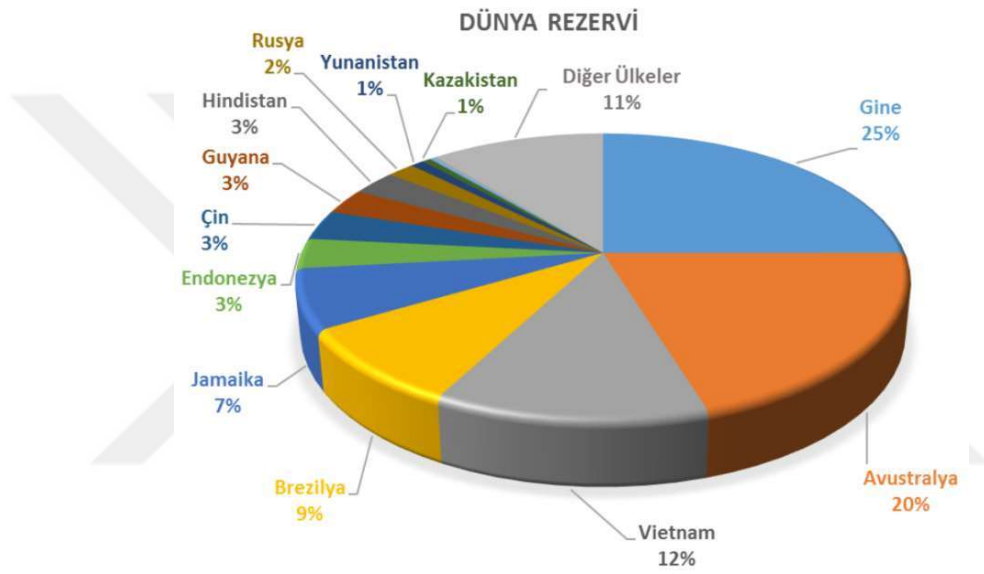
alüminyum da dikkate alındığında bu talebin 98 milyon tona ulaştığı görülmüştür. Küresel bazda birincil alüminyum üretiminde Çin, %56'lık bir üretimle ilk sırada yer almaktadır. Çin, 2000'li yıllardan itibaren iç talepteki alüminyum artışını karşılayabilmek amacıyla 2017 yılında 32 milyon ton üretim yapmıştır. Yine 2017 yılı verilerine göre Rusya 3.6 milyon ton üretimle ikinci, Kanada ve Hindistan ise 3.2 milyon ton ile üçüncü sırada yer almıştır (Eroğlu & Şahiner, 2018).



Şekil 2.5. Dünya birincil alüminyum üretimi (TALSAD, 2021)

2050 yılında dünya alüminyum talebinin 240 milyon ton olacağı tahmin edilmektedir. Talepte meydana gelen artmanın yaklaşık yarısı tekrar kullanım yoluyla karşılanması beklenmektedir (TALSAD, 2021). Gelişmiş ülkelere bakıldığında alüminyumun geri dönüşümle üretimi daha fazla olduğu görülmektedir. Örneğin ABD'de alüminyum ihtiyacının büyük bir kısmı tekrar kullanım yoluyla üretilen alüminyumdan sağlanırken, 2017 yılındaki geri dönüştürülmüş ikincil alüminyum üretimi 3.7 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Verilen bu rakamın %43' ünü eski ve %57' sini yeni hurda alüminyum dönüşümünden elde edilmiştir (Eroğlu & Şahiner, 2018).

Dünya genelinde 75 milyar ton olduğu tahmin edilen boksit kaynaklarının yaklaşık 30 milyar tonu çıkarılabilir rezerv olarak kaydedilmiştir. Alüminyum rezervleri olarak küresel çapta bakıldığında 7,4 milyar ton/yıl üretimle Gine ilk sıralarda yer alır. Gine'yi 6 milyar ton/yıl ile Avustralya takip ederken, sayılabilecek diğer ülkeler 3,7 milyar ton/yıl ile Vietnam, 2,6 milyar ton/yıl ile Brezilya, 2 milyar ton/yıl ile Jamaika, 1 milyar ton/yıl Çin ve 1 milyar ton/yıl ile de Endonezya sayılabilir.



Şekil 2.6. Dünya geneli çıkarılabilir boksit rezerv dağılımı (Survey, 2019)

Türkiye’de ise boksit rezervi olarak Toroslarda bulunan yaklaşık 420 milyon tonluk bir rezerv olduğu öngörülmekte olup, Konya Seydişehir (82 000 ton/yıl) ve Antalya Akseki’de bulunan işlenebilir haldeki boksit yataklarının toplam rezervinin yaklaşık 30 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir (Eroğlu & Şahiner, 2018).

Türkiye’de alüminyum rezervi, kişi başına düşen 13.6 kg’lık miktar dikkate alındığında yetersiz kaldığından dolayı birincil alüminyumun %93’ü ithalat yoluyla gerçekleştirilmektedir. Ancak son yıllarda hurda ve geri dönüşüm yoluyla ikincil alüminyum üretiminin artmasıyla Almanya, İtalya, Polonya, Fransa ve Birleşik Krallık gibi pek çok ülkeye ihracatımızın olduğu da görülmektedir (TALSAD, 2021).

2.5. Alüminyum ve Özellikleri

Atom numarası 13, yoğunluğu $2,7 \text{ g/cm}^3$ olan alüminyum $10 \times 10^6 \text{ psi}$ (70 GPa) elastik modülüne sahiptir. Kıyas yapmak amacıyla çeliğe baktığımızda yoğunluğu $7,83 \text{ g/cm}^3$ ve elastik modülü $29 \times 10^6 \text{ psi}$ (200 GPa) olup alüminyumun yaklaşık üçte katı kadardır (Kissell ve diğerleri, 2004). Yani 30 cm'lik küp çelik yaklaşık 211,4 kg'lık kütleye sahipken, aynı boyuttaki alüminyum sadece 73 kg'dır. Alüminyum alaşımları çeliklerden daha düşük çekme mukavemetine sahip olmasına rağmen özgül mukavemeti (veya mukavemet- ağırlık oranları) mükemmeldir (Askeland & Wright, 2014).

Tablo 2.1. Saf alüminyum elementinin bazı fiziksel ve mekaniksel özellikleri

Kimyasal sembol	Al
Atom numarası	13
Atom Ağırlığı	26.98
Kafes Yapısı	KYM
Yoğunluğu	2.6989 g/cm^3 (20°C) 2.37 g/cm^3 (660°C)
Elastik modül E	70607.88 MPa
Kayma modülü g	26477.955 MPa
Erime sıcaklığı	660.24°C
Erime ısısı	94.6 cal/g
Elektrik iletkenliği	37.74 m/Ohm.mm^2
Isı iletkenliği λ	$0.55 \text{ cal/cm.s.}^\circ\text{C}$

Alüminyum, dünya yüzeyinde oksijen ve silisyumun ardından en çok bulunan üçüncü elementtir. Aynı zamanda doğada en çok bulunan metal unvanını da taşımaktadır. Diğer taraftan, demir- çelik endüstrisinden sonra endüstriyel anlamda en çok kullanılan metaldir (Yağcı ve diğerleri, 2021).

Alüminyum alaşımları, taşıdıkları avantajlı özellikleri açısından diğer alaşım malzemeleri arasında ön sıralarda yer almaktadır. Bu önemli özelliklerinden bazıları sıralanacak olursa;

-Yüksek özgül mukavemeti (mukavemet/yoğunluk),

-İyi korozyon ve aşınma direnci,

-Yüksek elektriksel ve ısı iletkenliği,

-Kolay işlenebilirlik, dökülebilirliği,

-Geri dönüştürülebilirliği,

-Çevre dostu oluşu

gibi özellikler sayılabilir. Tüm bu ve daha fazla özelliği barındırmasından dolayı otomotiv ve havacılık endüstrisinde tercih edilmektedir (Smallman & Bibshop, 1999).

Alüminyum alaşımlarını demir- çelik endüstrisi gibi rakiplerine karşı öne çıkaran özellikleri, otomobil, uçak ve uzay araçlar için üretilen parçaların yakıt maliyetleri nedeniyle ağırlıklarının azaltılması ve bunun sonucu olarak da ortaya çıkan enerji verimliliğidir. 19. yüzyılın sonlarında mutfak aletleri üretimi ile endüstriyel anlamda hayatımıza girmeye başlayan alüminyum, daha sonraları denizcilik, havacılık, gıda ve ilaç ambalaj kutuları ile bina ve köprü inşaatları gibi sektörlerde kullanım yeri bulmuştur. 21. yüzyılın başlarında ise otomobil şaselerinden onların motor bloklarına ve jantlarının üretimine, kalorifer petekleri gibi ısıtma- soğutma sistemleri bileşenlerine, zırhlı araç plakaları ve uçak kanat ve gövde üretimi ile de hava ve savunma sanayinde tercih edilmeye başlanmıştır (Campell, 2003).

Alüminyum, doğada en çok bulunan metal olmasına rağmen, saf metali cevherden elde etmek için harcanan enerji nedeniyle daha az bulunan bazı metallerden daha pahalıya mal olmaktadır. Maliyetinin yüksek olmasına karşın alüminyumun endüstride yaygın olarak kullanılmasının başlıca nedenlerinden birkaçını aşağıdaki gibi özetlenebilir (Kissell ve diğerleri, 2004).

2.5.1. Yüksek mukavemet- ağırlık oranı

Alüminyum, çeliğin yaklaşık üçte biri kadar yoğunluğa sahip ve magnezyumdan sonra en hafif metaldir. Bununla birlikte, alüminyum alaşımlarının mukavemeti, yumuşak karbon çeliğinkiyle rekabet edebilir ölçüdedir. Bu yüksek mukavemeti ve hafifliği alüminyumu özellikle gemiler, vagonlar, uçaklar, roketler, kamyonlar ve otomobiller gibi nakliye araçlarında ve merdivenler, yapı iskelesi ve iskele merdiveni gibi taşınabilir yapılarda kullanmaya çok uygun hale getirir.

2.5.2. İmalat kolaylığı

Alüminyum, ekstrüzyon, bükme, haddeleme, çekme, dövme, döküm, eğirme ve işleme gibi işlemler de dâhil olmak üzere şekillendirilmesi ve üretilmesi en kolay metallerden biridir. Alüminyum, ekstrüde edilmeye en uygun metaldir. Bu yöntem (tüpten dış macunu sıkmak gibi, elde edilen parçanın şeklini ana hatlarıyla belirten bir açıklıktan katı metalin itildiği yöntem) tek işlemden karmaşık kesitlere sahip parçalar üretebildiğinden oldukça kullanışlıdır. Örnek olarak pencere çerçeveleri ve kapı eşikleri gibi alüminyum pencere ürünleri ve birçok binanın dış duvarlarında kullanılan kapı-pencere ayırma dikmeleri ve çerçeveleme elemanları verilebilir.

2.5.3. Korozyon direnci

1884 yılında mermerden imal edilen Washington Anıtı'nın tepesine yerleştirilen piramit şeklindeki alüminyum kapak bugün hala yerinde işlevini sürdürmektedir. Alüminyum oksijenle çok hızlı reaksiyona girer, ancak bu sert oksit kabuğunun oluşması metalin daha fazla oksidasyonunu önler. Bu ince, sert, renksiz oksit film, alüminyum yüzeye sıkıca yapışır ve hasar gördüğünde hızla yeniden şekillenir.

2.5.4. Yüksek elektrik iletkenliği

Alüminyum, eşit ağırlıktaki bakırdan iki kat daha fazla elektriği iletir ki bu da onu elektrik iletim ve nakil kablo hatlarında kullanım için ideal hale getirir. Ayrıca kurulacak tesislerin kablolama maliyetleri diğer ürünlere göre alüminyum açısından daha ekonomiktir.

2.5.5. Yüksek termal iletkenlik

Alüminyum, ısıyı demirden üç kat daha iyi iletir. Otomobil radyatörleri, buzdolabı evaporatör bobinleri, ısı eşanjörleri, pişirme kapları ve motor bileşenleri dâhil olmak üzere hem ısıtma hem de soğutma uygulamalarında faydalanılır.

2.5.6. Kriyojenik sıcaklıklarda yüksek tokluk

Alüminyum, düşük sıcaklıklarda kırılğan çatlak oluşumuna eğilimli değildir. Düşük sıcaklıklarda daha yüksek mukavemet ve tokluğa sahiptir ki bu da onu kriyojenik kaplar için kullanışlı hale getirir.

2.5.7. Yansıtıcılık

Alüminyum, radyant (ısı ve ışık yayan) enerjinin mükemmel bir yansıtıcısıdır ki bunun sonucu olarak ısı ve lamba reflektörlerinde ve yalıtımda kullanılır.

2.5.8. Toksik olmaması

Alüminyum toksik olmadığı için gıda ve içecekler için ambalaj endüstrisinde, ayrıca gıda işleme ve pişirme kaplarında kullanılan boru ve kaplarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.5.9. Geri dönüştürülebilirlik

Alüminyum kolayca geri dönüştürülür; ABD alüminyum üretiminin yaklaşık %30'u geri dönüştürülmüş malzemedendir. Boksitten alüminyum üretmek için gereken enerjinin yalnızca %5'ini kullanarak alüminyum geri dönüştürülebilir.

Alüminyum için yukarıda bahsedilen tüm özelliklerin kombinasyonu belirli bir uygulama için onun seçiminde rol oynar. Örneğin nakliye amaçlı alüminyumun hafifliğinden ve geri dönüştürülme kolaylığından dolayı içecek kutuları imalatında, kolay taşıma/ şekil alma ve korozyon direncinden dolayı yağmur olukları ve borularının yapımında kullanılmaktadır.

2.6. Alüminyum Alaşımlarını Tanımlama Sistemi

Mekanik özellik bakımından yüksek bir potansiyele sahip olduğu görülmediğinden dolayı başlarda kapı kolu, el aynası, lamba gibi dekoratif amaçlı olarak hayatımıza girmeye başlayan alüminyum, mühendislik uygulamaları için kullanılması ancak 19. yüzyıl sonlarını bulmuştur. Bunun sebebi saf halde yumuşak bir malzeme özelliği göstermesiydi. Bu sorunun üstesinden de alaşımlama yapılarak gelinmişti (Çetin, 2017).

Bir metale bir veya daha fazla elementin eklenmesi, çoğunlukla alaşımlanmadan önceki durumdan farklı özelliklere sahip bir malzeme elde edilmesine neden olur. Alüminyuma alaşım elementi eklenmesi bazen saf metalin bazı belirli özelliklerini (korozyon direnci

veya elektriksel iletkenlik gibi) azaltırken diğ er özelliklerini (mukavemet gibi) hatırı sayılır derecede artırabilir. Alüminyum ile yaklaşık 15 alaşım elementi kullanılır ve bunlar genellikle alaşımın ağırlıkça %10'undan daha azını içermesine rağmen malzeme özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir (Kissell ve diğ erleri, 2004).

Alüminyum alaşımlarını genel olarak iki kategoriye ayırmak mümkündür. Bunlar dövme alaşımlar (ki bunları şekillendirmek için işlenirler) ve döküm alaşımlardır (bunlar da şekillerini belirleyen bir kalıba erimiş halde d k l rl r). Birkaç farklı standart sistemine göre isimlendiriliyor olsa da alüminyum alaşımları genellikle 1933 yılında kurulan Aluminum Association (AA) tarafından geliştirilen gösterimin hemen hemen dünya genelinde kabul gördüğü söylenbilir. Bu gösterime göre üretim yöntemi ve alaşımın i erdiğ  elementler dikkate alınarak sınıflama yapılmıştır (Kissell ve diğ erleri, 2004).

Alaşımlama elementlerinin etkileri incelenirken; malzemenin özelliklerini ve d k lebilirliğ ni etkileyen Si, Cu, Mg gibi temel element majör (ana) alaşım elementi olarak adlandırılır. Katılaşma süreci üzerine etkisi olan, ötektik yapıdaki modifikasyon etkilerini oluşturan ve bazı fazların oluşup oluşmamasını etkileyen Ni ve Sn gibi elementler minör (ikincil) alaşım elementi olarak, parçanın özellikleri üzerine olumsuz etkileri olan Fe, Cr ve Zn gibi elementlere de impürite (safsızlık/ kirlilik) elementi olarak adlandırılmaktadır (Apelian, 2009).

2.6.1. Dövme alaşımlar

Bir basınç veya darbe etkiyle genellikle sıcak, yarı sıcak veya soğuk olarak bir kalıp yardımıyla parçaya kontrollü biçimde plastik şekil verme işlemine dövme denir. Sıcaklığ a göre sıcak veya soğuk dövme, kalıp tipine göre ise açık veya kapalı dövme tipleri mevcuttur.

Sıcak dövme, d v lecek parçanın erime fazının altında bir sıcaklık değ rine kadar ısıtılıp küçük bir kuvvetle presleme sürecidir. Bu yöntemle parça ölçüleri yeterince

hassas şekilde elde edilemez. Bu yüzden büyük boyutlu ve kaba parçaların üretimi için daha uygundur. Yüzey pürüzlülüğü iyi olmayıp yüzeyde oksit tabakası bulunur.

Soğuk dövmede ise parça katı formunu bozmayacak şekilde istenen sıcaklık değerine kadar ısıtılıp büyük bir kuvvetle bası uygulanır. Bu yöntemle parça ölçüleri yeteri kadar hassasiyete sahip olup orta ve küçük boyutlu parçaların üretimi için uygundur. Elde edilen parçaların yüzey pürüzlülüğü ve parça kalitesi iyidir.

Açık kalıpta dövme işlemi bir sıcak dövme çeşidi olup basit ve kaba şekilli parçaların şekillendirilmesi için uygun bir yöntemdir. Silindirik ve prizma şeklindeki parçaların dövüldüğü, ölçülerin elde edilene dek basma veya vurma işleminin devam ettiği bir süreçtir.

Kapalı kalıpta dövme de bir sıcak dövme çeşididir. Isıl işlem uygulanan parça erkek ve dişi kalıplar arasına yerleştirilerek preslenir. Uygulanan kuvvet etkisiyle parçanın plastik değişimi sağlanır. Genel olarak çapaklı bir üretim tekniğidir. Bu yüzden üretim sonrası çapaklar alınır ve ısıl işleme tabi tutulur.

Dövme alüminyum alaşımları dört basamaklı sayı sistemi ve malzemenin durumunu gösteren işlem simgesi ile tanımlanır. Majör alaşım elementi ilk rakamla tanımlanır (Kalpakjian & Schmid, 2010).

1xxx- Ticari olarak saf alüminyum: mükemmel korozyon direnci, yüksek elektriksel ve termal iletkenlik, iyi işlenebilirlik, düşük mukavemet gösterirken, ısıl işlem yapılmaz. Başlıca elektrik ve kimya endüstrisinde kullanılır.

2xxx- Bakır: Ana element bakır olmak üzere özellikle magnezyum ve diğer elementler içerebilir. Yüksek mukavemet-ağırlık oranı, korozyona karşı düşük direnç gösterirler. Bu yüzden uçaklarda geniş ölçüde kullanımı vardır. Isıl işlem yapılabilir.

3xxx- Mangan: İyi işlenebilirlik, orta mukavemet gösterdiklerinden dolayı mimari uygulamalarda kullanılır. Genellikle ısıl işlem yapılamaz.

4xxx- Silisyum: Daha düşük erime noktasına sahip olup, koyu gri ile kömür rengine bir oksit film tabakası oluşturur. Silisyum karmaşık şekillerin eksiksiz doldurulmasında

iyi akışkan özelliği göstermesi nedeniyle kaynak elektrot çubukları ve lehim sacı olarak kullanılır. Genellikle ısıtıl işlem yapılmaz.

5xxx- Magnezyum: İyi korozyon direnci ve kaynak yapılabilirlik özelliklerinden dolayı tekne gövdeleri, güverte iskeleleri ve deniz ortamlarına maruz kalan diğer ürünlerde kullanılır. Orta ila yüksek mukavemet gösterirler. Isıl işlem yapılmaz.

6xxx- Magnezyum ve Silisyum: Orta derecede mukavemet, iyi şekillendirilebilirlik, işlenebilirlik, kaynak yapılabilirlik ve korozyon direnci göstermeleri nedeniyle bina, inşaat ve diğer yapısal uygulamalar ile otomobil parçalarında yaygın olarak kullanılırlar. 6061 alaşımı, tüm alüminyum alaşımlarının en popülerlerinden biridir ve yumuşak karbon çeliği ile karşılaştırılabilir bir akma dayanımına sahiptir. Isıl işlem yapılabilir.

7xxx- Çinko: Bakır, magnezyum, krom ve zirkonyum gibi elementler içermesine rağmen ana alaşım bileşeni çinkodur. Orta ila çok yüksek mukavemet göstermeleri nedeniyle uçak yapı bileşenleri ve yüksek mukavemet gereken uygulamalarda kullanılır. Isıl işlem görebilir.

8xxx- Diğer elementler: Kayda değer miktarda kalay, lityum ve/veya demir içerebilir. Demir ve nikel katkısı, elektriksel iletkenlikte önemli bir kayıp olmadan mukavemeti artırmak için kullanılır.

9xxx- bu seri kullanımda olmayıp gelecekte kullanılmak üzere rezerve edilmiştir.

Bu tanımlamalardan görüldüğü üzere ilk rakam alaşım grubunu, ikinci rakam alaşımın modifikasyonlarını gösterir. Örneğin 1xxx serisi için, üçüncü ve dördüncü rakamlar alaşımdaki minimum alüminyum miktarını ifade eder. Mesela 1050 grubunda minimum alüminyum %99.50 ve 1090 grubunda ise minimum alüminyum %99.90 olduğunu belirtir. Diğer serilerde, üçüncü ve dördüncü rakamlar gruptaki farklı alaşımları tanımlar ve sayısal bir önemi yoktur. Örneğin, tipik bir alüminyum içecek kutusu, (tamamı H19 en yüksek soğuk işlenmiş malzeme durumunda) kutu gövdesi için 3004 veya 3104, kapak için 5182 ve tırnak için 5042 alüminyum alaşımlarından oluşabilir. Bu alaşımlar, üretim özellikleri ve ekonomik nedenlerle seçilir.

2.6.2. Dökme alaşımlar

Alüminyum döküm alaşımları, diğer mühendislik alaşımlarına göre daha kolay dökülebilmesi, nispeten daha düşük erime noktasına sahip olması, farklı birçok alaşım elementiyle kolay şekilde alaşım oluşturulabilmesi, birçok kalıplama metoduyla kalıplanabilmesi ve çok geniş döküm yöntemlerine uyum içerisinde oluşu gibi özelliklerinden dolayı döküm endüstrisinde tercih edilmektedir. Burada şunu da belirtmek gerekir ki, her döküm yöntemi farklı özellikte parça elde etmemize neden olur. Örneğin basınçlı döküm ile elde edilecek parçalar kum kalıba döküm yöntemine göre daha hızlı katılaşma sağlayacağı için daha yüksek mukavemete sahip malzemeler üretmemize sebep olur (Çetin, 2017).

Döküm alaşımları, dövme alaşımlardan daha büyük oranlarda alaşım elementleri içerir. Döküm alaşımlarının sınıflandırılmasında da dört rakam kullanılır. İlk rakam majör alaşım grubunu gösterir. İkinci ve üçüncü rakam alaşım ayrıntılarını gösterir. Dördüncü rakam ondalık olarak gösterilir ve .0 döküm için, .1 ve .2 safsızlık seviyesine bağlı olarak ingot alaşım için kullanılır. Orijinal alaşımın modifikasyonu, alaşım numarasının önüne konulan A, B, C gibi öneklerle gösterilir. 1xx.x alaşım grubu diğerlerinden biraz farklıdır. Saf alüminyum grubunu temsil ettiği için ikinci ve üçüncü basamaklar saflık miktarını göstermektedir. Örneğin %99.50 saflıktaki bir alaşım grubu için 150.0 kullanılırken %99.85 saflıktaki bir alaşım grubu 185.0 şeklinde temsil edilir. 2xx.x ve 8xx.x grubu alaşımlarda ise ikinci ve üçüncü basamaklar bazı özel alaşımları gösterecek şekilde basamak değerleri verilmektedir.

1xx.x- Bunlar ticari olarak saf alüminyum döküm alaşımı grubudur. Özellikle döküm motor rotorlarında kullanılır.

2xx.x- Bakırın birincil alaşımlama elementi olarak kullanıldığı alaşım grubudur. Mukavemeti en yüksek olan döküm alaşımıdır. Bu alaşımlar takım tezgâhları, uçak ve motor parçalarında kullanılır. 203.0 alaşımı yüksek sıcaklıklarda en yüksek mukavemete sahiptir.

3xx.x- Bu seri silisyum ile bakır ve/ veya magnezyum kullanılarak yapılan alaşımlama grubudur. Bu alaşımlar mükemmel akışkanlık ve mukavemete sahiptir ve en yaygın olarak kullanılan alüminyum döküm alaşımlarıdır. 356.0 alaşımı ve onun modifikasyonları birçok farklı uygulamada kullanıldıkları için çok popülerdir. Yüksek silisyum alaşımları iyi aşınma direncine sahiptir ve otomotiv motor blokları ile pistonları için kullanılır.

4xx.x- Silisyum içeren alaşım grubudur. Silisyum içermesinden dolayı dövme alaşım grubunda olduğu gibi döküm alaşım grubunda da mükemmel akışkan özelliği gösterir. Bu yüzden karmaşık döküm parçalarında kullanılması çok uygundur. Genel olarak korozyon dirençleri iyidir. A444.0 alaşımı orta düzey mukavemete fakat iyi derecede sünekliğe sahiptir.

5xx.x- Magnezyum içeren alaşım grubudur. İyi derecede korozyon direncine sahip olduğu için özellikle deniz ortamlarında kullanılır. İşlenebilirliği iyidir fakat dökümü 200, 300 ve 400 serilerinden daha zordur.

6xx.x- Bu seri kullanılmamaktadır.

7xx.x- Çinko ile yapılan alaşımlama grubudur. Bu serinin dökümü zordur. Orta veya iyi derecede mukavemete sahip olup iyi derecede korozyon direncine sahiptir. Ancak yüksek sıcaklıklar için uygun değildir.

8xx.x- Yaklaşık olarak %6 oranında kalay ile yapılan alaşım grubudur. Yataklama malzemesi için kullanılan birçok malzemeden daha üstün özellik göstermektedir. Büyük haddehanelerde ve dizel motorlar için bağlantı çubukları ile karter yataklarında kullanılmaktadır.

9xx.x- Bu seri, diğer serilerde kullanılanlar dışındaki elementlerle alaşımlanmış dökümler için ayrılmıştır.

Al- Si alaşımlarının yüksek akışkanlıkları, korozyona karşı yüksek dirençleri, iyi kaynak yapılabilmesi, büzülmeyi azaltmaları ve düşük termal genleşme katsayısı gibi özellikleri, alüminyum döküm alaşımları içerisinde Al- Si alaşımlarını ön plana çıkarmaktadır (Wang ve diğerleri, 2010).

2.6.3. Alüminyum döküm alaşımlarında ısıt işlemler

Aluminum Association'ın Döküm Temper Tanımlama Sistemi, mühendislik dökümlerine uygulanabilen başlıca ısıt işlem türlerini belirtmek için harfler ve sayılar kullanmaktadır (Callister & Rethwisch, 2013). Buna göre

Temel temperleme işlemleri:

F- döküm yaparak- Fazla ısıt işlem görmeden oda sıcaklığındaki havada kalıptan doğal olarak soğutulur.

O- tavlama yapılmış- Genellikle en zayıf, en yumuşak, en sünek ve boyutsal olarak en kararlı durum (sadece dövme ürünler için).

W- Çözelti ısıt işlem görmüş— yalnızca çökelme sertleşmesinin doğal olarak oda sıcaklığında aylarca veya yıllarca kaldığı ürünlerde kullanılır.

T- Çözelti ısıt işlem görmüş— mukavemeti birkaç hafta içinde stabilize olan ürünlerde kullanılır (bir veya daha fazla rakam ile kullanılır).

Gerinim sertleşmesi temper işlemleri:

H1- Sadece gerinim sertleşmesi

H2- Gerinim ile sertleştirilmiş ve daha sonra kısmen tavllanmış

H3- Gerinim ile sertleştirilmiş ve daha sonra kararlı durum elde edilmiş

Isıt işlem temper işlemleri:

T1- döküm işleminden sonra kontrollü soğutulmuş ve doğal yaşlandırma yapılmış.

T2- Yüksek sıcaklıkta şekillendirme işleminden soğutulmuş, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırma yapılmış

T3- Çözelti ısıt işlem görmüş, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırma yapılmış

T4- Çözelti ısıt işlem görmüş ve doğal yaşlandırma yapılmış

T5- döküm işleminden sonra kontrollü soğutulmuş ve yapay yaşlandırma veya aşırı yaşlandırma yapılmış

T6- çözelti ısıt işlemi görmüş ve tamamen yapay yaşlandırma yapılmış,

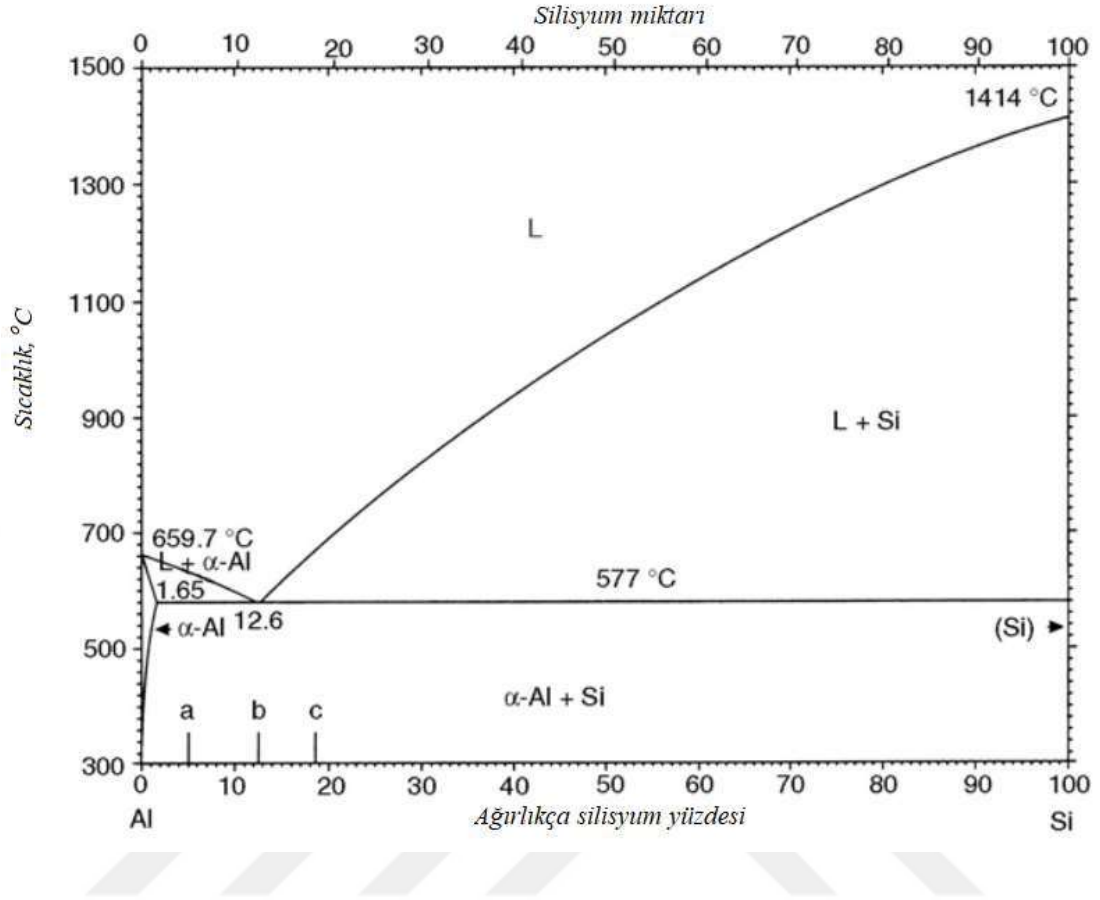
T7- Çözelti ısıt işlemi görmüş, su verilmiş ve aşırı yaşlandırılmış

Örneğin 356.0 döküm alaşımı, çözelti ısıt işlem görmüş, su verilmiş ve yapay olarak yaşlandırılmışsa tüm alaşım ve temperleme işleminin sonucunda 356.0-T6 olarak gösterilir. Yukarıda bahsedilen ısıt işlemlerden başka tanımlanan daha birçok ısıt işlem süreçleri (T8, T9, T42, T62, T351, T571... gibi) mevcuttur.

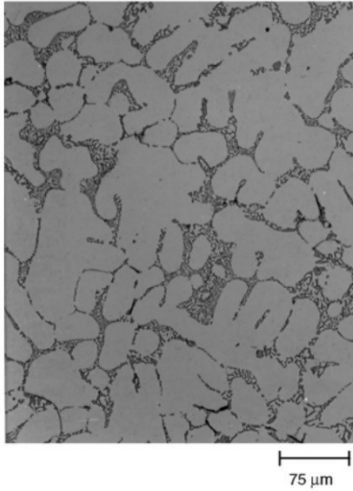
2.7. Al- Si Döküm Alaşımları

Alüminyum döküm alaşımları içerisinde Al- Si ikili alaşımını içeren 3xx.x ve 4xx.x grubu alaşımlar, yaklaşık olarak %90 gibi yüksek oranda çalışılan bir gruptur. Bunun sebebi olarak, bu alaşım grubunda silisyumun sağladığı üstün özellikler başta gelmektedir. Silisyum, alüminyum alaşımlarına iyi derecede akışkanlık sağlatarak ince kesitli ve yapısal olarak karmaşık şekilli parçaların üretimine olanak sağlamasıdır. Ayrıca mekanik özellikleri üzerine olumlu katkı sağlayan ötektik modifikasyonlara uygun olduğu da görülmektedir. Korozyon direncinin yüksek olması istenen fakat mukavemetin o kadar da önemli olmadığı uygulamalarda 4xx.x Al- Si alaşımı kullanılabilirken, mukavemetin iyi ancak korozyon direncinin nispeten düşük olması arzu edilen durumlarda ise bakır içeren 3xx.x Al- Si alaşım grubu tercih edilebilmektedir. Aynı zamanda Si, dökülebilirliği artırırken döküm yapılan üründe çekinti oluşumunu da azalttığı gözlenmektedir (Çetin, 2017).

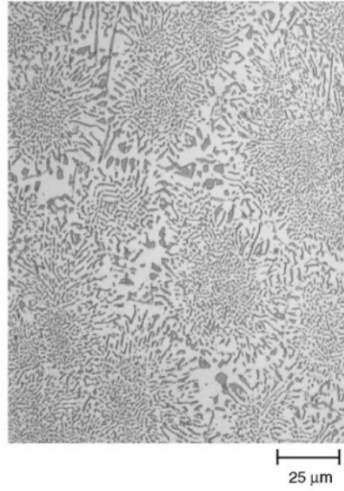
4xx.x Al- Si alaşımları, alaşım içerisine katılan silisyum miktarına göre üç grupta incelenmektedir. Ağırlıkça %11'den az olan alaşımlar ötektik altı, %11 ila %13 arasındaki silisyum içeriğine sahip olan alaşımlar ötektik ve %13 üzerindeki silisyum oranına sahip alaşım grubu ise ötektik üstü mikro yapıya sahip alaşımlar olarak adlandırılmaktadır (Hedge & Prabhu, 2008).



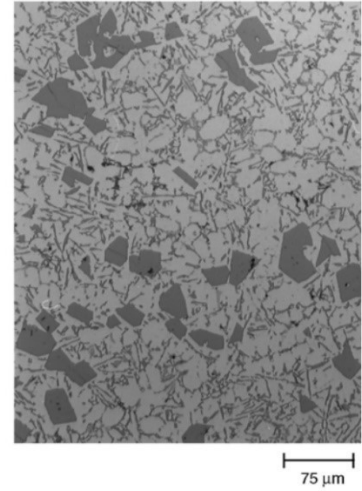
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 2.7. Alüminyum silisyum alaşımı (a) faz diyagramı, (b) ötektik altı, (c) ötektik, (d) ötektik üstü alaşım mikro yapısı (Warmuzek, 2004)

Şekil 2.7.(a)'daki Al- Si faz diyagramı incelendiğinde ötektik noktanın %12.6 silisyum değerine ve 577 °C sıcaklığına denk geldiği görülmektedir. Bu noktada alüminyumun dendritik yapıda olduğu (Şekil 2.7.(b)), bu yüzden de silisyum miktarını ötektik değerin altına çekerek çekme dayanımı yüksek malzemeler üretmenin mümkün olduğu söylenebilir. Örneğin ticari olarak çokça kullanılan A356 alaşımında silisyum miktarının yaklaşık olarak %7 dolaylarında olduğu görülmektedir. Aşınma direnci yüksek malzemeler üretilmek istendiği durumlarda ötektik üstü silisyum alaşım kullanılması gerekmektedir (Çetin, 2017).

Silisyum içeriğinin değişmesi malzemenin mikro yapısındaki fazları ve bu fazların şekli ile dağılımını etkilemektedir. Dolayısıyla mikro yapıda meydana gelen bu değişme, malzemenin mekanik doğası üzerine etki etmektedir. Alaşım yapısındaki küçük ve yuvarlak birincil fazlar, mukavemeti ve sünekliği artırmaktadır. İğnemsî yapıdaki silisyumlu fazlar, çekme mukavemetini artırmakta, süneklik, darbe ve yorulma dayanımını düşürmektedir (Warmuzek, 2004).

Alüminyumun silisyum ile alaşımlanması sonucu elde edilen malzeme, mükemmel akışkanlık, dökülebilirlik ve korozyon direnci sergiler. Aynı zamanda bu alaşımlar düşük mukavemet ve zayıf işlenebilirlik özelliği gösterir. Olağanüstü olabilen sünekliği, düşük safsızlık konsantrasyonlarının ve mikro yapısal özelliklerin bir fonksiyonudur. Ötektik altı alüminyum- silisyum alaşımlarının mukavemeti, sünekliği ve dökülebilirliği, ötektik alüminyum- silisyum modifikasyonu ile daha da geliştirilebilir. Modifikasyon, kum kalıba dökümde özellikle avantajlıdır ve kontrollü sodyum ve/veya stronsiyum ilavesiyle etkili bir şekilde gerçekleştirilebilir. Kalsiyum zayıf bir ötektik modifiye edicidir ve antimon ilavesi ile daha katmanlı bir ötektik elde edilebilir. Daha yüksek katılma oranları, daha ince modifiye edilmemiş ötektik bir mikro yapı oluşturmayı da sağlar. Alüminyum- silisyum alaşımları, düşük özgül ağırlık ve termal genleşme katsayıları gösterir. Ötektik üstü alüminyum- silisyum alaşımlarında, ötektik öncesi silisyum fazının fosfor ilavesi ile artırılması, döküm ve ürün performansı için gereklidir (Kaufman & Rooy, 2004).

Alüminyum alaşımlarında silisyumun yanında malzemenin niteliğini geliştirmek için farklı katkı elementleri eklenebilir. Silisyumla birlikte Cu, Ni ve Mg alaşımlandığı

zaman yaşlandırma süreci neticesinde malzemenin sertlik değerlerine olumlu katkı sağladığı bilinmektedir. Ancak bu olumlu katkı silisyum miktarıyla doğru orantılıdır (Li ve diğerleri, 2004). Bunun sebebi silisyumların belirli bir değere kadar alüminyum kafes yapısı içerisinde çözünmesi ve geri kalan silisyumların ise alüminyum ile silisyumun atom çaplarının farklılığı nedeniyle iç gerilme oluşturmalarıdır. Oluşan gerilme, deformasyon esnasında dislokasyon hareketliliğine mâni olarak malzemede mukavemet artışına neden olur (Warmuzek, 2004).

2.8. Alüminyum Alaşımlarında Modifiye Edici Elementler

Alüminyum elementinin fiziksel ve mekaniksel özelliklerinin değiştirilmesinde kimyasal ve ısı işlemleri olmak üzere iki önemli parametre vardır. Kimyasal olarak modifikasyon yapılabilmesi için yaklaşık on beş element kullanılmaktadır (Kissell ve diğerleri, 2004). Bunlardan Cu, Si, Mn, Mg, Zn ve Sn ana modifiye (majör) edici element olarak ağırlıkça %1 ila %7 oranında veya daha miktarlarda katılarak alaşımlama yapılmaktadır. İkincil alaşımlama elementi (minör) olarak katılan elementler genellikle ağırlıkça %1'den daha az miktarlarda eklenir (Vargel, 2020). Bu elementler farklı oranlarda katılarak alüminyumun mukavemeti, sünekliği, korozyon direnci gibi birçok özeliği değiştirilebilmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan kimyasal modifiye edici elementler ve etkileri genel olarak aşağıdaki gibidir:

2.8.1. Antimon (Sb)

Ağırlık olarak yaklaşık %0.10'dan fazla antimon ilavesi, alüminyum- silisyum ötektikini inceltir. Stronsiyum ve sodyum gibi antimon da benzer özellik göstererek iğnemi yapıdaki sert silisyum taneciklerini küçültür ve elyafimsı bir yapı oluşumunu bu sayede de alaşımlaştırmanın mukavemetini ve sünekliğini artırır (Çetin, 2017). Antimonun ötektik yapıyı değiştirmedeki etkisi alaşımlaştırmanın katılma hızına önemli ölçüde bağlıdır. Antimon aynı zamanda malzemenin dökülebilirliği ve metalurjik yapı üzerinde olumsuz etkileri olan

kaba intermetalikler meydana getirmesi için ya sodyum ya da stronsiyum ile reaksiyona girer.

