

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAPISAL UYGULAMALAR İÇİN ALÜMİNYUM
ESASLI MALZEMELERİN TOZ METALURJİSİ
KULLANILARAK GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Azim GÖKÇE

Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ
Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr.Ali Osman KURT
Ortak Danışman : Prof. Dr. Fehim FINDIK

Ağustos 2007

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAPISAL UYGULAMALAR İÇİN ALÜMİNYUM
ESASLI MALZEMELERİN TOZ METALURJİSİ
KULLANILARAK GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Azim GÖKÇE

Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ

Bu tez 06/08/2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Yrd. Doç. Dr. Ali Osman
KURT
Jüri Başkanı**

**Yrd. Doç. Dr. H.Özkan
TOPLAN
Üye**

**Yrd. Doç. Dr. Ramazan
YILMAZ
Üye**

ÖNSÖZ

Alüminyum alaşımları günümüzde birçok alanda yapısal malzeme olarak kullanılmaktadır. Diğer taraftan toz metalurjisi (T/M) de birçok endüstriyel alanda uygulama imkanı bulan bir üretim yöntemidir. Bu çalışmada; T/M yönteminin avantajlı yönlerinden faydalanılarak diğer yöntemlerle üretilen ve yaygın olarak kullanılan bazı alüminyum alaşımları yerine kullanılabilecek alternatif alaşımların üretilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmaların yürütülmesi sırasında her aşamada büyük desteğini gördüğüm, tez danışmanlarım Yrd.Doç.Dr. Ali Osman KURT ve Prof.Dr. Fehim FINDIK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Toz metalurjisi ile ilgili olarak tecrübesinden ve bilgilerinden faydalandığım Yrd.Doç.Dr. Ramazan YILMAZ ve alüminyum alaşımları konusunda bilgileriyle tezde büyük katkı sağlayan Yrd.Doç.Dr. Ramazan KAYIKÇI'ya teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalar sırasında yardımcı olan değerli arkadaşım Arş.Gör.Hüseyin ŞEVİK'e ve Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü'ndeki hocalarım ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu tez Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı (BAPK) tarafından 2006-50-01-78 kodlu proje ile desteklenmiştir. Metal tozlarının temininde yardımlarından dolayı Gürel Makina A.Ş. ve Magnezyum Metal A.Ş.'e yetkililerine destekleri için minnettarım.

Ayrıca, yetişmemde büyük emeği olan ve elde ettiğim başarılarda her zaman büyük pay sahibi olan aileme sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
TOZ METALURJİSİ.....	5
2.1. Temel Toz Metalurjisi Üretim Prosesleri.....	6
2.2. Toz Özellikleri ve Karakterizasyonu.....	7
2.3. Toz Harmanlama ve Karıştırma.....	14
2.4. Presleme ve Şekillendirme Teknikleri.....	15
2.4.1. Tek eksenli presleme.....	18
2.4.2. İzostatik presleme.....	19
2.4.2.1. Soğuk izostatik presleme.....	19
2.4.2.2. Sıcak izostatik presleme.....	20
2.5. Sinterleme.....	21
2.6. Sinter Sonrası İşlemler.....	24
BÖLÜM 3.	
ALÜMİNYUM ve ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI.....	26
3.1. Geleneksel Yöntemle Üretilen Alüminyum Alaşımları.....	27
3.1.1. Dövme alüminyum alaşımları.....	27

3.1.2. Döküm alüminyum alaşımları.....	28
3.2. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Alüminyum Alaşımları.....	29
BÖLÜM 4.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	32
4.1. Malzeme.....	32
4.2. Sinter Öncesi İşlemler.....	32
4.2.1. Toz karıştırma.....	32
4.2.2. Termal analiz.....	33
4.2.3. Toz yoğunlukları ve akış hızı ölçümleri.....	33
4.2.4. Toz şekillendirme işlemleri.....	33
4.3. Sinterleme.....	34
4.4. Sinter Sonrası İşlemler.....	36
4.4.1. Mikroyapısal analizler.....	36
4.4.2. Yoğunluk ölçümleri.....	36
4.4.3. Üç nokta eğme dayanımı ölçümleri.....	36
4.4.4. Sertlik ölçümleri.....	36
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	37
5.1. Tozların Özellikleri.....	37
5.1.1. Tozların fiziksel özellikleri.....	37
5.1.2. Tozların fiziksel özelliklerinin teknolojik özelliklere etkisi.....	41
5.1.3. Tozların termal özellikleri.....	43
5.1.4. Sinterleme.....	48
5.1.5. Mikro düzeyde alaşımlama ve Mg etkisi.....	56
5.1.6. Al ₁₅ Si ₅ Cu _{2.5} Mg ve Al ₁₅ Si ₅ Cu _{2.5} MgTi alaşımı.....	63
5.2. Mekanik Özellikler.....	66
5.2.1. Eğme dayanımı sonuçları.....	66
5.2.2. Kompozisyonların sertlik değişimleri.....	68
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	69

6.1. Sonuçlar	69
6.2. neriler.....	70
KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ.....	75

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

T/M	: Toz Metalurjisi
MPa	: Megapaskal
MPIF	: Metal Powder Industries Federation
ASTM	: Amerikan Society for Testing and Materials
BET	: “Brunauer-Emmet-Teller” analizi
CIP	: Soğuk İzostatik Presleme
HIP	: Sıcak İzostatik Presleme
DTA	: Diferansiyel Termal Analiz
TG	: Termal Gravimetri
DTC	: Diferansiyel Tarama Kalorimetresi
EDX	: Enerji Saçınımlı X-Işını analizi
XRD	: X Işını Kırınımı analizi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
HV	: Vickers Sertlik
TY	: Teorik Yoğunluk

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Bir araç için araç kütlesi ve hızı ile yakıt tüketimi arasındaki ilişki	2
Şekil 1.2. Japonya’da 2003 yılında otomotiv sektöründe toz metalurjisi yöntemiyle üretilen parçaların kullanım alanlarına göre ağırlık cinsinden yüzdeleri.....	3
Şekil 1.3. Bir otomobilde bulunan T/M parçaların kullanım alanları.....	3
Şekil 2.1. Temel toz metalurjisi üretim prosesleri.....	6
Şekil 2.2. Hall akışmetresi.....	8
Şekil 2.3. Tozların şeklinin görünür ve spesifik yoğunluğa etkisi.....	9
Şekil 2.4. Titreşimli yoğunluk ölçüm düzeneği	10
Şekil 2.5. Darbe sayısının titreşimli yoğunluğa etkisi.....	10
Şekil 2.6. ISO 3252 standardına göre partikül şekilleri.....	12
Şekil 2.7. Çeşitli toz karışımlarında ikinci faz tozların dağılımı.....	15
Şekil 2.8. Çeşitli metallerin sıkıştırma ile basınç- yoğunlaşma davranışları....	16
Şekil 2.9. Tozların sıkıştırılma esnasında kalıp içindeki davranışı.....	17
Şekil 2.10. Birkaç kez preslenmiş küresel tanelerin presleme sonrası deforme olmuş halinin SEM görüntüsü.....	17
Şekil 2.11. Tek eksenli toz sıkıştırma için tasarlanmış bir kalıp.....	18
Şekil 2.12. İzostatik presin kesit görünüşü.....	20
Şekil 2.13. Katı ve sıvı faz sinterleme sıcaklık bölgeleri.....	22
Şekil 2.14. Sinterlemede itici güç $\Delta(\gamma A)$ altında sinterlemenin basit kurgusu.....	23
Şekil 2.15. Sinterleme basamakları.....	23
Şekil 2.16. Sinter sıcaklığının bazı mikroyapısal ve mekanik özelliklere etkisi.....	24
Şekil 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan tek eksenli toz sıkıştırma kalıbı	34

Şekil 4.2.	Üretilen numune ebatları.....	34
Şekil 4.3.	Sinterleme işlemlerinde kullanılan fırın ve düzeneği.....	35
Şekil 4.4.	Kompaktların sinterlenmesinde kullanılan sinter rejimi.....	35
Şekil 5.1.	Kullanılan tozların SEM görüntüleri.....	37
Şekil 5.2.	Yüksek magnifikasyonda görüntülenmiş titanyum ve magnezyum tozları.....	38
Şekil 5.3.	Toz boyut dağılımı grafikleri.....	39
Şekil 5.4.	Hazırlanan toz karışımlarının görünür ve titreşimli yoğunlukları..	41
Şekil 5.5.	Toz karışımlarının termal analiz grafikleri.....	45
Şekil 5.6.	Al-Cu faz diyagramı.....	47
Şekil 5.7.	Al-Si faz diyagramı.....	47
Şekil 5.8.	Saf alüminyuma ait 600°C’de 2 saat süre ile sinterlenmiş numunenin optik mikroyapı görüntüsü.....	49
Şekil 5.9.	Yüksek safiyette Al tozundan üretilmiş numunenin (a) SEM görüntüsü ve (b) EDX analizi yapılan noktalar.....	50
Şekil 5.10.	Al5Cu numuneye ait 590 °C’de 1.5 saat sinterleme sonrası mikroyapı görüntüsü.....	52
Şekil 5.11.	Al5Cu numuneye ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri...	53
Şekil 5.12.	Al5Cu numunede EDX analizi yapılan noktalar.....	53
Şekil 5.13.	Al5Cu alaşımından elde edilen SEM görüntüsü ve EDX analizi yapılan noktalar.....	55
Şekil 5.14.	Al5Cu0.5Mg numuneye 590°C’de 1.5 saat yapılan sinter sonrası optik mikroyapı görüntüsü.....	56
Şekil 5.15.	Al5Cu0.5Mg numuneye ait farklı büyütme ölçeklerinde alınmış SEM görüntüleri.....	57
Şekil 5.16.	Al5Cu0.5Mg numuneye ait SEM görüntüsü ve EDX analizi yapılan noktalar.....	58
Şekil 5.17.	Al5Cu0.5Mg alaşımına ait SEM görüntüsü ve EDX analizi yapılan noktalar.....	59
Şekil 5.18.	Al5Cu0.5Mg alaşımına ait kırılma yüzeyi görüntüsü	61
Şekil 5.19.	Al5Cu0.5Mg numuneye ait elementel haritalama görüntüleri.....	61
Şekil 5.20.	Al5Cu0.5Mn numuneye ait XRD grafiği.....	63
Şekil 5.21.	Al-Si-Cu üçlü sistemine ait katılma eğrileri.....	64

Şekil 5.22. Al ₁₅ Si ₅ Cu _{2.5} Mg alaşımı 620°C’de 2 saat sinter sonrası optik mikroyapı görüntüsü.....	65
Şekil 5.23. Al ₁₅ Si ₅ Cu _{2.5} MgTi alaşımının 620°C 2 saat sinterleme sonrası optik mikroyapı görüntüsü.....	65
Şekil 5.24. Sinterlenen numunelerin eğme dayanımı değerleri.....	66
Şekil 5.25. Sinterlenmiş numunelerin mikrosertlik değerleri.....	68

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Otomobil imalinde kullanılan toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş parçalar ve kullanılan metal tozlarının türleri.....	4
Tablo 2.1. Çeşitli toz özelliklerinin sıkıştırılabilirlik üzerine etkisi.....	11
Tablo 2.2 . Çeşitli toz boyut ölçüm sitemleri ve ölçebileceği tane boyutu sınırları.....	13
Tablo 3.1. 2000 yılından bugüne dünyada cevherden üretilen yıllık Al miktarı.....	26
Tablo 3.2. Dövme alüminyum serileri.....	28
Tablo 3.3. Dökme alüminyum serileri.....	28
Tablo 3.4. Bazı ticari alüminyum alaşımlarının bileşimleri	30
Tablo 3.5. Bazı ticari alüminyum tozlarından üretilmiş parçaların özellikleri.....	31
Tablo 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan tozlara ait özellikler.....	32
Tablo 4.2. Hazırlanan toz kompozisyonları.....	33
Tablo 5.1. Hazırlanan toz karışımlarının akış hızları.....	43
Tablo 5.2. Saf alüminyum numuneye ait Şekil 5.9-b`de belirtilen noktalardan yapılan EDX analiz sonuçları.....	49
Tablo 5.3. Şekil 5.12`de belirtilen noktalarda yapılan EDX analiz sonuçları...	54
Tablo 5.4. Şekil 5.13`de belirtilen noktalarda yapılan EDX analiz sonuçları...	55
Tablo 5.5. Şekil 5.16`da belirtilen noktalarda yapılan EDX analiz sonuçları...	58
Tablo 5.6. Şekil 5.17`de belirtilen noktalarda yapılan EDX analiz sonuçları..	60

ÖZET

Anahtar kelimeler: Alüminyum, toz metalurjisi, alaşım, sinterleme, metal tozları

Bu çalışmanın amacı, toz formunda element olarak karıştırılarak hazırlanan Al5Cu, Al5Cu0.5Mg, Al15Si5Cu2.5Mg ve Al15Si5Cu2.5MgTi toz metalurjisi (T/M) alaşımlarının sinterlenebilme, mikroyapı ve mekaniksel özelliklerinin araştırılarak otomobil endüstrisinde araçların dış kaporta bölümlerinde kullanılabilir malzemelerin geliştirilmesidir. Yüksek safiyette alüminyum (Al) ve bakır (Cu) gibi yerli metal tozu üreticilerinden temin edilen alaşım ana elementleri bir dizi T/M hazırlık süreçlerini takiben dikdörtgen şekilli 33.5 x 13.5 x 3 mm³ boyutlarında tek yönlü kalıp içerisinde preslenerek farklı sıcaklık ve sürelerde azot atmosferi altında sinterlenmiştir. Sinterlenmiş numunelerin mekaniksel davranışları ile kimyasal kompozisyon, mikroyapı ve sinterleme yöntemi arasındaki ilişkiler incelenerek optimum dayanım için gerekli değerler ortaya konmuştur. Dayanımın belirlenmesinde 3 nokta eğme testindeki akma dayanımı verileri ve sertlik değerleri esas alınmıştır. Bu çalışma ile mikro-alaşımlama tekniği kullanılarak herhangi bir sinter ve yağlayıcı katkısı kullanmaksızın saf Al tozlarından preslenmesi ve sinterlenmesi ile elde edilen yapıların mukavemet değerlerinin yaklaşık 5 kat ve sertlik değerlerinin ise 2 kat oranında arttırılabileceği görülmüştür. Saf Al tozlarından elde edilen numunelerin sinterleme sonrası mukavemet değerleri 84 MPa'dan ağırlıkça %5 Cu ilaveli Al5Cu alaşımı için 294 MPa değerine yükselmiştir. Mikro-alaşımlama ile Al5Cu içerisine ağırlıkça % 0,5 Mg tozlarının ilave edilmesi ile elde edilen yeni Al5Cu0.5Mg alaşımı için ise bu değer 466 MPa'a yükselmiştir. Al5Cu0.5Mg için üç nokta eğme testi sonrası numunelerin kırılmaması bu alaşımın plastik deformasyon kabiliyetlerinin de yüksek olduğu görülmüştür. Yapılan çalışma ile Al esaslı T/M alaşımları kolay ve seri imalata uygun yöntemlerle yüksek mukavemet ve sertlik değerlerinde elde edilebileceği gösterilmiştir. Bu alaşımların yapısal malzeme olarak özellikle otomotiv sektöründe kullanılabileceği düşünülmektedir.

THE DEVELOPMENT OF HIGH STRENGTH NEW Al-BASED ALLOYS FOR STRUCTURAL APPLICATIONS USING POWDER METALLURGY

SUMMARY

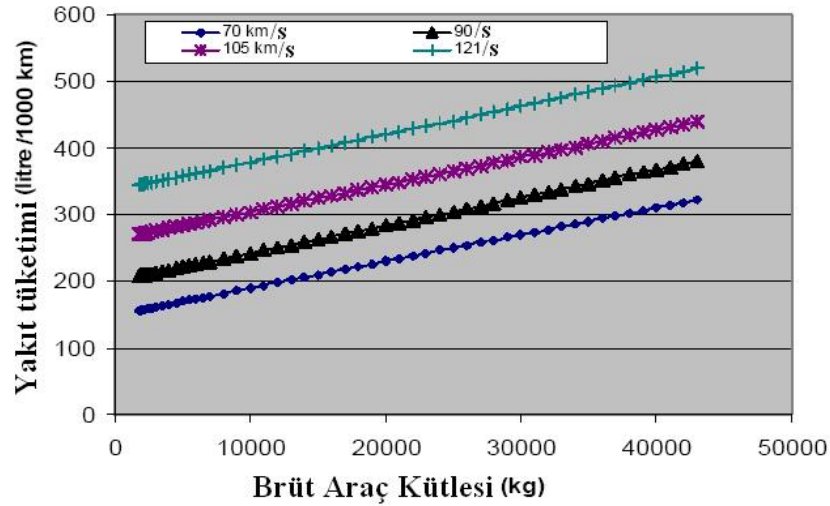
Keywords: Aluminium alloys, metal powders, powder metallurgy, compaction, sintering

The aim of this study is to develop new aluminium-based powder metallurgy alloys, i.e., Al5Cu, Al5Cu0.5Mg, Al15Si5Cu2.5Mg and Al15Si5Cu2.5MgTi, as an alternative to wrought parts for use in automotive bodywork applications. Powders mixed without any admixing of lubrication or sintering aids were annealed under N₂/H₂ atmosphere in order to eliminate or reduce any possible thin surface oxide films. The effects of the processing parameters such as sintering and microstructure on the mechanical properties of the produced alloys were studied using high purity metal powders, such as Al and Cu produced in homeland. Alloys were prepared using Al-base powders with some other elemental metal powders mixed in a micro and/or macro level before compacting them using 3.5x13.5x3 mm³ size rectangular floating die. Compacts suitable for three point bending test were sintered at different temperature and durations under pure nitrogen atmosphere. Optimum processing parameters were defined after examining mechanical properties, phase composition, micro-structural features of the sintered compacts. It was shown that using P/M production route with a micro-alloying technique, the strength value after sintering of the base Al powder (%99.6 pure) could be increased more than five times from 84 MPa to 466 MPa with a two times higher value in hardness. At three point bending test, the mean yield strength value of 294 MPa was obtained with the elemental powder mixture of Al5Cu alloy composition. The micro-addition of Mg (0.5wt.%) have resulted in an further increase in strength value of 466 MPa with a 20% increase in hardness of Al5Cu0.5Mg.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Doğal gaz ve fosil yakıt kaynaklarında azalma tespit edilmesi, bu kaynakların çok uzak olmayan bir gelecekte tükenmesi tehlikesi ve akaryakıt kullanan araçların tehlikeli boyutlara ulaşan CO₂ emisyonlarının yol açtığı sera etkisinden dolayı günümüzde otomobillerde ve diğer ulaşım araçlarında yakıt tasarrufu en çok aranan özelliklerden biri haline gelmiştir [1]. Otomobil üreticileri müşterilerine yakıt tasarrufu sağlayan, kullanım maliyeti daha az olan araçlar üretme çabası içindedir. Bu çaba üreticileri, otomobil parçalarını üretmek için alternatif yöntemler kullanmaya yönlendirmiştir [2]. Yakıt tasarrufu; motor verimini artırmak, aerodinamik araçlar üretmek, lastikler için dönme sürtünmesini azaltmak gibi yöntemlerle sağlanabilmektedir. Yakıt verimliliğini artırmanın en önemli koşullarından biri de araç ağırlığını düşürmektir [3]. Otomobillerin ağırlığını düşürmek amaçlanırken güvenlik, performans ve fiyat gibi unsurlardan da ödün verilmemesi gerekir [4].

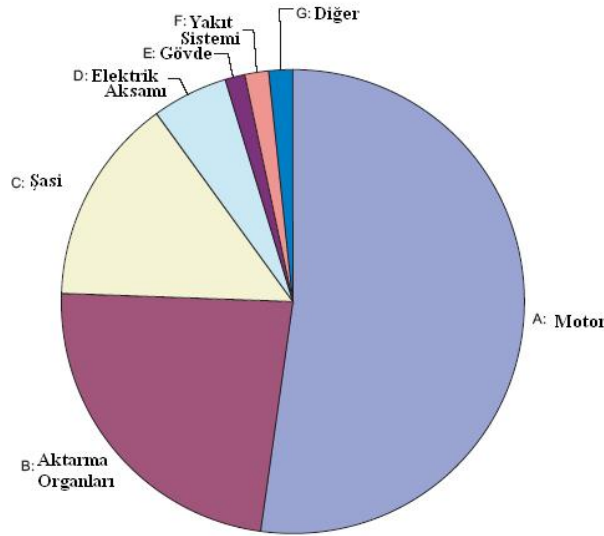
Bir araçta enerji tüketiminin yaklaşık % 27'sine aracın ağırlığından dolayı oluşan ivmelenme direncinin neden olduğu saptanmıştır [5]. Bir araçta ağırlığın 100 kg. azalmasıyla, 100 km`de yaklaşık 0,3–0,4 litre yakıt tasarrufu sağlanabileceği tahmin edilmektedir [6]. Araç ağırlığındaki %1 oranındaki artış tüketilen yakıt miktarında yaklaşık %0,7 oranında düşmeye sebep olmaktadır [7]. Büyük tonajlı araçlarda brüt araç ağırlığı-yakıt tüketimi grafiği Şekil 1.1'de görülmektedir. Ağırlıktaki düşüş yakıt sarfiyatıyla birlikte CO₂ emisyonunu da düşmektedir ve bundan dolayı günümüzde büyük önem kazanan, az yakıt tüketen ve doğaya en az zararı veren otomobilin üretilmesi amacıyla otomotiv sektöründe alüminyum esaslı malzemelerin kullanımında günden güne artış görülmektedir.



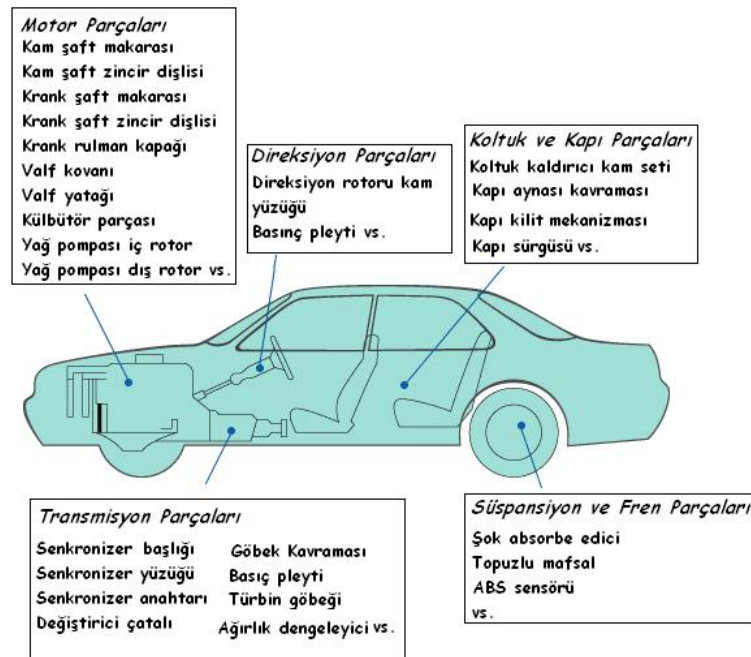
Şekil 1.1. Bir araç için araç kütlesi ve hızı ile yakıt tüketimi arasındaki ilişki [8]

Toz metalurjisi şekillendirilmiş metal tozları veya seramik tozlarını ergime sıcaklıklarının altındaki bir sıcaklıkta mukavemet kazandırılması suretiyle elde edilen bir imal yöntemidir. Günümüzde kullanılmakta olan anlamda toz metalurjisi yöntemi 1920'li yılların ortasından bu yana bilinmekte ve kullanılmaktadır. Endüstride başlıca kullanım tonaj açısından demir ve alaşım tozlarından üretilen parçalarda iken başlıca ekonomik değer sementle edilmiş karbür tozlarından üretilmiş parçalardadır [9].

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen parçaların kaba bir hesapla % 87.7'si otomotiv sektöründe, % 6.2'si elektrik makinelerinde, % 5.1'i endüstriyel makinelerde ve %1'i diğer endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Günümüzde Kuzey Amerika'da üretilmiş bir arabada yaklaşık 17–22.7 kg tozmetal parça bulunmaktayken bu rakam Avrupa'da üretilen arabalarda 7.3 kg Japonya'da üretilen arabalarda ise 7.1 kg kadardır [10]. Şekil 1.2.'de otomotiv sektöründe kullanılan tozmetal parçaların kullanım alanı yüzdeleri verilmiştir. Japonya'da 2003 senesinde otomotiv sektörü için üretilen tozmetal parçaların % 52.1'i motor parçalarında, % 23.5'i aktarma organlarında, %14.5'i şasi imalatında kullanılmıştır [11]. Toz üreticileri de en büyük müşterileri durumunda olan otomotiv üreticileri için yeni ticari toz alaşımları üretmek ve bir otomobil içindeki tozmetal parça miktarını artırmaya çalışmaktadır [12]. Şekil 1.3.'te bir otomobil içinde toz metalurjisi yöntemi ile üretilen bazı parçalar ve otomobil içindeki yerleri gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Japonya'da 2003 yılında otomotiv sektöründe toz metalurjisi yöntemiyle üretilen parçaların kullanım alanlarına göre ağırlıklı cinsinden yüzdeleri [11].