Antimon, potansiyel toksisite ve hijyen etkileri olan ağır bir metal olarak sınıflandırılır. Özellikle stibin gazı (SbH_3) ve diğer antimon bileşiklerine maruz kalan insanlarda ölümcül etkileri olduğu bilinmektedir.

2.8.2. Berilyum (Be)

Çelik grisi rengine sahip olan berilyum, ağırlığına oranla yüksek mukavemet gösteren bir elementtir. Alaşımlanmamış berilyum, roket nozulları, uzay ve füze yapıları, uçak disk frenleri, hassas aletler ve aynalarda kullanılmaktadır. Düşük nötron absorpsiyona sahip olmasından dolayı nükleer ve X-ray uygulamalarında da kullanılmaktadır. Berilyum ve oksitleri zehirli olduğundan dolayı toz ve dumanı solunmamalıdır. (Kalpakjian & Schmid, 2010)

Milyonda bir berilyum katkısı, yüksek sıcaklıklarda oksidasyon kayıplarını azaltmak ve magnezyum içeren kompozisyonlarda inklüzyonlarla ilişkilidir. Çelik alüminize banyolarında alüminyum filmin yapışmasını iyileştirmek ve istenmeyen demir-alüminyum komplekslerinin oluşumunu engellemek maksadıyla %0.1'e kadar Be kullanılmaktadır. Yüksek oranda berilyum eklentisi, mukavemet ve sünekliği iyileştirmek için kullanılabilir.

Dövme alüminyum- magnezyum ürünlerinin oksidasyonu ve renk bozulması, küçük miktarlarda berilyum eklenerek, berilyumun yüzeye difüzyonu ve yüksek hacimli bir oksit tabakası oluşturmasıyla büyük ölçüde azaltılır. Berilyum, alüminyumun korozyon direncini etkilemez. Berilyum genellikle kaynak dolgu metalinde 8 ppm'de tutulur.

2.8.3. Bakır (Cu)

Bakır katkısı, üretim yöntemleri ve yapılan ısı işlemler neticesinde malzemenin mukavemetini ve sertlik değerini artırmaktadır. Ağırlıkça %5 civarı bakır katkısı, termal işlemlerle uyum içerisinde olup döküm açısından kolaylık sağlar. Bakır ilavesi genellikle korozyon direncini azaltır. Bakır, malzemenin sıcak yırtılma direncini azaltır ve interdendritik büzülme potansiyelini artırır. %12'den fazla katılan bakır miktarı, malzemede gevrekliğe neden olur.

2.8.4. Silisyum (Si)

Silisyumun alüminyum alaşımlarındaki en önemli etkisi belki de döküm yapma kabiliyetini artırmasıdır. Alüminyuma silisyum ilavesi malzemenin akışkanlık, sıcak yırtılma direncini hatırı sayılır ölçüde iyileştirir. Bu yüzden alüminyum döküm işlemlerinde en çok tercih edilen silisyumlu bileşimlerdir. Ticari alaşımlar, ötektik altı ve ötektik üstü silisyum alaşımlarını kapsar.

Döküm işlemlerinde silisyum miktarının artışı, ince duvarların doldurulması ve daha karmaşık tasarımların ve detayların yeniden üretilmesi için akışkanlığı artırır. Alüminyum silisyum alaşımları tipik olarak katılaşma çatlamasına karşı daha dirençlidir ve mükemmel dökülebilirlik ve besleme özellikleri sergiler.

Katılaşma aralığındaki sıvı yüzdesi, başlangıç bileşimi ve dengesiz soğuma derecesi tarafından belirlenir. Basınçlı kalıp ve daimî kalıp dökümü gibi daha yüksek katılaşma hızına sahip işlemler ve daha hızlı katılaşmanın gerçekleştiği daha ince bölümler için, büzülme gözenekliliği, sıvıdan kısmen katılaşmış yapılara kütle beslemesinin artık gerçekleşmediği sıcaklıktan güçlü bir şekilde etkilenir. Kütle beslemenin durduğu sıcaklıkta katılaşan hacim fraksiyonu arttıkça, büzülme gözenekliliğini en aza indirmek için besleme iyileşir. Bu nedenle, alüminyum-silikon alaşımlarının en çok arzu edilen silikon içeriği, karakteristik proses katılaşma hızına karşılık gelir. Alçıya alma, hassas döküm ve kuma döküm gibi yavaş soğutma hızı prosesleri için tercih edilen değerler

%5- 7, daimî kalıba alma değerleri %7- 9 ve basınçlı döküm yöntemi değerleri %8- 12 arasındır. Bu değer aralıkları, eriyiğin soğuma hızı ve malzemenin akışkanlığı arasındaki korelasyon ile katılaşma devam ettikçe ötektik miktarının besleme üzerindeki etkisidir.

Isıl işlem yapılabilen alüminyum alaşımlarında silisyum, magnezyumla birleşerek Mg_2Si oluşturur. Demir ve diğer elementlerle birleşerek karmaşık çözünmeyen fazlar oluşturur. Silisyum ayrıca özgül ağırlığı ve termal genleşme katsayısını azaltır.

2.8.5. Skandiyum (Sc)

Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini değiştiren birçok metot bulunmaktadır. En yaygın olarak kullanılan metot, alüminyum alaşımlarının performansını en etkili olarak değiştiren nadir toprak elementleriyle mikro alaşım yapmaktır. Nadir toprak elementi olan skandiyum, alüminyum alaşımlarının özelliklerini ve mikro yapısını geliştirmede kullanılan en etkili olan elementlerden biri olduğuna inanılır. Sc ekleme ile ilgili birincil Al fazının tane inceltmesi veya ötektik Si fazının boyutunu ve morfolojisini değiştirdiğine dair çalışmalar mevcuttur. Döküm olarak Al-Si alaşımına Sc ilavesinin ötektik Si'nin morfolojisini plaka benzeri ve sivri formdan dallı ve biraz lifli olana değiştirebileceği bildirilmiştir. Ötektik Si'nin ortalama uzunluğu, Sc ilavesinin içeriği ağırlıkça %0.4'e ulaştığında 150'den 20 μm 'ye düşmektedir. Sc içeriği %0.5'e ulaştığında ötektik Si, plakamsı yapıdan lifli yapıya dönüştüğü ve mikro yapısını inceldiği gözlenmiştir. (Chen ve diğerleri, 2021)

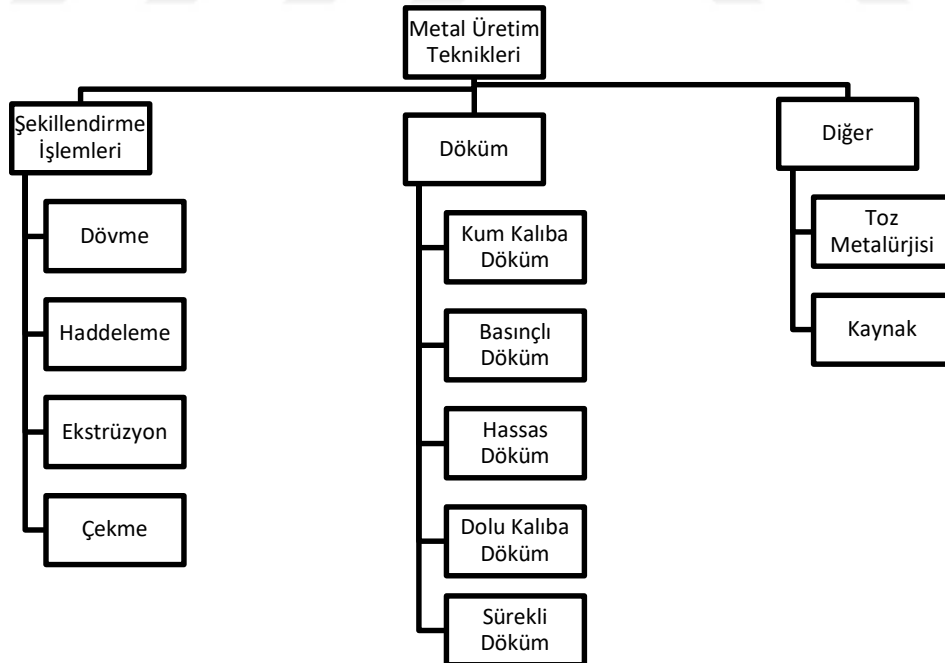
2.8.6. Titanyum (Ti)

Dökme alüminyum alaşımların tane yapısını inceltmek amacıyla az miktarda bor ile birlikte genellikle titanyum kullanılır. Akışkanlık özelliği üzere yaptığı olumsuz katkılardan dolayı basınçlı döküm yöntemlerinde titanyum tercih edilmez. Çekme

dayanımındaki artış sebebiyle sünekliği artırmanın yanında malzemenin ısıl iletkenliğini azaltır. Genellikle bor ile birlikte kullanıldığında tane inceltme etkisi vardır.

2.9. Metallerin retimi ve Şekillendirilmesi

Metal retim teknikleri, normalde arzu edilen özelliklere sahip alaşımlar üretmede kullanılan rafine etme, alaşımlama ve ısıl işlem süreçlerinden önce gelir. İmalat tekniklerinin sınıflandırmaları arasında çeşitli metal şekillendirme yöntemleri, döküm, toz metalürjisi, kaynak ve işleme gibi süreçler yer alır. Bir ürünün tamamlanmasından önce genellikle bu süreçlerden iki veya daha fazla kullanılmalıdır. Seçilen yöntemler; metalin özellikleri, bitmiş parçanın boyutu ve şekli ile maliyet gibi önemli birkaç faktöre bağlıdır. Bahsedilen metal imalat teknikleri, Şekil 2.8.’de gösterilen şemaya göre sınıflandırılabilir.

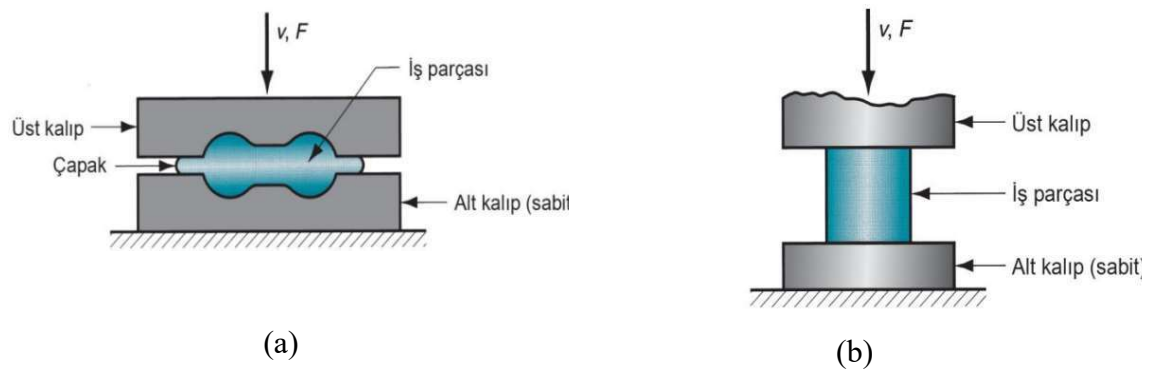


Şekil 2.8. Metallerin retim teknikleri

2.9.1. Dövmeye yöntemleri

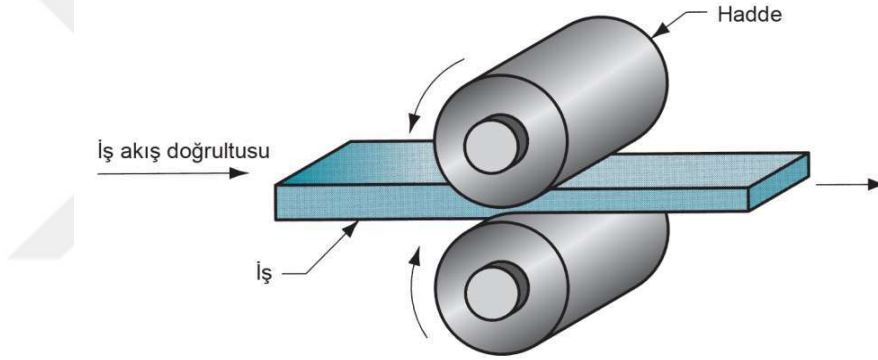
İngot (külçe), birincil alüminyum ürünlerden elde edilen geniş ve işlenmemiş alüminyum çubuklardır. Bunlar kullanım açısından uygun bir formda olmadığından dolayı yassı haddelenmiş ürünler, haddelenmiş tel ve çubuk gibi uzun ürünler, çekme borular, ekstrüzyonlar ve dövme ürünler gibi yarı mamul imalathane ürünlerine dönüştürülür. Külçeler ayrıca, döküm ürünler üretmek için dökümhanelere de verilir (Kissell ve diğerleri, 2004).

i. Dövmeye işlemi: Genellikle sıcak bir metalin tek bir parçasının mekanik olarak işlenmesi veya deforme edilmesidir. Bu işlem ardışık darbelerin uygulanması veya sürekli hidrolik veya mekanik pres ile gerçekleştirilebilir. Dövmeler kapalı veya açık kalıp olarak sınıflandırılır. Kapalı kalıp için, nihai şekle sahip iki veya daha fazla kalıp parçası arasındaki boşluğa metalin deforme olacağı şekilde bir kuvvet uygulanır (Şekil 2.9.(a)). Açık kalıp için, normal olarak büyük iş parçalarında basit geometrik şekillere (örneğin paralel düz, yarım daire biçimli) sahip iki kalıp kullanılır (Şekil 2.9.(b)). Dövmeye ürünler olağanüstü tane yapılarına ve mükemmel mekanik özelliklere sahiptir. Anahtarlar, otomotiv krank milleri ve piston bağlantı çubukları, bu teknik kullanılarak oluşturulan tipik ürünlerdir.



Şekil 2.9. Dövmeye yöntemlerinin uygulanışı (a) kapalı dövme, (b) açık dövme uygulaması

ii. Haddeleme: En yaygın kullanılan deformasyon işlemi olan haddeleme, bir metal parçasının iki silindir arasından geçirilmesinden oluşur (Şekil 2.10). Külçenin kalınlığındaki azalma ile boy ve genişliğindeki artma merdaneler tarafından uygulanan sıkıştırma gerilimlerinden kaynaklanır. Süreç, yaklaşık olarak 2 m genişliğinde, 6 m uzunluğunda, 0.5 m kalınlığında ve 16 tondan fazla ağırlığa sahip ısıtılmış külçelerin, kalınlığı birkaç cm'ye düşürmek için ileri geri yuvarlanmasıyla başlar. Daha sonra bu kalınlıktaki levhalar ısıtılabilir, su verilebilir, gerilebilir (artık gerilimleri düzeltmek ve gidermek için), yaşlandırılabilir, farklı işlemler için sevk edilebilir veya kalınlığını daha da azaltmak için sarılarak yumuşatmak için ısıtılarak sürekli haddeleme yapılabilir. Sonuçta folyo, levha veya plakalar elde edilir. Kalınlık olarak folyolar 0.15 mm'ye kadar, levhalar 0.15- 6.3 mm aralığında ve plakalar 6.3 mm'den fazla değere sahip olur.

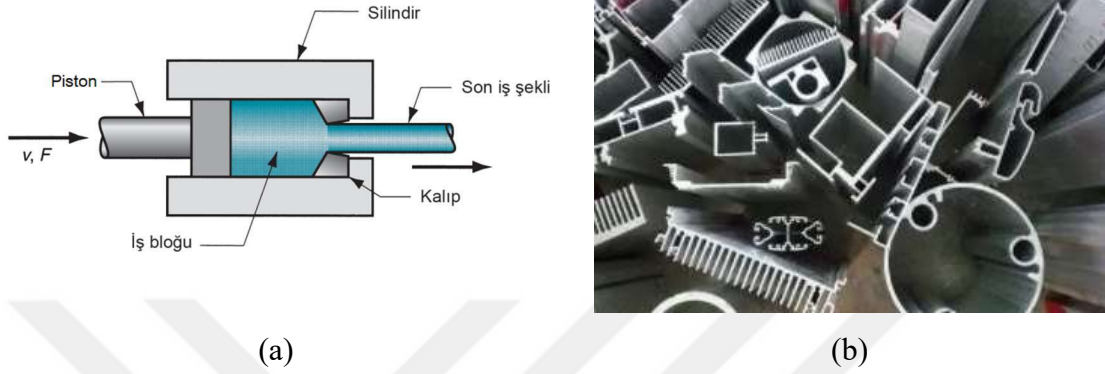


Şekil 2.10. Haddeleme işlemi

iii. Ekstrüzyon İşlemi: 1920'li yıllarda geliştirilen ve 1950'li yıllarda haddelemenin yerini alan ekstrüzyon işleminde bir metal çubuk, pistonu uygulanan bir sıkıştırma kuvveti ile kalıp deliğinden geçmeye zorlanmasıyla yapılır (Şekil 2.11.). Ortaya çıkan ekstrüde parça istenen şekle ve azaltılmış bir kesit alanına sahiptir. Bu işlem dış macunu tüpündeki macunu sıkma işlemine benzer şekilde gerçekleşir.

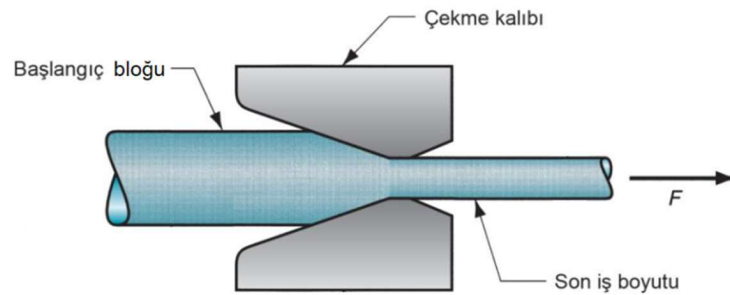
Günümüzde neredeyse tüm alüminyum şekiller için ekstrüzyon işlemi kullanılmaktadır. Alüminyum endüstrisinde profil olarak adlandırılan şekiller, kesit boyutlarına göre uzun olan tüm ürünler bu yolla üretilmektedir. Yaygın olarak bulunan şekiller arasında I

kirişler, te'ler, ze'ler, kanallar ve açılı ürünler bulunur. Makul kalıp maliyeti ve kısa teslim süresi ile çok çeşitli özel şekiller üretilebilir.



Şekil 2.11. (a) Ekstrüzyon işlemi, (b) ekstrüze üretilen bazı parçalar

iv. Çekme işlemi: Metal bir parçanın, Şekil 2.12.'deki gibi konik bir deliğe sahip kalıptan, çıkış tarafına uygulanan bir çekme kuvveti vasıtasıyla çekilmesidir. Enine kesitte bir azalma, buna karşılık gelen uzunlukta bir artış meydana gelir. Toplam çekme işlemi, ardı ardına gelen birkaç kalıptan oluşabilir. Çubuk, tel ve boru ürünleri yaygın olarak bu şekilde üretilir.



Şekil 2.12. Çekme yöntemiyle üretim modeli

2.9.2. Döküm yöntemleri

Döküm, tamamen erimiş bir metalin istenen şekle sahip bir kalıp boşluğuna döküldüğü imalat işlemidir. Kalıba dökülen eriyik katılaştıktan sonra metal kalıbın şeklini alır ancak bir miktar büzülme yaşar. Döküm teknikleri, (1) bitmiş şeklin çok büyük veya karmaşık olduğu ve diğer herhangi bir yöntemin pratik olmayacağı durumlarda, (2) sünekliği çok düşük, sıcak veya soğuk işlemle şekillendirmesi zor olan bir alaşımlarda ve (3) diğer imalat işlemleriyle karşılaştırıldığında, dökümün en ekonomik yöntem olduğu süreçlerde kullanılır (Callister & Rethwisch, 2013). Kum kalıba döküm, kokil kalıba döküm, hassas döküm, basınçlı döküm ve sürekli döküm dâhil olmak üzere bir dizi farklı döküm tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yukarıda bahsedilen metal döküm yöntemlerinden farklı savurma döküm, sıkıştırma döküm ve kabuklu döküm gibi daha birçok döküm yöntemi mevcuttur. Farklı döküm yöntemleriyle dökülen parçaların sergileyecekleri özelliklerde oldukça önemli farklar olacağı için her döküm yönteminin diğerine göre üstün/ üstün olmayan özellikleri mevcuttur. Örneğin alüminyum alaşımının kum kalıba dökümünde ısı transferi, basınçlı döküme göre daha yavaş olacağından döküm yapılan parça daha az dayanıma sahip olacaktır (Çetin, 2017). Burada önemli olan arzu edilen mekanik özelliklerin elde edilebileceği döküm yöntemini belirlemektir.

Genellikle dökülecek alüminyum külçe biçiminde alınır, ancak bir dökümhanenin yanında bulunan dökümcüden direkt olarak erimiş alüminyum da alınabilir (Kissell ve diğerleri, 2004). Şimdi alüminyum alaşımlarında en çok tercih edilen döküm yöntemlerine bakalım:

i. Kum Kalıba Döküm: Dökümhanelerde muhtemelen en yaygın kullanılan yöntem olan kum kalıba dökümde, kalıp malzemesi olarak silis kumu, zirkon veya olivin kum kullanılır. Bağlayıcı olarak da kürleşmeyen bentonit, havada sertleşen furan veya alfaset kullanımı yaygındır. Amaçlanan döküm şekline sahip bir modelin etrafına kum doldurularak iki parçalı bir kalıp oluşturulur (Çetin, 2017). Erimiş metalin boşluğa

akışını hızlandırmak ve iç döküm kusurlarını en aza indirmek için genellikle kalıba bir yolluk sistemi dâhil edilir.

Kum kalıba dökümde eriyik üzerine sadece atmosfer basıncı etki etmesi ve yüzey pürüzlülüğünün fazla olması ince kesitli parçaların üretimini zorlaştırmaktadır. Bu yüzden alüminyum alaşım dökümlerinde kum kalıba dökümde yaklaşık 4 mm'den ince kesitli parçaların dökümü pratikte yapılmamaktadır. Ancak 2 mm kalınlığında parçaların dökümü başarıyla yapılabilir (Kaufman & Rooy, 2004). Ayrıca soğuma süresinin uzun olması parçaların mukavemetini olumsuz yönde etkilemektedir. Fakat silikadan daha yüksek ısı kapasitesine sahip zirkon ve olivin gibi kumları kullanarak ve kalıp içerisine stratejik noktalara bakır, demir veya çelik soğutucu yerleştirilerek mekanik özellikler geliştirilebilir.

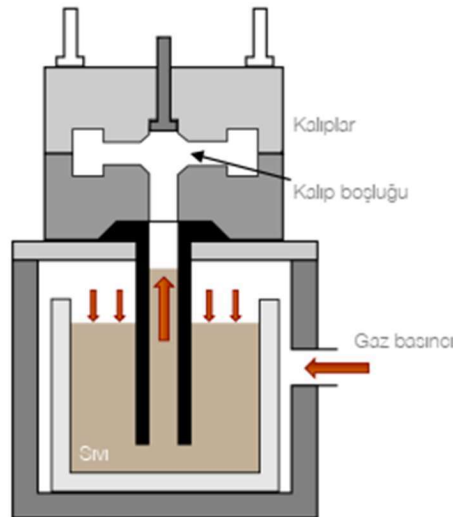
ii. Daimî Kalıba Döküm: Daimî kalıp dökümleri veya diğer ismiyle kokil döküm tekrar kullanılabilir kalıplarla yapılır. Kalıp malzemesi olarak alüminyum alaşımlarının erime sıcaklığından yüksek olan çelik veya dökme demir kullanılmaktadır. Yerçekimi etkisiyle veya bazen eriyik akışına küçük bir vakum yardımcı olur. Kokil döküm, kalıp maliyetlerinin yüksek olması yüzünden kuma dökümden daha pahalıdır. Bu yüzden az sayıda parça üretimi için uygun bir yöntem değildir. Ancak kokil dökümde katılaşmanın hızlı gerçekleşmesi nedeniyle malzemenin mikroyapısı ve mukavemeti açısından olumlu etkiler görülmektedir. Ürün yelpazesi, hızlı katılaşma sağladığı için 3xx.0 ve 4xx.0 gibi akışkanlığı yüksek silisyum içerikli alüminyum alaşımlarının üretimi ile sınırlıdır. Kalıp malzemesi ile intermetaliklerin oluşturması istenmeyen durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Kesit kalınlığı 2.5 mm civarında dökümler yapılması ve parçaların boyutsal kararlılığının yüksek oluşu bu yöntemi kum kalıba döküme göre öne çıkaran faktörler arasındadır.

iii. Basınçlı Döküm: Basınçlı dökümler, erimiş metalin basınç altında yeniden kullanılabilir bir çelik kalıba yüksek hızda enjekte edilmesiyle yapılır. Katılaşma hızının yüksek oluşu nedeniyle yüksek üretim oranları mümkündür. Ayrıca üretilen malzemelerin yüzey kalitesinin iyi oluşu ve boyutsal kararlılığın yüksek oluşu gibi sebepler bu üretim yönteminin diğer yöntemlerinin önüne taşımaktadır. Bir piston yardımıyla sıvı metalin soğutulan kalıp içerisine gönderildiği, bu yüzden de hızlı bir

katılaşma sürecinin işlediği yöntemde daha ince mikroyapı oluşması yüzünden mukavemeti yüksek, çekme ve yorulma dayanımları iyi parçaların üretimi mümkündür. Çatlama direnci ve akışkanlık özelliği iyi olan düşük bakır oranına sahip Al- Si ikili alaşımlarının üretiminde çoğunlukla basınçlı döküm yöntemi kullanılmaktadır (Çetin, 2017). Ayrıca çok ince kesitli ve karmaşık yapıli parçalar rahatlıkla üretilebilmektedir. Ancak dökümü yapılan alaşım çeşidinin sınırlı olması, kalıpların üretim ve tasarım zorluğu da maliyet açısından olumsuz bir unsurlar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Alüminyum alaşımların basınçlı döküm işleminde sıcak ve soğuk hazneli olmak üzere iki tip basınçlı döküm makinesi kullanılmaktadır. Fakat sıcak hazneli dökümde materyal haznede eritildiği için alaşımın içerisine farklı bileşenler karışma eğilimi yüksektir. Bu yüzden materyal farklı bir potada eritilip hazneye dökülerek preslendiği soğuk hazneli basınçlı döküm daha çok tercih edilmektedir.

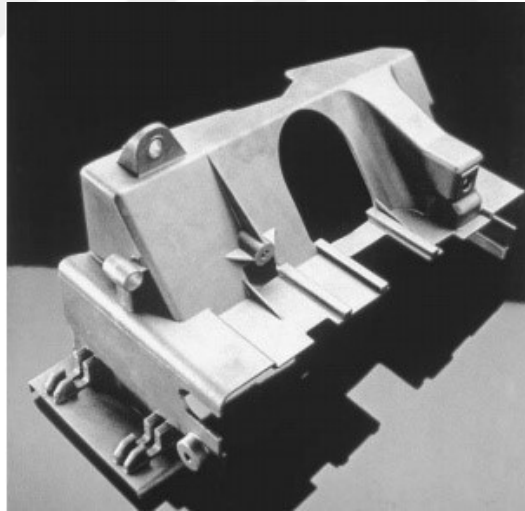
iv. Alçak Basınçlı Döküm: Alçak basınçlı dökümde sıvı haldeki metal eriyik basınç etkisiyle pota içerisindeki bir kanal aracılığıyla kalıp içerisine Şekil 2.13.'deki gibi gönderilir. Kalıbın eriyik ile dolmasıyla birlikte basınç düşürülür. Daha sonra soğuyan kalıplar birbirinden ayrılarak ürünün üretimi tamamlanır. Özellikle alaşım jant olarak bilinen ürünlerin üretiminde bu yöntem sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 2.13. Alçak basınçlı döküm şeması

v. Hassas Döküm: Hassas dökümler, oda sıcaklığında sertleşen refrakter bir bulamaç ile bozulabilir bir kalıbın (genellikle mum veya plastik) çevrenmesi ile yapılır. Yani hassas dökülecek parçanın modeli mum ya da plastikten yapılır. Daha sonra modelin üzeri refrakter çamurla kaplanır. Hem çamurun kuruması hem de mumun erimesi için kalıp ısıtılır. Bu işlemle birlikte eriyen mum kalıptan çıkartılır. Boşalan kalıp istenilen alaşımla doldurulup soğumaya bırakılır. Son olarak dış kısımdaki kabuk kırılarak döküm işlemi tamamlanmış olur.

Hassas dökümde kullanılan kabuğun yüzey kalitesi yüksek olması nedeniyle üretilen parçaların da Şekil 2.14.'de görüldüğü gibi yüzey kalitesi oldukça iyidir. Döküm nispeten vakum altında olduğu için malzemenin kesit kalınlığı 0.40 ila 0.75 mm aralığında değişmektedir. Ancak soğuma hızının yavaş olması mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkiler yaparken boyutsal kararlılığın yüksek olması yönteminin avantajlı yanı olarak dikkate alınabilir.



Şekil 2.14. A357.0 alaşımının yarı katı döküm yöntemiyle vites parçası üretimi

Yukarıda bahsi geçen döküm yöntemlerinden başka metal eriyiğin kalıplar arasında direkt olarak sıkıştırılarak üretildiği sıkıştırma döküm ve son dönemlerde yarı- katı döküm (thixocasting) olarak adlandırılan döküm yöntemleri de uygulanmaktadır. Daha çok alaşımlar için tercih edilen bu yöntemde alaşımın yarı- katı yani çamurumsu formda

olduğu bir sıcaklık aralığında kalıplar arasında preslenmesiyle bir nevi basınçlı döküm ile ürün elde edilmesi sağlanır. Yöntem ayrıntıları incelendiğinde dövme, ekstrüzyon ve döküm süreçlerinin işlediği çoklu üretim yöntemi olarak değerlendirmek mümkündür (Kissell ve diğerleri, 2004).

2.10. Hızlı Katılaştırma (Rapid Solidification)

Hızlı katılaştırma (HK) ilk olarak yaklaşık 50 yıl kadar önce Kaliforniya Teknoloji Enstitüsünde Dewez ve iş arkadaşları tarafından geliştirildi (Alshmiri, 2012). Onlar, ince bir sıvı metal tabakasını çok iletken bir altlık üzerinde soğuttular.

HK, bilimsel literatürde genel hatlarıyla, yüksek sıcaklıklardaki sıvının oda veya ortam sıcaklığında katı malzemeye geçişi sırasında termal enerjinin hızlı bir şekilde açığa çıkarılması olarak tanımlanır (Lavernia & Srivatsan, 2010). Isının hızlı bir şekilde açığa çıkması, sıvının katılaşmaya başlamadan önce 100°C veya daha yüksek bir sıcaklığa kadar aşırı soğumasına neden olabilir. Bu durum, geleneksel döküm yöntemlerinde elde edilen birkaç derecelik soğuma ile saniyede yaklaşık 1°C veya daha az olan soğuma arasında doğrudan bir karşılaştırmadır. HK işlemi, aşırı ısı (superheat) ve gizli ısıyı (latent heat) uzaklaştırarak soğuma hızının 10^2 - 10^6 K/s olduğu sıvının katıya dönüşümü olarak ta tanımlanır. HK'yi gerçekleştirmek için aşağıdaki kriterlerin karşılanması gerekir:

- i. Katılma meydana gelmeden önce yüksek aşırı soğuma
- ii. Sürekli katılma sırasında katılma cephesinin yüksek hızı
- iii. Katılma sırasında yüksek soğutma hızı.

HK, mikro yapıyı ve faz dengesini etkileyen aşağıdaki avantajlara sahiptir:

- 1) Mikro yapının iyileştirilmesi.
- 2) Katı çözünürlüğün uzatılması.
- 3) Artan kimyasal homojenlik.

4) Dengede olmayan kristal fazların çökmesi.

5) Amorf fazların oluşumu.

HK yöntemleri kullanılarak elde edilecek ürünlerde beklenen bazı yapısal özellikler ve ürün üzerinde gözlenmesi amaçlanan iyileştirmeler Tablo 2.2.'de özet şeklinde verilmiştir. Elde edilecek ürün boyutları ve katılaşma hızlarını karşılaştırmak için Tablo 2.3.'deki değerler dikkate alınabilir.

Tablo 2.2. HK'nin malzeme özellikleri üzerindeki etkileri

Yapısal özellikler	Beklenen özellik iyileştirmesi
Boyut iyileştirme	Hall-Petch güçlendirme
	Geliştirilmiş kırılma ve darbe tokluğu
	Gelişmiş süperplastisite
Genişletilmiş katı çözünürlük	Artan katı çözelti güçlendirme
	Artan çökme ve dağılım güçlendirme
	Minimize edilmiş kırılma denge fazı çökeltisi
Kimyasal homojenlik	Geliştirilmiş korozyon/oksidasyon direnci
	İşlemeye daha iyi yanıt
	Isıl işlemlere daha iyi yanıt
Dengede olmayan kristal fazların çökmesi	Gelişmiş fiziksel özellikler
	Gelişmiş mekanik özellikler
Amorf fazların oluşumu	Gelişmiş fiziksel özellikler
	Gelişmiş mekanik özellikler (dayanıklılık, aşınma)
	Gelişmiş korozyon direnci

Tablo 2.3. Bazı hızlı katılaşma teknikleri ve ürün boyutu, soğutma hız değerleri

Süreç Adı	Ürün/ Boyut	Soğutma oranı (Ks ⁻¹)
Atomizasyon Metotları		
Akışkan atomizasyonu (İkiz jet)	Gaz için: düşük O ₂ kontaminasyonu 50/100 µm çaplı küresel ve pürüzsüz toz	Gaz: 10 ² -10 ³ SSGA: 10 ⁶ üzeri
Gaz (Ar, N ₂)	Süpersonik gaz atomizasyonu: 10- 50 µm Ultrasonik gaz atomizasyonu: < 30 µm	USGA: 10 ⁵
Su	Su için yüksek O ₂ kontaminasyonu 75/200 µm çaplı düzensiz parçacıklar	Su: 10 ² -10 ⁴
Vakum atomizasyonu (çözünür gaz)	40/ 200 µm çaplı küresel toz	10 ⁴ - 10 ⁵
Döner elektrot işlemi (REP)	150/ 200 µm çaplı küresel/ pürüzsüz	10 ²
Hızlı katılma oranı (RSR)	< 100 µm çaplı küresel toz	10 ⁵
Elektrohidrodinamik atomizasyon (EHDA)	> 0.01- 150 µm çaplı damlalar	10 ⁷
Soğutma Metotları		
Eriyik eğirme (CBMS)	25/ 50 µm kalınlıklı şeritler	10 ⁵ - 10 ⁷
Potalı eriyik ekstrasyonu (CME)	20- 100 µm kalınlıklı ince tel veya lif	10 ⁵ - 10 ⁶
Eriyik sürüklenme (taşma)	İnce tel, folyo, parçacık	10 ⁴ - 10 ⁶
Hızlı eğirme kabı (RSC)	50 mm çaplı 50 µm kalınlıklı küresel ila düzensiz toz/ pullar	10 ⁶
Plazma sprej biriktirme	> 50 µm kalınlıklı gözenekli tabaka	10 ³ - 10 ⁵
Ark sprej	> 50 µm kalınlıklı gözenekli tabaka	10 ² - 10 ⁵

Uygulamada, yüksek oranda katılma elde edebilmek için geliştirilmiş bir dizi yöntem veya yol vardır. Atomizasyon metotları olarak, sıvı, gaz, su, vakum, döner elektrot

süreci, merkezkaç atomizasyonu, ikiz silindir atomizasyonu, lazer eritme/ eğirme atomizasyonu ve elektro hidrodinamik atomizasyon yöntemleri mevcuttur. Soğutma yöntemleri olarak da eriyik eğirme, pota eriyik ekstraksiyonu, eriyik sürüklenme (taşma), asılı duran damla, hızlı eğirme kabı ve ark spreyi metotları vardır (Lavernia & Srivatsan, 2010).

Hızlı şekilde katılaştan Al-Si alaşımlarının üretim yöntemleri olarak en çok tercih edilen yöntemler (Alshmr, 2012):

- a) Atomizasyon ve toz metalurjisi
- b) Sprey biriktirme (spray deposition)
- c) Eriyik eğirme (melt spinning)

Atomizasyonda, yüksek enerjili bir akışkan (gaz veya sıvı) erimiş metale çarptığında ince damlacıklar oluşturur. Damlacıklar, ilave basınç kuvvetlerine maruz kaldıkları için daha fazla değişikliğe uğrama eğilimi gösterirler ve gazın akış hızından kaynaklanan dinamik basınç, yüzey gerilimi nedeniyle ortaya çıkan geri yükleme kuvvetini aştığında parçalanma eğilimi gösterirler. Bu durum maksimum kararlılık kriteri olarak adlandırılır ve şu şekilde ifade edilir:

$$0.5\rho g(\Delta V)^2 = C(\sigma_M/d_M) \quad (2.1)$$

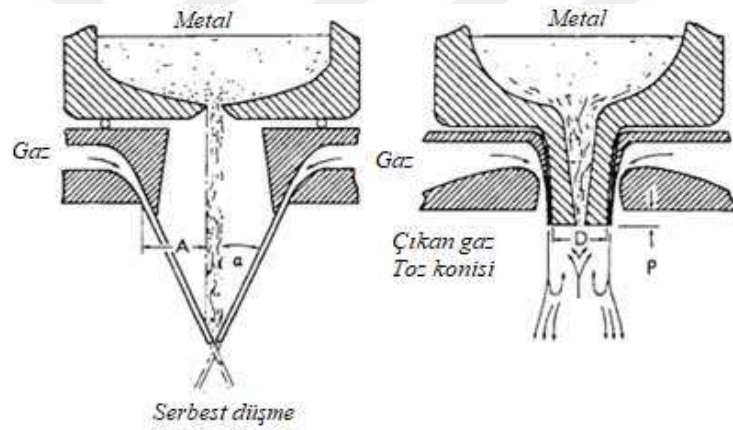
Burada ρ kullanılan gazın yoğunluğu, ΔV atomize edici akışkan ve eriyik metal arasındaki hız farkı, C atomizasyon sistemine ait deneysel sabit, σ_M yüzey gerilim kuvveti ve d_M damlanın çapıdır.

Atomize damlacıkların boyut dağılımı aşağıdakilere bağlıdır:

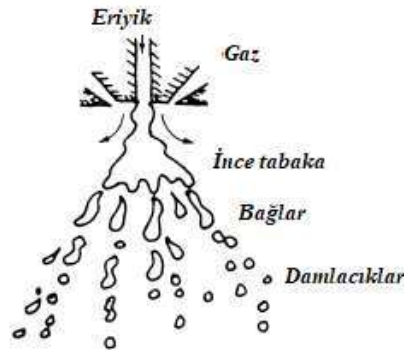
- i. Malzemenin termodinamik özellikleri, sıvılaşma sıcaklığı, katılaşma sıcaklığı, erime sıcaklığı, yoğunluk, termal iletkenlik, yüzey gerilimi, ısı kapasitesi ve füzyon ısısını içerir,
- ii. Kullanılan gazın yoğunluk, ısı kapasitesi, viskozite ve termal iletkenlik gibi termodinamik özellikleri,

iii. Atomizasyon gaz basıncı, kızgınlık sıcaklığı ve eriyik/gaz akış oranı gibi işlem parametreleri.