Şekil 1.3. Bir otomobilde bulunan TM parçaların kullanım alanları [13]

Alüminyum otomotiv sektöründe uzun yıllardır kullanılan bir malzeme olmasına rağmen kullanımı küçük hacimli araçların kapı, motor kapağı gibi kısımları ile sınırlanmıştır. Bununla beraber alüminyumun özgül ağırlığı çeliğin yaklaşık 1/3'ü kadar olduğundan üretilen araçta alüminyum esaslı parçaların kullanımının artırılmasıyla birlikte otomobil ağırlığında yüksek oranda indirime gidilebileceği düşünülebilir [14]. Dökme alüminyum alaşımları, özellikle alüminyum-silisyum

esaslı olan tipleri, düşük özgül ağırlıkları, düşük ergime noktası, mükemmel dökülebilirlik ve iyi korozyon dayanımlarından dolayı otomotiv ve havacılık uygulamalarında diğer malzemelere üstünlük sağlayan bir aday malzeme durumundadır.

Tablo 1.1. Otomobil imalinde kullanılan toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş parçalar ve kullanılan metal tozlarının türleri [15]

<i>Üretilecek parça</i>	<i>Kullanılan metal tozu türü</i>
ABS yüzüğü	Demir esaslı
Klima kompresör silindiri ve rotoru	Alüminyum/ Paslanmaz çelik
Dingil tutucu	Demir esaslı / Bakır
Denge mili mekanizması	Bronz
Rulman kapağı	Demir esaslı
Fren ABS sensor yüzüğü	Demir esaslı
Eksantrik mili (T/M uç kısımlar)	Demir esaslı
Eksantrik mili dişlisi, kasnağı, zincir dişlisi	Demir esaslı
Kavrama göbeği	Demir esaslı
Kavrama segmanı	Bronz
Kontrol valfi	Demir esaslı
Distribütör parçaları	Demir esaslı
Otomatik vites aksamı çevre dişlisi	Demir esaslı /Bronz
Motor valfi	Demir esaslı
Dişliler	Demir esaslı
Enjeksiyon pompası zincir dişlileri	Bakır / paslanmaz çelik
Manuel transmisyon parçaları	Demir esaslı
Yakıt pompası rulmanı	Bakır
Yağmur sensörü yüzüğü	Demir esaslı
Koltuk ayar dişli ve kaldıraçları	Demir esaslı
Şanzıman parçaları	Bakır / Paslanmaz çelik
Açılır tavan menteşe desteği	Paslanmaz çelik

T/M yöntemleri ile çeşitli otomobiller için parçalar üretilmekle birlikte alüminyum ve alaşımlarının gövde veya şasi elemanı olarak kullanımı yaygın değildir. Düşük yoğunluğa sahip olması nedeniyle araç ağırlığını düşürdüğünden alüminyumun otomobil gövdesi uygulamalarında kullanımının günden güne artacağı öngörülebilir [16].

BÖLÜM 2. TOZ METALURJİSİ

Toz metalurjisi (T/M) en basit tanımıyla, ortalama tane boyutu 150 mikrondan daha küçük, katı ve toz formundaki metal, alaşım veya seramiğin, şekli ve özellikleri önceden belirlenmiş bir parçaya dönüştürülmesi işlemidir. Geleneksel T/M işlemleri genel olarak toz üretimi, tozların tutulabilir bir “preform” halinde şekillendirilmesi ve partiküller arasında difüzyonun gerçekleşmesini sağlamak amacıyla ergime derecesi altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılmak suretiyle sinterlenmesi basamaklarından oluşur [9].

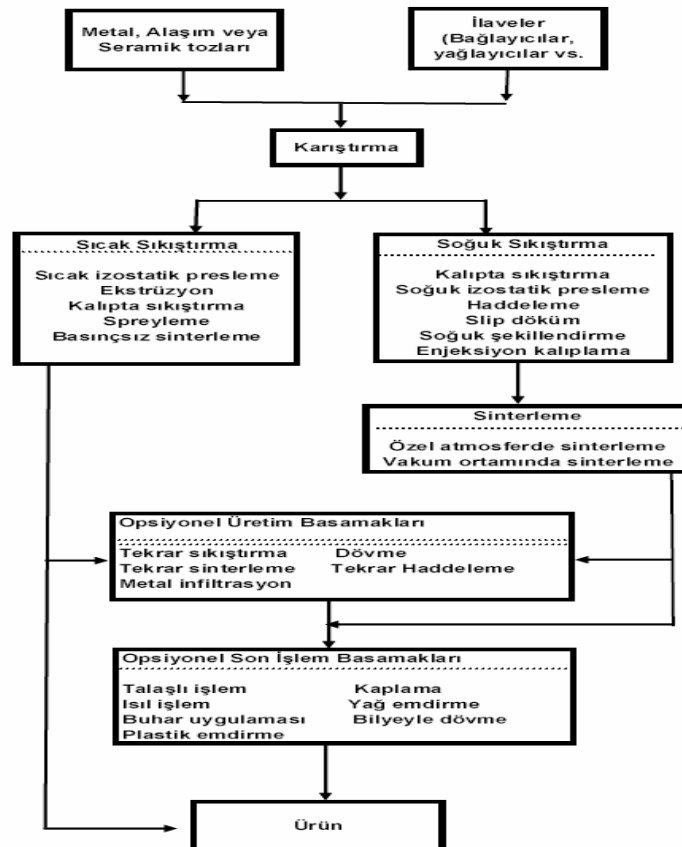
Altın, bakır, bronz gibi metal tozları ve birçok oksit tozu bilinen tarihin en başından beri pigment olarak dekoratif seramiklerde, boya ve mürekkep üretiminde kullanılmıştır. Altın tozuna en eski el yazmalarında rastlanabilmektedir. Bu tozların nasıl üretildiğine dair bir kanıt olmamasına rağmen metalin ergitilmesinden sonra granüle edilmesiyle üretildiği tahmin edilmektedir. İnsanoğlu tozların üretimini başardıktan ve bunları çeşitli amaçlarla kullandıktan sonra çekiçleme ile bu tozların katı bir yapı oluşturacak şekilde bir araya geldiğini keşfetmiştir [17]. Arkeolojik kanıtlara göre T/M yöntemi ilk defa M.Ö.2500 yılı civarında Persler tarafından kullanılmıştır.

Toz metalurjisi modern çağlardaki ilk önemli ticari kullanım alanlarından birini 1910 yılında üretilen lambalarda tungsten flamanların bu yöntemle üretilmesiyle yakalamıştır [18]. Bu teknoloji 1920'lerde büyük miktarda gözenekli bronz mil yatağı kovanlarının üretilmesi ile büyük aşama kaydetmiştir. İkinci dünya savaşı sırasında çok çeşitli alanlarda demir esaslı ve demir dışı malzemeler ve kompozitlerin T/M yöntemiyle üretiminde büyük gelişmeler yaşanmış ancak savaş sonrası 1960'lara kadar durağan bir gelişme göstermiştir. O zamandan bugüne T/M teknolojisi hızlı şekilde gelişmektedir. Toz metalurjisi, toz malzemelerden hızlı, ekonomik ve büyük miktarlarda ve istenilen hassasiyette parça üretimini sağlayan bir

yöntemdir. Üretilen parçalara ikincil işlemler uygulanabilir, örneğin, haddelenerek sac haline getirilebilir, ekstrüzyon ile çubuk haline getirilebilir veya izostatik presleme ile daha kompleks geometride parçalar üretilebilir [19]. Toz metalurjisi işlemi üretim sonrası işlem gereksiniminin minimum düzeyde olması, birim maliyetin düşük olması, parçanın kimyasal kompozisyonunun dolayısıyla mekanik ve fiziksel özelliklerinin homojen olması, istenilen kompozisyonlarda üretim yapılabilmesi gibi avantajları nedeniyle günümüzde en çok rağbet gören imal yöntemlerinden biridir.

2.1. Temel Toz Metalurjisi Üretim Prosesleri

Toz metalurjisi işlemi genel olarak tozların üretilmesi, üretilen tozlara gerekli katkıların ilavesi, karışımın homojen hale getirilmesi amacıyla karıştırılması, oluşturulan karışımın sıcak veya soğuk olarak şekillendirilmesi, sinterlenmesi ve son olarak gerek duyulursa sinter sonrası işlem süreçlerini kapsamaktadır. Temel T/M üretim prosesleri Şekil 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2.1. Temel toz metalurjisi üretim prosesleri [20]

2.2. Toz Özellikleri ve Karakterizasyonu

Toz metalurjisi yönteminde imal edilen ürünün özellikleri üzerinde, kullanılan tozlar büyük etkiye sahiptir. Tozların özellikleri iki alt ana bölümde incelenebilir.

Teknolojik özellikler: Toz akıcılığı, tozların ham ve titreşimli yoğunlukları, tozların sıkıştırılabilirliği.

Fiziksel özellikler: Tozların şekli, toz boyut dağılımı, spesifik yüzey alanı, tozların içinde bulunan safsızlıklar.

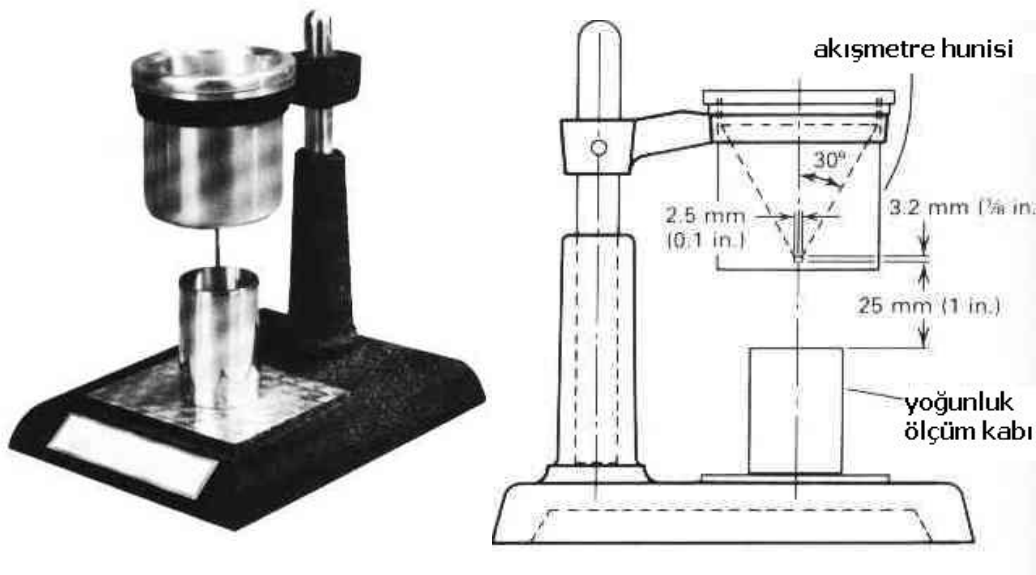
Toz akıcılığı tozların akma yetenekleri ile ilgili bir kavramdır. ISO 4490 standardına göre 50 gr tozun atmosfer şartlarında standart bir huni içerisinde geçiş zamanı ile tespit edilir. Toz akış hızının bilinmesi, büyük miktarlarda üretim yapılırken kalıp boşluğuna dolması gereken toz miktarının zamana göre belirlenmesinden dolayı önemlidir [17, 21].

Seri üretim sistemlerinde, kalıbın içine tozların dolması için gereken zaman toz akış hızına göre belirlenir. Sistemde tozların hızlı akması halinde kalıba dolması için gereken zaman kısa olacak, toz akıcılığının düşük olması durumunda ise tozlar kalıba daha yavaş dolacak ve dolayısıyla kalıba gerekli miktarda toz dolması için gereken zaman artacaktır. Sistemde kalıba istenen miktarda toz dolması için gereken zaman optimize edildikten sonra toz akıcılığı daha az veya daha fazla olan tozların sisteme girmesi halinde kalıba hedeflenenden farklı miktarda toz girecek dolayısıyla üretimi hedeflenen ürünün elde edilmesi mümkün olmayacaktır. Toz içindeki üniform olmayan topaklaşmalar, inklüzyonlar ve nem akış hızını etkileyeceği için T/M ile üretimde istenmeyen etkenlerdir.

Toz akıcılığını etkileyen en önemli faktörlerden biri taneler arası sürtünmedir. Taneler arası sürtünmeyi belirleyen etkenlerden en önemlileri tane yüzey alanı ve tane yüzey pürüzlülüğüdür. Yüzey alanı ve yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla taneler arasındaki sürtünme de artar ve akıcılık düşer. Şekilsiz tanelerin akıcılığı da aynı şekilde daha zayıftır. Tane boyut dağılımı aralığı büyüdükçe, büyük taneler

arasındaki boşlukların küçük taneler tarafından doldurulması ve böylece temas yüzeyi ve sürtünmenin artması ile akıcılıkta düşme görülecektir. Tüm bu bilgiler ışığında akıcılığı en iyi olan tozların aynı boyutta olan, yüzeyi kaba olmayan, küresel veya küresele yakın tozlar olduğu söylenebilir [22].