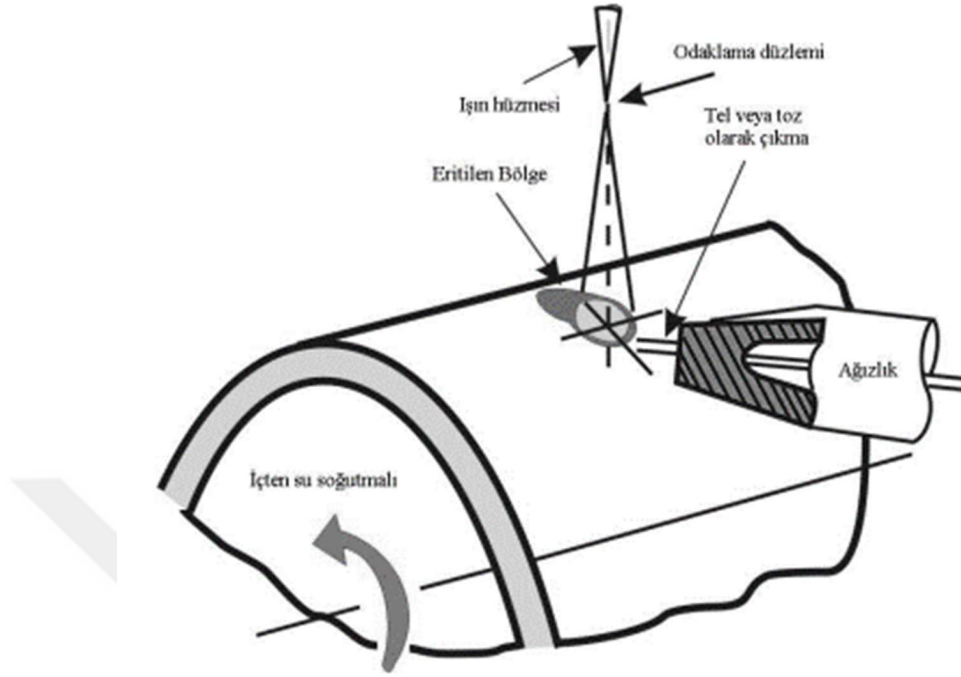
Atomizasyon işleminde tercih edilen iki taraftan sıvı veya gaz jetleri yardımıyla hızlı katılaştırma işlemi için farklı iki tekniğin şematik bir gösterim Şekil 2.15.'de görülmektedir. Burada alfa (α) açısı serbest düşen eriyikle gazın etkileşime girdiği açı ve A mesafesi eriyik ile gaz ağzı arasındaki mesafedir. D mesafesi karışmış eriyik metal ağzın çapı ve P metal ağzın toplam çıkıntı boyunu göstermektedir. Şekil 2.16.'da ise eriyik ile gazın etkileşime girmesiyle eriyikte gözlenen şekillenimler temsil edilmektedir.



Şekil 2.15. İki akışkanlı atomizasyon tasarımları.



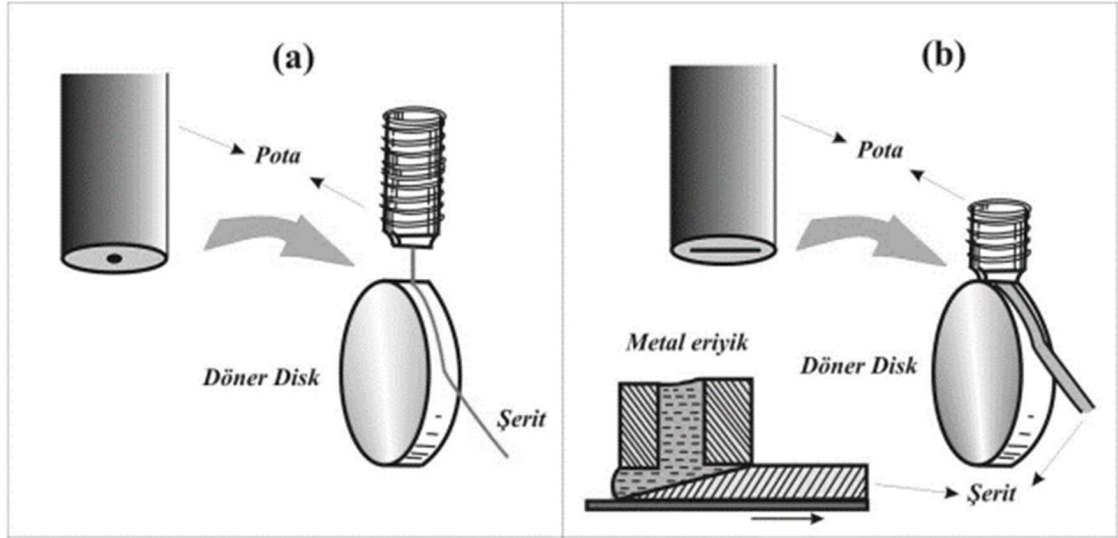
Şekil 2.16. İki akışkanlı sistemde malzemenin formasyonu



Şekil 2.17. Lazerli yüzey eritme yöntemin şematik gösterimi

HK yöntemlerinden biri olan eritme metodu hem hızlı eritme hem de hızlı katılaştırma süreçlerini içeren yenilikçi bir işlemdir. Ürün/ maliyet açısından değerlendirildiğinde hem oldukça yüksek maliyetler gerekli hem de bazı alaşım çeşitleriyle uyumlu olması bu yöntemin kullanılabilirliğini kısıtlamaktadır. Bu yöntemde malzeme bloğunun yüzeyini hızla eritebilmek için elektron demeti veya sürekli bir ışın kaynağı olarak lazer kullanılmaktadır. Bu katılaştırma yöntemin şematik gösterimi Şekil 2.17.'deki gibidir.

Son olarak bahsedeceğimiz HK yöntemlerinden biri olan soğutma metotları, eritme ve hızlı katılaştırma süreçlerinin aynı anda gerçekleştiği, muhtemelen endüstriyel anlamda en çok kullanılan bir sürekli üretim tekniğidir (Alshmr, 2012). Taylor tel yöntemi, çift silindir yöntemi, çift piston yöntemi ve eriyik eğirme (melt- spinnig) gibi pek çok farklı versiyonu bulunan bu metotta hem yüksek miktarlarla ürünler etmek mümkün hem de 10^6 K/s'nin üzerindeki yüksek soğutma hızlarına çıkılması bu yöntemi diğerlerinin önüne taşımaktadır.



Şekil 2.18. Hızlı katılaştırma tekniklerinden (a) eriyik eğirme, (b) düzlemsel akışla dökme tekniklerinin gösterimi

Eriyik eğirme yönteminde inert atmosferde bir pota içine yerleştirilen alaşım malzemesi indüksiyon ısıtıcı yardımıyla eritilir. Potanın üst kısmından gönderilen asal gaz yardımıyla eriyik potanın ağız açıklığından çıkarken hemen altında belirli bir hızla dönen bakır disk üzerine düşmesi sağlanır. Bakır disk üzerinde hızlıca katılaşıp eriyik tel veya çoğunlukla şerit şeklinde sistemde biriktirilir. Sistem değişkenleri olarak bahsedeceğimiz parametreler; eriyiğin potadan çıkıştaki akış hızı, potanın ağız geometrisi, pota ağzı- disk yüzeyi arasındaki mesafe, kullanılan diski boyutu ve dönüş hızı ile diskin sıcaklığıdır. Bu parametreler elde edilen şeritlerin boyutsal stabilizasyonu için önemli değerlerdir. Bu yöntemin şematik gösterimi Şekil 2.18.'deki gibidir.

2.11. Mekanik Alaşımlama

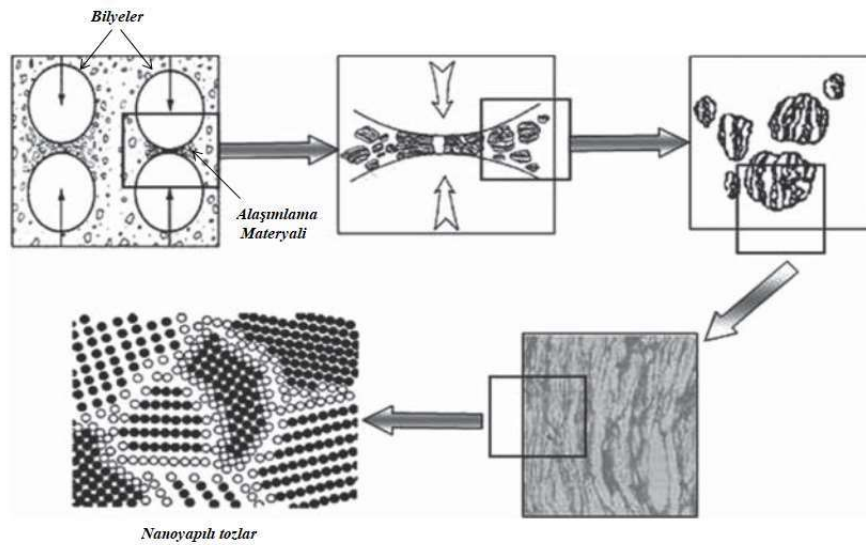
Fizik araştırmalarıyla ilgili ana alanlardan biri olan malzeme bilimi, fizikçileri, kimyagerleri ve mühendisleri içine alan multidisipliner bir araştırma bilimidir. Amorf ve nano kristaller gibi yarı kararlı bir yapıya sahip malzemeler, ilginç teknolojik uygulamalar sunar. Önceki sayfalarda değindiğimiz HK ve şimdi bahsedeceğimiz

mekanik alaşımlama (MA), amorf veya nano kristal alaşımlar elde etmek için iki önemli yoldur. Son zamanlarda, toz malzeme elde etmek için alternatif bir yol olarak şeritlerin mekanik alaşımlanması uygulanmaktadır (Sunol & Fort, 2008).

MA, John Benjamin ve Uluslararası Nikel Şirketi INCO'nun Paul D. Merica Araştırma Laboratuvarında çalışan meslektaşları tarafından 1966 yılında havacılık endüstrisindeki uygulamalar için oksit dispersiyonlu (ODS) nikel ve demir bazlı süper alaşımların üretimi için geliştirildi. İlk önce yüksek hızlı küçük bir karıştırıcı ile nikel- krom- alüminyum- titanyum alaşımı ürettirler. Daha sonra endüstriyel ölçekte ODS alaşımları üretme yöntemi olarak MA'nın doğuşuna yol açan yaklaşık 4 litrelik bilyeli öğütücü kullandılar.

Öğütmenin toz üzerindeki spesifik etkisi, tozun fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlıdır. Yani toz bileşenleri genellikle sünek/sünek, sünek/kırılgan ve kırılgan/kırılgan sistemler olarak sınıflandırılır.

MA, parçacık boyutunu küçültme, şekil değişikliği, topaklanma, katıhal alaşımlama, bir malzemenin özelliklerini modifiye etme ve iki veya daha fazla malzemenin/ fazların harmanlanması veya karıştırılması için kullanılır (Hadeef & Otmani, 2015).



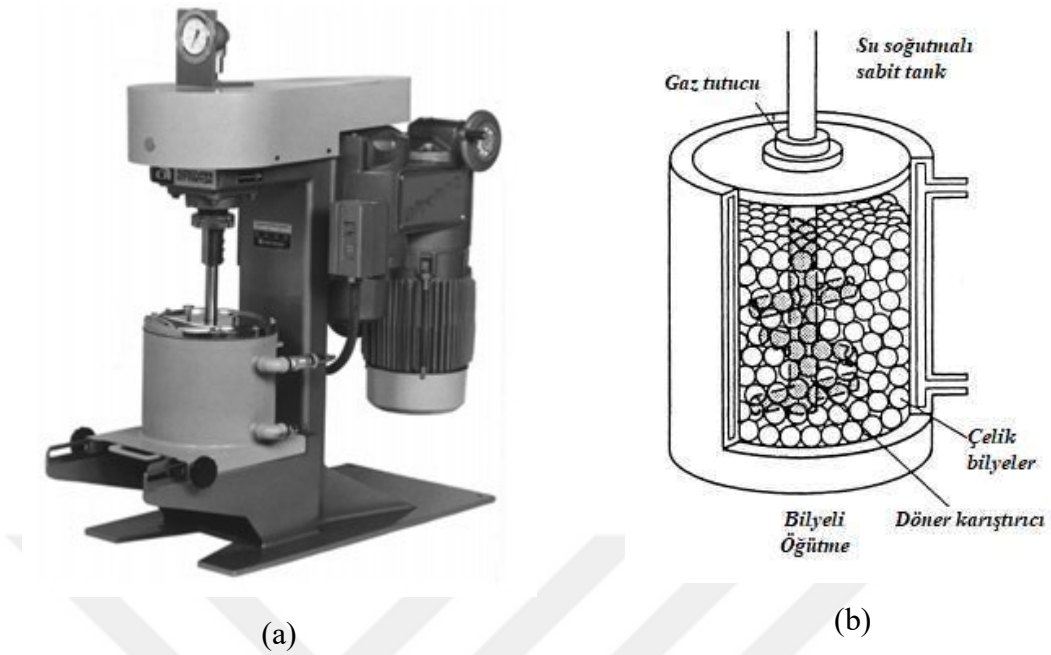
Şekil 2.19. Mekanik alaşımlama işlemi basamakları

MA sırasında, iki çelik küre çarpıştığında ve aralarında bir miktar toz sıkıştığında (Şekil 2.19.) çarpma etkisiyle toz partikülleri plastik deformasyona uğrayarak sertleşme ve kırılmalara sebep olur. Devam eden deformasyon ile parçacıklar, kırılan taneciklerin parçalanması ve/veya bir yorulma kırılma mekanizmasıyla sertleşerek ufalanır. Bu sayede üretilen kırıntılar, güçlü topaklaşma kuvvetlerinin olmadığı ortamda sürekli olarak boyut olarak küçülür. Bu aşamada parçacıkların soğuk kaynak yapma durumuna kıyasla kırılma eğilimi yüksektir. Öğütme kürelerinin devam eden etkisi sayesinde, parçacık boyutu aynı kalsa da parçacıkların yapısı istikrarlı bir şekilde inceltir (Hadeif & Otmani, 2015).

MA'nın uygulamalarının artmasıyla birlikte pek çok yöntem ve işlem de beraberinde gelişmeye başlamıştır. Bunlar arasında mekanik öğütme (MÖ), mekanik aktif tavlama (M2T), çift mekanik alaşımlama (ÇMA), tepkimeli öğütme (TM), dondurarak öğütme (cryomilling) (DÖ) ve çubuklu öğütme (ÇÖ) yöntemleri sayılabilir (Suryanarayana, 2001).

MA yoluyla tozlar üretmek amacıyla farklı tipte yüksek enerjili öğütme ekipmanları kullanılır. Bu ekipmanlar kapasiteleri, öğütme verimlilikleri, soğutma ve ısıtma düzenleri ve çalışma hızları bakımından farklılık gösterirler. Attritor öğütücüler, titreşimli öğütücüler, yüksek hızlı karıştırıcılar ve çalkalayıcılar, planeter öğütücüler ve büyük çaplı geleneksel bilyeli öğütücüler gibi çeşitli öğütme ekipmanları mevcuttur.

Attritorlar, hızlı şekilde parçacık boyutunu azaltmak için kullanılan yüksek hızlı öğütücülerdir (Şekil 2.20.). Hem ıslak hem de kuru öğütme uygulamaları için geliştirilmiştir. Öğütme ortamı ve öğütülecek malzeme ile dolu sabit bir kap kullanır. Karıştırıcı, yatay kolları olan motor tahrikli bir shaft tarafından döndürülür. Bu karıştırma hareketiyle malzeme üzerinde hem kesme kuvvetleri hem de darbe kuvvetleri oluşması sağlanır. Tankın iç kısmı ısıtma veya soğutma işlemi için sıvı geçirilecek şekilde tasarlanmıştır. Öğütme enerjilerinin düşük olması nedeniyle alaşımlamanın elde edilmesi laboratuvar öğütücülerine kıyasla daha uzun sürer.

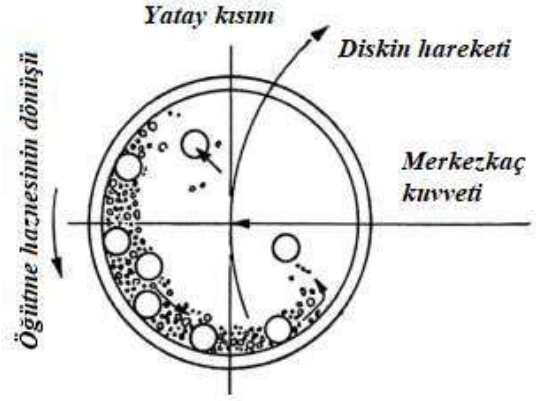


Şekil 2.20. (a) Model 1-S attritor cihazı (b) Attritor bilyeli öğütme cihazının şematik gösterimi

Planeter öğütme, bir dönüş diski ve iki veya dört hazneden oluşan bir sisteme sahiptir (Şekil 2.21.). Hazneler bir yönde dönerken döner disk ters yönde dönüş yapar. Bu öğütme sisteminin ismi güneş sistemi ve gezegenlerin şekline benzediği için planeter bilyeli öğütme olarak adlandırılmıştır. Hazneler ve disk zıt yönlerde döndükçe, merkezkaç kuvvetleri dönüşümlü olarak aynı ve zıt yönlerde hareket eder. Bu durum, öğütme bilyelerinin haznenin iç duvarından aşağı akmasına ve sürtünme etkisiyle malzemenin öğütülmesine sebep olur. Bu tip öğütücüler ile tek seferde birkaç yüz gram toz öğütülebilmektedir. Planeter bilyeli öğütücülerin diğer öğütme cihazlarına kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğu ve malzemeler üzerinde daha güçlü mekanik etki sağladığı bilinmektedir (Hadeş & Otmani, 2015). Yüksek frekansla titreşim neticesinde ortaya çıkan görece yüksek sıcaklık, nano parçacıkların hazırlanmasında topaklanma etkisi istenmeyen bir durumdur. Bu etkiyi ortadan kaldırmak amacıyla işlem kontrol kimyasalları kullanılır. Kimyasal kullanım oranı ağırlıkça %1-5 kadardır. Stearik asit, hekzan, metanol ve etanol en çok tercih edilen kimyasallardır.



(a)



(b)

Şekil 2.21. (a) Fritsch Pulverisette P-5 dört hazneli bilyeli öğütücü. (b) Bilyeli değirmen içindeki bilye hareketini gösteren şema (Suryanarayana, 2001)

Pek çok türü olan MA cihazlarında elde edilen tozlar, sistemdeki her bir parametreyle yakından ilişkilidir. Bu parametreler; öğütme tipi, öğütme haznesi, öğütme hızı, öğütme süresi, bilye- toz ağırlık oranı, öğütme ortamı, haznenin doluluk oranı gibi değerlerdir. Ayrıca başlangıçta var olan safsızlıklar, öğütme ortamından kaynaklı kontaminasyonlar, öğütme ortamı ve kontrol kimyasallarından kaynaklı kirlilikler ortaya çıkabilmektedir.

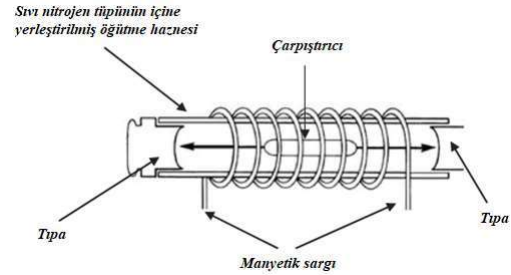
Öğütme sıcaklığı, yüksek enerjili bilyeli öğütmede çok önemli bir parametredir. Yüksek enerjili bilyeli öğütme deneylerinin çoğu oda sıcaklığında gerçekleştirilir. Öğütme sıcaklığının kasıtlı olarak değiştirildiği yalnızca birkaç araştırma rapor edilmiştir. Bu, ya sıcaklığı düşürmek için öğütme kabına sıvı nitrojen damlatılarak ya da öğütme sıcaklığını arttırmak için öğütme şişesini elektrikle ısıtarak yapılmaktadır. Bu araştırmalar, öğütme sıcaklığının katı çözünürlük seviyelerindeki değişim üzerindeki etkisini incelemek veya farklı bir sıcaklıkta amorf bir fazın mı yoksa bir nanokristal yapının mı oluştuğunu belirlemek için yapılmıştır. Öğütme ortamı- hazne arasındaki sürtünme veya toz parçacıkları arasındaki ekzotermik reaksiyon nedeniyle haznenin sıcaklığında bir artış olabileceği iyi bilinmektedir. Pratikte, hazneyi oda sıcaklığında

tutmak için arada öğütme işlemine ara verilmiştir ve herhangi bir sıcaklık artışının önemsiz olduğu varsayılır.

Alüminyum silisyum, titanyum ile yapılan alaşımlama diğerlerine göre daha sünek bir yapıya sahip olduğu için kırılabilirliği artırmak amacıyla düşük sıcaklıklarda öğütme işlemine tabi tutulur. Bu amaçla kullanılan kriyojenik öğütücüler, numuneyi ve öğütme haznesini aşırı soğutmak için sıvı nitrojen (SN) kullanır (Şekil 2.22.). En yaygın kullanılan kriyojenik öğütücü, SPEX Freezer/ Mill'dir. Bu makine, sıvı nitrojene daldırılmış hazneyi ve bilyeyi sallamak için manyetik bir bobin kullanır. Yüksek enerjili bilyeli öğütücülerin aksine, kriyojenik öğütücülerde tipik olarak öğütücü içinde yatay olarak salınan tek bir impactor denilen çarpıştırma tertibatı bulunur. Impactor, sertleştirilmiş çelik haznenin her iki ucuyla çarpıştığında, tozlar ezilir. Kriyojenik öğütücüler, yaklaşık -200°C 'lik süper soğutulmuş bir ortamda öğütme avantajına sahiptir. Bu çok düşük sıcaklık, metal malzemelerin soğuk kaynaklanmasını azaltabilir ve tane boyutunun küçültülmesi için öğütme süresini iyileştirebilir.



(a)



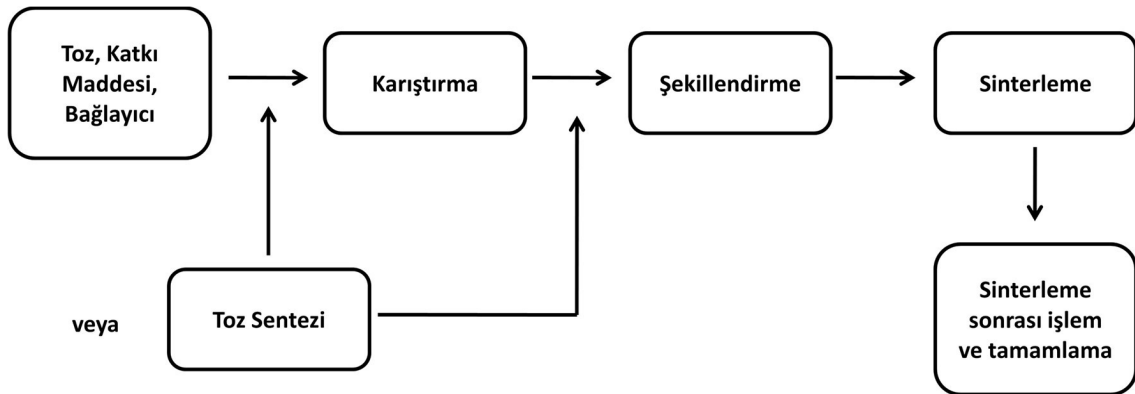
(b)

Şekil 2.22. Toz üretim işleminde yararlanılan (a) kriyojenik öğütücü ve (b) öğütme işleminin gerçekleştiği haznenin şematik gösterimi

2.12. Sinterleme

Sinterleme, ısı işlem uygulayarak metal ve/veya seramik tozlarından yoğunluk kontrollü malzeme ve bileşenler üretmek için kullanılan bir işleme tekniğidir. Bu yüzden sinterleme, malzeme bilimi ve mühendisliğinin dört temel ögesi olan performans- özellik- yapı/ bileşim- sentez/ süreç arasında sentez/ süreç içerisinde sınıflandırılır. Sinterleme birkaç bin yıldır bilinmektedir ve çanak çömlek, çini ve sağlık gereçleri üretiminde ve ince seramiklerde kullanılmıştır (Karimi-Jafari ve diğerleri, 2017). Son yıllarda malzeme geliştirmede malzeme sentezi ve işlem basamakları çok önemli hale geldiğinden, malzeme işleme teknolojisi olarak sinterlemenin önemi giderek artmaktadır (Kang, 2005).

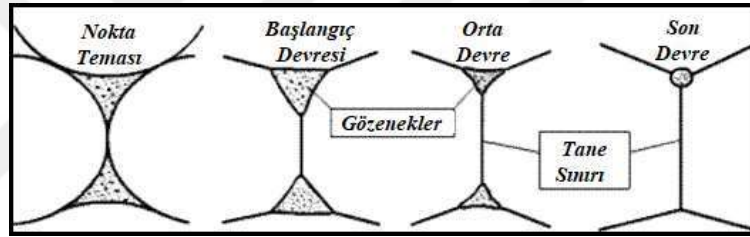
Aslında sinterleme, tarihöncesi çağlarda çanak çömleklerin pişirilmesiyle ortaya çıkan en eski tekniklerden biridir. Ancak 1940'lardan sonra sinterleme temel ve bilimsel olarak incelenmiştir. Modern çağda sinterlemenin en önemli ve faydalı kullanımlarından biri, her türlü sinterlenmiş parçanın imalatıdır. Sinterlenmiş parçaların genel üretim basamakları Şekil 2.23.'deki gibidir. Diğer işleme teknolojilerinden farklı olarak, bu tür parçaların üretimi için çeşitli işlem adımları ve değişkenlerin dikkate alınması gerekir. Örneğin, şekillendirme adımında, nihai ürün için gereken şekil ve özelliklere göre basit kalıp sıkıştırma, izostatik presleme, kayar döküm, enjeksiyon kalıplama vb. yöntemler kullanılabilir.



Şekil 2.23. Sinterlenmiş parçaların genel üretim şeması

Sinterleme süreci genel olarak katı hal sinterlemesi ve sıvı faz sinterlemesi olarak iki kısma ayrılabilir. Katıhal sinterleme tekniğinde tek fazlı parçacıkların sinterlenmesinde malzemenin erime sıcaklığının yaklaşık %80 sıcaklık değerine yakın bir sıcaklık değeri kullanılır. Sinterleme esnasında malzemesinin mikro yapısındaki değişimler, fiziksel ve mekanik özelliklerinde değişime neden olur. Bu sayede mukavemeti düşük olan sinterlenmemiş parçaya göre mukavemeti yüksek parçalar elde edilmiş olur.

Sinterleme sürecinde ilk başta tozların arasındaki temas alanı artarak var olan gözenekler küreselleşir. Tozların merkezleri arasındaki mesafe azalarak parçanın yoğunluğunda artma sağlanır. Bu süreç tozların birleşerek tanelerin büyümesi ile son bulur (Şekil 2.24.).



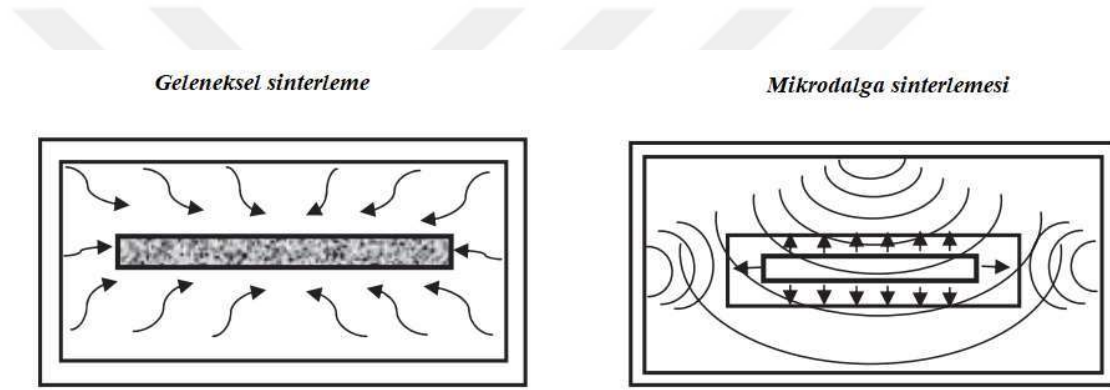
Şekil 2.24. Sinterleme esnasında nokta teması bağlarının gelişimi

Sıvı faz sinterlemesi esnasında sıvı halde bulunan faz ile katı bir faz aynı anda sinterleme sıcaklığında beraber bulunur. Sıvı faz sinterlemesinde tozlar arası bağ oluşum hızı yüksek olduğu için haliyle sinterleme süreci de kısalmaktadır. Çünkü sıvı fazın etkisiyle taneler arası çekim kuvveti artacak ve bir dış basınç olmadan yoğunluk artmaya başlayacaktır. Ayrıca katı taneler arasındaki sürtünme kuvveti sıvı fazın sağlayacağı kapiler etkiyle azalacağı için katı fazın yeniden düzenlenmesi daha hızlı olur. Bu kılcallık etki sayesinde sinterleme esnasında oluşan iç basınç, parça kalitesinde artış meydana getirmektedir.

Sinterleme yöntemleri, dış basınç olmadığı için daha ekonomik olan geleneksel (serbest veya düşük basınçlı) sinterleme ve sinterleme sırasında dış basınç kullanan basınçlı sinterleme olarak iki ana gruba ayrılabilir. Basınçlı sinterleme ile daha yüksek

yoğunluklu ve daha ince taneli mikro yapıya sahip malzeme üretebilir (Karimi-Jafari ve diğerleri, 2017).

Geleneksel yöntemlerde sinterleme proses adımları (süre ve sıcaklık) ve proses ortamı (vakum, oksijen vb.) olmak üzere iki önemli parametre vardır. Numuneleri ısıtmak için de geleneksel sinterleme ve mikrodalga destekli sinterleme olarak iki ana yöntem bulunmaktadır. Geleneksel yöntemde numuneler elektrikli fırına yerleştirilerek ısıtma elemanlarından ısı aktarılırken, mikrodalga ısıtmada numuneler mikrodalgaların absorpsiyonu nedeniyle içten ısıtılır (Şekil 2.25.).



Şekil 2.25. Geleneksel ve mikro dalga sinterlemesinin malzemedeki etkileri

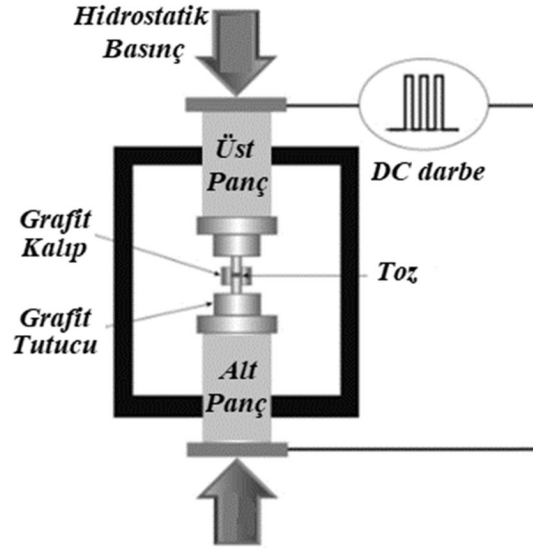
2.12.1. Spark plazma sinterleme

Sinterleme işlemini gerçekleştirmenin yöntemlerinden biri de elektrik akımının kullanılmasıdır. Bu yaklaşımın son zamanlarda yaygın olarak kullanılması, ticari olarak üretilmiş cihazların kullanılıyor olması olsa da kökeni çok daha eskidir. 1933'lü yıllarda yayınlanan patentler, tozların veya metallerin sinterlenmesine yardımcı olmak için bir elektrik deşarjının veya akımının kullanıldığını göstermektedir. 1950'lerde RPI'de Lenel tarafından, 1960 ve 1970'lerde Kaliforniya'da Lockheed Füze ve Uzay Şirketi'nde ve Inoue- Japonya'daki bilim adamları tarafından yapılan çalışmalarda bu yöntem “spark sinterleme” olarak adlandırılmıştır (Munir ve diğerleri, 2006).

Spark Plasma Sinterleme (SPS), son zamanlarda toz metalurjisi (TM) alanında öncü olan basınç destekli, darbeli bir elektrik akımı etkisiyle Joule ısıtımali sinterleme yöntemidir. SPS ayrıca alan aktiviteli/ destekli sinterleme (FAST, field activated/assisted sintering), elektrik deşarj sıkıştırma/ pekleştirme (EDC, electric discharge compaction/consolidation), darbeli elektrik akımı sinterleme (PECS, pulsed electric current sintering), plazma basınç sıkıştırma (P^2C , plasma pressure compaction), darbeli elektrik deşarj işlemi (PEDP, pulse electric discharge process), plazma aktiviteli sinterleme (PAS, plasma activated sintering), elektrik alan sinterleme, plazma basıncı konsolidasyonu, darbe akımlı basınçlı sinterleme (PCPS, pulse current pressure sintering) ve darbe akımlı sıcak presleme (PCHP, pulsed current hot pressing) olarak da bilinir (Paraskevas ve diğeri, 2014).

Basınsız sinterleme, sıcak presleme ve sıcak izostatik presleme gibi birçok geleneksel sinterleme tekniğı ile kıyaslandığı zaman hızlı ısıtma oranı, kısa sinterleme süresi, düşük sinterleme sıcaklığı ve tane büyümesinde azalma gibi bazı ayırt edici özellikler SPS'i öne çıkarmaktadır (Anselmi-Tamburini, 2021). SPS konsolidasyonu sırasındaki güç tüketimi, basınçsız sinterleme, sıcak presleme ve sıcak izostatik presleme dâhil olmak üzere geleneksel tekniklerin yaklaşık üçte biri ile beşte biri arasındadır.

SPS sistemlerinin genel işleyişi, sıcak presleme ile benzerdir. Basitleştirilmiş bir şema, Şekil 2.26.'daki gibidir. Numune bir kalıba yerleştirilir. Genellikle kalıba toz yerleştirildiği için sinterlenecek malzemenin ön şekillendirilmesi gerekmez. Kalıp, doğrudan içinden yüksek yoğunluklu/ düşük voltajlı bir elektrik akımı geçirilerek ısıtılır. Bir hidrolik sistem tarafından tek eksenli bir basınç uygulanır. Bu pistonlar ayrıca elektrot görevi görerek, kalıptan ve numuneden akması gereken yüksek yoğunluklu akımı besler. Hidrolik pistonlar, kalıptan kaynaklanan ısıdan korunmaları için su soğutmalıdır. Sinterleme işlemi sırasında basıncı sabit tutmak için bir geri beslemeli PID sistemi tarafından kontrol edilir. SPS sistemlerinin en belirgin özelliğı darbeli elektrik akımının kullanılmasıdır.



Şekil 2.26. Spark plazma sinterlemesinin şematik gösterimi

Tipik olarak düşük voltajlı (<10 V) ve yüksek yoğunluklu akımlar (1 ile 50 kA arası) kullanılır. İlk SPS sistemlerinde, akım her zaman DC darbeleri idi ve önceden tanımlanmış değerlerde sabit süreli (yaklaşık 3 ms) darbeler uygulanıyordu. Daha yeni makineler, darbelerin süresini, aralarındaki gecikme süresini, toplam darbe sayısını ve darbelerin açık ve kapalı sayısını tanımlamaya izin verecek şekilde daha fazla esneklik sunar. Bazı durumlarda DC veya bazı durumlarda ise AC kullanılabilir (Anselmi-Tamburini, 2021).

Sıcaklık kontrolü, gereken maksimum sıcaklığa bağlı olarak genellikle bir termokupl veya bir pirometre kullanılarak gerçekleştirilir. Termokupl genellikle, kalıp gövdesinin yan duvarında açılan küçük bir deliğe yerleştirilir. Pirometre kullanılması durumunda, daha büyük bir delik (birkaç mm çapında) kullanılır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

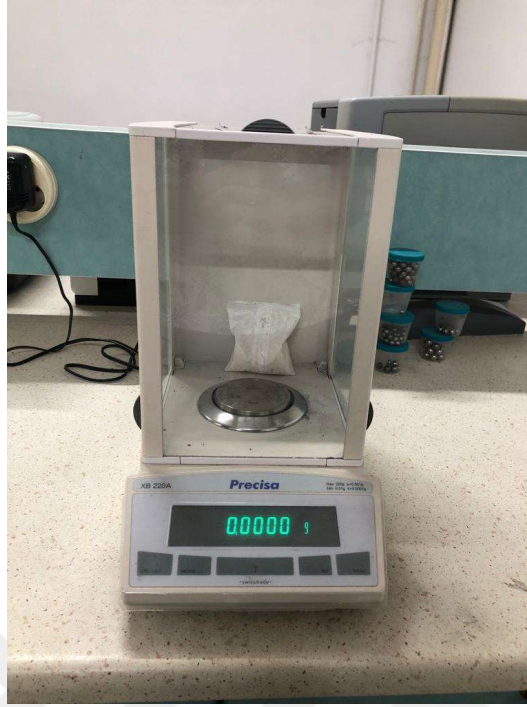
Çalışmanın bu safhasında tez bünyesinde malzeme üretimi için gerçekleştirilen işlem basamakları aşama aşama olarak;

- Çalışılacak malzemelerin külçe formunda üretimi,
- Üretimi yapılan numunelerin kesme cihazıyla kesilip eriyik eğirme cihazında şeritlerin üretimi,
- Elde edilen şeritlerin kesilerek bir kısmının spark plazma sinterleme yapılması,
- Kesilen şeritlerin kalan kısmının kriyojenik öğütme ile toz hale getirilmesi,
- Tozların soğuk presle pelet hale getirilmesi,

şekilde sıralanabilir. Şimdi üretim süreçlerinin ayrıntılı olarak incelemesi, devamında da analizlerin sonucunda elde edilen bulguların değerlendirilmesi yapılacaktır.

3.1. Numunelerin Üretimi

Tez çalışmasında kullanılacak olan ötektik altı Al-6Si-0.3Cu-0.3X (Be, Sc, Sb, Ti) alaşımlarının üretimi için yüksek saflıktaki Al ağ.%99.9, Si ağ.%98.4, Cu ağ.%99.9, Be ağ.%99.5, Sc ağ.%99.9, Sb ağ.%99.8 ve Ti ağ.%99.95 elementleri kullanılmıştır. Elementleri tartmak amacıyla Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen- Edebiyat Fakültesi İleri Katıhal Laboratuvarı'nda bulunan Şekil 3.1.'deki Precisa marka XB 220A model hassas terazi kullanıldı. Major ve minör elementlerin ağırlıkça yüzde değerleri Tablo 3.1.'deki gibi seçilmiştir. Daha sade bir gösterim amacıyla külçeler için K, şerit numuneler için Ş, toz numuneler için T, SPS numuneler için S, soğuk pres numuneler için P harfi ve alt indiste ana alaşım için base, diğerleri için katkılanan elementin kendi sembolü kullanılacaktır (Tablo 3.2.).



Şekil 3.1. Numunelerin tartıldığı 1/10000 hassaslıktaki Precisa marka XB 200A model terazi (TOGÜ FEF İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarı)

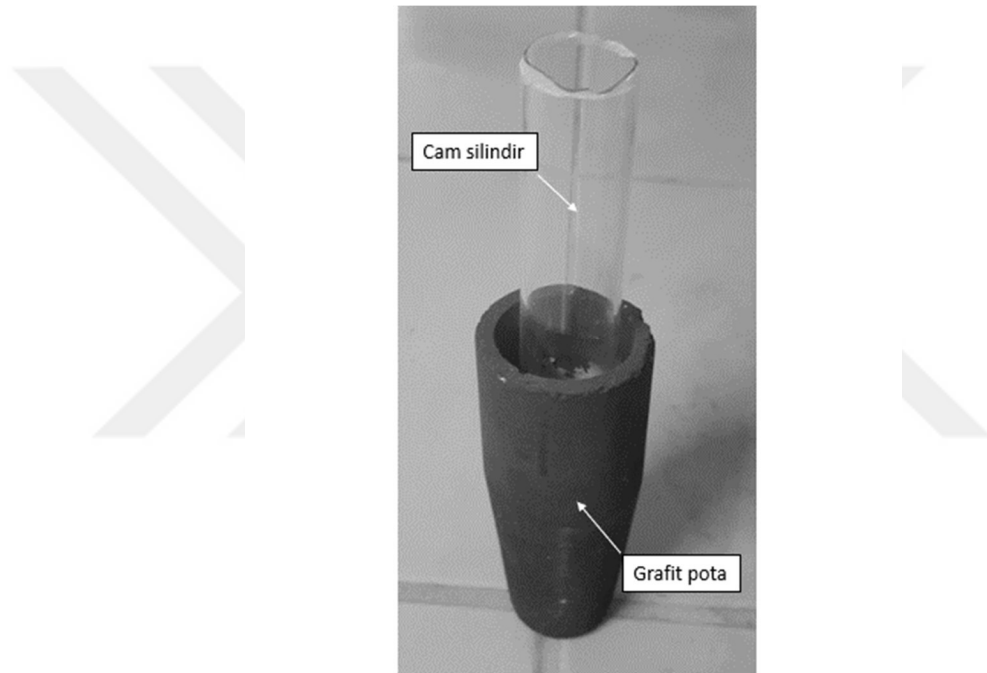
Tablo 3.1. Alaşımı yapılan elementlerin ağırlıkça % değerleri

Alaşım	Be (ağ. %)	Cu (ağ. %)	Sb (ağ. %)	Sc (ağ. %)	Si (ağ. %)	Ti (ağ. %)	Al (ağ. %)
Al6Si0.3Cu	-	0.3	-	-	6	-	Bal.
Al6Si0.3Cu0.3Be	0.3	0.3	-	-	6	-	Bal.
Al6Si0.3Cu0.3Sb	-	0.3	0.3	-	6	-	Bal.
Al6Si0.3Cu0.3Sc	-	0.3	-	0.3	6	-	Bal.
Al6Si0.3Cu0.3Ti	-	0.3	-	-	6	0.3	Bal.