ISO 4490 standardına göre yapılan ölçümlerde kullanılan düzenek “Hall Akışmetresi” olarak adlandırılır. Hall Akışmetresi düzeneği 2.5 mm çapında deliği olan 6061-T6 alaşımı, yüzeyi duvar sürtünmesini en aza indirmek amacıyla işlenmiş bir huni ve tutucudan oluşur (Şekil 2.2). Daha önceden hazırlanmış 50 gr toz huniye boşaltılır ve huni ağzı açılır. İlk toz tanesinin düşmesi ile son tanenin düşmesi arasında kalan zaman kronometre ile ölçülür. Bulunan zaman değeri saniye cinsinden hesaplanır böylelikle kullanılan tozun akıcılığı gr/s cinsinden tespit edilmiş olur.

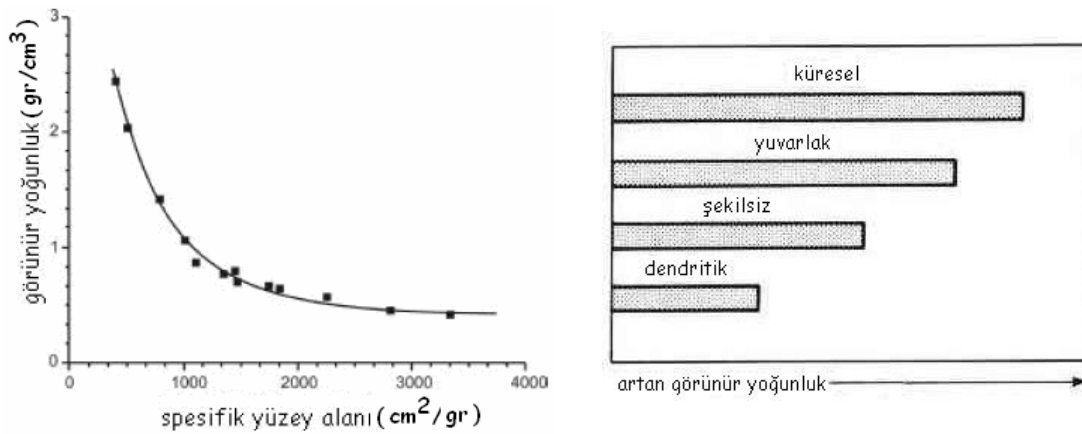


Şekil 2.2. Hall Akışmetresi [18]

ASTM B213 standardına göre Hall Akışmetresi'ndeki huninin toz geçişi için tasarlanan 2.5 mm çapındaki açıklığından herhangi bir sarsıntı vasıtasıyla veya sarsıntı olmaksızın geçemeyen tozlar serbest olarak akmayan tozlar olarak adlandırılır. Toz akıcılığını etkileyen faktörler olarak toz taneleri arasındaki sürtünme, toz boyutu ve şekli, malzeme tipi, çevresel faktörler sayılabilir [17].

Bir partikül malzemenin görünür yoğunluğu o malzemenin birim miktarının birim hacmine oranıdır. Toz malzemenin kapladığı hacim partikül paketlenme faktörüne,

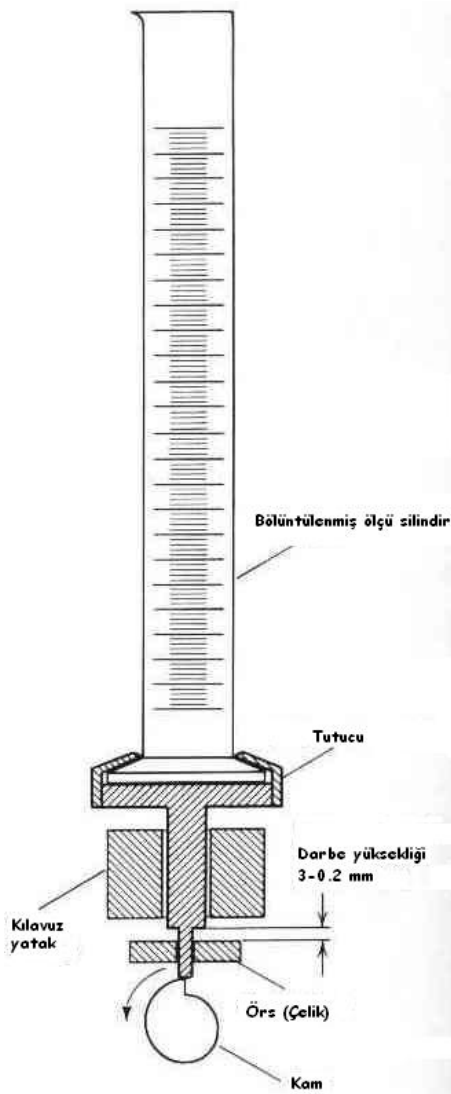
partikül paketlenme faktörü ise doldurma şekli, kabın şekli ve doldurma sırasındaki titreşim gibi etkenlere bağlıdır. Kıyaslama yapılabilmesi için malzemelerin görünür yoğunluğunun bulunmasında da Hall Akışmetresi kullanılır. Hall Akışmetresi altına konulan 25 cm³ hacmindeki bir kaba tozların serbest bir şekilde akması sağlanır ve kap içine dolan tozlar tartılarak kütlesi bulunur. Bulunan kütlenin sabit olan hacme bölünmesiyle tozların görünür yoğunluğu tespit edilir [9]. Görünür yoğunluk, kalıp ölçüleri ve pres hareketlerinin belirlenmesinde, tozların naklinde kullanılacak ekipmanların belirlenmesinde, tozların sinter davranışının belirlenmesinde büyük önem taşır [22]. Bir partikül malzemenin görünür yoğunluğu ayrıca toz boyutuna, toz şekline, tozların spesifik yüzey alanına, yüzey pürüzlülüğüne ve toz boyut dağılımına bağlıdır [17]. Spesifik yüzey alanı ve toz morfolojinin görünür yoğunluğa etkisi Şekil 2.3'te görülmektedir.



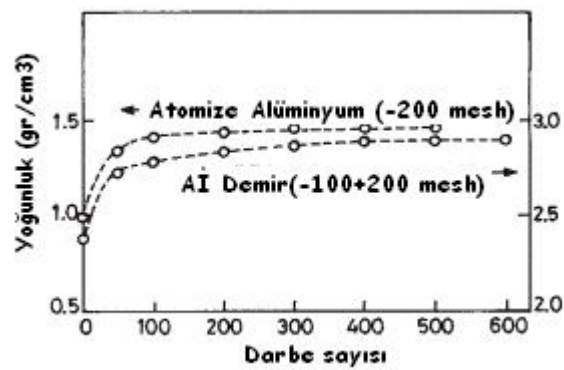
Şekil 2.3. Kullanılan tozların şeklinin ve spesifik yüzey alanının görünür yoğunluğa etkisi [22, 17]

Titreşimli yoğunluk, görünür yoğunluktan farklı olarak tozların bir kaba konmasından sonra kaba uzun süreli titreşim uygulanmasıyla elde edilen hacmin bulunması ve tozların ağırlığının bu hacme oranlanmasıyla bulunur. Hacimdeki en büyük azalma titreşim uygulanmasının ilk safhalarında görülür ve sonunda hacim daha fazla azalmaz ve bir değerde sabitlenir. Elde edilen bu değer tozların titreşimli hacmidir. Tozların titreşim kullanılarak yoğunlaştırma işleminde kaba yüzeyli, küçük taneli, belli geometrik şekli olmayan tozların titreşimle daha yoğun hale getirilme imkânı diğer tozlara göre daha fazladır. Bunun sebebi bu tozlar arasındaki sürtünme kuvvetlerinin diğer tozlara göre daha az olmasıdır [22].

Toz malzemelerin titreşimli yoğunluğunu ölçmek için kullanılan düzenek 3 parça olarak incelenebilir. Birinci parça 100 gr ağırlığa kadar ölçme kapasiteli ve 0.1 gram hassasiyetli terazi, ikinci parça 100 ml hacminde ve 0.2 ml hassasiyetinde ölçülendirilmiş silindirik şeffaf kap, ve son olarak üçüncü parça dakikada 100-250 titreşim arasında darbe üretebilecek bir mekanik sistem veya 100x100x50 mm³ ölçülerinde sert kauçuk bir tabakadır [18]. Titreşimli yoğunluk ölçümü de kullanılan darbe üretici mekanizma ve ölçülü silindir kap Şekil 2.4'te, darbe sayısı ile bağlantılı olarak yoğunluk değişimini gösteren grafik Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Titreşimli yoğunluk ölçüm düzeneği[17]



Şekil 2.5. Darbe sayısının titreşimli yoğunluğa etkisi [23]

Tam küresel partiküller ile teorik olarak ulaşılabilecek maksimum titreşimli yoğunluk % 74'tür [9].

Partikül malzemelerin titreşimli yoğunluğunun bulunması ile ilgili bilgiler ASTM B 527, MPIF 46, ISO 3953 standartlarında ayrıntılı olarak açıklanmıştır [17].

Partikül malzemelerin sıkıştırılabilirliği, bir dış basınç altında sıkışmaları ve daha yoğun bir yapı oluşturmalarının ölçülmesi ile ilgili bir kavramdır. Sıkışabilirlik belli bir sıkıştırma basıncında bulunan yoğunluk olarak veya belli bir yoğunluğa ulaşmak için gereken basınç değeri olarak tanımlanır. Tozların sıkışabilirliğini ilgili metal veya alaşımın sertliği, toz şekli, parça içindeki poroziteler, toz boyut dağılımı, metal dışı parçacıkların varlığı, alaşım elementleri veya yağlayıcıların katkısı büyük oranda etkilemektedir. Sıkıştırılabilirlik, yoğunlaşma parametresi cinsinden incelenecek olursa;

$$\text{Yoğunlaşma parametresi} = \frac{\text{sinter öncesi yoğunluk} - \text{görünür yoğunluk}}{\text{teorik yoğunluk} - \text{görünür yoğunluk}}$$

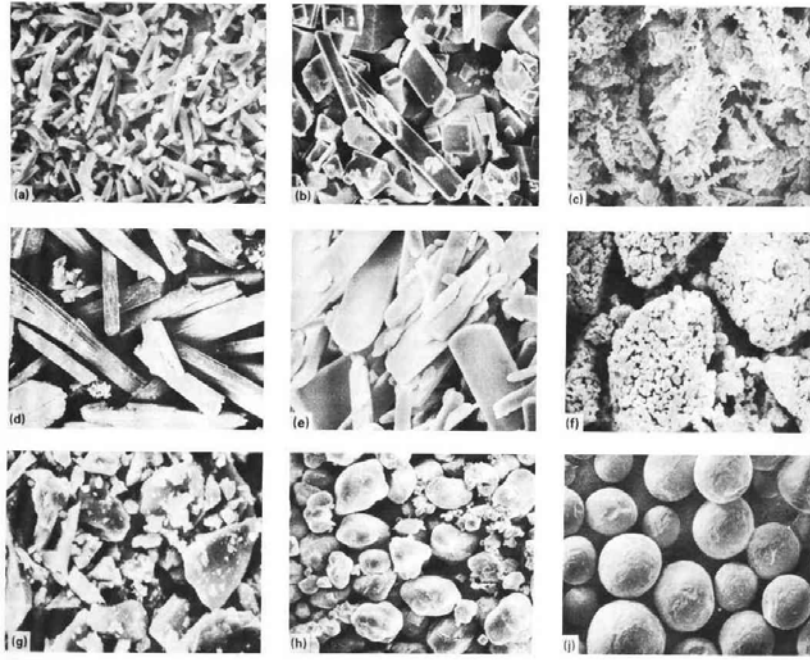
formülüyle açıklanır. Kullanılacak tozların sıkışabilirliği kullanılacak kalıbın dizaynı için önemlidir. Kalıp dizayn edilirken sıkışabilirliği fazla olan tozlar için kalıp boşluğu, sıkışma oranı iyi olmayan tozlar için dizayn edilen kalıp boşluğuna göre daha büyük yapılır [23]. Tablo 2.1’de partikül şekli ve safsızlıkların sıkışabilirliği nasıl etkilediği gösterilmiştir. Metal tozlarının sıkışabilirliği deneyiyle ilgili deney prosedürü ASTM B331, MPIF 45 ve ISO 3927 standartlarında açıklanmıştır [17].

Tablo 2.1. Çeşitli toz özelliklerinin sıkıştırılabilirlik üzerine etkisi [24]

<i>Toz tipi</i>	<i>Partikül Şekli</i>	<i>Safsızlık miktarı (%)</i>	<i>Basınç (MPa)</i>
Öğütülmüş Süngerimsi	Sünger, düzensiz	1.2	510
Su Atomize	Düzensiz, yuvarlanmış	0.2	680
İndirgenmiş Oksit	Düzensiz, süngerimsi	1.2	1300
Su Atomize	Düzensiz, yuvarlanmış	0.4	700
Su Atomize	Düzensiz, yuvarlanmış	0.8	770

(Kullanılan toz demir tozu olup basınç değeri, sinter öncesi yoğunluğun %90 olması için gerekli değerlerdir)

Tozların şekli; toz akıcılığı, görünür yoğunluk, sıkıştırılabilirlik ve sinterlenebilirlik gibi özelliklerini doğrudan etkilediği için en önemli toz karakteristiklerinden biridir [17]. Toz şeklini tarif etmek için uluslararası standartlara göre belirlenmiş nodüler, dendritik, asiküler, fiberimsi, pulsu, küresel, düzensiz, taneli gibi terimler kullanılır [9]. Şekil 2.6 da çeşitli karakteristik toz tipleri görülmektedir.



Şekil 2.6. ISO 3252 standardına göre partikül şekilleri a) asiküler toz partikülleri b) köşeli toz partikülleri c) dendritik toz partikülleri d) fiberimsi toz partikülleri e) pulsu toz partikülleri f) taneli (granüler) toz partikülleri g) şekilsiz toz partikülleri h) nodüler toz partikülleri j) küresel toz partikülleri [17]

Teorik olarak en yüksek paketleme yoğunluğunun belli boyut dağılımı aralığına sahip küresel tanelerde olduğu söylenebilir. Partikül yüzey alanı, partikül yüzey pürüzlülüğünün ve partikül şekilsizliğinin artmasıyla birlikte paketleme yoğunluğu ve toz akıcılığı da düşmektedir. Tozların şeklinin eşeksenli olması, yuvarlağımsı ve düzgün formlara yaklaşması durumunda paketleme yoğunluğu da artar [23,24].

Toz metalurjisinde kullanılan toz malzemelerin özelliklerinden bahsederken “boyut” kavramından çok “boyut dağılımı” kavramının kullanılması daha doğru olacaktır. Toz boyut dağılımının T/M işleminin bütün adımlarında göz önünde bulundurulması ve parametreler belirlenirken dikkate alınması gerekir. Üretim yöntemi aynı olsa bile üretilen tozların hepsinin boyutu aynı olmayacaktır [22]. Partikül boyutunu ölçerken partikül boyu, hacmi veya yüzey alanı kullanılır. Partikül boyut dağılımı analizi için ölçme yöntemleri sayma metotları, sedimentasyon metotları, tasnif metotları, ışık dağıtma ve kırılma metotları kullanılabilir. Sayma metotları partiküllerin kendilerinin ölçülmesi veya partiküllerin görüntülerinin ölçülmesine bağlı olarak doğrudan ve dolaylı olarak ikiye ayrılabilir. Sedimentasyon metodunda yerçekimi ortamında veya

santrifüj kuvveti altında tozların serbest düşme hızı toz boyutlarını bulma yöntemi kullanılır. Tozların sınıflandırılması metodunda tozların elekten geçirilmesi veya sıvı ile sınıflandırılmasına dayanır. Işık dağıtma ve kırılma metodunda partiküllerin kırılma patenleri incelenir. Işık dağıtma ve kırılma yöntemleri, geçen yıllarla beraber ölçülebilir boyut aralığı ile ilgili çok yönlülüğü ve hızlı olması açısından gün geçtikçe daha çok önem kazanmaktadır [9]. Toz boyutu ölçümü için çeşitli metotlar ve ölçebilecekleri tane boyutu sınırlamaları Tablo 2.2.'de görülmektedir.

Tablo 2.2. Çeşitli toz boyut ölçüm sitemleri ve ölçebileceği tane boyutu sınırları [22]

<i>Test Sınıfı</i>	<i>Metot</i>	<i>Kullanılabilir yaklaşık tane boyutu (mikron cinsinden)</i>
Sedimentasyon	Yerçekimsel	1-250
	Santrifüjle	0.05-60
Bulanıklık ölçümü	Turbidimetre (ışık yoğunluğunu azaltma ölçümü)	0.05-50
Yıkayarak ayırma	Yıkayarak ayırma	5-50.0
Elektrolitik öz direnç	Coulter sayıcısı	0.5-800
Geçirgenlik	Elek altı analizi	0.2-50
Yüzey alanı	Gaz fazından soğurma	0.01-20
	Sıvı fazdan soğurma	0.01-50

Spesifik yüzey alanı bir partikül malzemenin yüzey alanının ağırlığına bölünmesi ile bulunur [24]. Toz partiküllerinin birbiri arasında olan ve buldukları atmosferle olan her türlü reaksiyonu yüzeyden başlar. Biçimsiz bir toz parçacığının aynı zamanda yüzeyi de kaba ise bu partikülün spesifik yüzey alanı yüksek olacaktır [23]. Spesifik yüzey alanı m^2/gr veya cm^2/gr sinsinden ifade edilir. Spesifik yüzey alanının tespitinde gaz soğurma metodu veya geçirgenlik metoduyla tespit edilir. Gaz soğurma metoduyla yüzey alanı tespiti tozun vakum ortamında ısıtılmasıyla başlar, daha sonra toz gaz atmosferine alınır, tozlar tarafından soğrulan gaz miktarından yola çıkarak tozların yüzey alanı tespit edilir. Gaz soğurma metodu genel olarak *The Brunauer-Emmet-Teller* (BET) analizi olarak bilinir. Geçirgenlik yönteminde ise kompakt haline getirilmiş tozların akışkan akışına gösterdikleri direnci esas alarak partiküllerin yüzey alanını hesaplar [9,17,22]. Spesifik yüzey alanı partiküllerin özellikle sinterleme davranışları üzerinde büyük etkiye sahiptir.

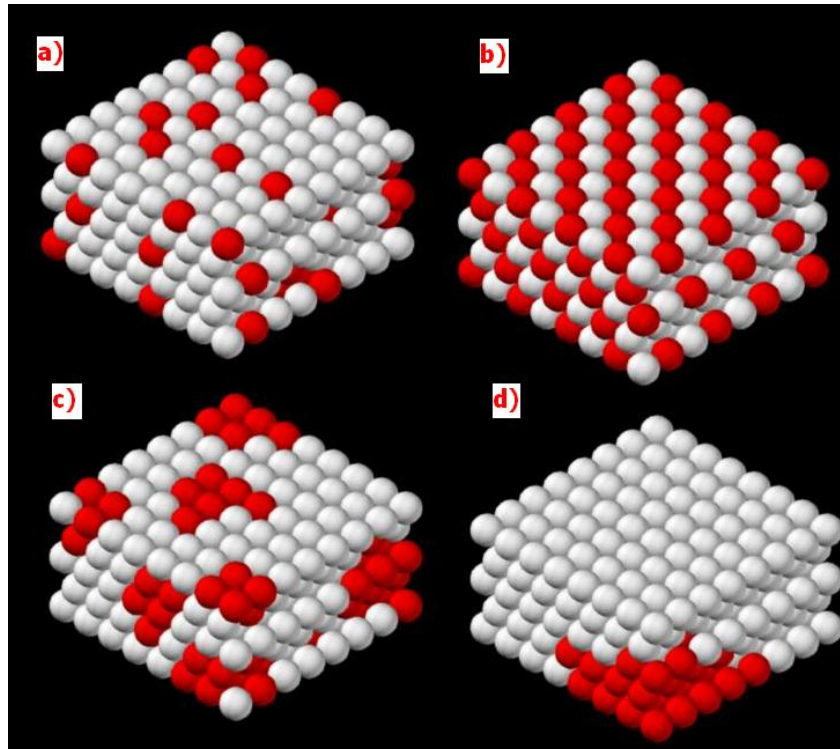
Kimyasal safsızlıklar bütün endüstriyel malzemeler için ortak problemdir. Tozların yüksek spesifik yüzey alanlarından dolayı toz üretilmeleri ve parçaya dönüştürülmesi süreçlerinde başka bileşimlerle ortamlarla ve maddelerle etkileşim durumundadır. Etrafta gaz halinde bulunan safsızlıklar ortamdan soğrulma veya kemisorpsiyon (kimyasal yüzerme) ile uzaklaştırılabilirler. Tozlarda bulunan safsızlıklar genelde diğer katı malzemelerde bulunan safsızlıklardan daha fazladır. Tozlarda bulunan bu safsızlıklar küçük miktarda bile olsa sinter sonrasında oluşan nihai ürünün özelliklerini büyük oranda ve genellikle olumsuz yönde etkiler. Oksijen metal tozlarında ve oksit olmayan seramik tozlarında en önemli inklüzyondur. Safsızlıklardan kaynaklanan segregasyonların sebep olduğu problemlerden dolayı Auger Elektron Spektroskopisi (AES) ve Elektron Enerji Kaybı Spektrometresi (EELS) gibi mikro-analitik sistemler kullanılmakla beraber bu yöntemler henüz standart hale getirilmemiştir [9].

2.3. Toz Harmanlama ve Karıştırma

Toz harmanlama terimi aynı kimyasal kompozisyonda tozların birbiri içinde karıştırılması işlemi tanımlar. Harmanlama işleminde asıl amaç nakliye ve sonrası işlemler sırasında değişik boyuttaki tanelerin dağılımının heterojen hale geçmesinden dolayı bu dağılımın homojen hale getirilmesidir. Toz karıştırma işleminde ise farklı kimyasal bileşimdeki tozların birbirleri içinde dağıtılması ve homojen bir karışım elde edilmesi amaçlanır.

Tozların nakliyesi sırasında oluşan titreşimden dolayı büyük boyuttaki taneler yüzeye doğru yükselip küçük boyuttaki taneler tabanda birikir. Bu durum büyük tanelerin küçük tanelerden ayrılarak yoğunlaşmasına sebep olur. Tanelerde boyutsal olarak meydana gelen bu segregasyondan dolayı ilk etapta görünür yoğunluk düşer, daha sonraki aşamalarda ise sıkıştırma ve sinterleme de çeşitli problemler ortaya çıkabilir. Bununla beraber taneler arasındaki sürtünme daha fazla olduğu için 100 µm'den küçük tozlarda tane boyutu segregasyonu daha az görülür [25]. Toz harmanlanması işlemi oluşan bu boyutsal segregasyonların ortadan kaldırılmasıdır.

Toz karıştırma işlemi de toz harmanlama işlemine benzemekle birlikte amaç boyutsal segregasyonların engellenmesinden çok oluşturulacak yeni kompozisyonun her noktasında toz karışımının aynı olması yani oluşacak yeni alaşım veya kompozit yapının homojen olmasının sağlanmasıdır. Bunun için kullanılacak ham tozların veya ön-alaşımlanmış tozların her noktasında alaşımı oluşturan tozlardan eşit miktarda bulunması gereklidir. Oluşan karışımın homojenliği farklı noktalardan alınan yoğunluk, ısı kapasitesi, elektriksel iletkenlik testleri ile ölçülebilir [24]. Karışımın homojenliğini anlamak için mikroyapısal incelemelerden de faydalanılabilir. Şekil 2.7.'de toz karışımlarda çeşitli karışım sonrası dağılım şekilleri görülmektedir.



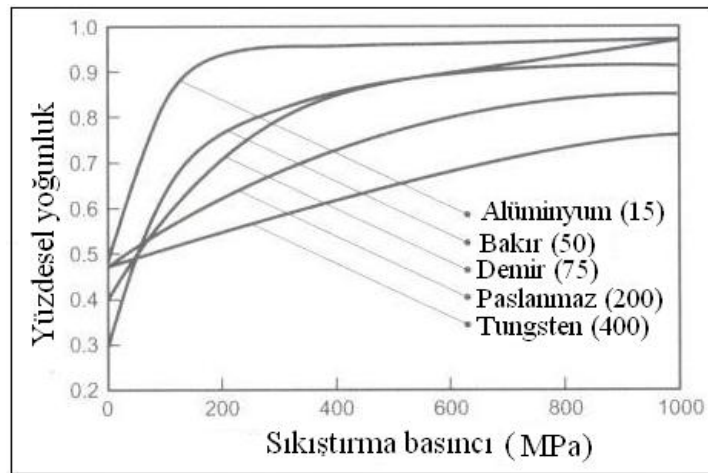
Şekil 2.7. Çeşitli toz karışımlarında ikinci faz tozların dağılımı. a) rasgele, b) sıralı, c) topaklanmış, d) segreg olmuş

2.4. Presleme ve Şekillendirme Teknikleri

Karıştırma sonrasında tozlar, istenilen şekle getirilmek ve yoğunluğun artırılması için şekillendirme veya sıkıştırma işlemlerine tabi tutulur. Endüstriyel olarak en çok kullanılan sıkıştırma teknikleri tek eksenli çift veya tek taraftan etkili preslemedir. Bununla birlikte izostatik presleme, enjeksiyon kalıplama, haddeleme, dövme gibi çeşitli toz sıkıştırma yöntemleri de kullanılmaktadır. Sıkıştırma ile sinter öncesinde

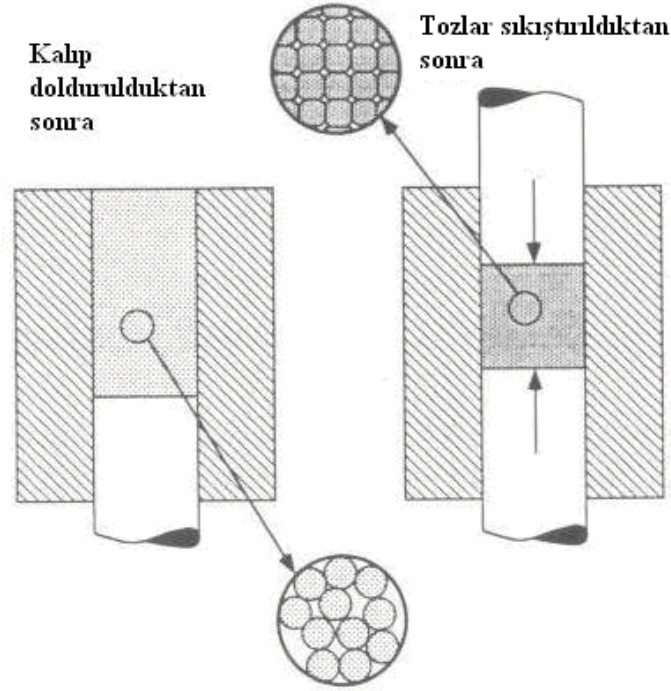
malzeme istenilen şekle getirilir ve sinter öncesi herhangi bir işleme tabi tutulacaksa bunun için gerekli dayanımı göstermesi sağlanır. Sıkıştırma işlemi için kalıp tasarımı yapılırken sıkıştırılacak tozların özelliği, tozların sıkıştırılması için gereken basınç ve üretilecek ürünün şekli göz önünde bulundurulur.