Tablo 3.1.'de verilen ağırlıkça yüzde karışım oranına göre elementler hassas terazide tartıldı. Belirlenen Al-6Si-0.3Cu baz alaşımı ve baz+ modifiye edici elementler farklı bir yöntem kullanılarak grafit potaya yerleştirildi. Bu yöntemde pota olarak yüksek sıcaklığa dayanıklı olan grafit pota kullanıldı. Elementler potaya yerleştirilirken daha homojen bir yapı elde edebilmek için Şekil 3.2.'deki gibi grafit potanın dikey eksenine paralel olacak şekilde orta kısmına iki ucu açık cam boru yerleştirildi.

Tablo 3.2 Kullanılan malzemelerin üretim yöntemine göre sınıflandırılması

	Külçe	Şerit	Toz	SPS	Soğuk Pres
Al6Si0.3Cu	K _{Base}	Ş _{Base}	T _{Base}	S _{Base}	P _{Base}
Al6Si0.3Cu0.3Be	K _{Be}	Ş _{Be}	T _{Be}	S _{Be}	P _{Be}
Al6Si0.3Cu0.3Sb	K _{Sb}	Ş _{Sb}	T _{Sb}	S _{Sb}	P _{Sb}
Al6Si0.3Cu0.3Sc	K _{Sc}	Ş _{Sc}	T _{Sc}	S _{Sc}	P _{Sc}
Al6Si0.3Cu0.3Ti	K _{Ti}	Ş _{Ti}	T _{Ti}	S _{Ti}	P _{Ti}

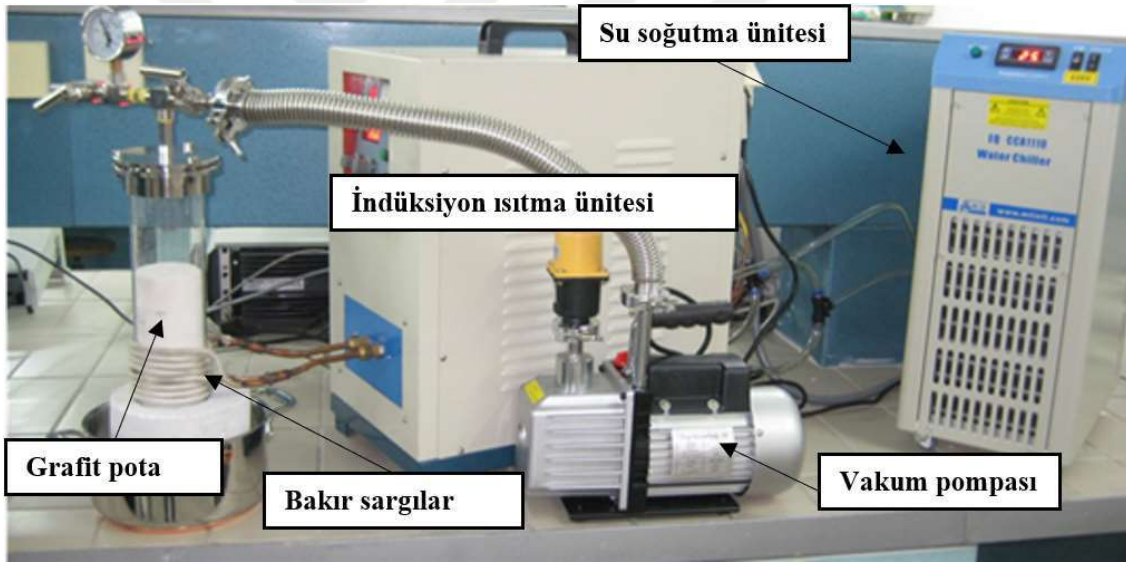


Şekil 3.2. Külçe malzeme üretimi için kullanılan grafit pota ve içerisine yerleştirilen cam boru

Önce grafit potanın dip kısmına ve pota ile cam boru arasına granül halindeki alüminyum tanecikleri yerleştirildi. Daha sonra elde edilecek alaşımın cinsine göre diğer elementler 6Si-0.3Cu/ +0.3Be/ +0.3Sc/ +0.3Sb/ +0.3Ti cam silindirin içine yerleştirilerek bu işlemten sonra cam boru yavaşça grafit potadan çekildi. Grafit pota ve içerisine yerleştirilen elementler, Şekil 3.3.'deki indüksiyon fırınında sargı bobinlerinin arasındaki hazneye yerleştirildi. Kuvars cam içerisindeki bu hazne, numunelerin

oksidasyona ve/veya kontaminasyona maruz kalmaması için vakum pompası yardımıyla hazne atmosferi vakum yapıldıktan sonra ısıtma işlemine geçildi.

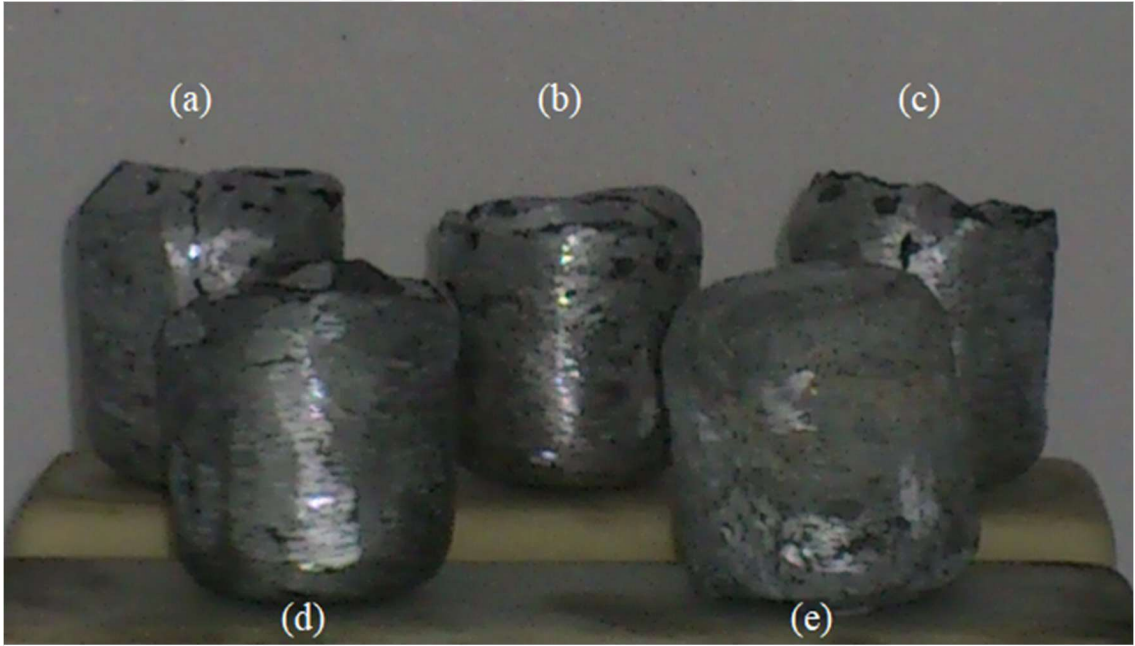
Isıtma işlemi sırasında potanın sıcaklık değeri dışardan pirometre yardımıyla ölçüldü. Pota içerisindeki sıcaklık değeri yaklaşık olarak 900°C civarına çıkarılıp bir süre beklendikten sonra indüksiyon fırınının frekansı kademeli olarak azaltılarak kapatılıp pota hazneden çıkartıldı. Çıkarılan pota soğuduktan sonra ters çevrilerek oluşan alaşımın potadan ayrılması sağlandı. Katılaştıran numunelerin grafit potadan çıkarıldıktan sonra üzerinde grafit pota kalıntıları olduğu gözlemlendi. Bu grafit kalıntıları Şekil 3.4.'de verilen taşlama cihazı ile alındı. İşlem sonrasında kalıntıları temizlenen külçelerin durumları Şekil 3.5.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. İndüksiyonla eritme cihazı, su soğutma sistemi, vakum pompası. (TOGÜ FEF İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarı)



Şekil 3.4. Taşlama makinesi (TOGÜ FEF İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarı)



Şekil 3.5. Grafit potadan çıkarılıp taşlama cihazında grafit kalıntıları temizlenen alaşımlar. (a) K_{Base} , (b) K_{Be} , (c) K_{Sb} , (d) K_{Sc} , (e) K_{Ti}

Şekil 3.5.'deki külçeler daha sonra Şekil 3.6.'da gösterilen Metkon marka MicraCut-200 model mikro kesme cihazı yardımıyla dikey eksen boyuncası kesilerek iki parçaya ayrılması sağlandı (Şekil 3.7.).



Şekil 3.6. Metkon marka Micracut 200 kesme cihazı (TOGÜ FEF İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarı)



Şekil 3.7. Metkon marka Micracut 200 kesme cihazında iki parçaya ayrılan külçe örnekler

Elde edilen alaşımların yapısal homojenliğini sağlamak maksadıyla parçalardan biri sabit tutularak diğeri yatay ekseninde 180 derece döndürölüp bu şekilde grafit potaya tekrar yerleştirildi. Pota indüksiyon fırınına yerleştirilip vakum alındıktan sonra yine yaklaşık 900 °C sıcaklığına kadar çıkılıp bir süre beklendikten sonra indüksiyon fırınının frekansı kademeli olarak azaltılıp kapatıldı. Daha sonra fırından alınan pota soğumaya bırakıldı.

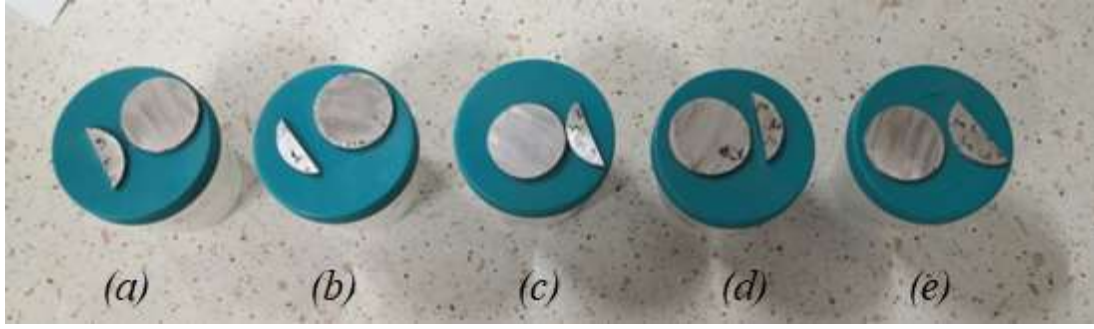
Soğuyan potadan çıkarılan alaşım üzerine bulaşan grafit parçaları tekrar taşlama cihazında temizlenerek numuneden uzaklaştırıldı. Bu süreç tüm alaşımlar için tekrarlanarak alaşımlar külçe halinde elde edildi. Daha sonra elde edilen alaşımların tümü içerisindeki gözenekli yapıyı azaltmak/ gidermek ve tam homojenlik sağlamak için tavlama yapmak amacıyla kare fırına yerleştirilerek yaklaşık olarak 12 saat boyunca tavlama yapıldı (Şekil 3.8.). Fırından alınan her bir alaşım soğuk suya atılarak yaşlandırma işlemine tabi tutuldu.



Şekil 3.8. Tavlama ve Yaşlandırma işlemi için fırına yerleştirilen alaşımlar

3.2. Külçe Numunelerin Kalıplanması

Şekil 3.6.'daki kesme cihazına yerleştirilen alaşımlardan ince diskler alındı (Şekil 3.9.).

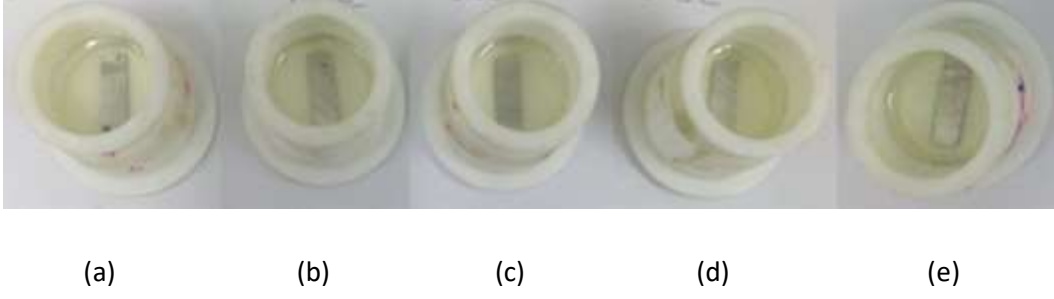


Şekil 3.9. Külçe alaşımlardan kesme cihazıyla kesilen parçalar. (a) K_{Base} , (b) K_{Be} , (c) K_{sb} , (d) K_{Sc} , (e) K_{Ti}

Bu disklerden alınan parçalar XRD analizi için kalıplama işlemine alınırken kalan kısımlar ise eriyik eğirme cihazından şerit elde etmek için ayrıldı. Kalıplama için alınan parçalar çift taraflı yapıştırıcı bant yardımıyla kalıpların dip kısmına yapıştırıldı. Sonra kalıplama işlemi yapmak için Şekil 3.10.'daki Struers marka 15 birim EpoFix Resin kullanıldı. EpoFix'in hızlı katılaşmasını sağlamak maksadıyla içerisine yine aynı firmanın ürünü olan 2 birim EpoFix Hardener ile karıştırılarak elde edilen karışım kalıpların üzerine döküldü. Şekil 3.11.'de kalıplanan numuneler gösterilmektedir. Kalıpların tam olarak sertleşmesi için yaklaşık olarak 24 saat beklendi.



Şekil 3.10. Kalıplama işlemi için kullanılan EpoFix Resin, EpoFix Hardener, Silikon Kalıp ve kalıplanmış numune



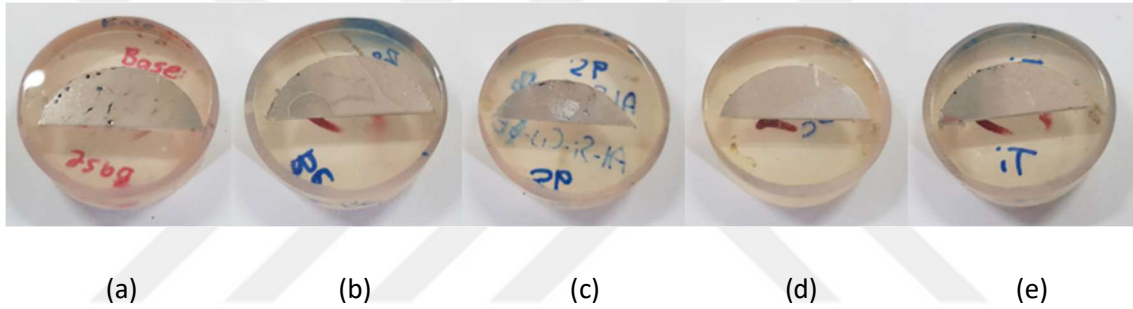
Şekil 3.11. Kalıplama işlemine alınan alaşımlar (a) K_{Base} , (b) K_{Be} , (c) K_{Sb} , (d) K_{Sc} , (e) K_{Ti}

Kalıplanan numunelerin sertleşme işlemi bittikten sonra 3 cm çapında ve yaklaşık 9 mm kalınlığında elde edilen tabletler kalıptan çıkarılarak yüzeylerinin pürüzsüzleştirilmesi amacıyla Şekil 3.12'deki Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarında bulunan Metkon Marka Gripo-2V parlatma cihazı kullanıldı.



Şekil 3.12. Metkon marka Gripo-2V Parlatma cihazı (TOGÜ FEF İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarı)

Zımparaların ısınmasını önlemek amacıyla toz alümina süspansiyon yapılarak önce 800 meshlik kalın sonra 1400 meshlik ince zımparalar ile zımparalanarak devir hızı 230 devir/dk olacak şekilde numune yüzeyleri parlatıldı. Parlatılan numune yüzeyleri her ne kadar pürüzsüz olsa da kontrast oluşturmak maksadıyla seyreltik asit çözeltisiyle dağlanması gerekmektedir. Optik mikroskop (OM) ve SEM analizlerinde tane sınırları ve mikroyapı analizleri için daha elverişli hale gelebilmesi maksadıyla numuneye uygun olan 95 ml su +5 ml HF karışımında yaklaşık olarak 10 s. dağlanarak yüzey su ile yıkandı. Bu işlemlerden sonra elde edilen numuneler Şekil 3.13.'deki görselde verilmektedir.



Şekil 3.13. Disk şeklinde kesilen külçelerin kalıplanıp parlatılmış şekli (a) K_{Base} , (b) K_{Be} , (c) K_{Sb} , (d) K_{Sc} , (e) K_{Ti}

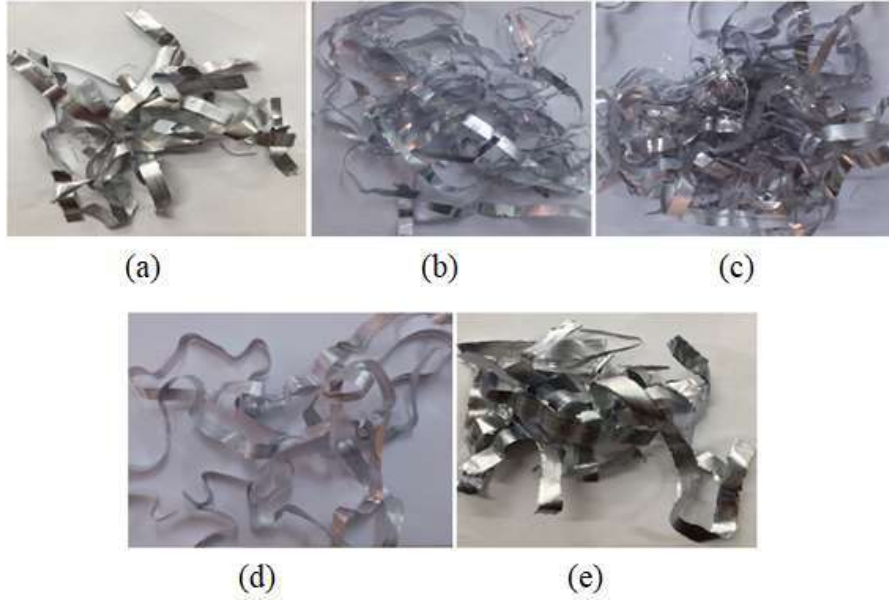
3.3. Eriyik Eğirme Yöntemiyle Şeritlerin Üretimi

Kalıplama işlemi için alınan numunelerin geri kalan parçaları Şekil 3.14.'de görülen Eriyik Eğirme (Edmund Bühler, Melt Spinner SC) cihazında kullanılacak şekilde küçük parçalar haline getirildi. Eriyik eğirme cihazının bakır disk yüzeyi parlatma macunu yardımıyla düşük devirde döndürülerek parlatıldı. Daha sonra eriyik eğirme cihazında boron nitrat potaya yerleştirilen yaklaşık 5 g'lık numuneler pota ağzı ile disk arası mesafe 0.2 mm olacak şekilde ayarlanıp kapağı kapatıldı. Yaklaşık 10^{-7} bar'lık vakum alındıktan sonra hazne etkileşimsiz atmosfer oluşturmak amacıyla hazne argon gazı ile dolduruldu. Disk yüzey hızı 20 m/s olacak şekilde döndürülürken indüksiyonla eritilen pota içerisindeki numune pota girişinden yaklaşık olarak 160 mbar'lık basınca sahip argon gazı ile disk yüzeyine püskürtüldü. Disk yüzeyine değen eriyik hızlıca katılaşarak

şeritler elde edilmesi sağlandı. Şekil 3.15.'deki gibi yaklaşık olarak 1 cm genişliğinde ve 20 µm kalınlığında şeritler elde edildi.



Şekil 3.14. Edmund Bühler Melt Spinner SC Eriyik eğirme cihazı pota ve bakır disk haznesi (TOĞÜ FEF İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarı)



Şekil 3.15. Eriyik eğirme cihazı ile üretilen şeritler (a) Ş_{Base} , (b) Ş_{Be} , (c) Ş_{Sb} , (d) Ş_{Sc} , (e) Ş_{Ti}



(a) (b) (c) (d) (e)

Şekil 3.16. Eriyik eğirme yöntemiyle elde edilen şeritlerin kalıplara alınıp yüzeyi parlatıldıktan sonraki şekli (a) Ş_{Base}, (b) Ş_{Be}, (c) Ş_{Sb}, (d) Ş_{Sc}, (e) Ş_{Ti}

Tüm alaşımlar için tekrarlanan hızlı katılaştırılmış şerit elde etme işlemi sonrasında şeritlerden alınan parçalar, analiz için kalıplama ve ardından parlatma işlemine tabi tutuldu. Elde edilen numuneler Şekil 3.16.’deki gibidir.

Şeritlerin kesitlerinin incelenmesi için kalıplama ve parlatma cihazında parlatma işlemi yapıldı (Şekil 3.17.).



(a) (b) (c) (d) (e)

Şekil 3.17. Eriyik eğirilmiş şeritlerin kesit incelemesi için kalıplara alınmış ve parlatılmış hali (a) Ş_{Base}, (b) Ş_{Be}, (c) Ş_{Sb}, (d) Ş_{Sc}, (e) Ş_{Ti}

3.4. Kriyojenik Öğütme ile Toz Üretimi

Şeritler bir kısmı spark plazma sinterleme (SPS) için diğerk kısmı da toz haline getirilmek için küçük parçalar halinde kesilerek hazırlandı. Kriyojenik öğütme cihazı olarak Şekil 3.18.’de verilen Ahi Evran Üniversitesi Metalürji ve Malzeme

Mühendisliği İleri Malzeme Araştırma Laboratuvarında bulunan Retsch marka CryoMill model cihaz kullanılmıştır. Numuneler şekil 3.19.'daki gibi toz haline getirilip soğuk presleme için uygun duruma getirildi.



şekil 3.18. Retsch marka CryoMill model kriyojenik tme cihazı (Ahi Evran Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği İleri Malzeme Araştırma Laboratuvarı)



Şekil 3.19. Kriyojenik öğütme ile üretilen toz numunesi



(a) (b) (c) (d) (e)

Şekil 3.20. Kriyojenik öğütme işleminden sonra elde edilen tozlar T_{Base} , (b) T_{Be} , (c) T_{Sb} , (d) T_{Sc} , (e) T_{Ti}

3.5. Soğuk Presleme ile Malzemelerin Üretimi

Soğuk presleme işlemi için Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarında bulunan Şekil 3.17.'deki Retsch marka PP25 model cihaz kullanılmıştır. Kriyojenik öğütme yoluyla elde edilen tozlardan 1.6 gramlık numuneler alınarak soğuk pres cihazının kalıp takımı içerisine döküldü. Kalıp kapatıldıktan sonra pres makinesinin kolu çekilerek tozlar 20 s. boyunca 20 tonluk

basınç altında bekletildi. Daha sonra pres kaldırılarak kalıp takım içerisindeki preslenmiş numuneler kalıptan çıkartıldı.

Her bir toz grubu için aynı şartlarda tekrarlanan işlem sonucunda elde edilen peletler Şekil 3.22.'de verilen Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarında bulunan Protherm marka yüksek sıcaklık fırınında argon ortamda 10 saat boyunca 560 °C sıcaklıkta sinterleme işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 3.23.). Sinterleme süreci tamamlandıktan sonra Şekil 3.6.'daki kesme cihazıyla kesilerek Şekil 3.24.'de verilen kesitler elde edilmiştir.



Şekil 3.21. Retsch PP25 soğuk pres makinesi ve kalıp takımları (TOGÜ FEF İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarı)



Şekil 3.22. Protherm marka yüksek sıcaklık fırını (TOGÜ FEF İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarı)



(a) (b) (c) (d) (e)

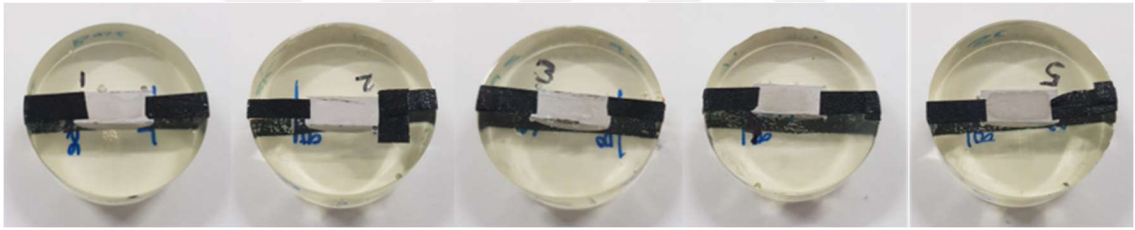
Şekil 3.23. Sinterleme sonrası elde edilen numunelerin görüntüleri (a) P_{Base} , (b) P_{Be} , (c) P_{Sb} , (d) P_{Sc} , (e) P_{Ti}



(a) (b) (c) (d) (e)

Şekil 3.24. Soğuk pres yöntemiyle üretilen peletlerin kesit görüntüleri (a) P_{Base} , (b) P_{Be} , (c) P_{Sb} , (d) P_{Sc} , (e) P_{Ti}

Şekil 3.24.'de kesitleri verilen numuneler, kalıplanıp parlatma cihazında parlatma işlemine alınmıştır. Numunelerin son hali Şekil 3.25.'deki görselde verilmiştir.



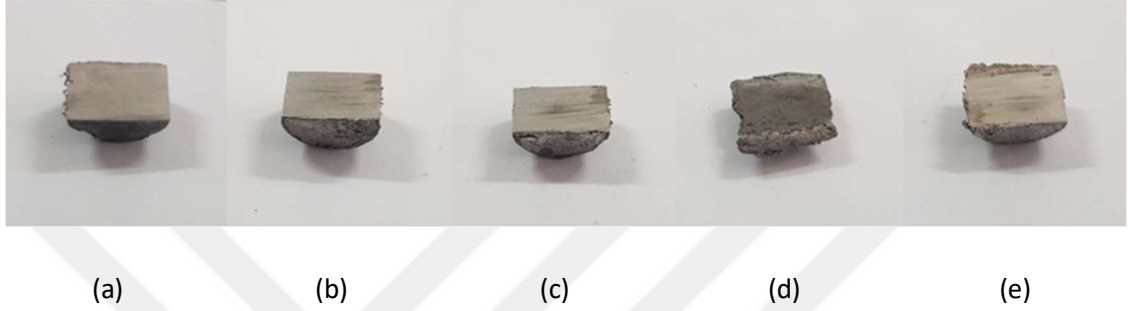
(a) (b) (c) (d) (e)

Şekil 3.25. Soğuk pres yöntemiyle elde edilen peletlerin kalıplanmış kesit görüntüleri (a) P_{Base} , (b) P_{Be} , (c) P_{Sb} , (d) P_{Sc} , (e) P_{Ti}

3.6. SPS ile Malzemelerin Üretimi

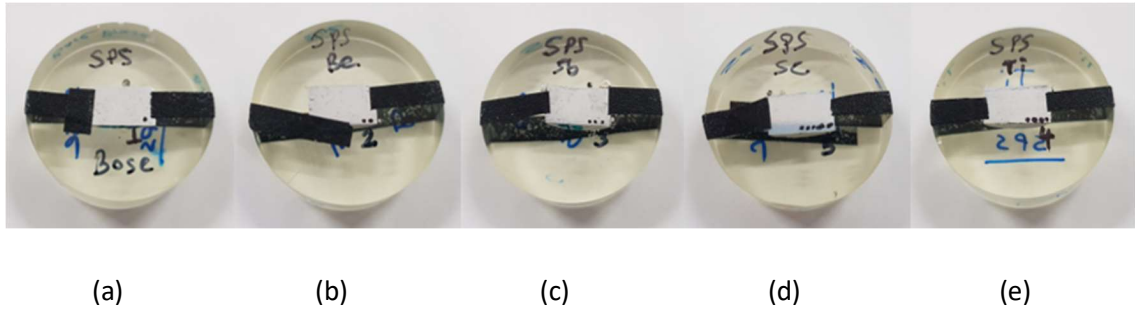
Eriyik eğerme cihazıyla üretilen şeritler, küçük parçalar halinde kıyıldıktan sonra SPS ile pelet hale getirilmek üzere hazırlandı. Hazırlanan numuneler, İstanbul Gaziosmanpaşa'da bulunan Hartek Mermer Ltd. Şti.'nin bünyesinde var olan Ar-Ge laboratuvarındaki SPS cihazı ile pelet forma getirildi. SPS işlemi için 1.5 gramlık numunelerin basınç değeri rampalı şekilde 300 kg/cm^2 değerine ve sıcaklık değeri ise 450°C 'ye kadar çıkarılıp 10 dakika bekletilerek hazırlanmıştır. Numunelerin soğuma işlemi basınçsız ortamda ısıtma için geçen süreyle aynı sürede yapılmıştır. Süreç

sonunda elde edilen peletler Şekil 3.22.'de verilen Protherm marka yüksek sıcaklık fırınında argon ortamda 10 saat boyunca 560°C sıcaklıkta sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Sinterleme süreci tamamlandıktan sonra Şekil 3.6.'daki kesme cihazıyla kesilerek Şekil 3.26.'de verilen kesitler elde edilmiştir.



Şekil 3.26. SPS numunelerin kesme cihazıyla kesilerek elde edilen kesitlerin görüntüleri (a) S_{Base} , (b) S_{Be} , (c) S_{Sb} , (d) S_{Sc} , (e) S_{Ti}

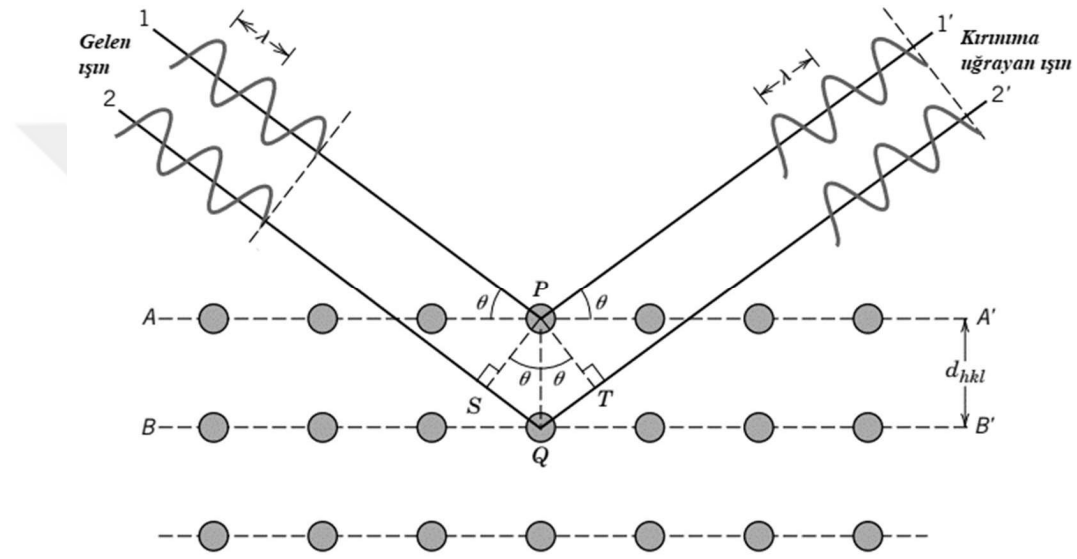
Kesitleri Şekil 3.26.'de verilen SPS numuneler, kalıplama ve parlatma işlemine alınmıştır. Bu işlem sonunda Şekil 3.27.'deki gibi analiz için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.27. Kalıplanan ve parlatılan SPS numune görüntüleri (a) S_{Base} , (b) S_{Be} , (c) S_{Sb} , (d) S_{Sc} , (e) S_{Ti}

3.7. XRD Analizleri

Tarihsel olarak, katılardaki atomik ve moleküler düzenlemelere ilişkin bilgilerimizin çoğu, x-ışını kırınım araştırmalarından elde edilmiştir. Dahası x-ışınları yeni materyallerin geliştirilmesinde hala çok önemlidir.



Şekil 3.28. Paralel düzlemler arasından x- ışınların kırınımına uğraması (Callister & Rethwisch, 2013)

Aynı h, k, l Miller indislerine sahip olacak şekilde aralarındaki mesafe d_{hkl} olan birbirine paralel düzlem olan A- A' ve B- B' dikkate alındığında (Şekil 3.28.) yapıcı girişimin olduğu durumda ışınlar arasındaki yol farkı

$$n\lambda = \overline{SQ} + \overline{QT} \quad (3.1)$$

ile verilir. Şeklin geometrisinden bu ifadenin

$$n\lambda = d_{hkl} \sin \theta + d_{hkl} \sin \theta \quad (3.2)$$

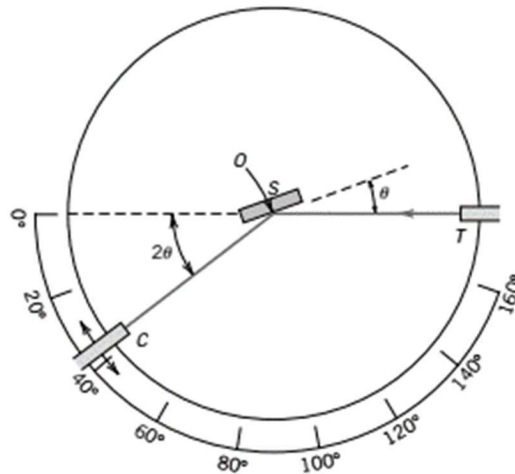
$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (3.3)$$

olduğu sonucu elde edilir. Bu ifade Bragg yasası olarak bilinir. Burada $n= 1, 2, 3, \dots$ gibi tamsayı değerleri alan yansıma derecesidir.

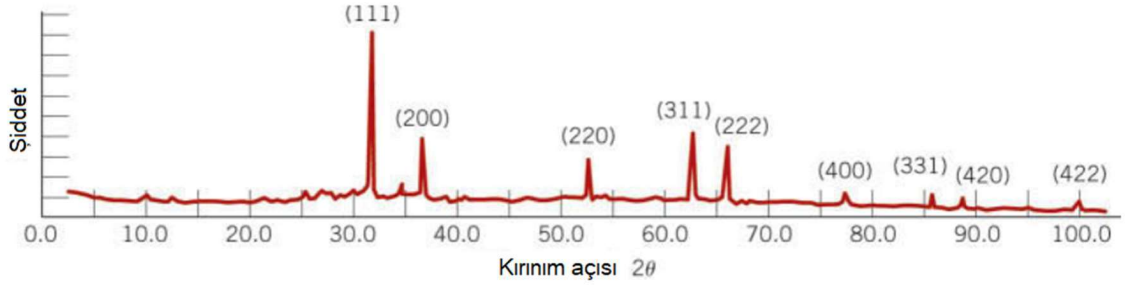
Ardışık ve paralel düzlemler arasındaki mesafe kafes parametreleri ve Miller indislerine bağlıdır. Örneğin kübik simetriye sahip kafes için paralel düzlemler arasındaki mesafe;

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (3.4)$$

ile verilir. Burada a birim hücrenin kenar uzunluğudur. Şekil 3.29.' şeması gösterilen x-ışını kırınım cihazında numune S kısma yerleştirilir. T'de bulunan x- ışını kaynağından monokromatik ışınlar numune ile etkileşir. Kırınım açısı 2θ ile kırınım şiddeti grafiği (Şekil 3.30.) elde edilir. Elde edilen grafikten de kristal yapısı, birim hücre boyutu ve geometrisi belirlenir.



Şekil 3.29. X-ışını difraktometresi şematik gösterimi. T, x-ışını kaynağı, S, numune, C, dedektör, O, numunenin ve dedektörün etrafında döndüğü eksen (Callister & Rethwisch, 2013)



Şekil 3.30. Örnek bir XRD grafiği

XRD analizleri, OM ile gözlemeyecek kadar küçük tane boyutuna sahip olan malzemelerin kristal yapı analizlerinde sıklıkla kullanılan bir tekniktir. Tez kapsamında üretilen külçe ve şerit alaşımların XRD analizleri Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde var olan ve Şekil 3.31’de görülen PANalytical Emperians markalı XRD cihazında yapılmıştır. Numunelerin analizinde kullanılan gerilim 45 kV, akım 40 mA değerinde ve dalga boyu $\lambda=0.154$ nm olan monokromatik $\text{CuK}\alpha$ radyasyonudur. Yapılan tüm analizler, oda sıcaklığında, $2\theta=10^\circ - 90^\circ$ aralığında alınmıştır.



Şekil 3.31. XRD analiz cihazı (Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi ARTMER)

3.8. XRF Analizleri

Tahribatsız bir analiz tekniği olan X-ışını Floresans (XRF) spektroskopisi, kalitatif, kantitatif ve yarı-kantitatif olmak üzere analizler yapılabilen bir tekniktir. Bir numune içerisindeki bileşenleri belirlemek için kalitatif, bileşenlerin konsantrasyonunu belirlemek için kantitatif ve hassasiyeti- doğruluğu kesin olmadan standart numune olmaksızın teorik olarak şiddet hesabı yaparak konsantrasyon belirlemek için yarı kantitatif analizler tercih edilir.

Hedef metale gönderilen yüksek enerjili elektronlar, hedef metal elektronları ile etkileşerek yavaşlar ve elektromanyetik ışıma yaparak Bremsstrahlung (frenleme) ışıması adı verilen sürekli x- ışının üretilmesine neden olur. Bir de yüksek enerjili elektronlar hedef metal elektronları ile etkileşerek yörüngedeki elektronun kopmasına sebep olur. Daha yüksek enerjili başka bir elektron bu yörüngeyi doldururken iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkı kadar foton salınmasına neden olur. Salınan bu yüksek enerjili ışınlar karakteristik x- ışını veya floresans ışıması adı verilir. İşte XRF spektroskopisinde kullanılan ışınların üretilmesi bu şekilde gerçekleşmektedir.

Uygulamada pek çok XRF spektrometresi kullanılmaktadır. Bazıları: EDXRF- enerji dağılımlı XRF spektrometresi, WDXRF- dalga boyu dağılımlı XRF spektrometresi, HDXRF- yüksek çözünürlüklü XRF spektrometresidir.

Tez çalışmasına konu olan numuneler hazırlandıktan sonra uygun boyutlarda alınarak Şekil 3.32.'de verilen Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan PANalytical marka Epsilon5 model XRF cihazı ile analizleri yapıldı. Bu cihazda sıvı azot soğutmalı germanyum dedektör kullanılmakta ve bakır hedef metalinden elde edilen x- ışını kaynağına sahiptir. 100 kV'a kadar hızlandırma voltajı altında 0.6 ila 24 amperlik akım aralığında çalışmaktadır.



Şekil 3.32. XRF analiz cihazı (Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi ARTMER)

3.9. SEM Analizleri

Taramalı elektron mikroskobu, yüksek oranda büyütme yaparak yüksek çözünürlüklü görüntü elde etme tekniği olarak mikro yapı analizlerinde sıklıkla kullanılan bir tekniktir. Yüksek voltajlarda hızlandırılan elektron demeti görüntüsü alınacak numune üzerine düşürülür. Numune yüzeyindeki elektronlarla etkileşen yüksek hızlı elektron demeti, yüzeyden elektron kopması ve X- ışını oluşmasına neden olur. Dedektör tarafından algılanan bu ışınlar, elektrik sinyaline dönüştürülerek numunenin mikro yapısal özellikleri hakkında elde etmemize olanak sağlar. Ayrıca enerji dağılımlı X-ışını (EDX) tekniğiyle elementel analiz de yapılmasını mümkün kılar. SEM analizleriyle düşükten yükseğe kadar çok geniş skalada büyütmelere kadar numunenin morfolojik, yapısal ve elementel bilgilerine ulaşmak mümkündür.

Vakum ortamında da kullanılan yaygın olan SEM cihazları, ikincil elektron (SE), geri saçılmış elektron (BSE), VCD, ESEM, STEM veya SE+BSE görüntülemesi yapılarak analiz çeşitliliği artmaktadır. İncelemesi yapılan numunelere X-ray elementel dağılım haritalaması (X-ray mapping) yapılarak kalitatif elementel analizler (SEM-EDS) yapılabilmektedir.



Şekil 3.33. SEM analiz cihazı (Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi ARTMER)

Tez çalışmasına konu olan numuneler SEM analizleri için Şekil 3.30.'da verilen Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesindeki, QUANTA 450 Field Emission Gun (FEG) SEM yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. SEM analizleri 2 ila 10 μm çözünürlükte ve 10 000x ila 50 000x büyütme gücünde görüntüler alınmıştır.

3.10. Sertlik Analizi

Mukavemet ve aşınma direnci değerlerine bağlı olan sertlik, tahribatsız oluşu ve malzemenin farklı mekanik özellikleriyle ilişkili oluşu nedeniyle sıklıkla kullanılan bir ifadedir. Malzemelerin en temel mekanik özelliklerinden biri olan sertlik (hardness), katı ve sertliği belirlenecek malzemeye göre daha sert standart bir uç üzerine uygulanacak yüke karşı malzemenin gösterdiği direnç olarak tanımlanır (Kalpakjian & Schmid, 2010), (Callister & Rethwisch, 2013). Standart ucun malzeme üzerindeki girme derinliğinin (penetration) kıyaslandığı izafi bir ölçüm olan sertlik, sürtünmeye, çizilmeye, kesmeye ve plastik şekil değişikliğine karşı gösterilen direnç olarak da ifade edilir. Genel olarak sertlik değeri matematiksel olarak (3.5) bağıntısı ile ifade edilebilir.

$$H = \frac{P}{S} \quad (3.5)$$

Burada P, maksimum yük ve S oluşan izin izdüşüm yüzey alanıdır.