Sıkıştırmanın ilk aşamasında yoğunluk artışı hızlı iken ilerleyen aşamada tozların arasındaki gözeneklerin dolmasıyla beraber yoğunluk artışı yavaşlar. Şekil 2.8.'de beş farklı metalin sıkıştırma basıncıyla yoğunluk artışı görülmektedir. Parantez içindeki değerler metallerin Vickers sertlik değerleridir. Bu grafikten de anlaşıldığı gibi yumuşak metallerin sıkıştırılması sert metallere göre daha kolaydır.



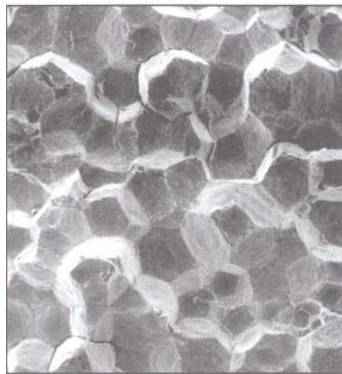
Şekil 2.8. Çeşitli metallerin sıkıştırma ile basınç- yoğunlaşma davranışları [24].

Şekil 2.9.'da tozların kalıp içindeki yoğunlaşma davranışları taslak olarak gösterilmiştir. Buna göre ilk aşamada tozlar kalıp içine ilk konulduğunda yoğunlukları, görünür yoğunluklarına eşittir. Basınç uygulanmaya başlanmasıyla tozlar deforme olmaya ve mekanik kuvvetlerle birbirlerine bağlanmaya başlar. Basıncın devam etmesiyle deformasyondan dolayı tozlar sertleşir ve sıkıştırmaya devam edebilmek için daha çok basınç uygulanması gerekir [25]. Tozların cinsine ve kalıp malzemesine bağlı olarak 1000 MPa'a kadar sıkıştırma basıncı uygulanabilir [24, 25].



Şekil 2.9. Tozların sıkıştırılma esnasında kalıp içindeki davranışı [9]

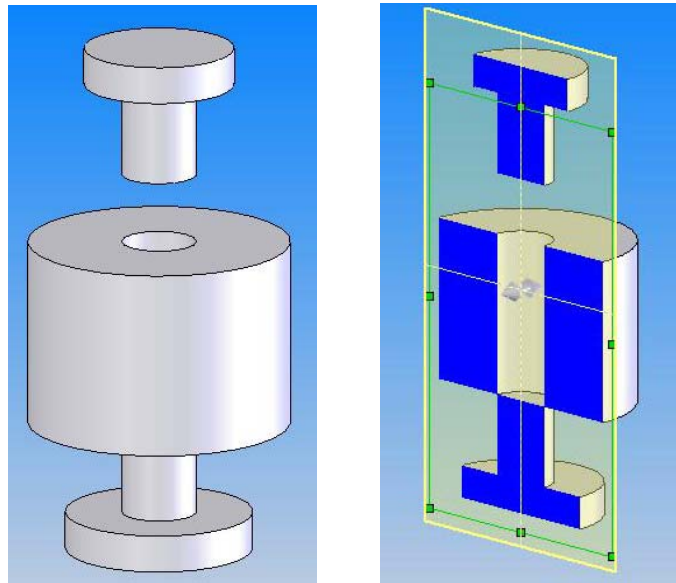
Tozların birbirleri arasında tutunmalarının sağlanması için bir miktar deforme olması gereklidir. Sert karbür, oksit, borür ve nitrür tozları presleme esnasında deforme olmazlar bu yüzden ham parçanın dayanımını sağlamak için bu tozlara bağlayıcı olarak polimer esaslı malzemeler katılır. Alüminyum, kurşun gibi yumuşak tozların ham yoğunluğu sıkıştırma ile neredeyse tam yoğunluğa yakın değerlere kadar çıkarılabilir. Şekil 2.10.'da, küresel tozların kalıpta birkaç kez sıkıştırıldıktan sonra kalıptan çıkarılıp kırılmasıyla elde edilen SEM görüntüsünde tozların kalıpta şekillendirilirken nasıl deforme olduğu görülmektedir [24].



Şekil 2.10. Birkaç kez preslenmiş küresel tanelerin presleme sonrası deforme olmuş halinin SEM görüntüsü [24]

2.4.1. Tek eksenli presleme

Tek eksenli presleme toz presleme teknikleri arasında en basit olanıdır. Tek eksenli preslemede rijit bir kalıp içine yerleştirilmiş tozlar bir zımba vasıtasıyla sıkıştırılır. Bu yöntemde tek yönden basınç uygulanabildiği gibi aynı eksenle zıt yönlerde iki zımba yardımıyla da tozların sıkıştırılabilmesi mümkündür. Şekil 2.11.'de silindirik numune üretmek için tasarlanmış bir tek eksenli presleme kalıbı ve bu kalıba ait kesit görüntüsü verilmektedir.



Şekil 2.11. Tek eksenli toz sıkıştırma için tasarlanmış yuvarlak kesitli bir kalıp

Tek eksenli sıkıştırmada ilk olarak kalıp boşluğuna tozlar doldurulur daha sonra üst ve alt zımbalar tarafından sıkıştırılır son olarak ta elde edilen ham parça kalıptan çıkarılır. Sıkıştırma sonucu elde edilen ham parçalar kalıptan çıkarılma esnasında ve sinter öncesi işlemlerde parçalanmayacak kadar sağlam olmalıdır. Presleme sonucunda elde edilen yapı sinter sonrasındaki malzemenin mikroyapısal ve mekanik özelliklerini doğrudan etkiler.

Tek eksenli preslemede gerek ham parçanın kalıptan çıkarılmasını zorlaştırdığı ve gerekse parçanın yoğunluğunun homojen olmasını engellediği için kalıp duvarı sürtünmesinin dikkate alınması gerekir. Ham parçalarda zımba ile temas halinde olan kısımlarda yoğunluk en fazladır. Yanal yüzeylerde gelen yük kalıp yüzeylerindeki

sürtünmeden dolayı daha azdır. Bu da yoğunluğun daha az olmasına sebep olur. Presleme sonrası, belirtilen nedenlerden dolayı düzensiz yoğunluk dağılımı sinterleme de parçanın şekilsel deformasyona uğramasına neden olur. Ayrıca bu sürtünmeden dolayı kalıp zımbası da aşınarak zamanla hassasiyeti belirlenmiş toleransların dışına çıkar. Kalıp yüzeylerindeki sürtünmeyi azaltmak için yağlayıcı malzemeler kullanılır [24].

2.4.2. İzostatik presleme

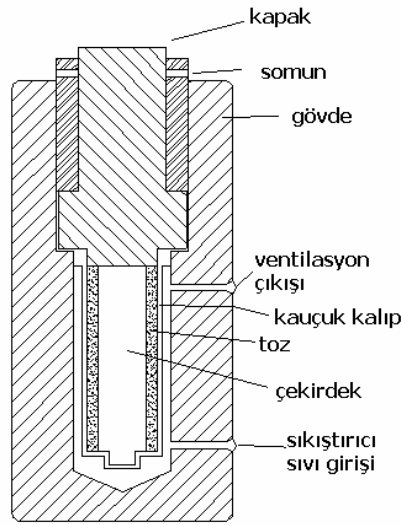
Tek eksenli presleme endüstride yoğun olarak kullanılmasına rağmen bu yöntemle kompleks parçaların üretilmesi pek mümkün değildir. Bu yüzden tek eksenli preslemenin üretilecek parça için yetersiz kaldığı durumlarda izostatik presleme kullanılır. İzostatik preslemenin soğuk izostatik presleme (CIP) ve sıcak izostatik presleme (HIP) olmak üzere iki türü vardır.

2.4.2.1. Soğuk izostatik presleme (CIP)

Soğuk izostatik preslemede toz ile doldurulmuş esnek bir kalıp su veya yağ gibi bir akışkan yardımıyla izostatik olarak sıkıştırılır. Şekil 2.12’de bir izostatik presin kesit görünüşü verilmiştir. Bu yöntemde 1400 MPa basınca kadar ulaşılabilmesine rağmen genellikle izostatik presleme 350 MPa’nın altındaki basınçlarda uygulanmaktadır. Soğuk izostatik preslemenin;

- Sinter öncesi parçalarda üniform yoğunluk,
 - Aynı basınçta tek eksenli olarak preslemeden yaklaşık % 5-15 daha fazla ham yoğunluk,
 - Ham parçalar için yüksek dayanım,
 - Daha az iç gerilim,
 - Bağlayıcı ve yağlayıcı kullanılmadan sıkıştırma sağlanabilmesi,
 - Kompleks parçalar üretilme imkanı,
 - Plastik ve kauçuk kalıpların kullanımıyla düşük takım maliyeti,
 - Düşük malzeme ve sonradan işleme maliyeti
- gibi avantajlarının yanı sıra;

- Ham parçalarının boyutsal kontrolünün tek eksenli kalıpta şekillendirmeye oranla daha az hassas olması,
- İzostatik preslenen parçaların yüzeylerinin daha az hassas olması,
- Esnek kalıpların kullanım ömrünün daha az olması,
- Bir parçanın sıkıştırılması için gereken zamanın tek eksenli sıkıştırmaya göre daha uzun olması gibi dezavantajları vardır [22].



Şekil 2.12. İzostatik presin kesit görünüşü [26]

Soğuk izostatik preslemede, sıkıştırma amacıyla gaz veya sıvı kullanılabilir. Sıkıştırıcı seçiminde kullanılacak maddenin sıkıştırılabilirliği, cihazın pompa ve conta sistemleri ile üretilecek parça önemlidir [9].

2.4.2.2. Sıcak izostatik presleme (HIP)

Sıcak izostatik presleme (HIP) yönteminde soğuk izostatik preslemeden farklı olarak toz malzemeler gaz basıncıyla sıkıştırılırken aynı anda basınç odasının yüksek sıcaklıklara çıkarılmasıyla daha az gözenekli bir yapı elde edilir. Sıkıştırıcı gaz olarak asal gazlar, genellikle argon, tercih edilir. Sıcak izostatik preslemenin bir başka kullanım alanı da değişik altlıklar üzerine toz malzemelerin ince bir tabaka halinde kaplanması teknolojisidir [27].