Malzemelerin sertlik derecelerini belirlemek için geliştirilen birçok yöntem mevcuttur. Genellik olarak sertlik, statik sertlik yöntemleri (Brinell, Rockwell, Vickers, Knopp gibi) ve dinamik sertlik yöntemleri (Poldi çekici, Shore skolerskobu gibi) olarak iki gruba ayrılır.

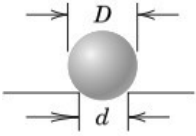
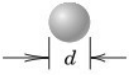
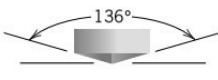
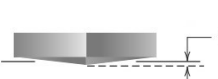
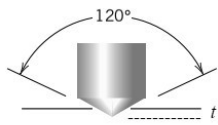
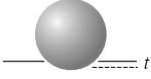
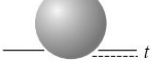
Tez kapsamında yapılan statik sertlik analizleri Şekil 3.31.'de gösterilen Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi FEF İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarında bulunan HighWood HWDM-3 marka sertlik cihazıyla yapılmıştır.



Şekil 3.34. Statik sertlik cihazı (TOGÜ FEF İleri Katıhal Fiziği Laboratuvarı)

Kullanılan sertlik cihazlarını birbirinden ayıran en önemli fark tercih edilen uç geometrileridir. Batıcı uç geometrisi küresel ise Brinell sertliği, piramit şeklinde ise Vickers sertliği, yine piramit şeklinde ise Knoop sertliği, konik veya küre şeklindeyse de Rockwell sertliği belirlemek için kullanılır. Batıcı uçların geometrik şekli ve sertlik hesabını yaparken kullanılacak ifade karşılaştırmalı olarak Tablo 3.3.'deki gibi özetlenebilir.

Tablo 3.3. Genel sertlik test teknikleri, karakteristikleri ve sertlik hesap formülleri (Kalpakjian & Schmid, 2010)

Test	Batıcı uç	Batıcı uç geometrisi		Yük	Sertlik hesabı için kullanılan formül
		Yan görünüm	Üstten görünüm		
Brinell	10 mm çaplı çelik veya tungsten karbit küre			P	$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers	Piramit			P	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop	Piramit			P	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell	Koni			60 kg 100 kg 150 kg	HRA HRC = 100- 500 t HRD
B F G	1.588 mm			100 kg 60 kg 150 kg	HRB HRF HRG = 130- 500 t
E	3.175 mm çaplı çelik küre			100 kg	HRE

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, Al- 6Si-0.3Cu- 0.3X (X= Be, Sb, Sc, Ti) alaşımı ilk olarak indüksiyon fırınında külçe olarak üretildi. Daha sonra, eriyik eğirme (melt-spinning) yöntemi ile hızlı katılaştırma yapılarak şerit formunda üretimi gerçekleştirildi. Şeritlerin bir kısmı, herhangi bir işleme tabi tutulmadan doğrudan SPS (spark plasma sintering) tekniği ile silindir şekilli peletler halinde üretildi. Şeritlerin diğer kısmı kriyojenik sıcaklıklarda bilyeli öğütme tekniği kullanılarak toz formuna getirilmesi sağlandı. Elde edilen tozların soğuk preslenmesi ve daha sonra sinterlenmesi ile silindir şekilli peletler elde edildi. Böylelikle çalışma kapsamında, hem katkı elementlerinin Al- 6Si- 0.3Cu alaşımına etkisi hem de farklı üretim yöntemlerinin, mekanik, mikroyapı ve kristal yapı gibi fiziksel özellikler açısından karşılaştırılması amaçlanmıştır.

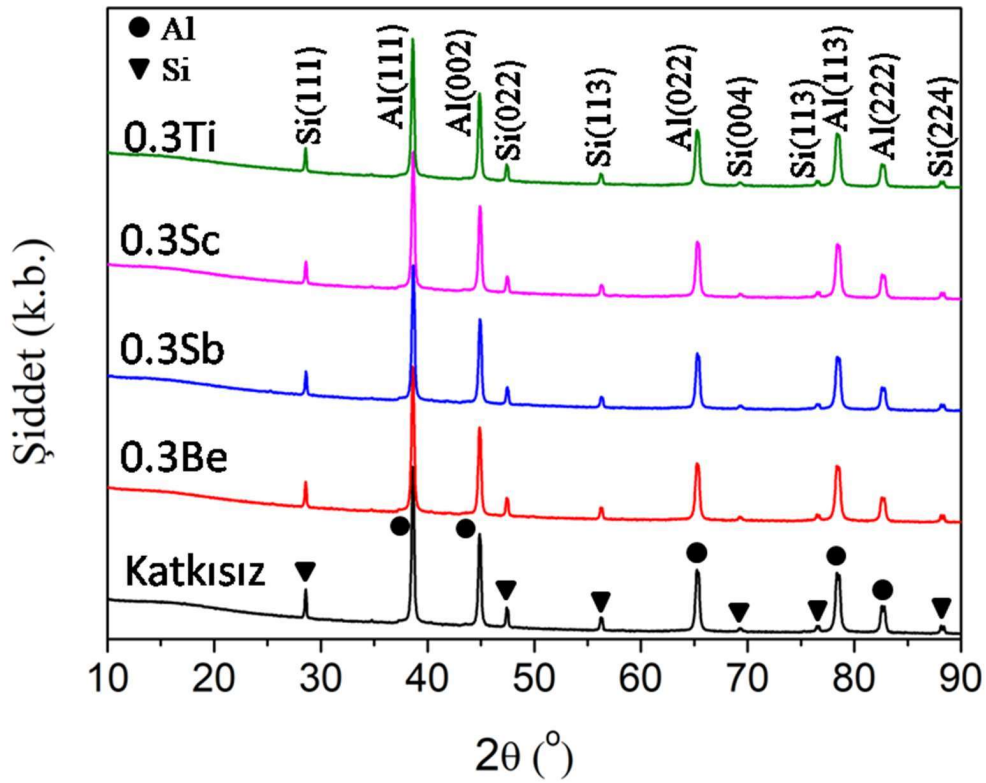
Tablo 4.1’de indüksiyon fırınında külçe formunda üretilen alaşımların XRF sonuçları listelenmektedir. Alaşımların Al- ağı. %6Si- ağı. %0.3Cu- ağı. %0.3X bileşimine sahip olması amaçlanmıştır. Tablo 4.1’de Be ve Sb katkılı alaşımların katkı oranlarının, amaçlanandan bir miktar düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca “Diğer” olarak belirtilen safsızlık elementlerinin, alaşım içerisindeki miktarlarının kabul edilebilir değerlerde olduğu görülmektedir. Bu türlü safsızlıklar, başlangıç elementlerinin yapısında bulunmaktadır. Öte yandan Tablo 4.1’den görüldüğü üzere alaşımların istenilen bileşimlere oldukça yakın olduğu görülmektedir.

Tablo 4.1. İndüksiyon fırınında külçe olarak üretilen alaşımların XRF yöntemi ile belirlenen bileşim değerleri

	Al (ağı.%)	Si(ağı.%)	Cu(ağı.%)	Be(ağı.%)	Sb(ağı.%)	Sc(ağı.%)	Ti(ağı.%)	Diğer
Al6Si0.3Cu	93.359	6.040	0.382	-	-	-	-	0.219
Al6Si0.3Cu0.3Be	93.564	5.885	0.332	0.217	-	-	-	0.152
Al6Si0.3Cu0.3Sb	93.445	5.061	0.305	-	0.210	-	-	0.979
Al6Si0.3Cu0.3Sc	93.050	5.935	0.282	-	-	0.364	-	0.369
Al6Si0.3Cu0.3Ti	93.007	6.017	0.341	-	-	-	0.382	0.253

4.1. X-Işını Kırınımı Analizleri

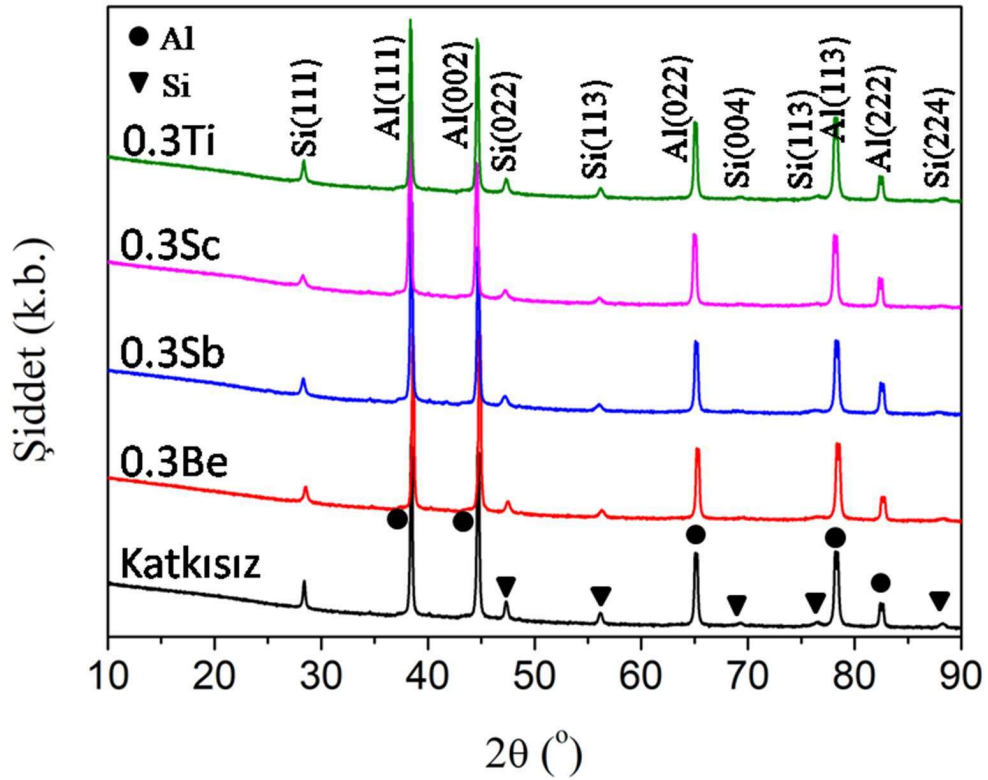
Şekil 4.1.'den Şekil 4.5.'e kadar verilen grafiklerde alaşımların X-ışını kırınım (XRD) desenleri verilmektedir. Şekil 4.1'de indüksiyon fırınında üretilen külçe alaşımlara ait XRD desenleri verilmektedir. Alaşımların tamamında, $2\theta = 10^\circ - 90^\circ$ aralığında Al (Referans numarası: 98-005-3775, Ek-1) ve Si'ye (Referans numarası: 98-004-3610, Ek-2) ait mümkün olan tüm kırınım pikleri gözlemlendi. Bunun dışında herhangi bir safsızlık pikine rastlanmadı. Ayrıca, Cu ve diğer katkı elementlerine ait (Be, Sb, Sc ve Ti) herhangi bir intermetalik faza ait pik gözlenmemiştir. Bu durum söz konusu elementlerin, Al ana matrisi içinde çözünmesi ile açıklanmaktadır.



Şekil 4.1. İndüksiyon ergitme ile üretilen külçe alaşımlara ait XRD desenleri

Şekil 4.2'de eriyik eğirme yöntem ile üretilen alaşımlara ait XRD desenleri verilmektedir. Al ve Si'ye ait tüm kırınım pikleri gözlemlendi. Bunun dışında herhangi bir

safsızlık fazına rastlanmadı. Külçe alaşımlardan farklı olarak, özellikle Si piklerinde belirgin bir genişleme gözlenmektedir. Kırınım piklerinde genişlemenin ölçüsü FWHM (full width at half maximum, yarı maksimumdaki tam genişlik) ile değerlendirilmektedir. Silisyumun $2\theta = 47^\circ$ 'deki (022) fazına ait FWHM değerleri hesaplandı (HighScore Plus programı) ve Tablo 4.2'de listelendi. Buna göre, eriyik eğirme ile üretilen şerit alaşımların FWHM değerlerinin, belirgin olarak külçe alaşımlarından büyük olduğu görülmektedir. Kırınım piklerindeki genişleme, kristal yapıdan nano-kristal yapıya geçiş olarak yorumlanmaktadır. Bir başka ifadeyle, şerit alaşımlarda soğuma hızının artmasıyla birlikte, kristal yapıda uzun mesafe düzeninden kısa mesafe düzenine doğru bir geçiş gözlenmektedir.



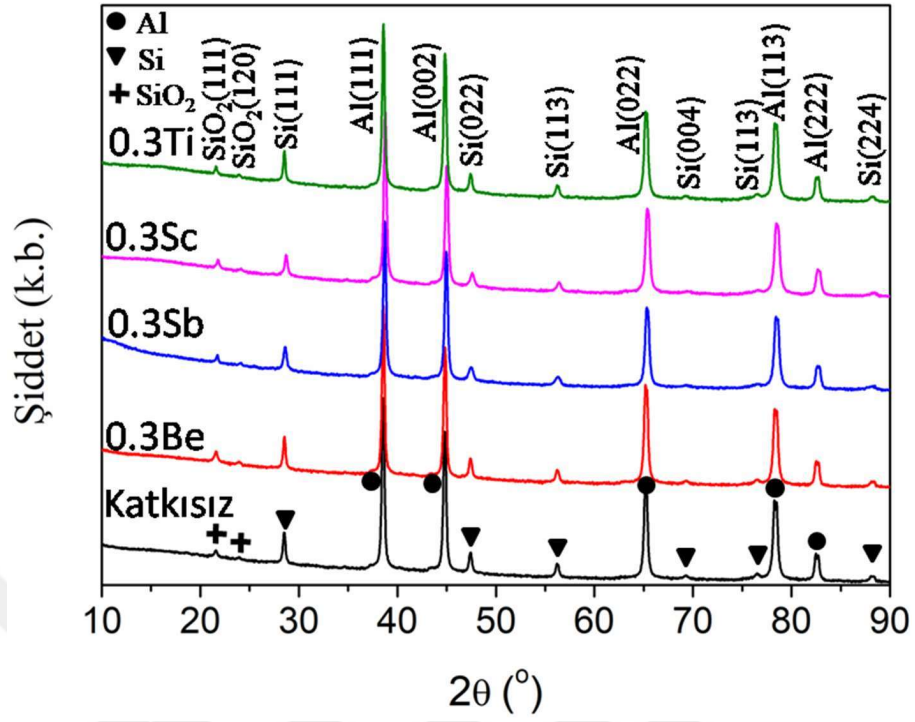
Şekil 4.2. Eriyik eğirme yöntemi ile üretilen alaşımların XRD desenleri

Tablo 4.2. Farklı tekniklerle üretimi yapılan alaşımlarda, Si (022) pikine ait FWHM değerleri

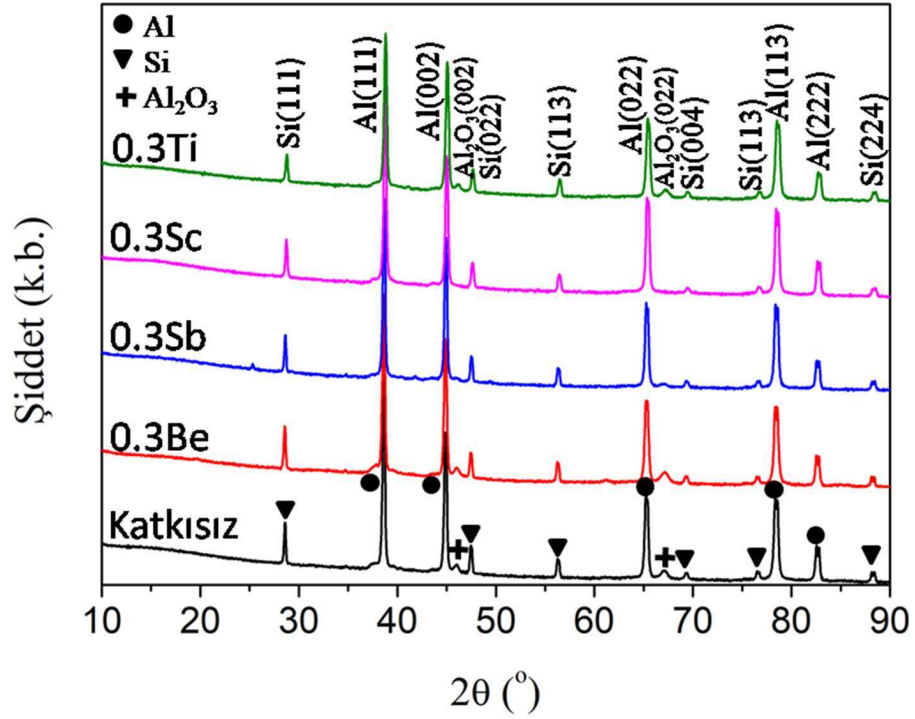
Alaşım	Külçe alaşım	Şerit alaşım	Kriyojenik öğütme	Sinterleme
Al-6Si-0.3Cu	0,1023	0,3432	0,2303	0,1535
Al-6Si-0.3Cu-0.3Be	0,1023	0,3432	0,2814	0,2303
Al-6Si-0.3Cu-0.3Sb	0,1279	0,5616	0,4093	0,1535
Al-6Si-0.3Cu-0.3Sc	0,1535	0,3744	0,2447	0,2303
Al-6Si-0.3Cu-0.3Ti	0,1279	0,2496	0,2247	0,2158

Şekil 4.3'te kriyojenik bilyeli öğütme tekniği ile toz formuna getirilen şerit alaşımların XRD desenleri verilmektedir. Al ve Si piklerinin yanında, SiO_2 safsızlık fazları görülmektedir (Referans numarası: 98-016-2660, Ek-3). Bu fazların, öğütme esnasında silisyumun oksitlenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, öğütme sonrası Si (022) pikine ait FWHM değerlerinde bir miktar azalma görülmektedir. Bu durum, öğütme esnasında oluşan yüksek miktarda mekanik enerjinin, tane büyümesine sebep olması ile açıklanabilir ve literatürle uyum içindedir.

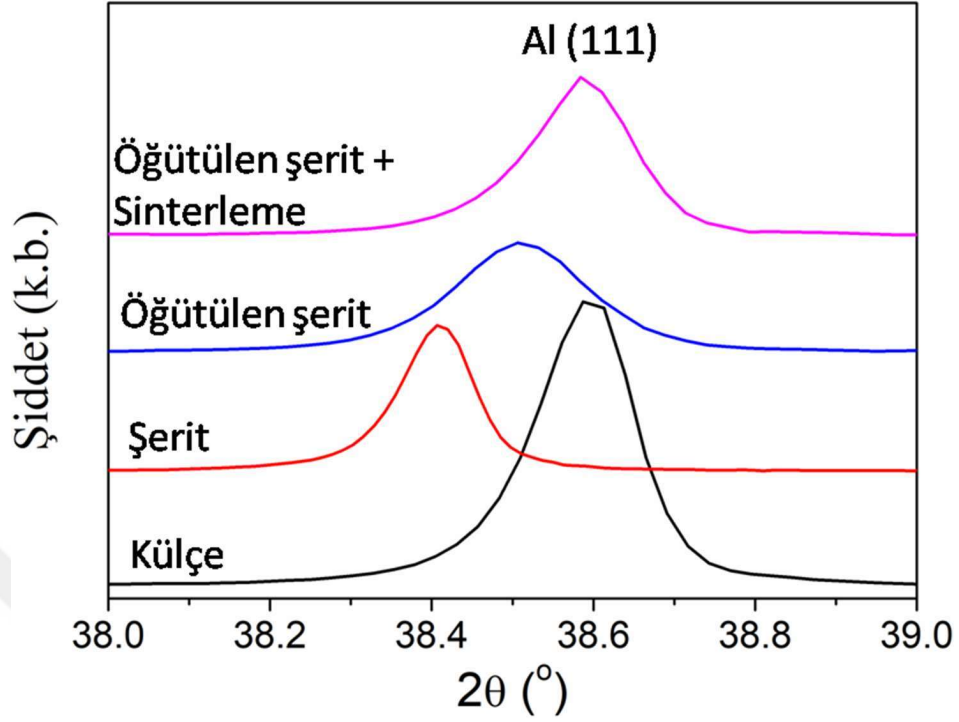
Şekil 4.4'te 560 °C'de 10 saat boyunca ısıtılma tabi tutulan tozların XRD desenleri verilmektedir. Isıl işlem sonrası SiO_2 fazlarının kaybolduğu görülmektedir. Öte yandan az miktarda Al_2O_3 safsızlık fazının oluştuğu saptandı (Referans numarası: 98-009-9783, Ek-4). Söz konusu safsızlıklar, ısıtılma esnasında alaşımı oluşturan elementlerin oksijen ile reaksiyona girmesinden kaynaklanmaktadır. Si (022) pikine ait FWHM değerinin daha da azaldığı görülmektedir (Tablo 4.2). Isıl işlem esnasında, alaşıma verilen ısı enerjisi atomların mobilitesini artırarak, atomların daha az enerjili duruma geçmesini kolaylaştırır ve alaşımlarda tane büyümesi gerçekleşir. Öte yandan, ısıtılma tabi tutulan alaşımlarının külçe alaşımlara nazaran FWHM değerlerinin büyük olması, alaşımların hali hazırda hızlı katılaştırma ile kazanılan kristal yapısını bir miktar koruduğunu göstermektedir. Bu durum, sonraki bölümde alaşımların mikroyapı incelemesiyle ayrıntılı olarak tartışılacaktır.



Şekil 4.3. Kriyojenik bilyeli öğütme ile toz formuna getirilen şerit alaşımların XRD desenleri



Şekil 4.4. 560 °C’de sinterlenen tozların XRD desenleri



Şekil 4.5. Farklı yöntemlerle üretilen alaşımların Al (111) fazına ait XRD pikleri

Şekil 4.5’te, katkısız alaşımların Al (111) fazına ait XRD pikleri verilmektedir. En düşük katılaşma hızlarında üretilen külçe alaşımının Al (111) pikinin kırınım açısı yaklaşık olarak $2\theta = 38,59^\circ$ olarak belirlendi. Eriyik eğirme yöntemi ile üretilen şerit alaşım pik açısının belirgin bir şekilde sola kaydığı görülmektedir ($2\theta = 38,41^\circ$). Bragg yasası;

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (4.1)$$

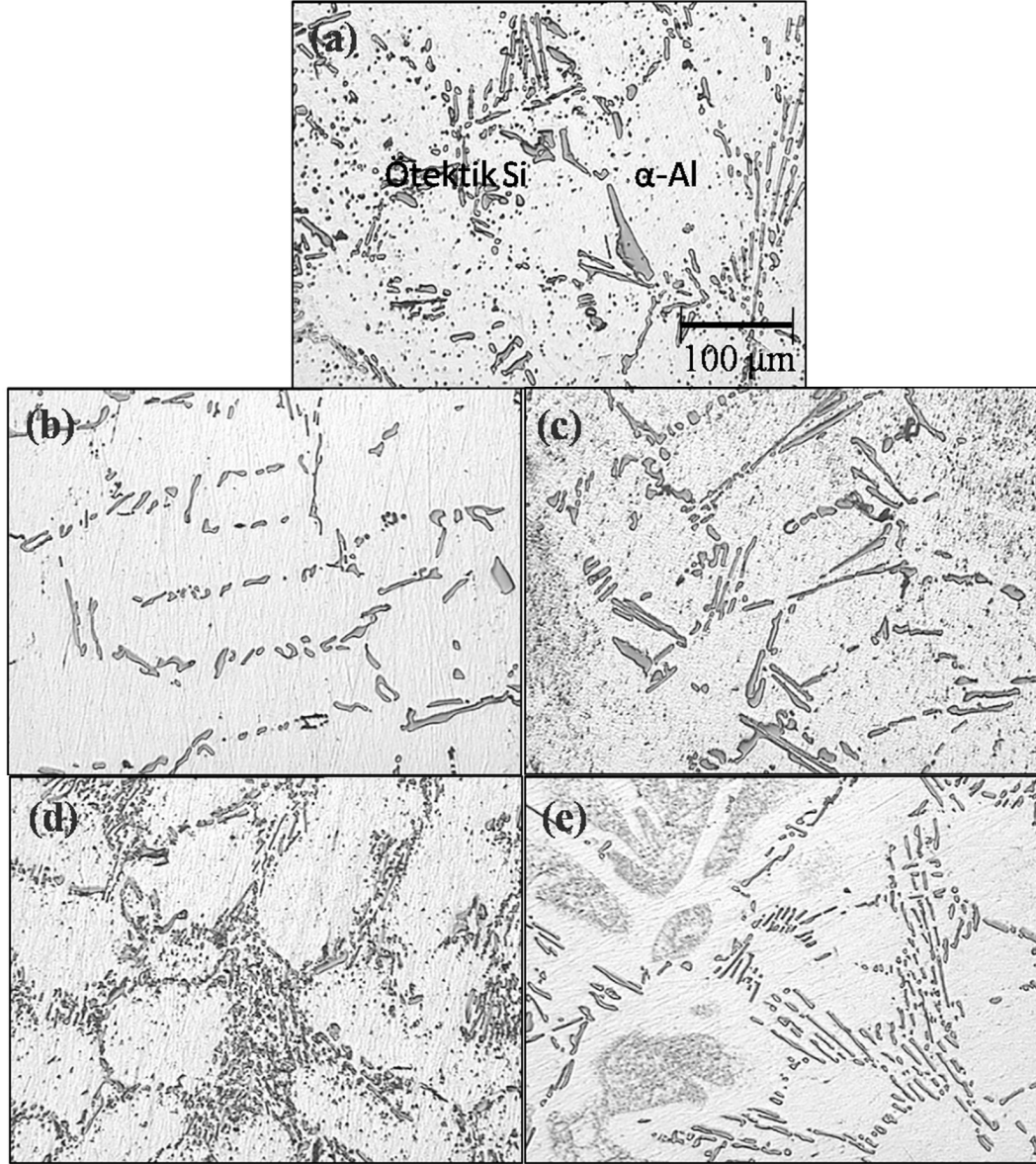
olarak verilmektedir. Burada n , kırınımın derecesi; λ , x-ışınının dalga boyu; d düzlemler arası mesafe ve θ kırınım açısıdır. $n=1$ için $\sin\theta = \lambda/2d$ olmaktadır. Deneyde kullanılan x-ışınının dalga boyu, λ , sabittir. Bu nedenle θ açısının azalması, düzlemler arası d mesafesinin artmasıyla açıklanabilir. Soğuma hızının artması, alaşımlarda katı çözünürlük sınırlarının artması sağlamaktadır. Soğuma hızının artması ikincil fazların (Si), ana matris içerisinde (Al) arayer atomu olarak yerleşmesini artırmaktadır. Bu durum ise Al’nin kristal örgüsünün genişlemesine ve kırınım açısının düşük açılara kaymasına sebep olmaktadır. Bilyeli öğütme ile toz formuna getirilen alaşıma ait Al

(111) pikinin sağa doğru kaydığı görülmektedir ($2\theta = 38,51^\circ$). Bu durum, öğütme esnasında, bilyeler arası çarpışmalarla meydana gelen mekanik enerjinin etkisiyle birlikte, Al matrisi içerisinde çözünen Si atomlarının çökmesiyle açıklanabilir. Böylece, Al matrisinde meydana gelen gerinim (strain) azalarak, düzlemler arası mesafe daha da azalmıştır ve 2 θ kırınım açısının tekrar sağa doğru kayması gerçekleşmiştir. Isıl işlem uygulanan (sinterleme) tozlarda, Al (111) kırınım açısının, sağa doğru kayarak, külçe alaşıminkiyle aynı değeri aldığı görülmektedir ($2\theta = 38,59^\circ$). Sinterleme esnasında, alaşıma verilen ısı enerjisi, Si atomlarının tamamıyla çökmesini sağlamıştır. Böylece Al piki sağa doğru kaymasına sebep olmuştur.

4.2. Optik Mikroskop Görüntüleri

Alaşımların genel mikroyapı görüntülerini birlikte değerlendirebilmek için aynı büyütmede (100x büyütme) optik mikroskop görüntüleri alındı. Şekil 4.6'da indüksiyon fırınında külçe olarak üretilen alaşımların optik fotoğrafları verilmektedir. Alaşımların tamamında ötektik Si ve α -Al fazları belirgin olarak görülmektedir. Diğer katkı elementleri, optik fotoğraflarda tespit edilememiştir. Yavaş soğuma hızlarında, ötektik altı Al- Si alaşımlarında mikroyapı gelişimi iki aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşamada, birincil α -Al dentritleri $\sim 620^\circ\text{C}$ 'de katılaşmaya başlar. Bu reaksiyon ötektik sıcaklık olan 577°C 'ye kadar devam eder. 577°C 'de ise ötektik katılaşma başlar ve ötektik Si parçacıkları Al matrisi içerisinde oluşur.

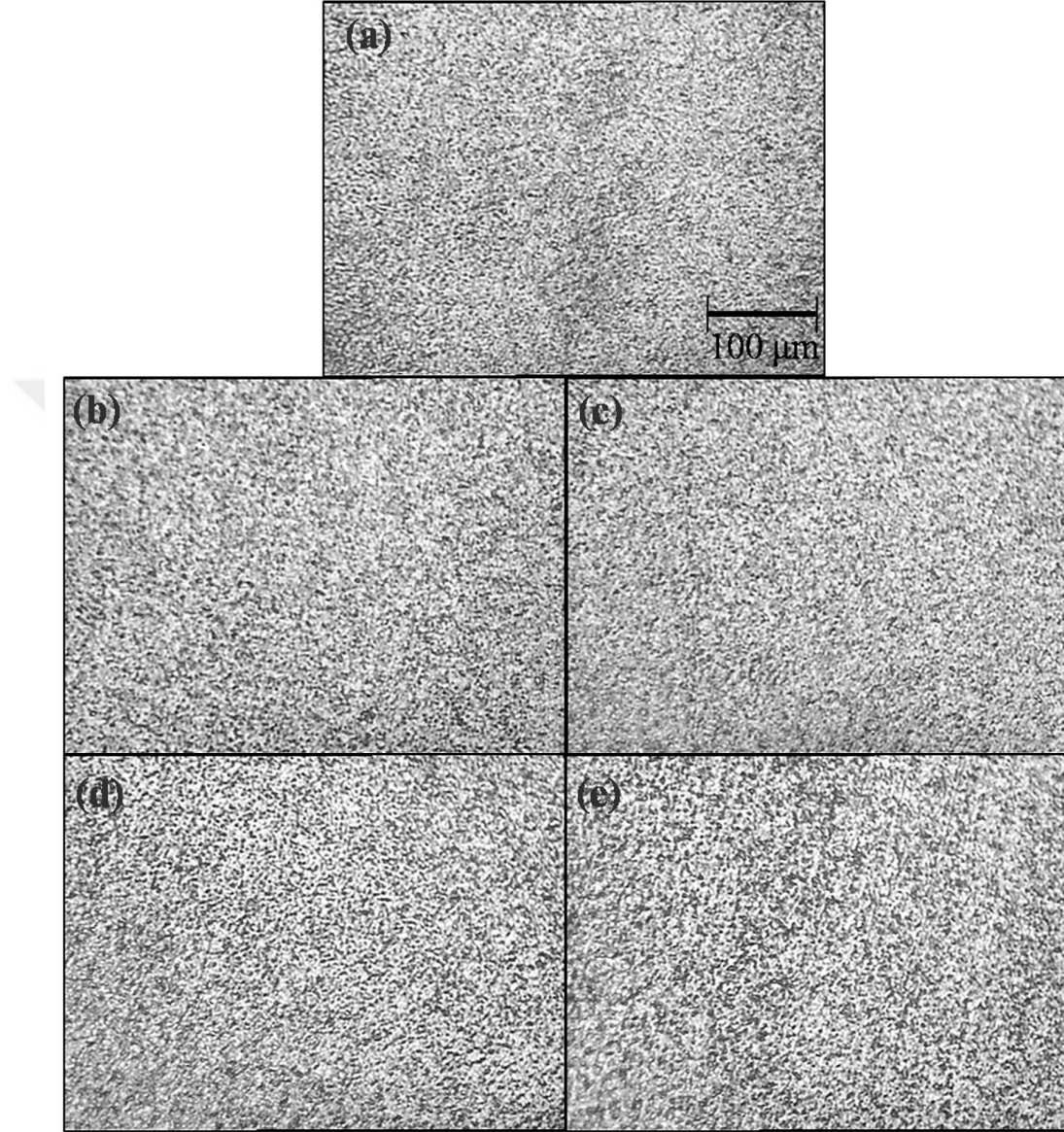
Şekil 4.6 incelendiğinde, katkısız alaşımda ötektik Si'lerin kaba plakamsı yapıda olduğu görülmektedir. Element ilavesinin ötektik Si'lerin tane boyutunu önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Bunların arasında, özellikle Be ve Sc ilaveli alaşımlarda tane boyutunun belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Buna karşın Ti ilaveli alaşımda ötektik Si fazı lamelli yapıya dönüşmüştür. Optik mikroskobu görüntülerinden, Si fazının morfolojisi hakkında yorum yapmak güçtür. Bu nedenle daha ayrıntılı incelemeler SEM görüntüleri ile yapılacaktır.



Şekil 4.6. İndüksiyon fırınında üretilen külçe alaşımların optik mikroskop ile elde edilen fotoğrafları (a) Katkısız Al-6Si-0.3Cu ve katkılı alaşımlar (b) 0.3Be, (c) 0.3Sb, (d) 0.3Sc, (e) 0.3Ti

Şekil 4.7’de eriyik eğirme yöntemi ile üretilen şerit alaşımların optik mikroskop görüntüleri verilmektedir. Alaşımların tamamının homojen ve ince taneli ötektik Si ve α -Al’den oluştuğu görülmektedir. Külçe alaşımlara kıyasla, mikroyapıdaki incelmenin oldukça fazla olması aşırı soğuma ile açıklanmaktadır. Bilindiği üzere eriyik eğirme yönteminde katılaşma hızı 10^6 K/s civarındadır. Bu soğuma hızlarında, alaşımlar,

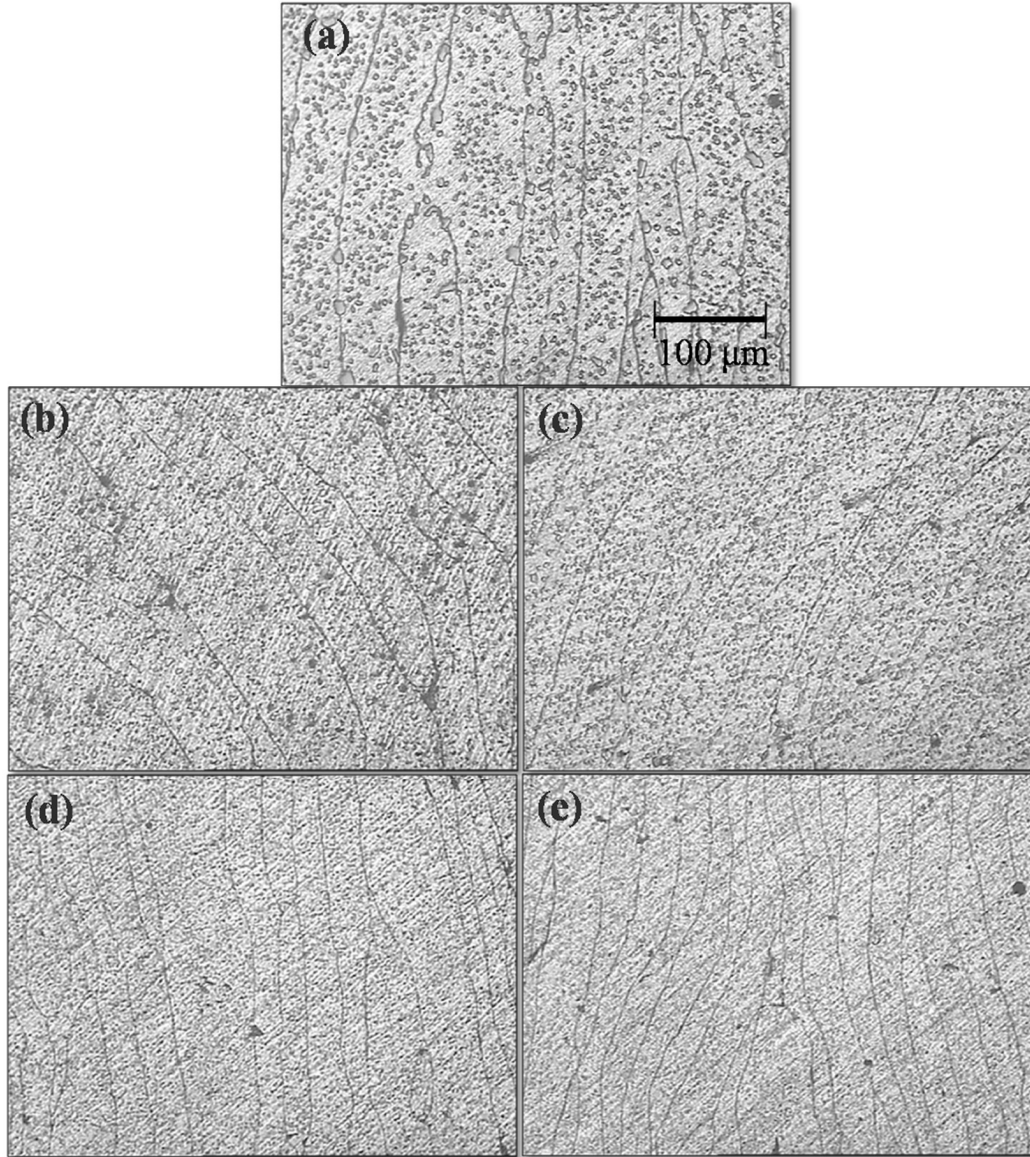
kristallenemedi aniden donarlar. Bu durumda ise amorf ya da nanokristal yapılı bir mikroyapının oluşumu gerçekleşir.



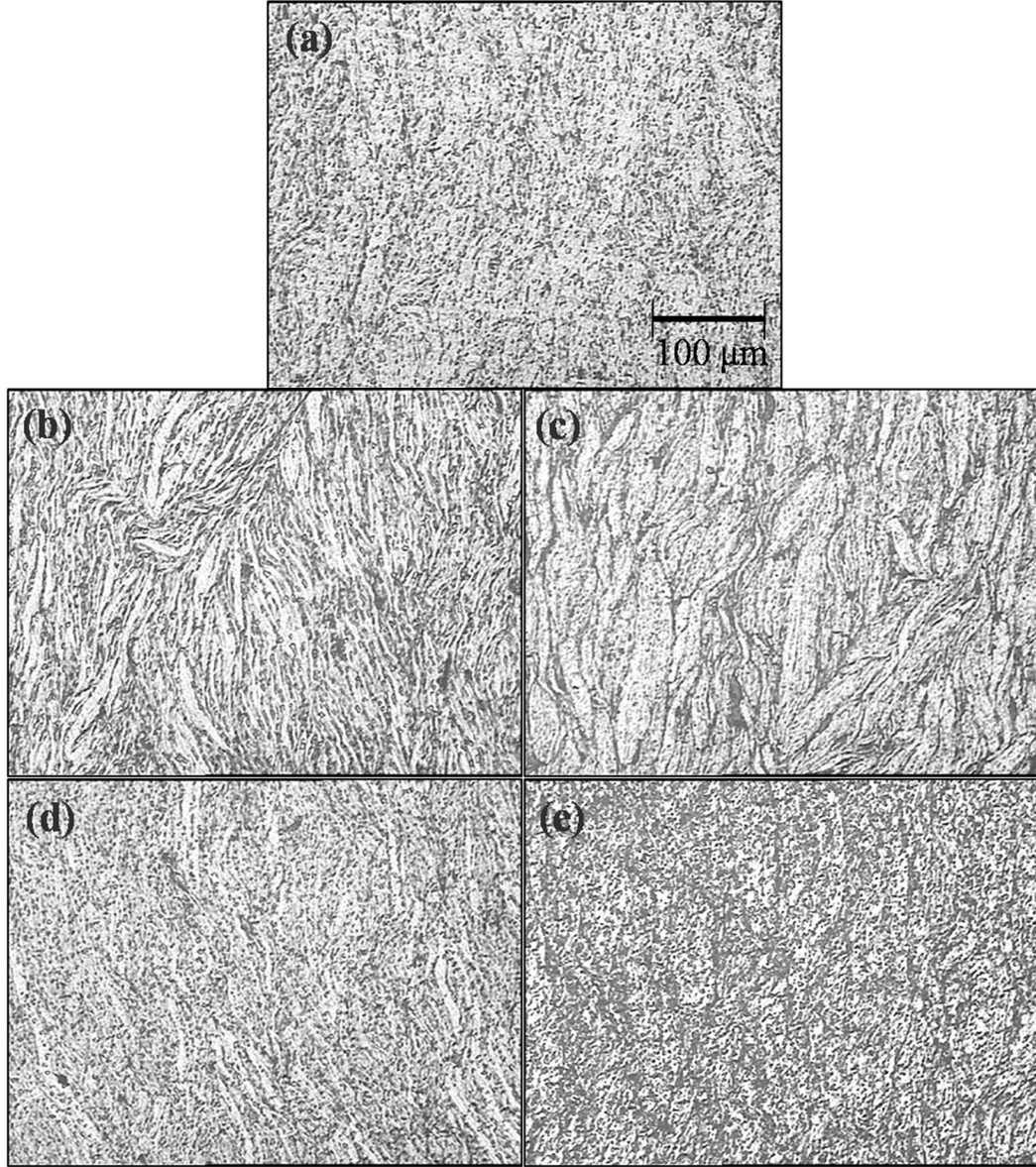
şekil 4.7. Eriyik eğirme yöntemi ile üretilen şerit alaşımların optik mikroskop fotoğrafları

şekil 4.8’de SPS ile külçe formuna getirilen şeritlerin optik mikroskop görüntüleri verilmektedir. Alaşımlar, Kesim 3.6’da anlatıldığı üzere önce SPS ile 450 C’de 10 dk bekletildi daha sonra pekleşmenin tam olarak gerçekleşmesi için 560 C’de 10 saat ısıtılma maruz bırakıldı. Bu nedenle, şerit alaşımlarda görülen ince Si fazlarının SPS

alaşımlarda kabalaştığı görülmektedir. Bu durum, hızlı katılaştırılmış alaşımlara ısıtıl işlem uygulandığında, aşırı doymuş Al-matrisindeki Si'ların çökmesi ve daha sonra birleşip kabalaşmasıyla açıklanmaktadır. Ayrıca şeritlerin birleşme yüzeyleri, mikroyapı fotoğraflarından ayırt edilebilmektedir. Si fazlarının daha çok bu birleşme bölgelerinde kabalaştığı görülmektedir.



Şekil 4.8. SPS yöntemi ile külçe olarak üretilen şerit alaşımların optik mikroskop fotoğrafları



Şekil 4.9. Bilyeli öğütme + soğuk pres ile külçe olarak üretilen şerit alaşımların optik mikroskop fotoğrafları

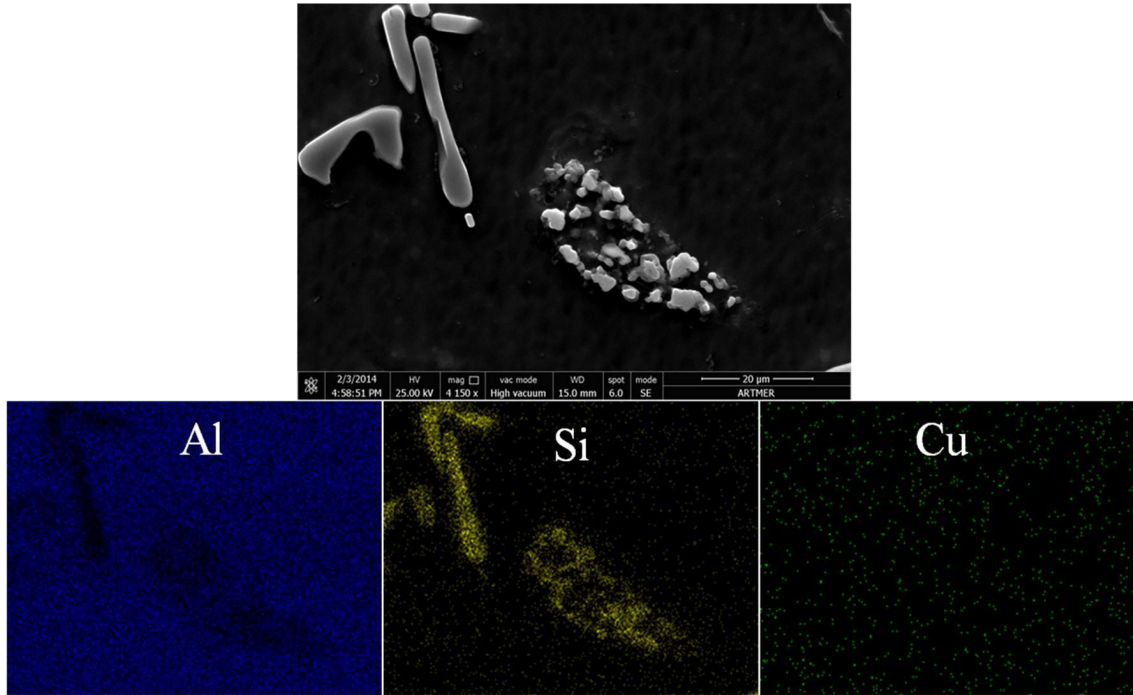
Şekil 4.9’da kriyojenik öğütme ile toz formuna getirilen ve daha sonra soğuk presleme ile külçe formuna getirilen alaşımların mikroyapı fotoğrafları verilmektedir. Bu alaşımlarda, 560 °C’de ısıtılma maruz bırakılarak pekleşmesi sağlanmıştır. Soğuk preslenen alaşımlarda, SPS alaşımların aksine şeritlerin yapısı tam olarak görülememektedir. Bu durum, öğütme esnasında şeritlerin büyük oranda toz formuna getirilmesi ile açıklanabilir. Öte yandan, alaşımların belirgin bir lamelli mikroyapıya

sahip olduğu gör÷lmektedir. Si fazlarının morfolojisi ve boyutların optik fotoğraflardan tam olarak gör÷lemez. Ayrıntılı inceleme SEM görüntülerinde yapılacaktır.

4.3. SEM ve EDX- Haritalama Görüntüleri

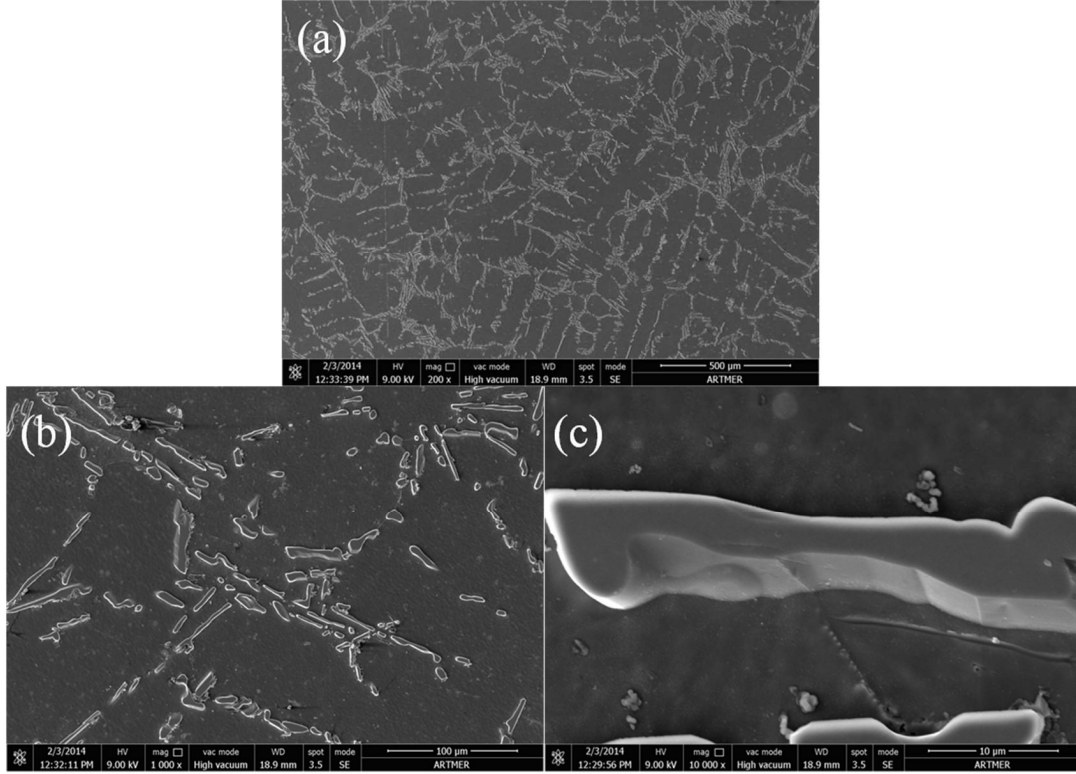
Farklı yöntemlere üretilen alaşımların, elementel analizi, mikroyapı gelişimini ve Si morfolojisini daha iyi değerlendirebilmek için yüksek büyütmelerde SEM ve EDX-haritalama analizleri yapıldı.

Şekil 4.10'de katkısız külçe alaşımının EDX- haritalama görüntüsü verilmektedir. Mikroyapının Al ve ötektik Si olmak üzere iki fazlı bir yapıdan oluştuğu gör÷lmektedir. Cu elementinin denge durumunda Al içindeki çözünürlüğü Al- Cu faz diyagramına göre ağı. %0.6 civarındadır. Cu elementi, Al-matrisi içinde tamamen çöz÷ldüğünden mikroyapıda tespit edilemedi.



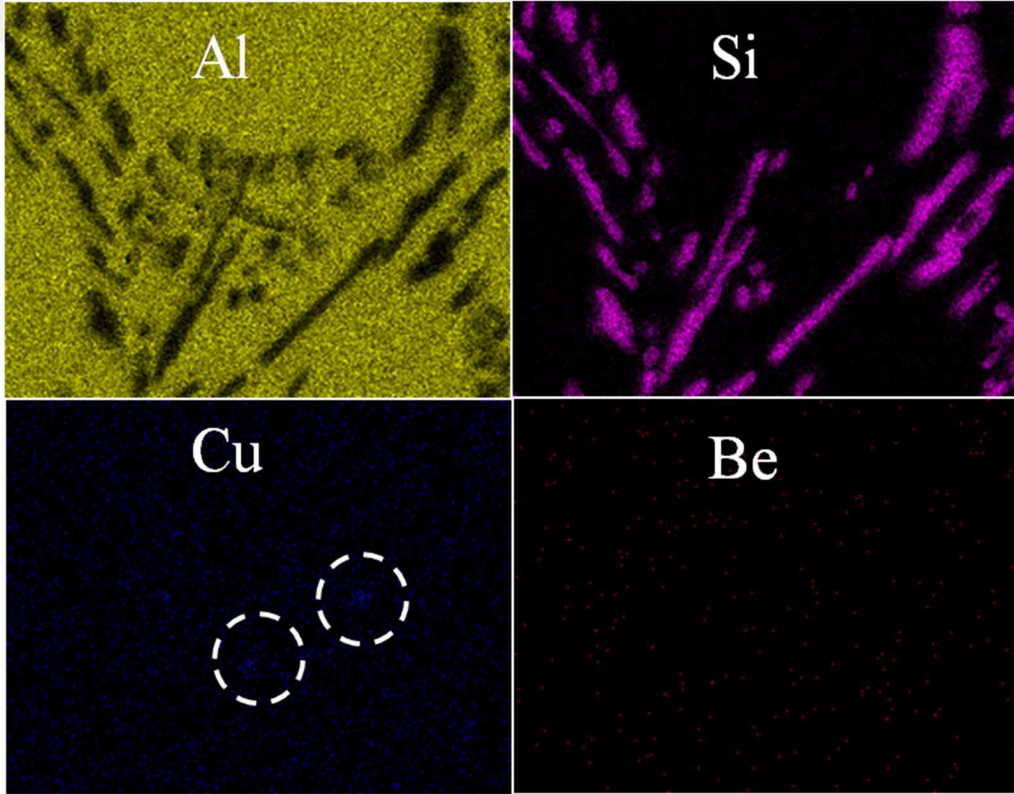
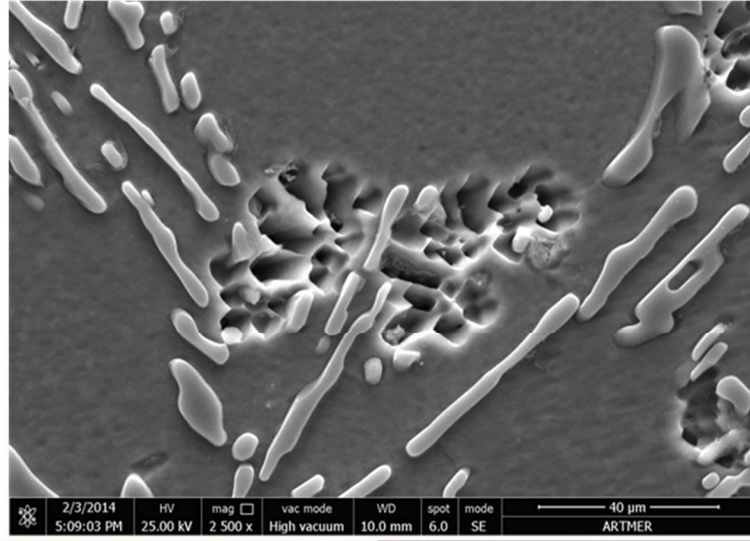
Şekil 4.10. Al-6Si-0.3Cu külçe alaşımının EDX- haritalama görüntüleri

Şekil 4.11’de katkısız külçe alaşımının farklı büyütmelerde elde edilen SEM görüntüleri verilmektedir. Mikroyapı düzensiz α -Al dentritleri ve ötektik Si fazlarından oluşmaktadır (Şekil 4.11.a). Ayrıca ötektik Si fazlarının, kaba ve köşeli yapıda olduğu görülmektedir (Şekil 4.11.b).



Şekil 4.11. Al-6Si-0.3Cu külçe alaşımının farklı büyütmelerde alınan SEM görüntüleri (a) 200x, (b) 1000x, (c) 10000x

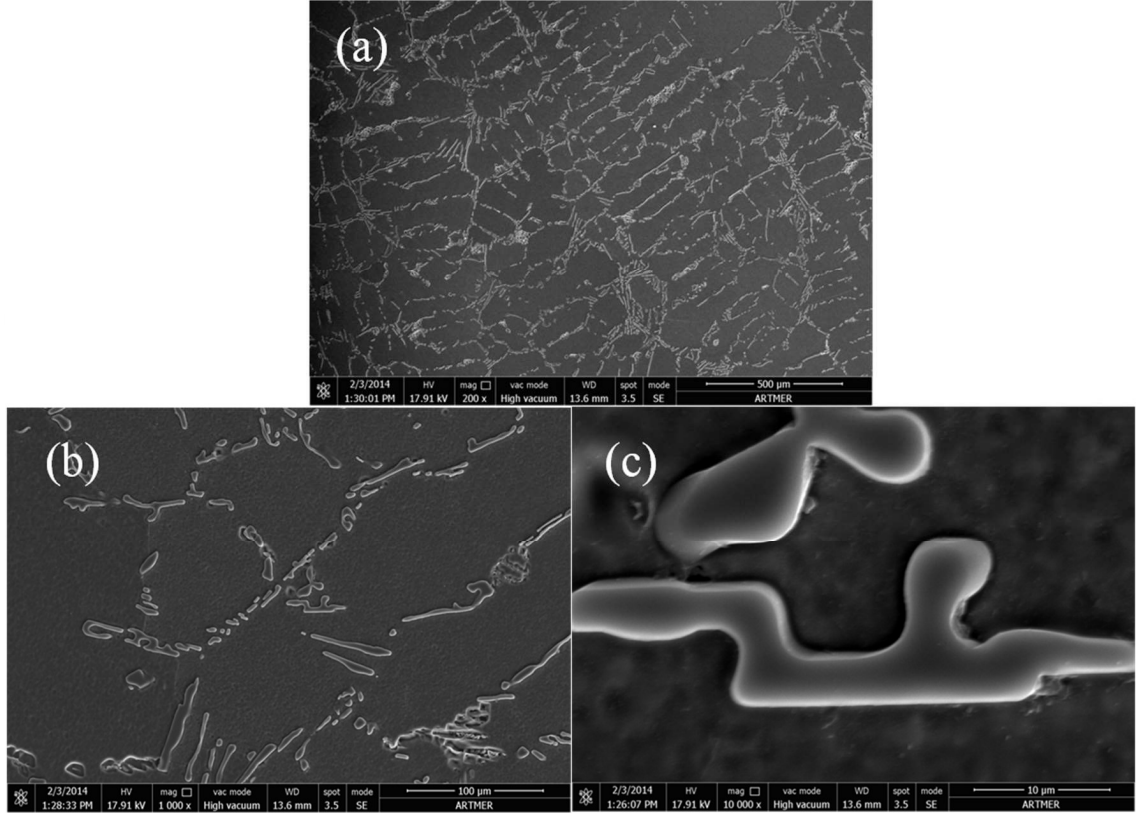
Şekil 4.12’de Be katkılı külçe alaşımının EDX-haritalama görüntüsü verilmektedir. Mikroyapının Al ve ötektik Si olmak üzere iki fazlı bir yapıdan oluştuğu görülmektedir. Bunun dışında bazı bölgelerde Cu fazları tespit edilmiştir ancak Be elementi tespit edilememiştir. Öte yandan Şekil 4.12’de orta kısımda bulunun küçük boşlukların Be elementine ait olduğu düşünülmektedir. Ancak EDX- haritalama görüntüsü karbon sonrası elementler için yapılabildiği için Be gözlenememiştir.



Şekil 4.12. Al-6Si-0.3Cu-0.3Be külçe alaşımlarının EDX- haritalama görüntüleri

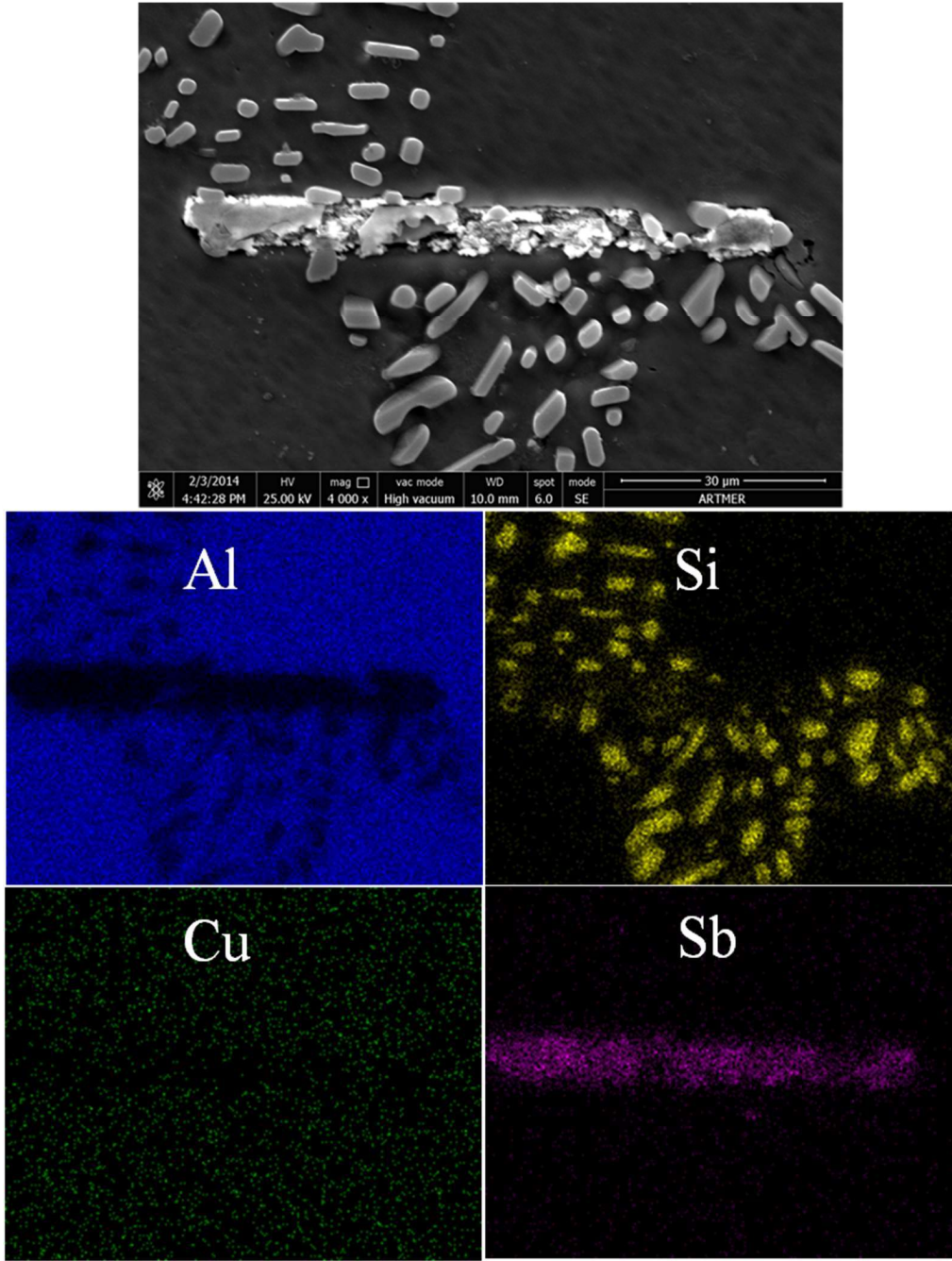
Şekil 4.13’de Be katkılı külçe alaşımlarının farklı büyütme ölçeklerinde elde edilen SEM görüntüleri verilmektedir. Mikroyapı düzenli α -Al dendritlerinden ve ötektik Si fazlarından oluşmaktadır (Şekil 4.13a). Ötektik Si fazının boyutlarında bir miktar küçülme görülmektedir. Ayrıca, ötektik Si’nin köşeli morfolojisi değişerek oval bir morfolojiye

dönüşmüştür. Dolayısıyla Be ilavesinin, Al-6Si-0.3Cu alaşımında Si'yi modifiye edici bir etki gösterdiği söylenebilir.



Şekil 4.13. Al-6Si-0.3Cu-0.3Be külçe alaşımının farklı büyütmelerde alınan SEM görüntüleri (a) 200x, (b) 1000x, (c) 10000x

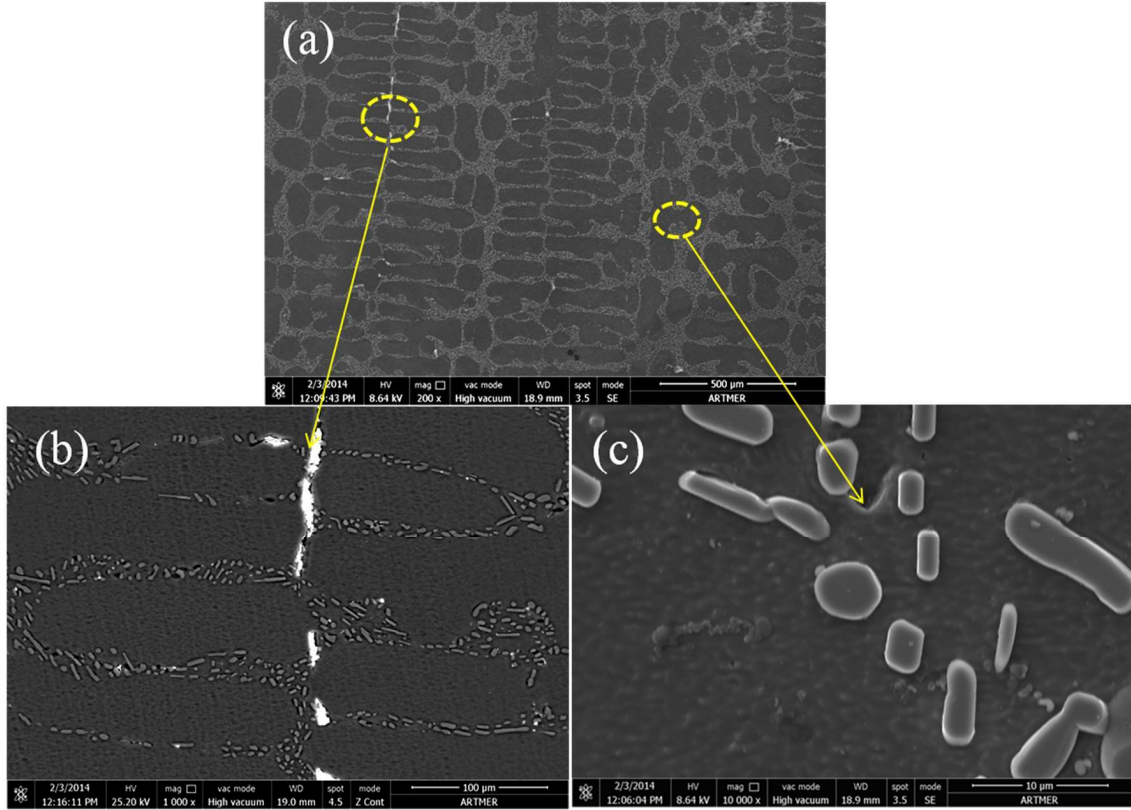
Şekil 4.14'de Sb katkılı külçe alaşımın EDX-haritalama görüntüsü verilmektedir. Mikroyapının, Al, ötektik Si ve Sb fazlarından oluştuğu görülmektedir. Cu elementine ait bir faz tespit edilememiştir.



Şekil 4.14. Al-6Si-0.3Cu-0.3Sb külçe alaşımının EDX- haritalama görüntüleri

Şekil 4.15’de Sb katkılı külçe alaşımın farklı büyütmelerde elde edilen SEM görüntüleri verilmektedir. Mikroyapı düzenli α -Al dentritlerinden ve ötektik Si fazlarından oluşmaktadır (Şekil 4.15.a). α -Al’nin dentrit yapısının, katkısız alaşıma kıyasla oldukça küçüldüğü görülmektedir. Bu durum, Sb fazının, Al dentritleri arasına yerleşmesi ve ikincil dentrit kollarının büyümesinde çekirdek görevi görmesi ile açıklanabilir (Şekil

4.15.b). Sb katkılı alaşımda, ötektik Si tamamen oval lifsi ve küresel morfolojiye dönüştüğü ve boyutlarının önemli ölçüde azaldığı görülmektedir (Şekil 4.15.b). Sb elementi, hem tane inceltici hem de modifiye edici bir özellik göstermiştir.

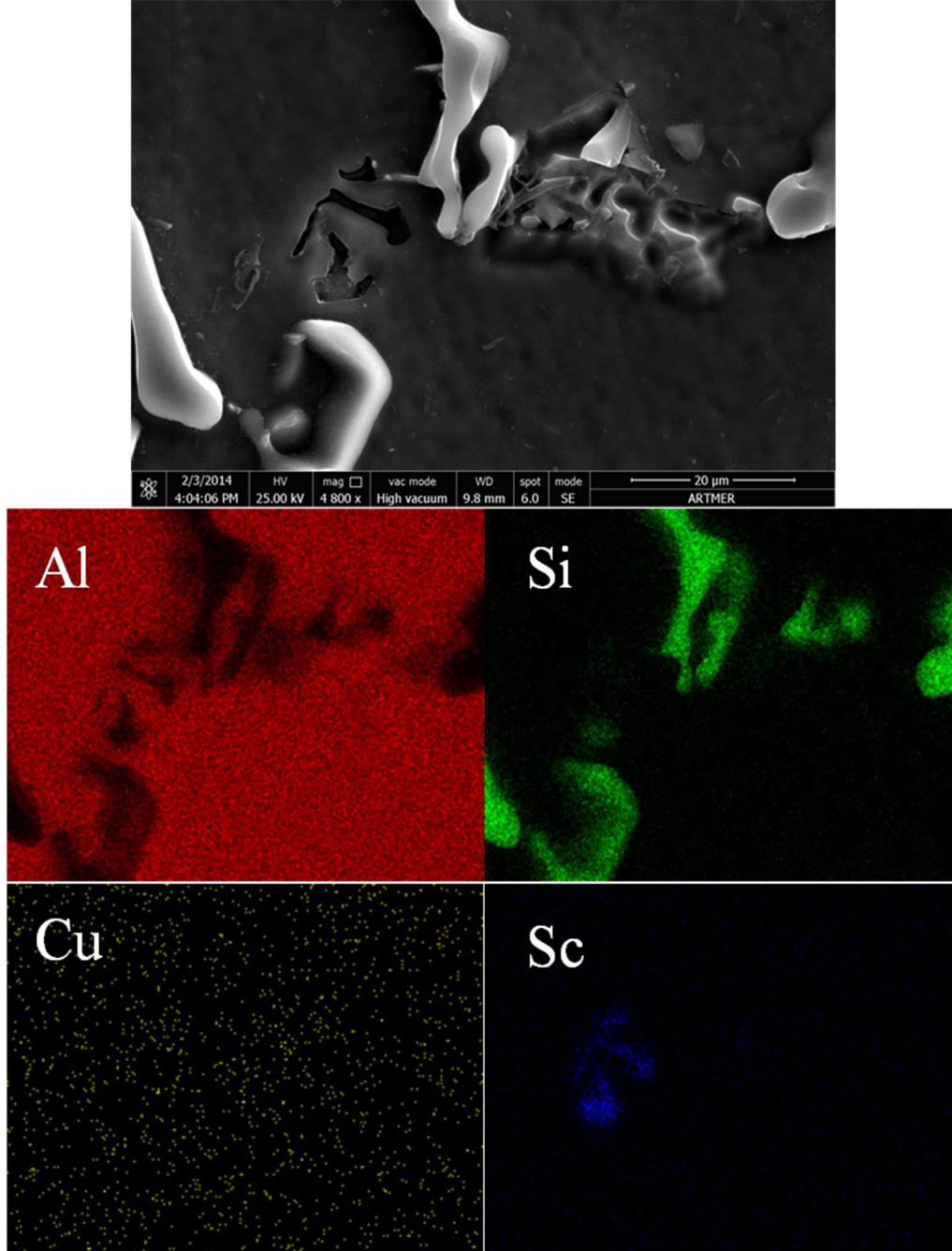


Şekil 4.15. Al-6Si-0.3Cu-0.3Sb külçe alaşımının farklı büyütmelelerde alınan SEM görüntüleri (a) 200x, (b) 1000x, (c) 10000x

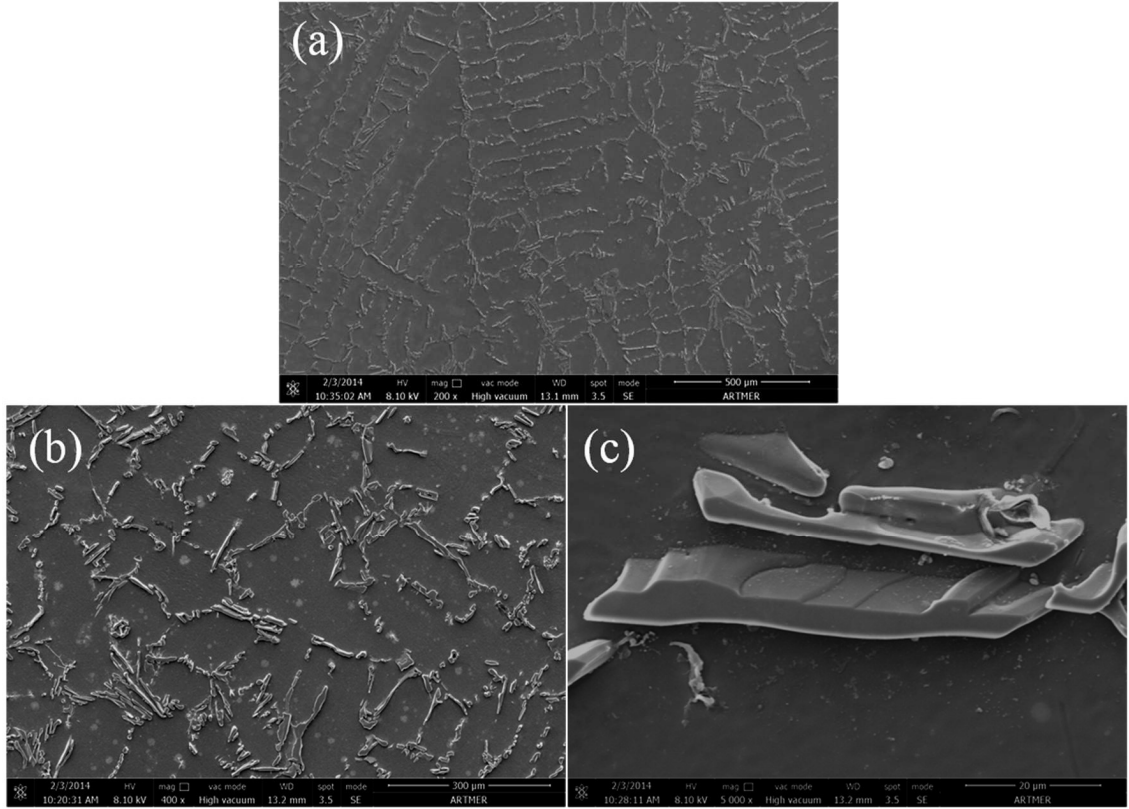
Şekil 4.16’de Sc katkılı külçe alaşımın EDX-haritalama görüntüsü verilmektedir. Mikroyapıda, Al ve ötektik Si’ye ek olarak Sc fazı da tespit edilmiştir. Al alaşımlarında tane inceltici olarak tercih edilen Sc elementi, çoğunlukla mikroyapı içinde Al_3Sc bileşiği olarak bulunmaktadır.

Şekil 4.17’de Sc katkılı külçe alaşımın farklı büyütmelelerde elde edilen SEM görüntüleri verilmektedir. Mikroyapı düzenli α -Al dentritlerinden ve ötektik Si fazlarından oluşmaktadır (Şekil 4.17.a). α -Al dentrit kollarının, katkısız alaşıma nazaran küçüldüğü görülmektedir. Ancak ötektik Si fazının boyutlarında ve morfolojisinde belirgin bir

değişiklik gözlenmemiştir (Şekil 4.17 a ve b). Bu bakımdan, Sc'nin Si fazlarını modifiye edemediği ancak Al-dendrit yapısını düzenlediği sonucuna ulaşılabilir.



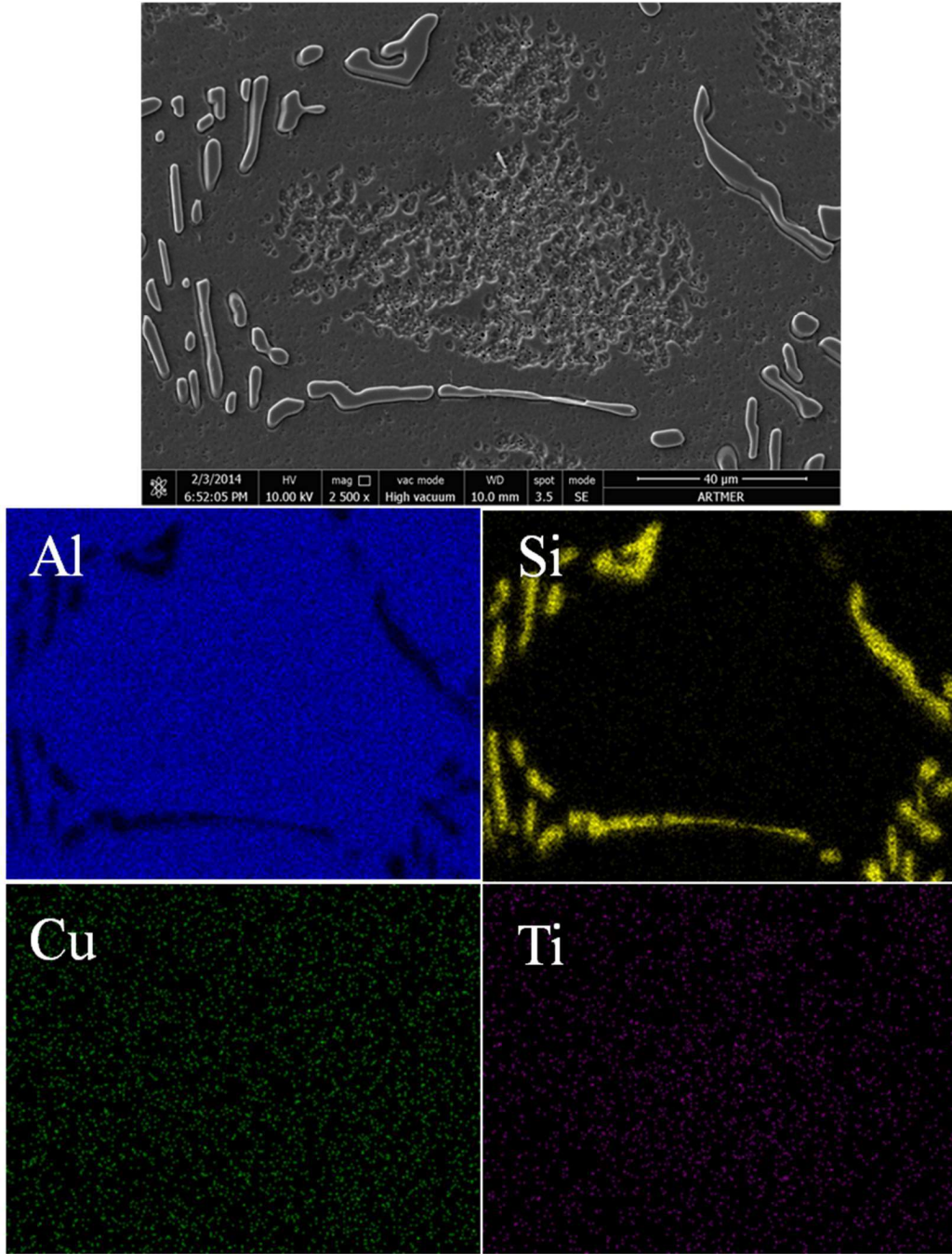
Şekil 4.16. Al-6Si-0.3Cu-0.3Sc külçe alaşımının EDX- haritalama görüntüleri



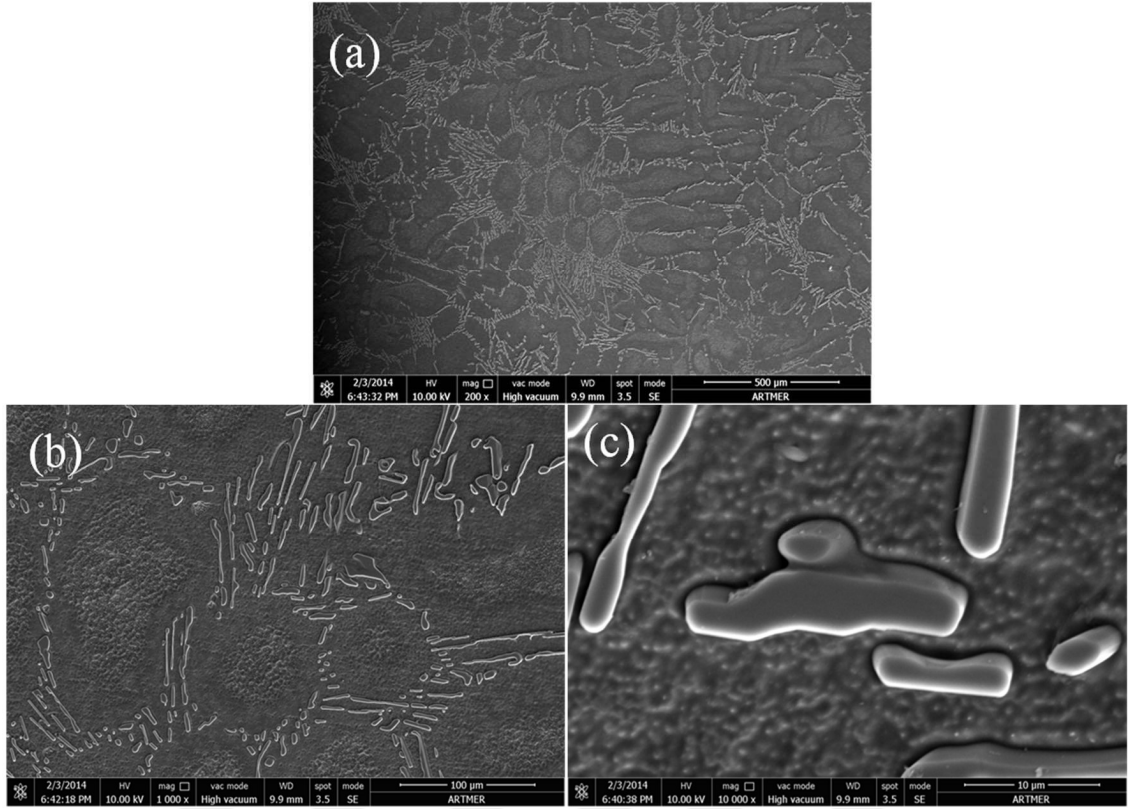
Şekil 4.17. Al-6Si-0.3Cu-0.3Sc külçe alaşımının farklı büyütmelerde alınan SEM görüntüleri (a) 200x, (b) 1000x, (c) 10000x

Şekil 4.18’de Ti katkılı külçe alaşımın EDX-haritalama görüntüsü verilmektedir. Mikroyapının sadece α -Al ve ötektik Si’den oluştuğu görülmektedir. Ayrıca α -Al fazının orta kısmında çözünmüş bir bölge görülmektedir. Bu kısmın Ti ve Cu’ca zengin bölge olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4.19’de Ti katkılı külçe alaşımın farklı büyütmelerde elde edilen SEM görüntüleri verilmektedir. α -Al dentrit yapısının, katkısız alaşıma kıyasla daha düzenli ve dentrik kolları arası mesafenin azaldığı görüldü. Ötektik Si fazlarının ise tamamen ince ve lifsi morfolojiye dönüştü (Şekil 4.19.a). Ti katkısının hem α -Al dentrit yapısını incelttiği hem de ötektik Si morfolojisini modifiye ettiği söylenebilir.