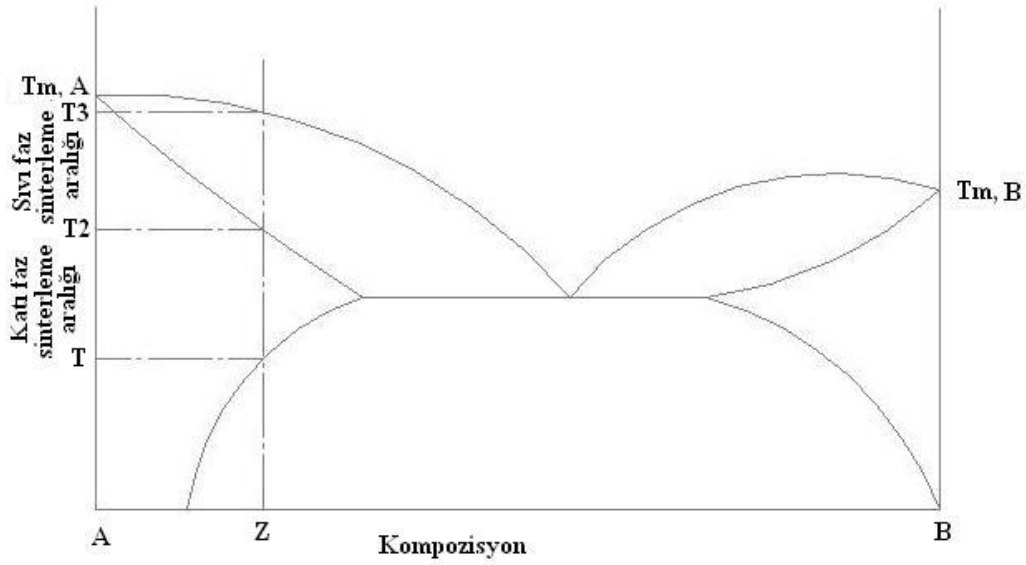
2.5. Sinterleme

Sıkıştırma sonrasında tozlar birbirlerine sadece mekanik ve elektriksel bağlar ile bağlı durumdadır. Bu bağlar üretilen parçanın herhangi bir amaçla kullanımı için yeterli dayanımı sağlayamamaktadır, bu yüzden T/M yönteminde parçaları oluşturan tozlar yüksek sıcaklıklarda sinterlenerek partiküller arasındaki bağların güçlenmesi amaçlanır.

Sinterleme, sıkıştırılmış bir tozmetal parçanın, kendisini oluşturan tozlar arasındaki bağların güçlenmesi, dolayısıyla daha sağlam bir yapı oluşturulması amacıyla ana bileşeni olan malzemenin ergime sıcaklığı altındaki bir sıcaklığa kadar çıkarılmasını öngören ısı işlem türüdür. Sinterleme işlemi, oksit seramikler dışında, genelde koruyucu bir atmosfer altında ve kompozisyonu oluşturan ana bileşenin ergime sıcaklığının %60-90'ı arasında bir sıcaklıkta yapılır [10]. Sinterleme sonrasında malzemenin dayanımı artar ancak bazı durumlarda, örneğin, içinde bulunan kalıntı gözeneklerden dolayı, tozmetal malzemenin dayanımı aynı bileşimdeki döküm veya işlenmiş parçaya göre daha düşük olabilir [2].

Sinterleme basit olarak katı faz sinterleme ve sıvı faz sinterleme olarak iki gruba ayrılır. Katı faz sinterleme sıkıştırılmış ham parçanın sinterleme esnasında tamamıyla katı halde kalmasıyla olur. Sıvı faz sinterlemede ise sinterleme esnasında kompakt içinde sıvı faza geçen bileşenler bulunur [28]. Sinterleme sonucunda özellikle ince taneli toz kullanıldığı durumlarda yoğunluk artışıyla birlikte hacimsel küçülme de meydana gelir [29]. Tek bileşenli bir tozmetal parçanın sinterlenmesinde, sinterleme sıcaklığı metalin ergime derecesinin $2/3$ 'ü veya $4/5$ 'i alınarak tespit edilirken çok bileşenli sistemlerde karışım oranlarına bağlı olarak ergime derecesi düşük olan elementin ergime derecesinin üstünde ergime derecesi yüksek olan elementin ise ergime derecesinin altında sinterleme sıcaklığı seçilir [30]. Sinterleme sıcaklığı ve süresi sinterlenecek tozların özelliklerine göre seçilir. Şekil 2.13'te şematik bir faz diyagramı görülmektedir. Diyagrama göre A ve B tozları Z kompozisyonunda karıştırılmıştır. Eğer bu karışım T-T2 sıcaklığı arasında sinterlenirse bu işlem katı faz

sinterleme olarak adlandırılır şayet T2-T3 sıcaklığı arasında sinterlenirse bu iki toz malzeme arasında sinterleme sıcaklığına bağlı olarak bir ötektik oluşacak bu yüzden kompakt içinde bir miktar sıvı faz görülecektir. Bu nedenle bu tip sinterleme işlemine sıvı faz sinterleme denilmektedir.

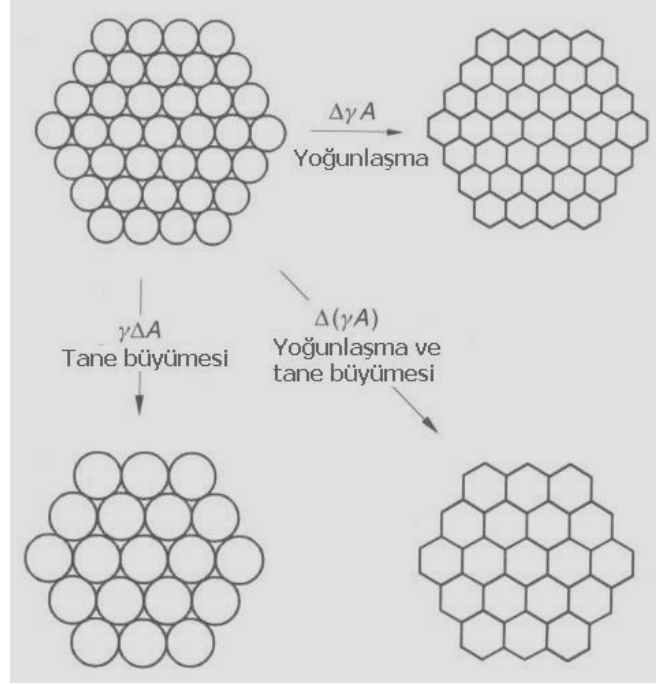


Şekil 2.13. Katı ve sıvı faz sinterleme sıcaklık bölgeleri

Sinterlemenin oluşmasını sağlayan itici güç, toplam ara yüzey enerjisinin azalmasıdır. Toz kompaktın toplam ara yüzey enerjisi γA , spesifik ara yüzey enerjisi γ , kompaktın toplam ara yüzey alanı A ise, enerjideki toplam düşme;

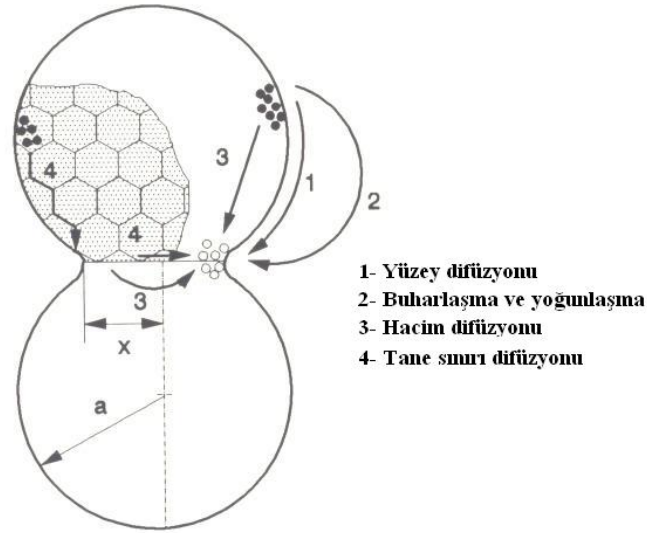
$$\Delta(\gamma A) = \Delta \gamma A + \gamma \Delta A$$

olarak ifade edilir. Tane büyümesine bağlı olarak ara yüzey alanı ve yoğunlaşmadan dolayı ara yüzey enerjisi değişir. Katı faz sinterleme de $\Delta \gamma$, katı-katı ara yüzeyden katıdan buhar ara yüzeyine geçişle bağlantılıdır. Şekil 2.14.'te yoğunlaşma ve tane büyümesi etkisiyle oluşan toplam ara yüzey enerjisi şematik olarak gösterilmiştir ve bu sinterlemenin temel kurgusudur [28].



Şekil 2.14. Sinterleme de itici güç $\Delta(\gamma A)$ altında sinterlemenin basit kurgusu [28]

Sinterleme işlemi kurgusal olarak şekil 2.15'te görülen 4 aşamada meydana gelir.



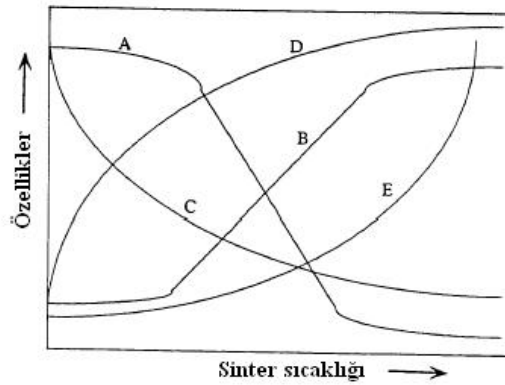
Şekil 2.15. Sinterleme mekanizmaları [9]

İlk basamakta partiküllerin temas noktaları "boyun" olarak adlandırılan sinter köprülerine dönüşür. Sinter öncesinde de temas noktaları zaten presleme basıncından dolayı nokta şeklinde değil temas yüzeyi şeklindedir. Sonrasında ikinci bölümde boyun zamanla genişler ve tane sınırını oluşturur. Tane sınırları komşu iki toz tanesi

arasındaki temas yüzeyi şeklindedir ve tozlar birbirinden ayrı durumdadır. Tane merkezlerinde çok küçük miktarda çekmeler görülebilir.

Üçüncü aşamada, ikinci aşamaya göre, güçlü bir boyun oluşumundan sonra, x mesafesi belli bir değeri aşarsa toz taneleri artık bağımsız tane olarak kalamazlar. Dördüncü aşamada ise gözenekler küresel şekil alır ve tane büyümesi gerçekleşir. (Çekmeler genellikle bu aşamada meydana gelir.) Son aşamada, %90-95 teorik yoğunluk arasında kapanan gözenek oranı hızlı şekilde artar. İzole edilmiş gözenekler küresel hale gelir. İçerde kalan gazların dışarıya çıkamadığı durumlarda bu gazlar gözenek olarak yapıda kalır ve dolayısıyla daha fazla yoğunlaşma mümkün olmaz. Sinterleme esnasında vakum uygulanması gibi sebeplerle gözeneklerin boş olması durumunda veya gözeneklerdeki gazın dışarıya difüz edebilmesi durumunda, özellikle ince taneli yapılarda hızlı bir yoğunlaşma görülebilir [9].

Sinter sıcaklığının artışı ile bazı mikroyapısal ve mekanik özelliklerde meydana gelen değişim Şekil 2.16'da görülmektedir.



Şekil 2.16. Sinter sıcaklığının bazı mikroyapısal ve mekanik özelliklere etkisi A) Gözeneklilik B) Yoğunluk C) Elektriksel yalıtkanlık D) Dayanım E) Tane boyutu [31]

2.6. Sinter Sonrası İşlemler

Uygulamada gereken bazı mekanik özellikler tozmetal parçalara sadece sinterleme ile kazandırılmayabilir. Bu yüzden döküm ve işlenmiş parçalara uygulanan birçok ikincil işlem tozmetal parçalara da uygulanabilir. Buna rağmen tozmetal parçalarda var olan gözenek ikincil işlemler yapmak için bazı sınırlamalar getirebilir [22].

Sinter sonrası işlem yapılmasında başka bir amaç ise hassas toleranslar içinde üretilmesine rağmen bazı tozmetal parçalarda doğan yüzey talaş kaldırılması ihtiyacıdır.

Sinter sonrası işlemler olarak talaş kaldırma, yağ emdirme, son ölçüye getirme ve ikincil presleme, buharla işlem, yüzey işlemleri, çapak alma, ısıl işlemler veya birleştirmeler sayılabilir.

BÖLÜM 3. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Alüminyum yerkabuğunda oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan üçüncü elementtir. Yerkabuğu kütlelerinin % 8'ini oluşturur ve yerkabuğunda en çok bulunan metaldir. Alüminyum, çok eski tarihlerden bu yana bilinmesine rağmen endüstriyel metal olarak modern döküm yönteminin keşfedildiği 1886 yılından sonra kullanılmaya başlanmıştır. Bugün dünya üzerinde en çok kullanılan demirdışı metaldir. Özellikle hafif ve parlak olmasından dolayı bazı alanlarda çeliğe tercih edilmektedir [32]. Alüminyum endüstriyel olarak üretilen ve kullanılan metaller arasında magnezyum ve berilyumdan sonra en hafif üçüncü metaldir. Özgül ağırlığı 2.7 gr/cm^3 'tür ve bu değer demir için 7.8 bakır için 8.8 gr/cm^3 'tür. Düşük özgül ağırlığı, gerekli işlemlerle makul ölçüde yükseltilebilen dayanımı, iyi korozyon dayanımı ve nispeten düşük maliyetiyle rahatlıkla günümüzde en önemli demirdışı metal olduğu söylenebilir [33]. Alüminyum günümüzde günden güne daha çok alanda kullanım imkanı bulmaktadır. 2000 yılından günümüze dünya üzerindeki çeşitli bölgelerdeki cevherden üretilmiş alüminyum miktarı Tablo 3.1'de görülmektedir.