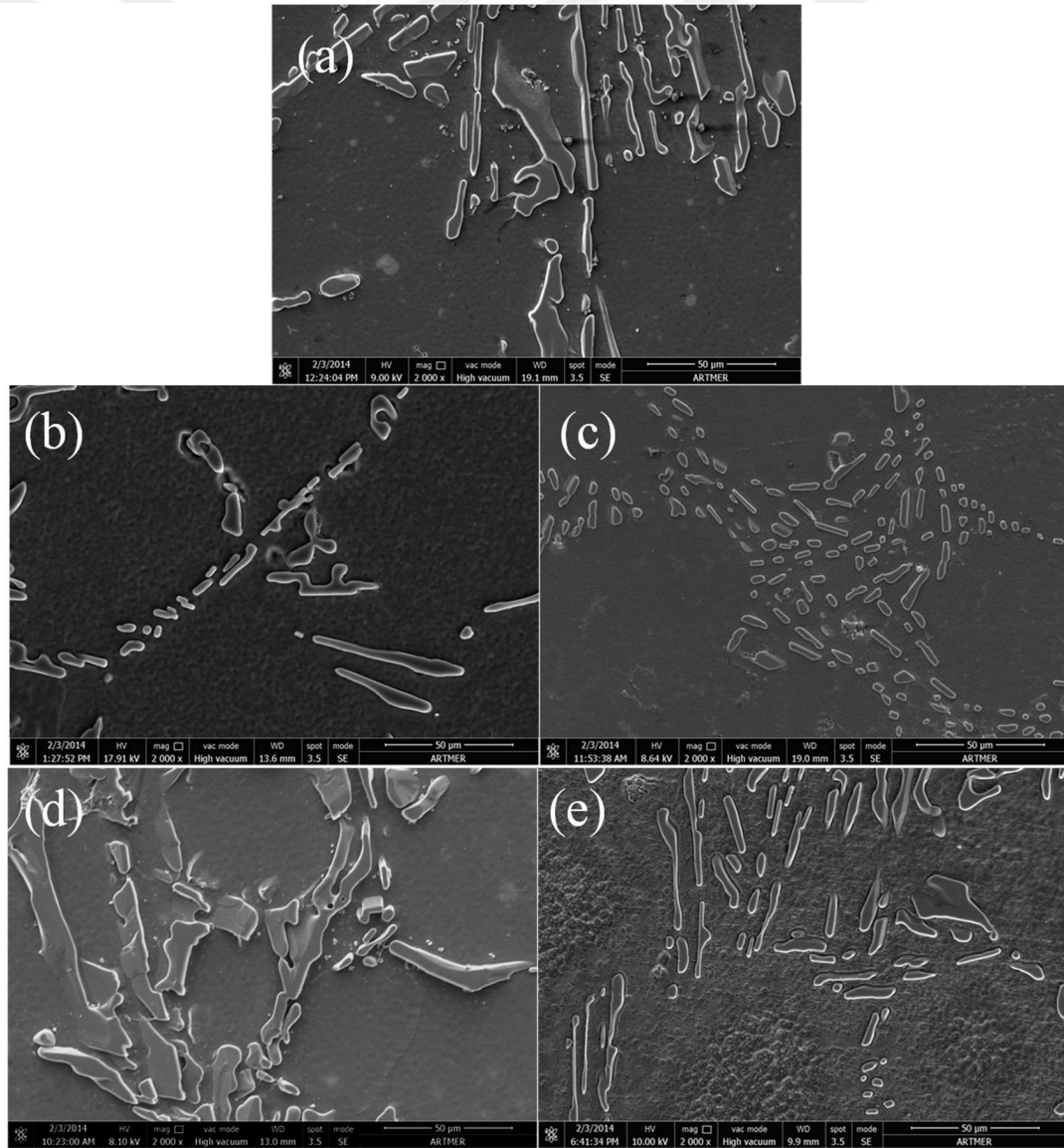
Şekil 4.18. Al-6Si-0.3Cu-0.3Ti külçe alaşımının EDX- haritalama görüntüleri



Şekil 4.19. Al-6Si-0.3Cu-0.3Ti külçe alaşımlarının farklı büyütme oranlarında alınan SEM görüntüleri (a) 200x, (b) 1000x, (c) 10000x

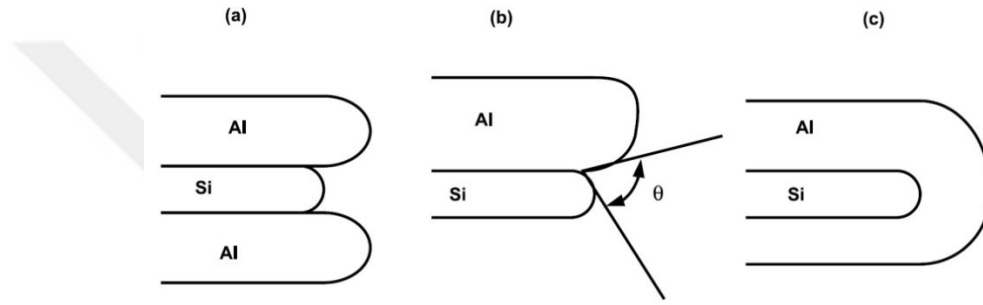
Şekil 4.20’de külçe alaşımların mikroyapı görüntüleri birlikte verilmektedir. Katkısız alaşımda, ötektik Si fazının köşeli ve kaba bir morfolojiye sahip olduğu görülmektedir. Be, Sb ve Ti katkılı alaşımlarda ise ötektik Si fazının köşegen yapıdan daha oval bir yapıya dönüştüğü görülmektedir. Sb katkılı alaşımda aynı zamanda ötektik Si boyutlarının azaldığı görülmektedir (Haghighy & Timelli, 2021). Sb katkısının birincil Si kristallerin inceltme mekanizmasını, ikizlenmeler ve paketlenme kusur yoğunluğunun artması ile açıklamışlardır (Haghighy & Timelli, 2021). Bir diğer çalışmada, Sb ilavesinin, ötektik altı $AlSi_6Cu_4$ alaşımında, ötektik Si morfolojisini modifiye ettiği ancak bu etkinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu rapor edilmiştir (Farkašová ve diğerleri, 2013). Öte yandan, Sb katkısının mikroyapıyı inceltme özelliğinin daha baskın olduğu gözlenmiştir. 1000 ppm oranında yapılan Sb katkısının alaşımların sertliği iki kat artırdığı rapor edilmiştir. Bu çalışmada, Sb’nin hem tane inceltme hem de modifiye etme özelliği birlikte gözlenmiştir. Ti ilavesinin, ötektik Al-Si alaşımlarında, Al_3Ti çökelmelerine sebep olduğu rapor edilmiştir (Saheb ve diğerleri,

2001). Bir diğer çalışmada, Al-Ti-C mastır alaşımının, ötektik Al-Si-Fe-Cu alaşımında, kaba yapıyı incelttiği saptanmıştır (Tang ve diğerleri, 2017). Be ilavesinin ötektik Si parçacıklarının kısmi olarak modifiye ettiği rapor edilmiştir (İbrahim ve diğerleri, 2015). Literatürde yapılan çalışmalarda, ağ. %0.2 Sc ilavesinin, Al6Si0.25Mg alaşımında, ötetik Si fazının hem yapısını hem de boyutlarını incelttiği görülmüştür (Prukkanon ve diğerleri, 2009). Öte yandan tez çalışmada Sc ilavesinin, ötektik Si'nin modifiye edilmesinde belirgin bir etkisi gözlenmedi. Ancak Al₃Sc intermetalik bileşiğinin mikroyapı içerisinde homojen olarak dağıldığı görüldü.



Şekil 4.20. Külçe alaşımların birlikte mikroyapı görüntüleri (2000x)

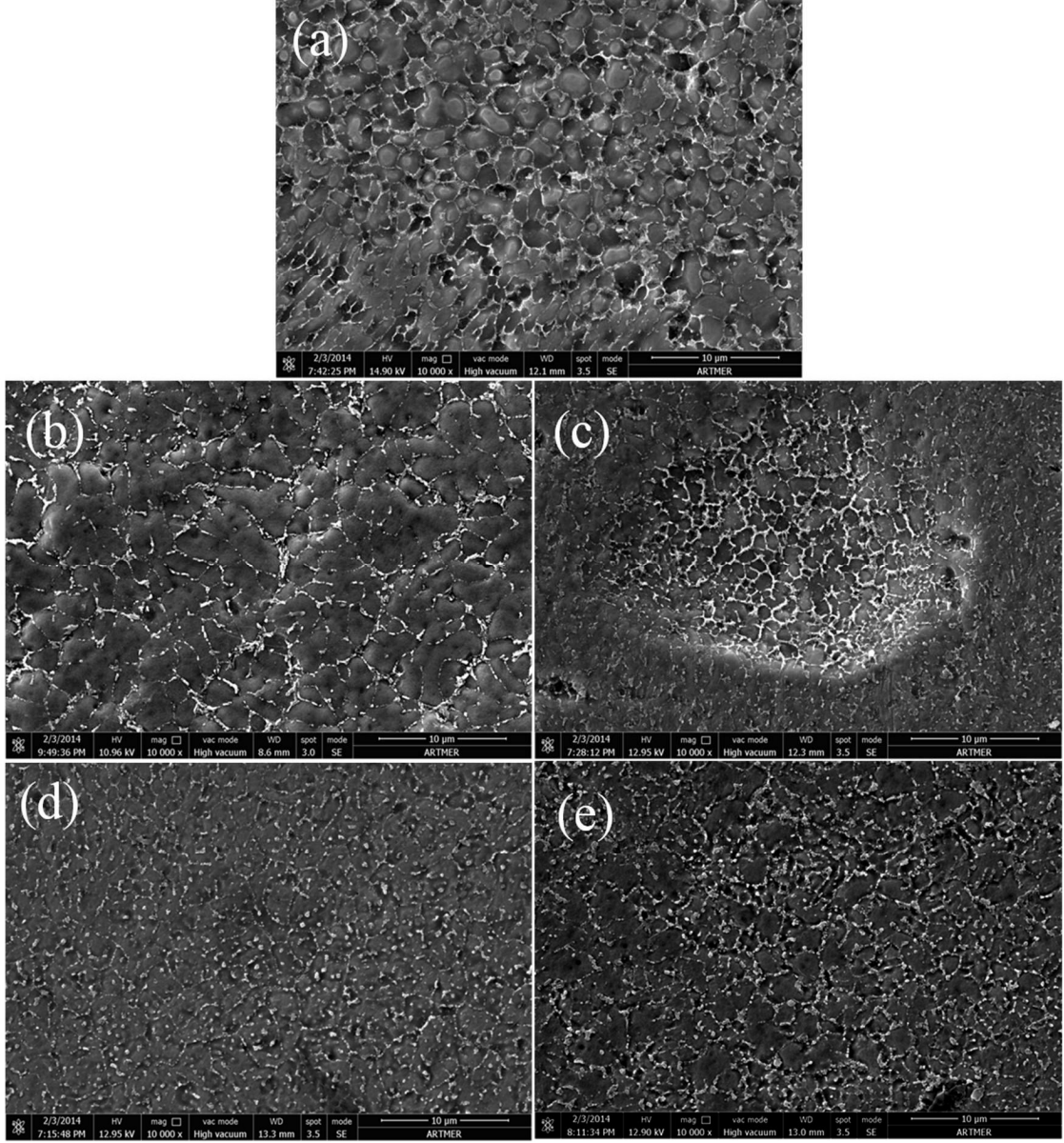
Si fazının modifikasyonu iki teori ile açıklanmaktadır (Zamani M. , 2015). Bunların ilki yüzey enerji teorisidir. Bu teori, kimyasal modifikasyonu açıklamak için Al-Si katı arayüzünün yüzey enerjisini temel almıştır. Bu teori en çok kabul gören yaklaşım olmasına rağmen hala üzerinde tartışmalar devam etmektedir. Bu teoriye göre, kimyasal modifiye edici element, Al-Si arayüzünün yüzeyinin azalmasına sebep olur ve arayüzey açısını artırır (Şekil 21). Böylece, Si kristalinin büyümesi bastırılır ve aşırı soğumayla birlikte ötektik yapının modifikasyonu gerçekleşir.



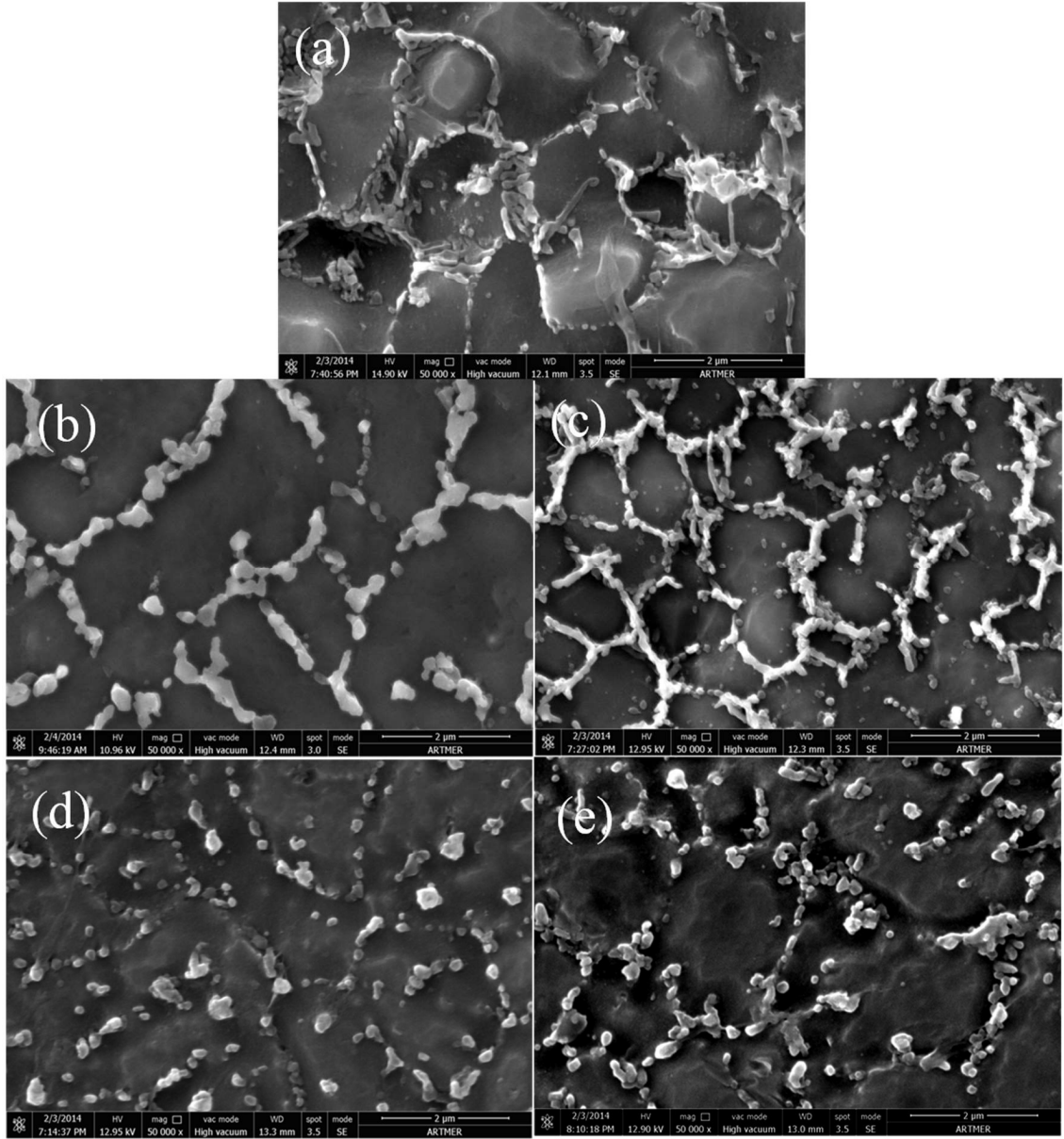
Şekil 4.21. Na ile modifiye edilen Al-Si alaışımının ötektik katılaşması (Makhlouf & Guthy, 2001)

Bir diğer teori ise, arayüzey modifikasyon teorisidir. Bu teoriye göre, kimyasal modifiye ediciler, Si kristalinin büyümesini iki yol ile engeller. Bunlar, ikiz düzlem yeniden oluşan kenar mekanizması (TPRE) ve arayüz zehirlleme teorisidir (Makhlouf & Guthy, 2001).

Şekil 4.22’te eriyik eğirme yöntemi ile üretilen alaşımların mikroyapı fotoğrafları verilmektedir. Alaşımların tamamında, hızlı soğutmanın etkisiyle birlikte oldukça ince ve homojen bir mikroyapı oluşmuştur. α -Al dentritik yapı, hücresel yapıya dönüşmüştür. Şekil 4.23’te yüksek büyütme mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. Ötektik Si fazlarının, mikron altı lifsi bir morfolojiye dönüştüğü saptandı. Hücresel yapı Sb katkılı alaşımda oldukça belirgindir ve ötektik Si fazının boyutlarının daha da küçüldüğü görülmektedir (Şekil 23.c). Bu durum, Sb ilavesinin, modifiye edici özelliğinin hızlı katılaştırma koşullarında da etkin olduğunu göstermektedir.



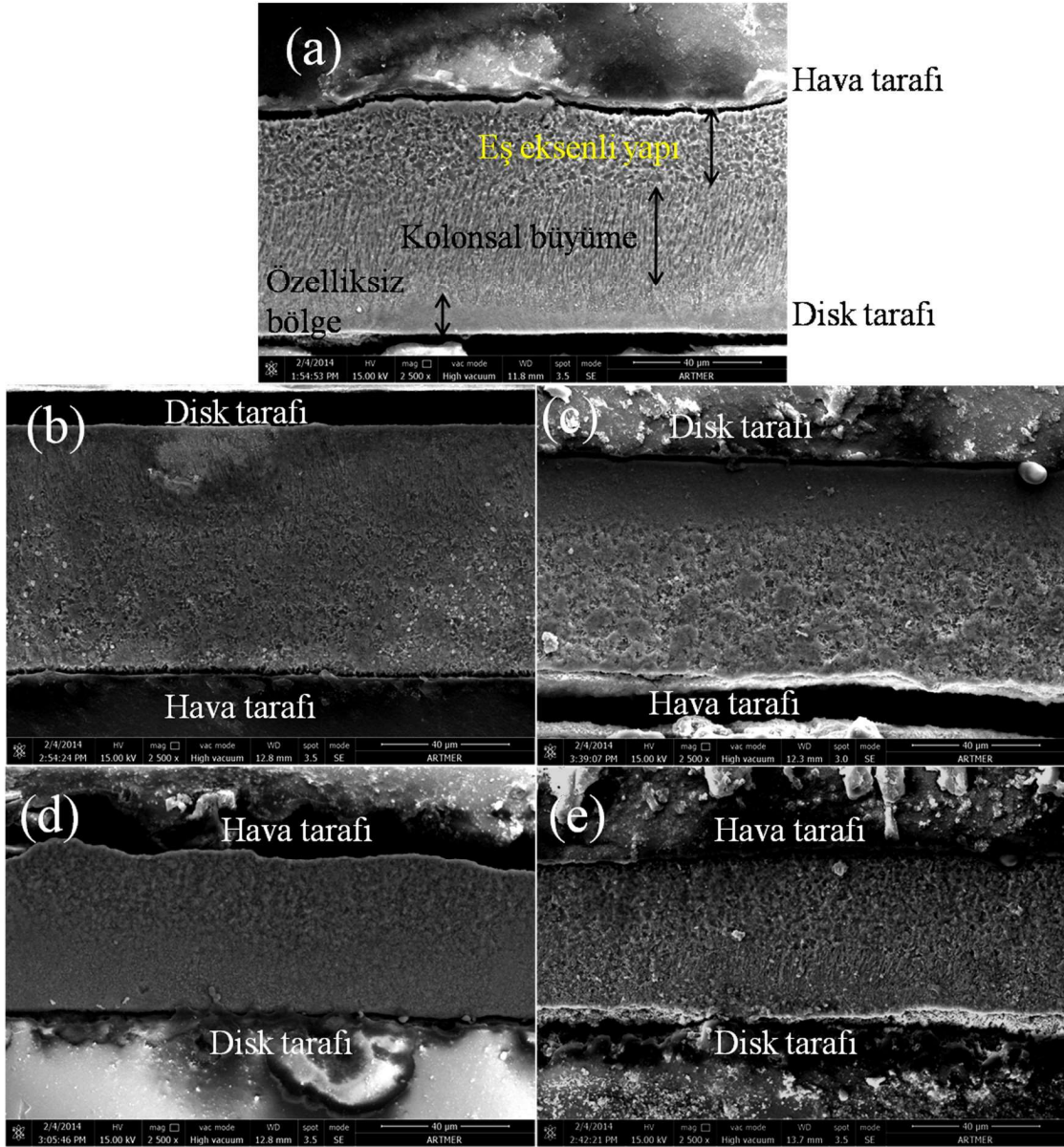
Şekil 4.22. Eriyik eğirme yöntemi ile üretilen alaşımların mikroyapı fotoğrafları (a) Al-6Si-0.3Cu, (b) Al-6Si-0.3Cu-0.3Be, (c) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sb, (d) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sc, (e) Al-6Si-0.3Cu-0.3Ti (Büyütme: 10kx)



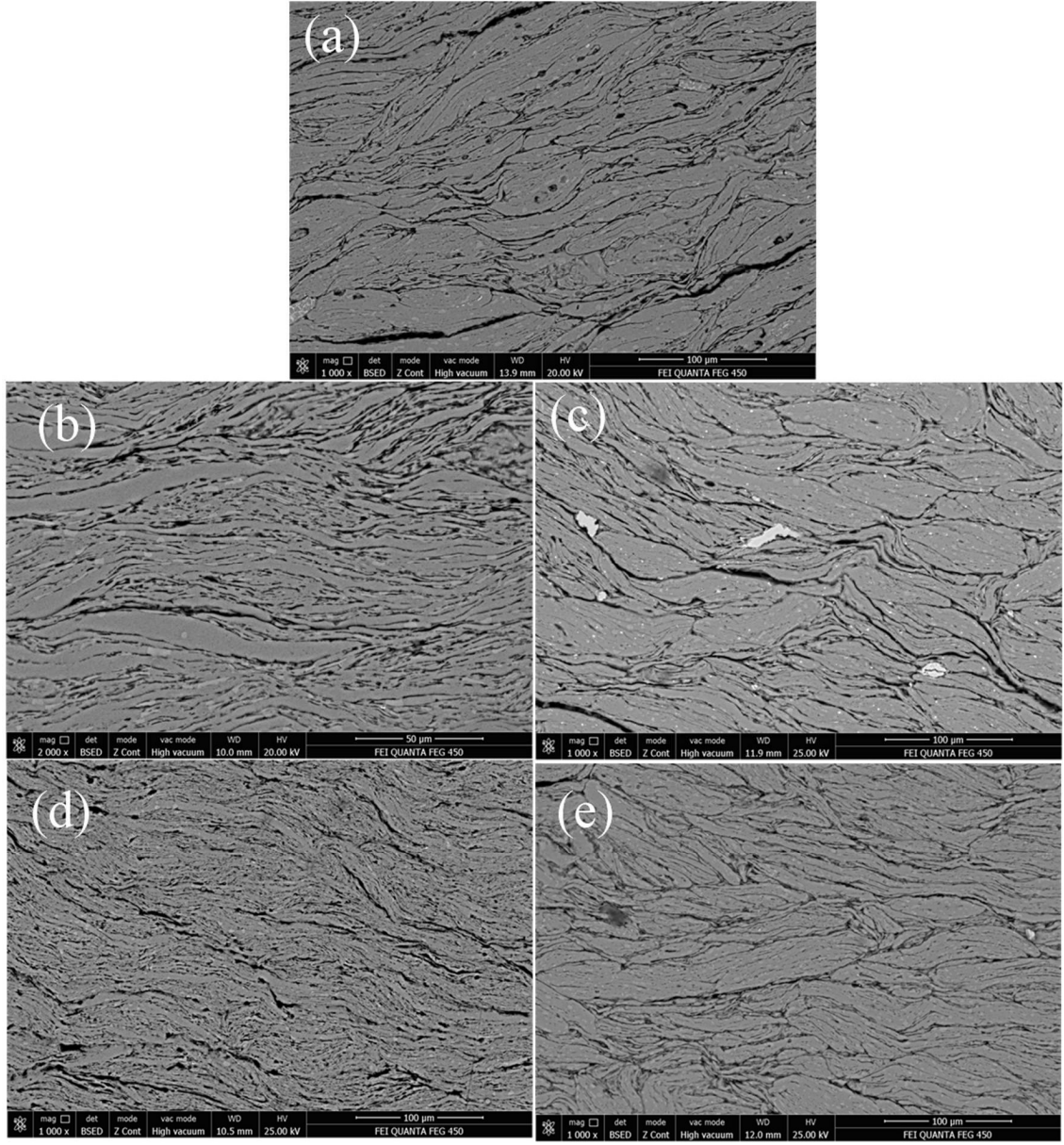
Şekil 4.23. Eriyik eğirme yöntemi ile üretilen alaşımların mikroyapı fotoğrafları (a) Al-6Si-0.3Cu, (b) Al-6Si-0.3Cu-0.3Be, (c) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sb, (d) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sc, (e) Al-6Si-0.3Cu-0.3Ti (Büyütme: 50kx)

Şekil 4.24'te eriyik eğirme ile üretilen şeritlerin kesit fotoğrafları verilmektedir. Alaşımlarda üç bölge belirgin olarak tespit edilmiştir. Alaşımın disk yüzeyinde özelliiksiz bölge (featurless zone), hava yüzeyinde ise hüresel (eş-eksenli) bir oluşum görülmektedir. İki bölge arasında kolonsal bir yapı görülmektedir. Özelliiksiz bölge, soğuma hızının en fazla olduğu bölgedir ve bu nedenle mikroyapı çok incedir. Hava

yüzeyinde ise soğuma hız en düşüktür ve bu nedenle mikroyapı diğer bölgelere kıyasla daha kabadır. İki bölge arasında ise ısı gradyanı sebebiyle kolonsal bir yapı oluşmuştur.



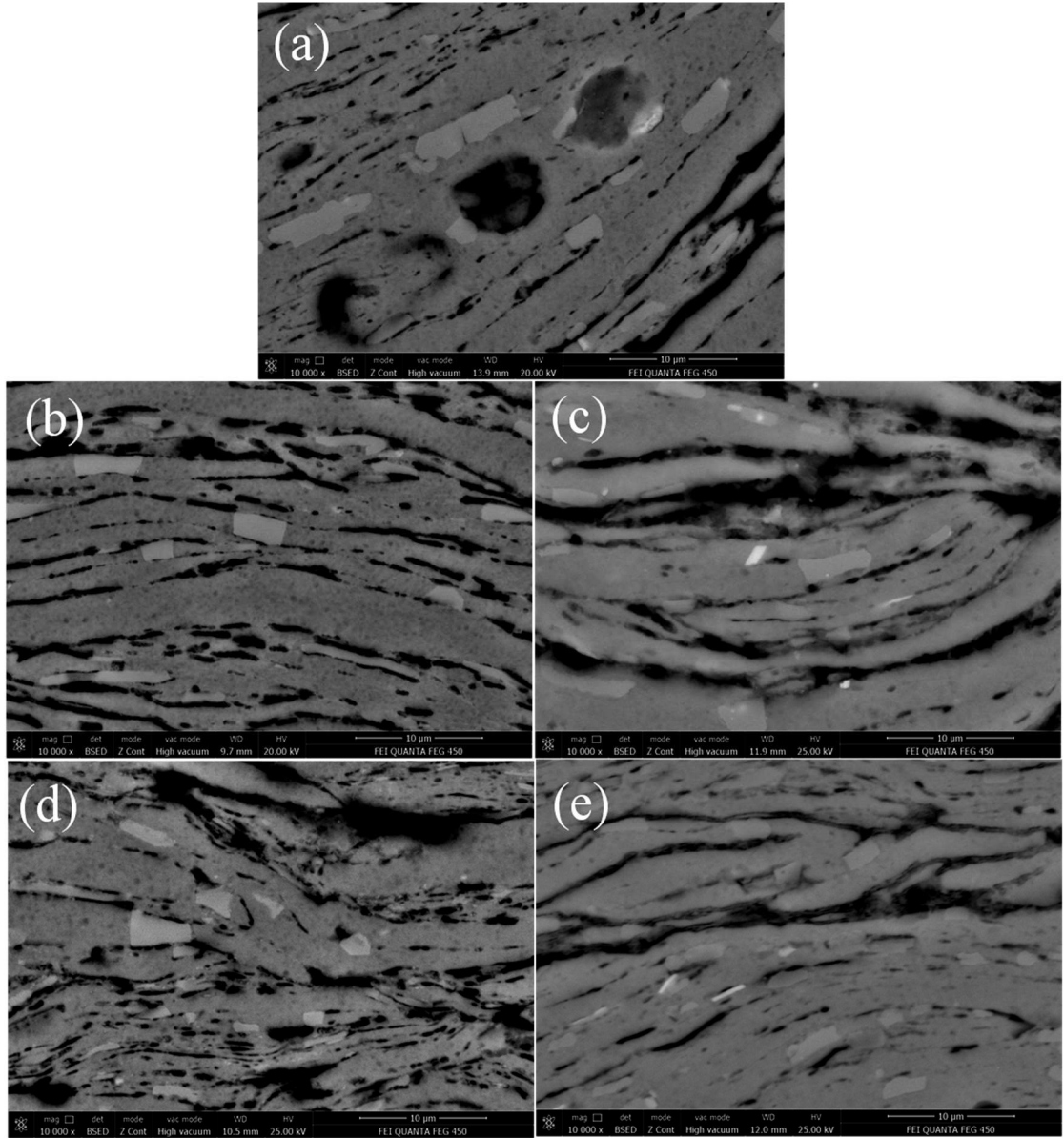
Şekil 4.24. Eriyik eğirme ile üretilen alaşımların kesit görüntüleri (a) Al-6Si-0.3Cu, (b) Al-6Si-0.3Cu-0.3Be, (c) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sb, (d) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sc, (e) Al-6Si-0.3Cu-0.3Ti (Büyütme: 50kx)



Şekil 4.25. Kriyojenik öğütme + soğuk preslenen alaşımların SEM görüntüleri, (a) Al-6Si-0.3Cu, (b) Al-6Si-0.3Cu-0.3Be, (c) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sb, (d) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sc, (e) Al-6Si-0.3Cu-0.3Ti (Büyütme: 1000x)

Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 'de kriyojenik öğütme ile toz formuna getirilen ve daha sonra soğuk pres ile külçe olarak üretilen şerit alaşımların, farklı büyütme altındaki mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Alaşımların mikroyapılarının homojen olduğu görülmektedir (Şekil 4.25). Şekil 4.25.c'de Sb katkılı alaşımda, beyaz renkli faz Sb elementine ait olup ısıtılma esnasında, Sb fazının çökmesinden kaynaklanmaktadır.

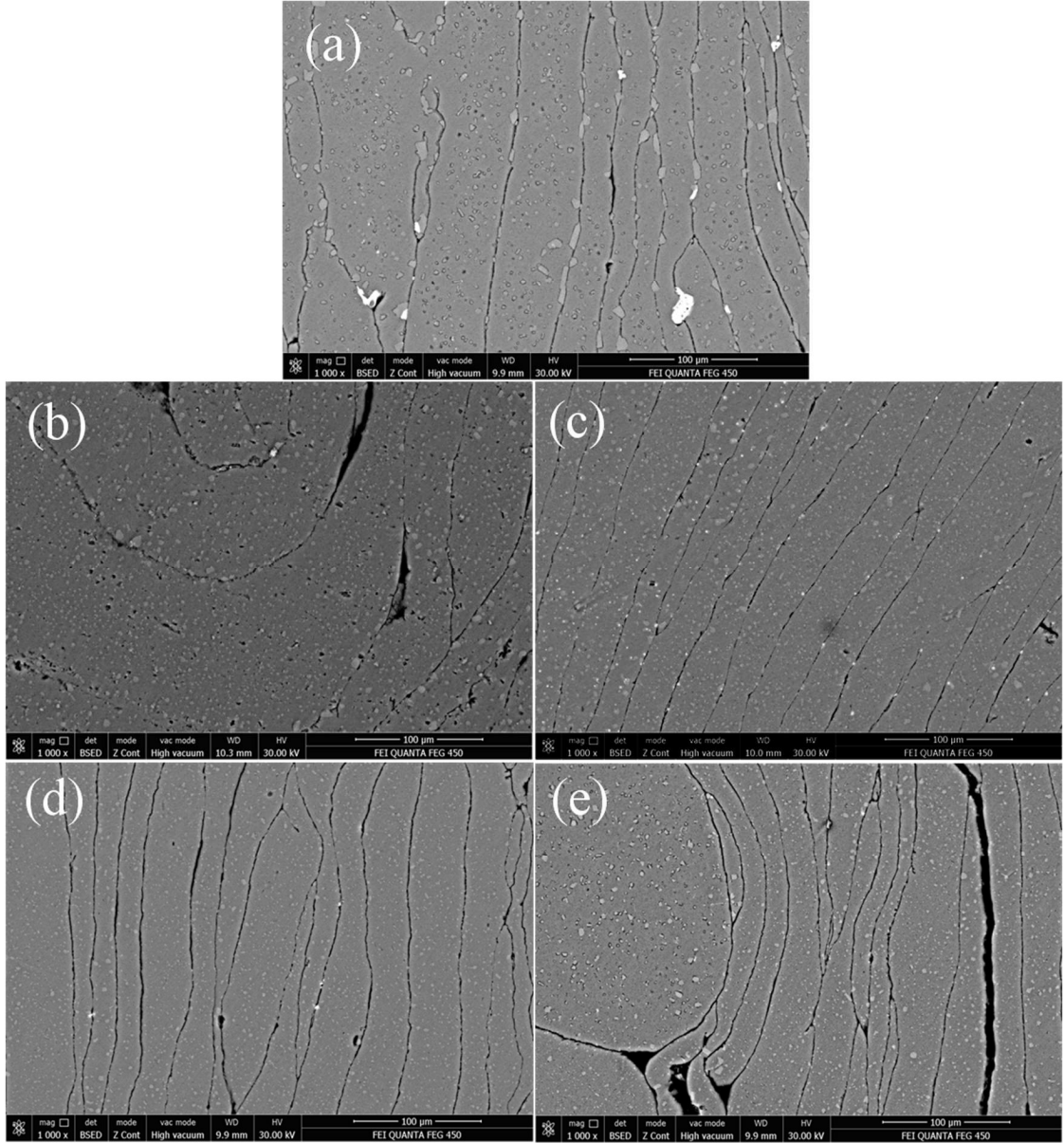
Yüksek büyütme SEM fotoğraflarında Si fazları belirgin olarak görülmektedir. Si fazının hücresel ve lifsi yapıdan, dikdörtgensel yapıya dönüştüğü görülmektedir. Si fazında görülen dikdörtgensel yapının öğütme esnasında, bilyeler arasında meydana gelen çarpışmalardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Öte yandan ötektik Si fazında görülen kabalaşma ise ısıtma işlem esnasında çöken Si atomlarından kaynaklanmaktadır.



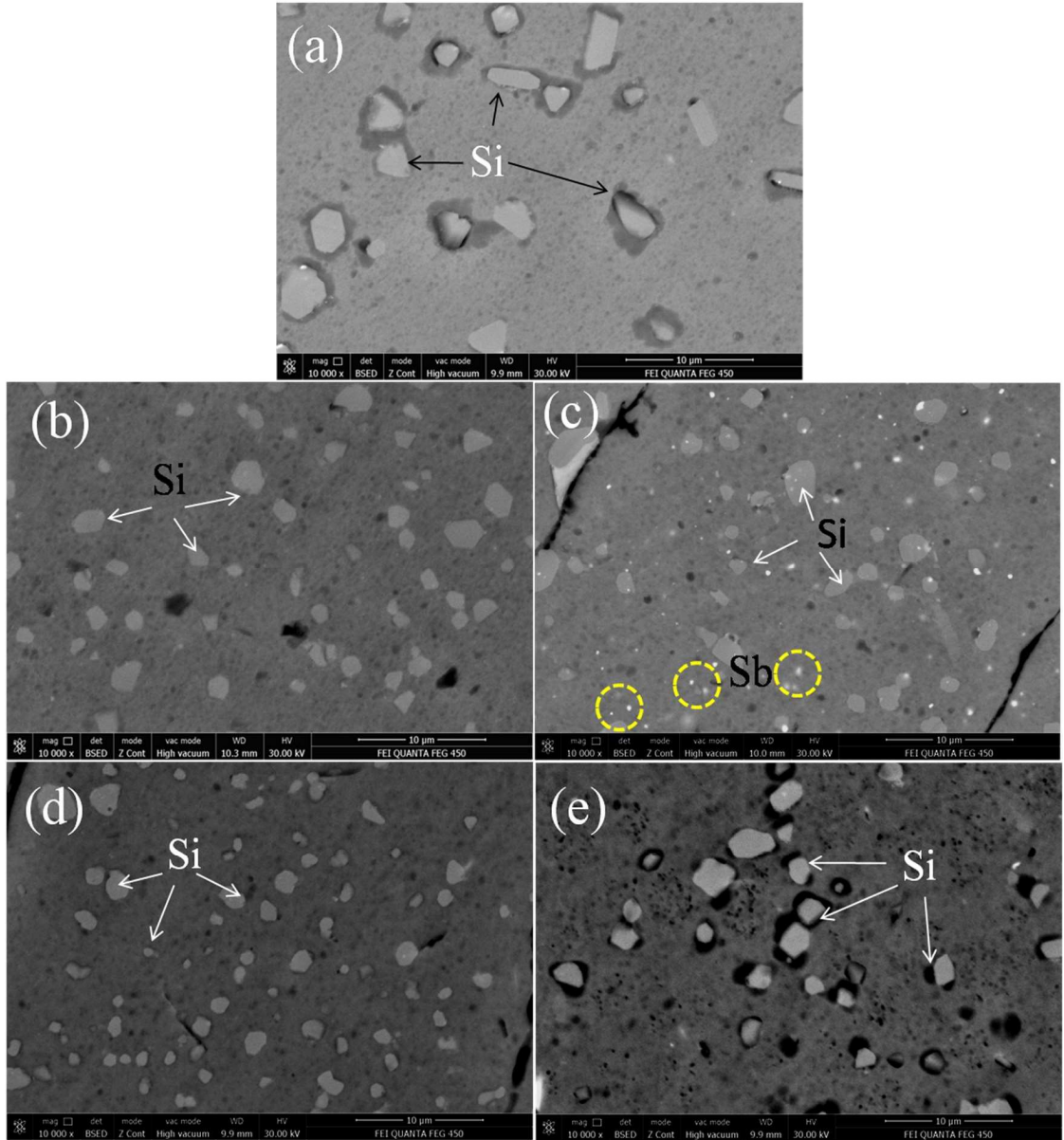
Şekil 4.26. Kriyojenik öğütme + soğuk preslenen alaşımların SEM görüntüleri, (a) Al-6Si-0.3Cu, (b) Al-6Si-0.3Cu-0.3Be, (c) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sb, (d) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sc, (e) Al-6Si-0.3Cu-0.3Ti (Büyütme: 10 000x)

Ayrıca, Sb ve Ti katkılı alaşımlarda açık renkli görülen fazlar, alaşım içerisinde çözünen Sb ve Ti elementlerinin ısıtma işlemi ile birlikte çökmesi olarak yorumlanmaktadır. Isıtma işlemi ve bilyeli öğütme işlemlerinin, aşırı doymuş yapıda çözünmüş ikincil fazların çökmesine sebep olduğu saptanmıştır. Ancak çökelen fazların, mikroyapı içerisindeki dağılımı oldukça homojendir. Bunun dışında, mikroyapıda belirgin boşlukların olduğu görülmektedir. Her ne kadar, bilyeli öğütme ile hızlı katılaştırılan şeritler, toz formuna getirilse de, iki aşamalı pekleştirme işlemi şeritler arası difüzyonun yeterince sağlanamadığı görülmektedir.

Şekil 4.27 ve Şekil 4.28 'de doğrudan SPS ile külçe olarak üretilen şerit alaşımların, farklı büyütmeler altında mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Alaşımların mikroyapılarının homojen olduğu görülmektedir (Şekil 4.27). Si çökelmeleri belirgin olarak görülmektedir ve çökelmelerin daha çok şerit yüzeylerinde olduğu görülmektedir. Katkısız alaşımda, Si fazındaki kabalaşmanın daha belirgin olduğu görülmektedir (Şekil 4.28.a). Sb katkılı alaşımda ise çökelen Si'ye ek olarak homojen ve ince taneli Sb fazı da oluşmuştur. Ayrıca Sb, Si fazının daha küresel yapıda olması, ısıtma işlemi ile birlikte Sb elementinin modifiye edici etkisini kaybetmediği anlamına gelmektedir. Şerit yüzeyleri arasındaki boşlukların, SPS alaşımlarda daha az olduğu görülmektedir. SPS yönteminde, ısıtma işlemi ve preslemenin eş zamanlı olarak gerçekleşmesi sebebiyle boşluk oluşumunun daha az olduğu düşünülmektedir.



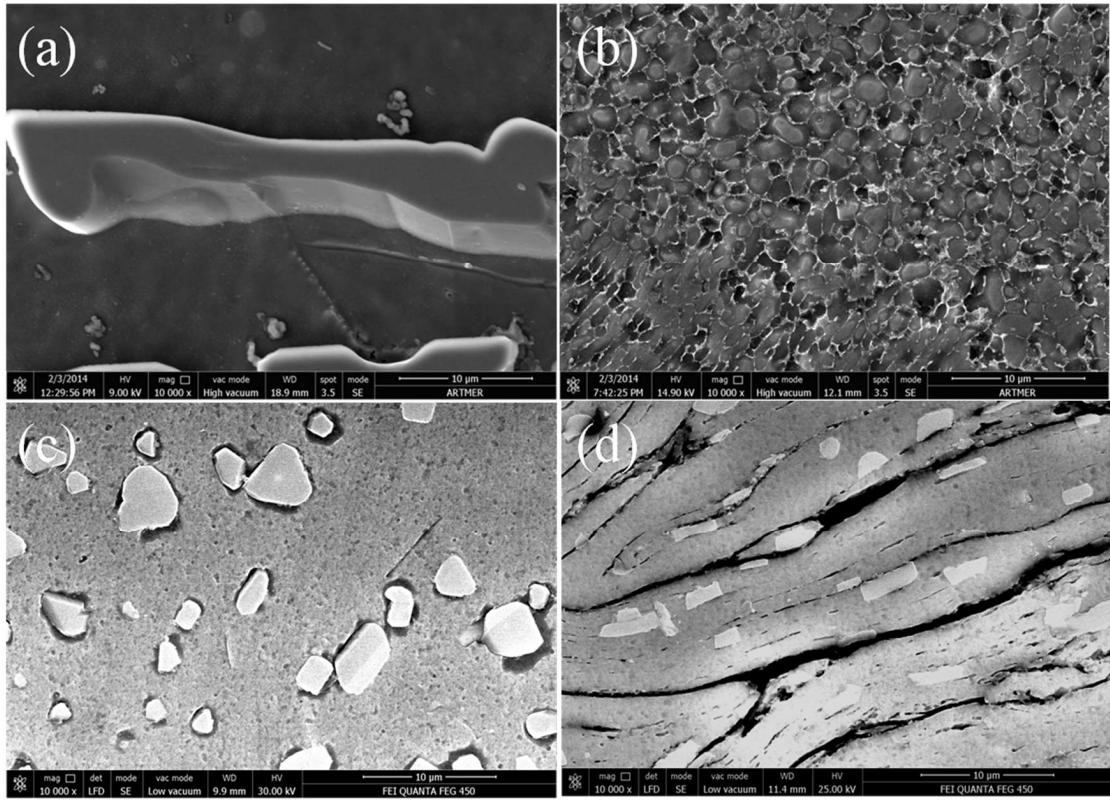
Şekil 4.27. SPS ile külçe olarak üretilen şerit alaşımların SEM görüntüleri, (a) Al-6Si-0.3Cu, (b) Al-6Si-0.3Cu-0.3Be, (c) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sb, (d) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sc, (e) Al-6Si-0.3Cu-0.3Ti (Büyütme: 1000x)



Şekil 4.28. SPS ile külçe olarak üretilen şerit alaşımların SEM görüntüleri, (a) Al-6Si-0.3Cu, (b) Al-6Si-0.3Cu-0.3Be, (c) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sb, (d) Al-6Si-0.3Cu-0.3Sc, (e) Al-6Si-0.3Cu-0.3Ti (Büyütme: 10kx)

Üretim yönteminin mikroyapı ve Si morfolojisi üzerine etkisini görebilmek için, katkısız alaşımın aynı büyütme altındaki mikroyapı fotoğrafları Şekil 4.29'da verilmektedir. Şekil 4.29.a'da indüksiyon fırınında üretilen ve atmosfer ortamında yavaş soğumaya bırakılan alaşımın Si morfolojisi görülmektedir. Ötektik Si'nin oldukça iri taneli ve köşeli yapıda olduğu görülmektedir. Eriyik eğirme ile üretilen alaşımda ise mikroyapı homojen ve ince taneli ötektik Si'den oluşmaktadır (Şekil 4.29.b). Si'nin

boyutu, 20-50 μm 'den 1 mikron altında kadar inmiştir. SPS ve bilyeli öğütme+soğuk preslenen alaşımlarda ise Si'nin tane boyutunun arttığı ancak külçe alaşıma kıyasla daha küçük olduğu görülmektedir. Ayrıca, şeritler arası boşluk SPS alaşımda soğuk pres alaşıma göre daha azdır. Si morfolojisindeki farklılıkta oldukça belirgindir. SPS alaşımda ötektik Si'nin daha çok küresel yapıda olduğu, ancak soğuk pres alaşımda dikdörtgensel yapıda olduğu görülmektedir.

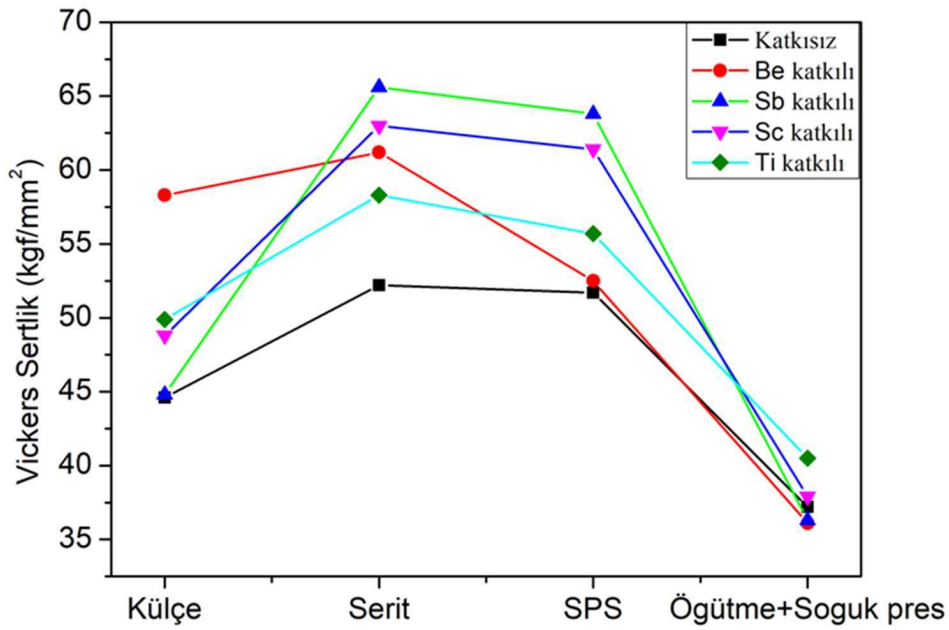


Şekil 4.29. Farklı yöntemler ile üretilen katkısız Al-6Si-0.3Cu alaşımının mikroyapı fotoğrafları, (a) Külçe alaşım, (b) şerit alaşım, (c) SPS alaşım ve (d) bilyeli öğütme + soğuk pres alaşım

4.4. Mekanik Özellikler

Şekil 4.30'de alaşımların birlikte Vicker's sertlik değerleri verilmektedir. Külçe alaşımların sertlik değerleri literatürle uyum içindedir (Sales ve diğerleri, 2018). Külçe alaşımlarda en yüksek sertlik değeri Be katkılı alaşımda görüldü. Bu durum, söz konusu

alaşımın homojen ve ince yapılı mikroyapısı ile açıklanmaktadır. Hızlı katılaştırılan alaşımlarda, sertlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Sertlik değerlerinde görülen bu artış, mikroyapılarda görülen homojen ve hücreli mikroyapı ile uyumludur. Sb ve Sc katkılı alaşımlarda, sertlik değerlerinin daha fazla olduğu saptandı. Buradan, Sb ve Sc ilavelerinin, hızlı soğutma koşullarında daha etkin olduğu sonucuna varılabilir. SPS alaşımlarda sertlik değerleri bir miktar azalmıştır. Bu durum, ısı işlem ile birlikte Si fazının kabalaşmasıyla açıklanmaktadır. Bilyeli öğütme+soğuk pres alaşımlarda sertlik değerleri ciddi oranda düşmüştür. Bu durum, Si morfolojisinden daha çok şeritler arasında görülen boşluklarda kaynaklanmaktadır (Şekil 4.29.d). Sertlik değerleri birlikte değerlendirildiğinde, SPS yönteminin öğütme+soğuk pres yöntemine göre pekleştirmede daha üstün olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 4.30. Farklı yöntemler ile üretilen alaşımların Vicker's sertlik değerleri

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Al-6Si-0.3Cu-0.3X (X= Be, Sb, Sc ve Ti) alaşımı önce indüksiyon ergitme yöntemi ile külçe olarak ve eriyik eğirme yöntemi ile şerit olarak üretildi. Şerit alaşımların pekleştirilme işleminde ise iki farklı yöntem kullanıldı. Bunlardan birincisi SPS yöntemi olup, şeritlerin eş zamanlı olarak basınçla birlikte ısıtılma maruz bırakılması işlemidir. Diğer yöntemde ise şeritler önce kriyojenik öğütme ile toz formuna getirildi daha sonra ise soğuk preslenip ısıtılma maruz bırakıldı. Üretilen alaşımların, kristal yapı, mikroyapı ve mekanik özellikleri hem üretim yöntemi hem de katkılama elementleri bakımından değerlendirilmiştir. Buna göre;

- XRD analizlerinde, külçe alaşımlarında Al ve Si ait mümkün olan tüm kırınım pikleri gözlemlendi. Bunun dışında herhangi bir safsızlık pikine rastlanmadı. Katkı elementlerinin kırınım deseninde görünmeyişi, bu elementlerin büyük oranda Al matrisi içerisinde çözünmesiyle açıklandı. Eriyik eğirme yöntemi ile üretilen şerit alaşımlarda, Si piklerinde belirgin bir genişleme gözlemlendi. Bu durum, şerit alaşımlarda nano-kristal bir yapı oluştuğunu göstermektedir. Kriyojenik öğütme ile toz formuna getirilen şeritlerde öğütme esnasında oluşan oksit pikleri saptandı. Ayrıca, Si'ye ait pik genişliği artmıştır. Bu durum öğütme esnasında meydana gelen tane büyümesinden kaynaklanmaktadır. Tozların ısıtılma işlemi sonrası Si pikinin genişliğinin daha da arttığı görüldü. Bu durum, aşırı doymuş Si atomların çökmesi olarak yorumlandı.
- Optik mikroskop ve SEM görüntülerinden, külçe alaşımların α -Al ve ötektik Si'dan oluşan bir mikroyapı sahip olduğu görüldü. Katkısız alaşımda, ötektik Si'lerin iri taneli ve köşeli yapıda olduğu ancak katkı elementlerinin ötektik yapıyı incelttiği belirlendi. Be, Sb ve Ti katkılı alaşımlarda ise köşeli ötektik Si fazı küresel yapıya dönüştü. Hızlı katılaştırılan şeritlerde, mikroyapının tamamen homojen ve ince yapıli ötektik Si'lerden meydana geldiği görülmüştür. Si'nin tane boyut 1 mikronun altına küçülmüştür. Ayrıca, Si fazının ağ yapılı şekilde dağıldığı görüldü. Şerit alaşımların, kesit yapısı incelendiğinde, disk yüzeyinin homojen ve çok ince yapıli, hava yüzeyinin ise daha kaba bir

mikroyapıda olduğu bulundu. Külçe formuna getirilen şeritlerde, Si fazının ısıtılma işlemi neticesinde tekrar kabalaştığı görüldü. Şeritler arasındaki bağlanmanın SPS alaşımlarda daha iyi olduğu gözlemlendi.

- Vicker's sertlik analizlerinde, külçe alaşımların sertlik değerlerinin literatürle uyumlu olduğu ve katkı elementlerinin alaşımın sertliğini artırdığı saptandı. En yüksek sertlik değerleri, homojen ve ince mikroyapıya sahip hızlı katılaştırılan alaşımlarda görüldü. SPS alaşımlarda, Si fazında görülen kabalaşmaya paralel olarak sertlik değerleri bir miktar azalmıştır. En düşük sertlik değerleri ise soğuk preslenen şeritlerde görüldü. Bu durumun, şeritler arası kaynaşmanın yeterince gerçekleşmemesinden kaynakladığı sonucu varılmıştır. Katkı elementlerinden, özellikle Sb katkısının hem şerit hem de SPS alaşımında en yüksek değere sahip olduğu bulundu.

Sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, hızlı katılaştırılan şerit alaşımların külçe formuna getirilmesinde SPS yönteminin daha etkili olduğu görüldü. Ayrıca katkı elementleri arasında Sb katkılı alaşımın daha yüksek mukavemet değeri sergilediği sonucuna varılmıştır.

6. KAYNAKÇA

- Aariuser. (2021, 05 26). *Wikimedia Commons*. 05 10, 2022 tarihinde https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/26/Aluminium_oxide_A.jpg adresinden alındı
- Ağaoğulları, D. (2019). Effects of ZrC content and mechanical alloying on the microstructural and mechanical properties of hypoeutectic Al-7 wt.% Si composites prepared by spark plasma sintering. *Ceramics International*, 45(10), 13257- 13268. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.04.013>
- Alshmri, F. (2012). Rapid Solidification Processing: Melt Spinning of Al-High Si Alloys. *Advanced Materials Research*, 283- 290, 1740-1746. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.383-390.1740>
- Anselmi-Tamburini, U. (2021). Spark plasma sintering. M. Pomeroy içinde, *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses* (1st Edition b., Cilt 1, s. 294- 310). Elsevier Inc.
- Apelian, D. (2009). *Aluminum Cast Alloys: Enabling Tools for Improved Performance*. North American Die Casting Association.
- Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2014). *The Science and Engineering of Materials* (Seventh b.). Boston, The United State of America: Cengage Learning.
- Atxaga, G., Pelayo, A., & Irisarri, A. (2001). Effect of microstructure on fatigue behaviour of cast Al-7Si-Mg alloy. *Materials Science and Technology*, 17(4), 446-450. <https://doi.org/10.1179/026708301101510023>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). *Materials Science and Engineering* (9th Edition b.). The United States of America: John Wiley & Sons Inc.
- Campell, J. (2003). *Castings* (2. Baskı b.). United Kingdom: Butterworth-Heinemann.
- Chen, J., Wen, F., Liu, C., Li, W., Zhou, Q., Zhu, W., . . . Guan, R. (2021). The microstructure and property of Al-Si alloy improved by the Sc-microalloying

- and Y2O3 nano-particles. *Science and Technology of Advanced Materials*, 22(2), 205-217. <https://doi.org/10.1080/14686996.2021.1891841>
- Çetin, A. (2017, Eylül). Alüminyum Döküm Alaşımları. *Dökümhane Eğitim Projesi*(4).
- Davis, J. R. (2001). Alloying: Understanding the Basics. *Alloying: Understanding the Basics* (s. 351-416). içinde Materials Park, Ohio 44073-0002, The United States of America: ASM International.
- Eroğlu, G., & Şahiner, M. (2018). *Dünyada ve Türkiye'de Alüminyum*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. Ankara: Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı.
- ETKB. (2020, 07 14). *Enerji İşleri Genel Müdürlüğü Ulusal Enerji Denge Tabloları Raporu*. TC Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. TC Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı:
https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/Ulusal_Enerji_Denge_Tablolar/2020.xlsx adresinden alındı
- Farahany, S., Ourdjini, A., Idrisi, M., & Shabestari, S. (2013). Evaluation of the effect of Bi, Sb, Sr and cooling condition on eutectic phases in an Al-Si-Cu alloy (ADC12) by in situ thermal analysis. *Thermochimica Acta*, 559, 59-68. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2013.02.024>
- Farkašová, M., Tillová, E., & Chalupová, M. (2013). Modification of Al-Si-Cu cast alloy. *FME Transactions*, 41(3), 210- 215.
- Guo, J., Guan, Z.-P., Yan, R.-F., Ma, P.-K., Wang, M.-H., Zhao, P., & Wang, J.-G. (2020). Effect of Modification with Different Contents of Sb and Sr on the Thermal Conductivity of Hypoeutectic Al-Si Alloy. *Metals*, 10(12), 1637-1650. <https://doi.org/10.3390/met10121637>
- Hadef, F., & Otmani, A. (2015). Mechanical Alloying/Milling. M. Aliofkhaeaei içinde, *Handbook of Mechanical Nanostructuring* (s. 263-276). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.

- Haghighyeghi, R., & Timelli, G. (2021). An investigation on primary Si refinement by Sr and Sb additions in a hypereutectic Al-Si alloy. 283. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128779>
- Hedge, S., & Prabhu, K. N. (2008). Modification of Eutectic Silicon in Al-Si alloys. *Journal of Material Science*, 43(9), 3009-3027. <https://doi.org/10.1007/s10853-008-2505-5>
- Higgins, R., & Bolton, W. (2021). *Materials for Engineers and Technicians* (Seventh Edition ed.). New York: Routledge Taylor & Francis Group.
- Ibrahim, M. F., Alkahtani, S. A., Abuhasel, K. A., & . Samuel, F. H. (2015). Microstructural Characterization of Beryllium Treated Al-Si Alloys. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 1- 10. <https://doi.org/10.1155/2015/673025>
- Jones, H. (1984). Microstructure of Rapidly Solidified Materials. *Materials Science and Engineering*, 65, 145- 156. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(84\)90208-8](https://doi.org/10.1016/0025-5416(84)90208-8)
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2010). *Manufacturing Engineering and Technology* (Sixth edition b.). New York: Prentice Hall Pearson Education, Inc.
- Kang, S.-J. L. (2005). *Sintering*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Karimi-Jafari, M., Kowal, K., Ul-Haq, E., & Tofail, S. (2017). Spark Plasma Sintering of Lead-Free Ferroelectric Ceramic Layers. M. Hashmi içinde, *Comprehensive Materials Finishing* (Cilt 3, s. 347-355). Elsevier Inc.
- Katiyar, N. K., Biswas, K., & Tiwary, C. (2021). Cryomilling as environmentally friendly synthesis route to prepare nanomaterials. *International Materials Reviews*, 66(7), 493-532. <https://doi.org/10.1080/09506608.2020.1825175>
- Kaufman, J. G., & Rooy, E. L. (2004). *Aluminum Alloy Castings*. ASM International.
- Kaya, H., & Aker, A. (2017). Effect of alloying elements and growth rates on microstructure and mechanical properties in the directionally solidified Al-Si-X

- alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 694, 145-154.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.09.199>
- Kissell, J. R., Pantelakis, S. G., & Haidemenopoulos, G. N. (2004). Aluminum and Aluminum Alloys. J. K. Wessel içinde, *Handbook of Advanced Materials* (s. 351-463). The United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Lavernia, E. J., & Srivatsan, T. S. (2010). The rapid solidification processing of materials: science, principles, technology, advances, and applications. *Journal of Materials Science*(45), 287- 325.
- Li, R., Li, R., Zhao, Y., He, L., Li, C., Guan, H., & Hu, Z. (2004). Age-hardening behavior of cast Al–Si base alloy. *Materials Letters*, 58(15), 2096- 2101.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2003.12.027>
- Makhlouf, M. M., & Guthy, H. (2001). The aluminum–silicon eutectic reaction: mechanisms and crystallography. *Journal of Light Metals*, 1(4), 199- 218.
[https://doi.org/10.1016/S1471-5317\(02\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S1471-5317(02)00003-2)
- Manani, S., Patodi, A., Verma, M. N., & Pradhan, A. K. (2022). Comparative Study of Microstructure and Properties of Hypoeutectic Al-Si Alloys Being Cast With and Without Melt Thermal Treatment. *Metallography, Microstructure, and Analysis*. <https://doi.org/10.1007/s13632-022-00855-w>
- Meenia, S., Khan MD, F., Babu, S., Immanuel, R., Panigrahi, S., & Janaki Ram, G. (2016). Particle refinement and fine-grain formation leading to enhanced mechanical behaviour in a hypo-eutectic Al–Si alloy subjected to multi-pass friction stir processing. *Materials Characterization*, 113, 134-143.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.01.011>
- Milligan, J., Vintila, R., Brochu, & M. (2009). Nanocrystalline eutectic Al–Si alloy produced by cryomilling. *Materials Science and Engineering: A*, 508(1-2), 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.12.017>

- Munir, Z. A., Anselmi- Tamburini, U., & Ohyanagi, M. (2006). The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method. *Journal of Materials Science*(41), 763- 777.
- Paraskevas, D., Vanmeensel, K., Vleugels, J., Dewulf, W., Deng, Y., & Duflou, J. R. (2014). Spark Plasma Sintering As a Solid-State Recycling Technique: The Case of Aluminum Alloy Scrap Consolidation. *MDPI Materials*, 7(8), 5664- 5687.
- Prukkanon, W., Srisukhumbowornchai, N., & Limmaneevichitr, C. (2009). Modification of hypoeutectic Al–Si alloys with scandium. *Journal of Alloys and Compounds*, 477(1-2), 454-460. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.10.016>
- Raghukiran, N., & Kumar, R. (2016). The role of the bimodal distribution of ultra-fine silicon phase and nano-scale V-phase (AlSi₂Sc₂) on spark plasma sintered hypereutectic Al–Si–Sc alloys. *Materials Science & Engineering: A*, 657, 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.01.069>
- Rathod, N., & Manghani, J. (2012). Effect of modifier and grain refiner on cast Al–7Si aluminum alloy : a review. *International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development*, 5(2), 574-582.
- Rejaeian, M., Karamouz, M., Emamy, M., & Hajizamani, M. (2015). Effects of Be additions on microstructure, hardness and tensile properties of A380 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(11), 3539-3545. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63951-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63951-6)
- Safon. (2007). *Wikimedia Commons*. 05 10, 2022 tarihinde https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/11/Bauxite_h%C3%A9rault.JPG/800px-Bauxite_h%C3%A9rault.JPG adresinden alındı
- Saheb, N., Laoui, Tahar, Daud, A., & Harun, M. (2001). Influence of Ti addition on wear properties of Al–Si eutectic alloys. *Wear*, 249(8), 656- 662. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00687-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00687-1)
- Sales, R. C., Felipe Junior, P., Paradela, K. G., Garção, W. J., & Ferreira, A. F. (2018). Effect of Solidification Processing Parameters and Silicon Content on the

- Dendritic Spacing and Hardness in Hypoeutectic Al-Si Alloys. *Materials Research*, 21(6). <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2018-0333>
- Seensattayawong, P., Pandee, P., & Limmaneevichitr, C. (2018). Impression creep properties of hypoeutectic Al-Si alloys with scandium additions. *Materials Today: Proceedings*, 5(3), 9440-9446. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.10.122>
- Sigworth, G. K., & Kuhn, T. A. (2007). Grain refinement of aluminium casting alloys. *International Journal of Metalcasting*, 1(1), 31- 40. <https://doi.org/10.1007/BF03355416>
- Smallman, R., & Bibshop, R. J. (1999). *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering* (Sixth Edition b.). Butterworth- Heinemann.
- Sunol, J. J., & Fort, J. (2008). Materials developed by mechanical alloying and melt spinning. *International Review of Physics*, 2(1), 31-35.
- Survey, U. G. (2019). *Mineral Commodity Summaries 2019*. USGS Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/70202434>
- Suryanarayana, C. (2001). Mechanical alloying and milling. *Progress in Materials Science*, 46(1-2), 1-184.
- TALSAD. (2021). *Dünyada ve Türkiye'de Alüminyum 2020 Yılı Raporu*. Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği.
- Tang, P., Li, W., Wang, K., Du, J., Chen, X., Zhao, Y., & Li, W. (2017). Effect of Al-Ti-C master alloy addition on microstructures and mechanical properties of cast eutectic Al-Si-Fe-Cu alloy. *Materials & Design*, 115, 147- 157. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.036>
- Uzun, O., Karaaslan, T., & Keskin, M. (2001). Production and Structure of Rapidly Solidified Al-Si Alloys. *Turkish Journal of Physics*, 25(5), 455- 466.
- Vargel, C. (2020). *Corrosion of Aluminium* (2nd b.). Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099925-8.00004-1>

- Vijeesh, V., & Prabhu, K. N. (2014). Review of Microstructure Evolution in Hypereutectic Al–Si Alloys and its Effect on Wear Properties. *Transactions of the Indian Institute of Metals*(67), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s12666-013-0327-x>
- Wang, E. R., Hui, X. D., Wang, S. S., Zhao, Y. F., & Chen, G. L. (2010). Improved mechanical properties in cast Al–Si alloys by combined alloying of Fe and Cu. *Materials Science and Engineering: A*, 527(29- 30), 7878-7884. <https://doi.org/DOI: 10.1016/j.msea.2010.08.058>
- Warmuzek, M. (2004). *Aluminum-Silicon Casting Alloys*. ASM International.
- Yağcı, T., Cöcen, Ü., Çulha, O., & Korkmaz, A. (2021). Alüminyum Alaşımlarına Dair Son Yıllardaki Akademik ve Endüstriyel Gelişmelere Genel Bakış ve Değerlendirme. *Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(3).
- Yamamoto, K., Takahashi, M., Kamikubo, Y., Sugiura, Y., Iwasawa, S., & Nakata, T. (2021). Optimization of Cu content for the development of high-performance T5-treated thixo-cast Al–7Si–0.5Mg–Cu (wt.%) alloy. *Journal of Materials Science & Technology*, 93, 178- 190. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.03.036>
- Ye, H. (2003). An overview of the development of Al–Si-alloy based material for engine applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 12(3), 288-297. <https://doi.org/10.1361/105994903770343132>
- Zamani, M. (2015). Al-Si Cast Alloys- Microstructure and Mechanical Properties at Ambient and Elevated Temperature. Sweden: School of Engineering, Jönköping University Department of Materials and Manufacturing.
- Zhang, W., Liu, Y., Yang, J., Dang, J., Xu, H., & Du, Z. (2012). Effects of Sc content on the microstructure of As-Cast Al-7 wt.% Si alloys. *Materials Characterization*, 66, 104-110. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.11.005>

7. EKLER

EK 1.

Name and formula

Reference code: 98-005-3775
Compound name: Aluminum
Common name: Aluminum
Chemical formula: Al_1

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
Space group: $Fm\bar{3}m$
Space group number: 225

a (Å): 4.0440
b (Å): 4.0440
c (Å): 4.0440
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 90.0000

Calculated density (g/cm³): 2.71
Measured density (g/cm³): 2.71
Volume of cell (10⁶ pm³): 66.14
Z: 4.00

RIR: 4.41

Subfiles and quality

Subfiles: User Inorganic
User Metallic
Quality: User From Structure (=)

Comments

Creation Date: 1.04.2003
Modification Date: 1.02.2013
Original ICSD space group: $Fm\bar{3}m$, SB 1, 43-44. Cell from 2nd ref
(Jette et al.): 4.051. M.p.=933.5 K. At least one temperature factor missing in the paper.. No R value given in the paper.. X-ray diffraction from single crystal
Structure type: Cu
The structure has been assigned a PDF number (experimental powder diffraction data): 4-787
The structure has been assigned a PDF number (calculated powder diffraction data): 01-071-4625
Structure type: Cu
Recording date: 4/1/2003
Modification date: 2/1/2013
ANX formula: N

PDF code: 00-004-0787

Publication title: Roentgenspektroskopische Untersuchungen einiger Metalllegierungen nach Seemann-Bohlin

ICSD collection code: 53775

Structure: Cu

Chemical Name: Aluminum

Second Chemical Formula: Al

References

Structure: Lange, H., *Journal of the Institute of Metals*, **31**, 193 - 206, (1924)

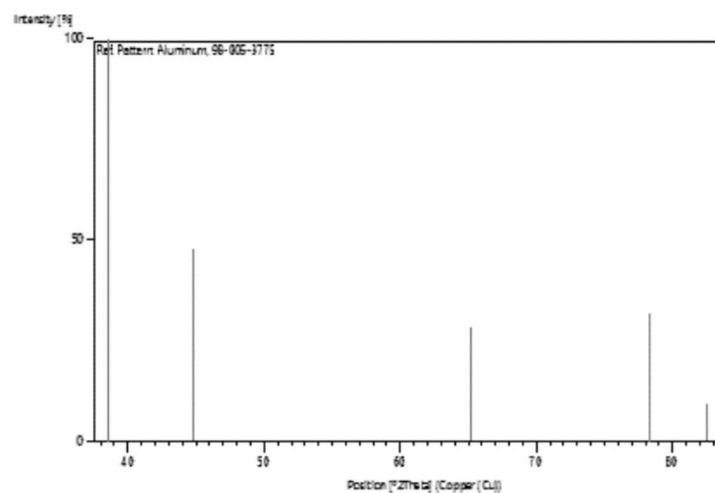
Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	2.33480	38.528	100.0
2	0	0	2	2.02200	44.786	47.7
3	0	2	2	1.42977	65.198	28.7
4	1	1	3	1.21931	78.359	31.9
5	2	2	2	1.16740	82.576	9.1

Structure

No.	Name	Elem.	X	Y	Z	Biso	sof	Wyck.
1	Al1	Al	0.00000	0.00000	0.00000	0.5000	1.0000	4a

Stick Pattern



EK 2.

Name and formula

Reference code: 98-004-3610
Compound name: Silicon
Common name: Silicon
Chemical formula: Si₁

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
Space group: F d -3 m
Space group number: 227
a (Å): 5.4300
b (Å): 5.4300
c (Å): 5.4300
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 90.0000
Calculated density (g/cm³): 2.33
Measured density (g/cm³): 2.33
Volume of cell (10⁶ pm³): 160.10
Z: 8.00
RIR: 4.78

Subfiles and quality

Subfiles: User Inorganic
Quality: User From Structure (=)

Comments

Creation Date: 15.07.2000
Modification Date: 1.04.2006
Original ICSD space group: FD3-MS. M.p. 1683 K
Cell for powder, heated: 5.43070
Cell for powder, unheated: 5.43081
Cell for etched crystal bar: 5.43048 (Dm=2.3289). Measured at unetched crystal fragments. At least one temperature factor missing in the paper.. No R value given in the paper.. X-ray diffraction from single crystal
Structure type: C(cF8)
The structure has been assigned a PDF number (experimental powder diffraction data): 27-1402
The structure has been assigned a PDF number (calculated powder diffraction data): 01-089-2955
Structure type: C(cF8)
Recording date: 7/15/2000
Modification date: 4/1/2006
ANX formula: N
Z: 8
Authors density: 2.329
Calculated density: 2.33

Pearson code: cF8
 Wyckoff code: a
 PDF code: 00-027-1402
 Structure TIDY: TRANS Origin 1/8 1/8 1/8
 Structure TIDY: REMARK Transformed from non-centrosymmetric setting.
 Publication title: Perfection of the lattice of dislocation-free silicon, studies by the lattice-constant and density method
 ICSD collection code: 43610
 Structure: C(cF8)
 Chemical Name: Silicon
 Second Chemical Formula: Si

References

Structure: James, W.J.;Borgeaud, P.;Straumanis, M.E., *Journal of Applied Physics*, **32**, 1382 - 1384, (1961)

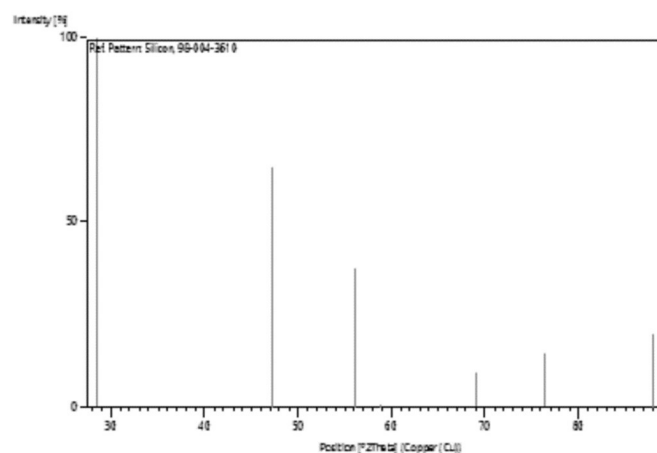
Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	3.13501	28.447	100.0
2	0	2	2	1.91979	47.312	65.0
3	1	1	3	1.63721	56.133	37.8
4	2	2	2	1.56751	58.868	0.0
5	0	0	4	1.35750	69.144	9.8
6	1	3	3	1.24573	76.392	14.4
7	2	2	4	1.10839	88.050	19.9

Structure

No.	Name	Elem.	X	Y	Z	Biso	sof	Wyck.
1	Si1	Si	0.12500	0.12500	0.12500	0.5000	1.0000	8a

Stick Pattern



EK 3.

Name and formula

Reference code:	98-016-2660
Mineral name:	Cristobalite beta
Compound name:	Cristobalite beta
Common name:	Cristobalite beta
Chemical formula:	O ₂ Si ₁

Crystallographic parameters

Crystal system:	Orthorhombic
Space group:	F d d 2
Space group number:	43
a (Å):	7.1320
b (Å):	7.1320
c (Å):	7.1320
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	90.0000
Calculated density (g/cm ³):	2.20
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	362.77
Z:	8.00
RIR:	5.61

Subfiles and quality

Subfiles:	User Inorganic User Mineral
Quality:	User From Structure (=)

Comments

Creation Date:	1.08.2009
Modification Date:	30.12.1899
Original ICSD space group:	FDD2. The Fd3-m structure (ICSD 162659) is a disordered superposition of Fdd2 cells, in each of which the O atoms fill all 16 positions. X-ray diffraction (powder). Temperature factors available 573. Standard deviation missing in cell constants
Temperature in Kelvin:	
Compound with mineral name:	Cristobalite beta
Recording date:	8/1/2009
Mineral origin:	synthetic
ANX formula:	AX2
Z:	8
Calculated density:	2.2
R value:	0.054
Pearson code:	oF24
Wyckoff code:	b a
Publication title:	The structure of the beta-cristobalite phases of Si O2 and Al P O4
ICSD collection code:	162660

Chemical Name: Silicon Oxide
 Second Chemical Formula: Si O₂

References

Structure: Leadbetter, A.J.;Wright, A.F., *Philosophical Magazine, Serie 6 (1901-1925)*, **31**, 1391 - 1401, (1975)

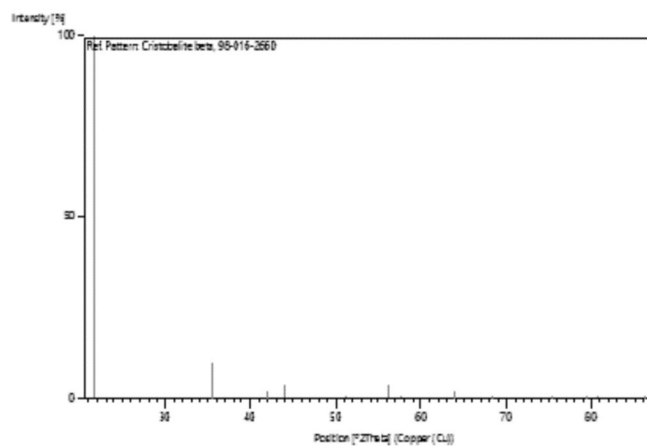
Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	4.11766	21.564	100.0
2	2	0	2	2.52154	35.575	9.8
3	3	1	1	2.15038	41.981	2.4
4	2	2	2	2.05883	43.943	3.8
5	4	0	0	1.78300	51.192	0.3
6	1	3	3	1.63619	56.171	3.5
7	4	2	0	1.59476	57.765	0.6
8	2	2	4	1.45581	63.892	2.2
9	5	1	1	1.37255	68.280	0.8
10	0	4	4	1.26077	75.320	0.6
11	1	3	5	1.20553	79.431	0.6
12	4	4	2	1.18867	80.788	0.2
13	2	6	0	1.12767	86.171	0.3

Structure

No.	Name	Elem.	X	Y	Z	Biso	sof	Wyck.
1	Ol	O	0.07920	0.17080	0.12500	3.5600	1.0000	16b
2	Si1	Si	0.00000	0.00000	0.00000	3.8500	1.0000	8a

Stick Pattern



EK 4.

Name and formula

Reference code: 98-009-9783
Compound name: Aluminium Oxide - Alpha
Common name: Aluminium Oxide - Alpha
Chemical formula: Al_2O_3

Crystallographic parameters

Crystal system: Hexagonal
Space group: R -3 c
Space group number: 167

a (Å): 4.7950
b (Å): 4.7950
c (Å): 13.1000
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 120.0000

Calculated density (g/cm³): 3.89
Volume of cell (10⁶ pm³): 260.84
Z: 6.00

RIR: 3.63

Subfiles and quality

Subfiles: User Inorganic
Quality: User From Structure (=)

Comments

Creation Date: 1.04.2005
Modification Date: 30.12.1899
Original ICSD space group: R3-CH. The coordinates are those given in the paper but the atomic distances do not agree with those calculated during testing. The coordinates are probably correct. At least one temperature factor missing in the paper. No R value given in the paper.
Structure type: Al₂O₃
Temperature in Kelvin: 1200. Synchrotron radiation (powder). Standard deviation missing in cell constants. Rietveld profile refinement applied
The structure has been assigned a PDF number (calculated powder diffraction data): 01-074-4582
Structure type: Al₂O₃
Recording date: 4/1/2005
ANX formula: N₂O₃
Z: 6
Calculated density: 3.89
Pearson code: hR10
Wyckoff code: e c
Structure TIDY: TRANS Origin 0 0 1/2
Publication title: High-temperature synchrotron X-ray diffraction study of phases in a gamma Ti Al alloy
ICSD collection code: 99783

Structure: Al₂O₃

Chemical Name: Aluminium Oxide - Alpha

Second Chemical Formula: Al₂O₃

References

Structure:

Zhecheva, A.;Sha, W.;Malinov, S.;Novoselova, T., *Materials Science and Engineering*, **371**, 103 - 112, (2004)

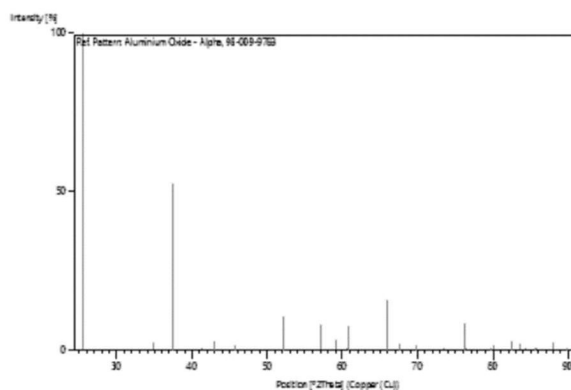
Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	1	2	3.50716	25.375	100.0
2	1	0	4	2.57150	34.861	2.8
3	1	1	0	2.39750	37.482	52.6
4	0	0	6	2.18333	41.318	0.2
5	1	1	3	2.10157	43.004	3.2
6	2	0	2	1.97924	45.808	1.7
7	0	2	4	1.75358	52.115	10.5
8	1	1	6	1.61427	57.003	8.3
9	2	1	1	1.55839	59.246	3.5
10	1	2	2	1.52632	60.620	0.0
11	0	1	8	1.52334	60.751	7.6
12	2	1	4	1.41539	65.945	15.8
13	0	3	0	1.38420	67.628	1.8
14	1	2	5	1.34642	69.795	1.8
15	2	0	8	1.28575	73.612	0.9
16	1	0	10	1.24931	76.134	8.6
17	1	1	9	1.24421	76.502	0.3
18	2	1	7	1.20258	79.664	1.0
19	2	2	0	1.19875	79.970	1.7
20	0	3	6	1.16905	82.434	3.1
21	2	2	3	1.15598	83.573	2.0
22	1	3	1	1.14730	84.351	0.8
23	3	1	2	1.13432	85.544	0.0
24	1	2	8	1.13309	85.659	0.3
25	0	2	10	1.10791	88.098	2.7
26	0	0	12	1.09167	89.759	0.5

Structure

No.	Name	Elem.	X	Y	Z	Biso	sof	Wyck.
1	O1	O	0.16670	0.00000	0.25000	0.5000	1.0000	18e
2	Al1	Al	0.00000	0.00000	0.14726	0.5000	1.0000	12c

Stick Pattern



8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	Fatih YAŞAR
Kişisel Bilgiler	Uyruğu: Doğum Tarihi ve Yeri:
İletişim Bilgileri	E-posta: Telefon:
Öğrenim Bilgileri	Lise: Lisans (1): Lisans (2): Yüksek Lisans: Doktora:
İş Deneyimi	