Tablo 3.1. 2000 yılından bugüne dünyada cevherden üretilen yıllık Al miktarı (Değerler bin ton cinsindedir) [34]

Dönem								Toplam	Günlük Ortalama
	Afrika	Kuzey Amerika	Latin Amerika	Asya	Batı Avrupa	Doğu/Merkez Avrupa	Okyanusya		
2000	1,178	6,041	2,167	2,221	3,801	3,689	2,094	21,191	57.9
2001	1,369	5,222	1,991	2,234	3,885	3,728	2,122	20,551	56.3
2002	1,372	5,413	2,23	2,261	3,928	3,825	2,17	21,199	58.1
2003	1,428	5,495	2,275	2,475	4,068	3,996	2,198	21,935	60.1
2004	1,711	5,11	2,356	2,735	4,295	4,139	2,246	22,592	61.7
2005	1,753	5,382	2,391	3,139	4,352	4,194	2,252	23,463	64.3
2006	1,864	5,333	2,493	3,494	4,176	4,232	2,274	23,866	65.4

Alüminyum alaşımları, ağırlığın önemli olduğu otomotiv ve havacılık uygulamalarında, düşük yoğunluk ve iyi dayanım özelliği sergilemeleri nedeniyle tercih edilen malzemelerdir.

Alüminyum yeryüzünde bol miktarda yer almasına rağmen saf olarak bulunmaz; demir, silisyum, oksijenle birleşmiş haldedir. Alüminyum cevherine boksit adı verilir. Yeryüzünden elde edilen boksit bayet metodu adı verilen bir yöntemle alüminaya (Al_2O_3) dönüştürülür. Daha sonra alümina elektroliz yöntemiyle alüminyuma dönüştürülür [35].

Alüminyum ürün olarak; haddelenmiş, ekstrüzyonla üretilmiş, dökülmüş ve dövme olarak rahatlıkla temin edilebilir. Aynı zamanda Al ve alaşımlarından cıvata, perçin, vida ve çivi üretilmektedir [36].

3.1. Geleneksel Yöntemlerle Üretilen Al Alaşımları

Alüminyum alaşımlarını dövme alüminyum alaşımları ve döküm alüminyum alaşımları olarak iki grupta incelemek mümkündür.

3.1.1. Dövme alüminyum alaşımları

Dünyada üretilen toplam alüminyumun yaklaşık olarak %85'i döküm ingotlardır. Bunlar hadde, ekstrüzyon, çekme gibi işlemlerden geçirilerek kullanılmaktadır [37]. Dövme alüminyum alaşımlarının, başlıca alaşım elementine göre sınıflandırılması Tablo 3.2'de görülmektedir.

Dövme alüminyum alaşımları incelenirken göz önünde bulundurulacak bir nokta da alaşımların mekanik ve mikroyapısal özelliklerinin ısı ile iyileştirilip iyileştirilemeyeceğidir. Genel olarak 3XXX ve 5XXX serisi ısı işlem yapamayan seriler olarak adlandırılırken 2XXX, 6XXX, 7XXX ve 8XXX serisi ısı işlem uygulanabilen seriler olarak isimlendirilir [37].

Tablo 3.2. Dövme alüminyum alaşımı serileri [38]

Seri	Başlıca Alaşım Elementi
1XXX	%99 ve üstü saflıkta alaşımlanmamış alüminyum
2XXX	Bakır
3XXX	Manganez
4XXX	Silisyum
5XXX	Magnezyum
6XXX	Magnezyum ve Silisyum
7XXX	Çinko
8XXX	Diğer alaşım elementleri

Bakır, uygun ısı işlem vasıtasıyla alüminyum içinde oluşturduğu katı eriyik sebebiyle çökeltme sertleşmesine bağlı olarak alaşımın dayanımını büyük oranda yükseltebilir. Bu yüzden bakır, alüminyum için en önemli alaşım elementlerinden biridir. Alüminyumdaki bakırın eriyebilirliği, ötektik sıcaklıkta % 5.6'dır ve oda sıcaklığında ise % 0.1'dir [35]. Bu yüzden alaşım ötektik sıcaklıktan hızlı bir şekilde oda sıcaklığına düşürülerek çökeltme sertleşmesi sağlanır.

3.1.2. Döküm alüminyum alaşımları

Döküm alüminyum alaşımlarının kimyasal kompozisyonları dövme alüminyum alaşımlarından oldukça farklıdır. Döküm alüminyum alaşımları serileri ve başlıca alaşım elementleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Dökme alüminyum alaşımlarında seriler ve başlıca alaşım elementleri [38]

Seri	Başlıca alaşım elementi
1XX.X	Saf alüminyum
2XX.X	Bakır
3XX.X	Silisyum ve bakır ve/veya magnezyum
4XX.X	Silisyum
5XX.X	Magnezyum
7XX.X	Çinko
8XX.X	Kalay

Ana alaşım elementi olarak silisyum kullanılan alüminyum döküm alaşımları, üstün döküm özelliklerinden dolayı en önemli ticari döküm alaşımlardır. Silisyum saf alüminyumun korozyon direncini düşürmediği gibi bazı asidik ortamlarda korozyon direncini artırır.

En önemli ticari ikili alüminyum silisyum alaşımları nominal %5.3 Si içeren 443 ve nominal %12 Si içeren 413'tür. Günümüzde alüminyum-bakır döküm alaşımları yerine daha çok alüminyum-silisyum-magnezyum alaşımları tercih edilmektedir. Bunun ana nedeni Al-Cu ikili sisteminin zayıf dökülme özelliğine sahip olması, korozyon direncinin iyi olmaması ve Al-Si-Mg alaşımlarına göre daha yüksek spesifik ağırlığa sahip olmalarıdır [35].

3.2. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Alüminyum Alaşımları

Tozmetal alüminyum alaşımlarının özelliklerini iyileştirmek için kullanılan yöntemlerden biri mikro (< % 0.5) veya makro (% 1–20) düzeyde alaşım elementi kullanmaktır. Bakır, magnezyum, lityum ve silisyum gibi alaşım elemanlarının değişik oranlarda ilavesiyle tozmetal parçaların mekanik ve fiziksel özellikleri değiştirilebilir. Alaşım elementleri mekanik özelliklerin yanı sıra yoğunluk ve korozyon dayanımında da değişikliklere sebebiyet verir. Kadmiyum, kalay, kobalt, titanyum, bizmut ve gümüş gibi elementler çökeltme sürecini etkileyerek daha ince taneli yapı elde edilmesini sağlar [39]. Alüminyum alaşımlarının toz metalurjisi ticari olarak birkaç alaşım üzerine yoğunlaşmıştır. Karıştırma esnasındaki potansiyel risklere karşı, üreticiler tarafından önceden karıştırılmış, bazı yağlayıcılar katılmış alüminyum alaşımları üretilmektedir. Alüminyum alaşımları, nispeten düşük basınçlarda (400-480 MPa) preslenir. Alüminyum esaslı ticari alaşımlar yüksek sıkıştırılabilirlik gösterir ve yaklaşık 350 MPa basınç kullanılarak % 90–95 arasında teorik yoğunluğa ulaşabilir [20]. Tablo 3.4'da bazı ticari alüminyum tozlarının kimyasal kompozisyonları verilmiştir. Tablo 3.5'te ise bu tozlardan bazılarının mekanik özellikleri görölmektedir.

Tablo 3.4. Bazı ticari alüminyum alaşımlarının bileşimleri [17]

Alaşım	Bileşim				
	Cu	Mg	Si	Al	Yağlayıcı
601AB	0.25	1.0	0.6	kalan	1.5
201AB	4.4	0.5	0.8	kalan	1.5
602AB	--	0.6	0.4	kalan	1.5
601AC	0.25	1.0	0.6	kalan	--
201AC	4.4	0.5	0.8	kalan	--
202AB	4.0	--	--	kalan	1.5

201AB alaşımı, bileşim olarak dövme 2014 alaşımına benzer. Yüksek dayanım ve orta derecede korozyon direnci gösterir. 601AB alaşımı ise dövme 6061 alaşımına benzer ve daha iyi dayanım, iyi süneklik ve iyi korozyon direnci gösterir. 602AB alaşımının da ise iyi iletkenlik özelliği vardır. Alüminyum alaşımlarının hafif bir malzeme olarak tercih edildiği düşünüldüğünde bu alaşımlara rakip olabilecek titanyum ve berilyum alaşımlarına göre büyük fiyat avantajı vardır [18].

Tablo 3.5. Bazı ticari alüminyum tozlarından üretilmiş parçaların özellikleri [17]

Alaşım	Presleme basıncı (MPa)	Ham yoğunluk (gr/cm ³)	Ham dayanım (MPa)	Sinterlenmiş yoğunluk (gr/cm ³)	Temper	Çekme dayanımı (Mpa)	Akma dayanımı (MPa)	% uzama	Sertlik
601AB	96	2.29	3.1	2.45	T1	110	48	6	55-60(HRH)
					T4	141	96	5	80-85 (HRH)
					T6	183	176	1	70-75(HRE)
	165	2.45	6.55	2.52	T1	139	88	5	60-65 (HRH)
					T4	172	114	5	80-85 (HRH)
					T6	232	224	2	75-80(HRE)
	345	2.55	10.4	2.58	T1	145	94	6	65-70 (HRH)
					T4	176	117	6	85-90 (HRH)
					T6	238	230	2	80-85(HRE)
602AB	165	2.42	6.55	2.55	T1	121	59	9	55-60(HRH)
					T4	121	62	7	65-70(HRH)
					T6	179	169	2	55-60(HRE)
	345	2.55	10.4	2.58	T1	131	62	9	55-60(HRH)
					T4	134	65	1	70-75(HRH)
					T6	186	172	3	65-70(HRE)
201AB	110	2.36	4.2	2.53	T1	169	145	2	60-65(HRE)
					T4	210	179	3	70-75(HRE)
					T6	248	248	0	80-85(HRE)
	180	2.50	8.3	2.58	T1	201	170	3	70-75(HRE)
					T4	245	205	3.	75-80(HRE)
					T6	323	322	0.	85-90(HRE)
	413	2.64	13.8	2.70	T1	209	181	3	70-75(HRE)
					T4	262	214	5	80-85(HRE)
					T6	332	327	2	90-95(HRE)

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Malzeme

Deneysel çalışmalarda önceden belirlenmiş kompozisyonlarda T/M yöntemiyle alaşımların üretilmesi ve elde edilen alaşımların mikroyapısal karakterizasyonunun yapılarak fiziksel ve mekanik özellikler ile ilişkilendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmalarda kullanılan tozlara ait özellikler Tablo 4.1’de görülmektedir.

Tablo 4.1. Deneysel Çalışmalarda kullanılan tozlara ait özellikler

Toz	Tedarikçi firma	Toz safiyeti (%)	Toz boyutu (µm)
Alüminyum	Gürel Makina A.Ş.	99.60	—63
Bakır	Gürel Makina A.Ş.	99.60	—63
Magnezyum	Magnezyum Metal A.Ş.	99.95	—63
Titanyum	Alfa Aesar	99.95	—44
Silisyum	3A Alüminyum A.Ş.	99.36	—75*

* Deneysel çalışmalarda 3A Alüminyum A.Ş.den alınan silisyum kayaçların laboratuarlarda öğütülmesiyle elde edilen toz kullanılmıştır. Diğer değerlerin tümü üretici firma verilerini göstermektedir.

Tüm tozların tane boyut dağılımları, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü’nde bulunan Malvern Mastersizer 2000 model toz boyut dağılımı ölçüm cihazı ile belirlenmiştir. Toz morfolojisinin belirlenmesi amacıyla Sakarya Üniversitesi (SAÜ), Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan JEOL marka JSM 6060 LV model tarama elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

4.2. Sinter Öncesi İşlemler

4.2.1. Toz karıştırma

Tozlar, Tablo 4.2’de verilen kompozisyonlarda karıştırılmıştır. Karıştırma işleminde 8 mm çapında alümina bilyeler kullanılmıştır. Tozların homojen karışımının

sağlanması amacıyla tozlar yüksek saflıkta izopropil alkol içinde 10 saat yatay konumda yatay ve dikey ekseninde döndürülmek suretiyle karıştırılmış daha sonrasında filtre kağıtlar vasıtasıyla süzölmüş ve 2 saat süreyle etüvde kurutulmuştur.

Tablo 4.2. Hazırlanan toz kompozisyonları (% ağı.)

Alaşım	Al	Cu	Mg	Si	Ti
Al	100	--	--	--	--
Al5Cu	95	5	--	--	--
Al5Cu0.5Mg	94.5	5	0.5	--	--
Al15Si5Cu2.5Mg	78.5	5	2.5	15	--
Al15Si5Cu2.5MgTi	77.5	5	2.5	15	1

4.2.2. Termal analiz

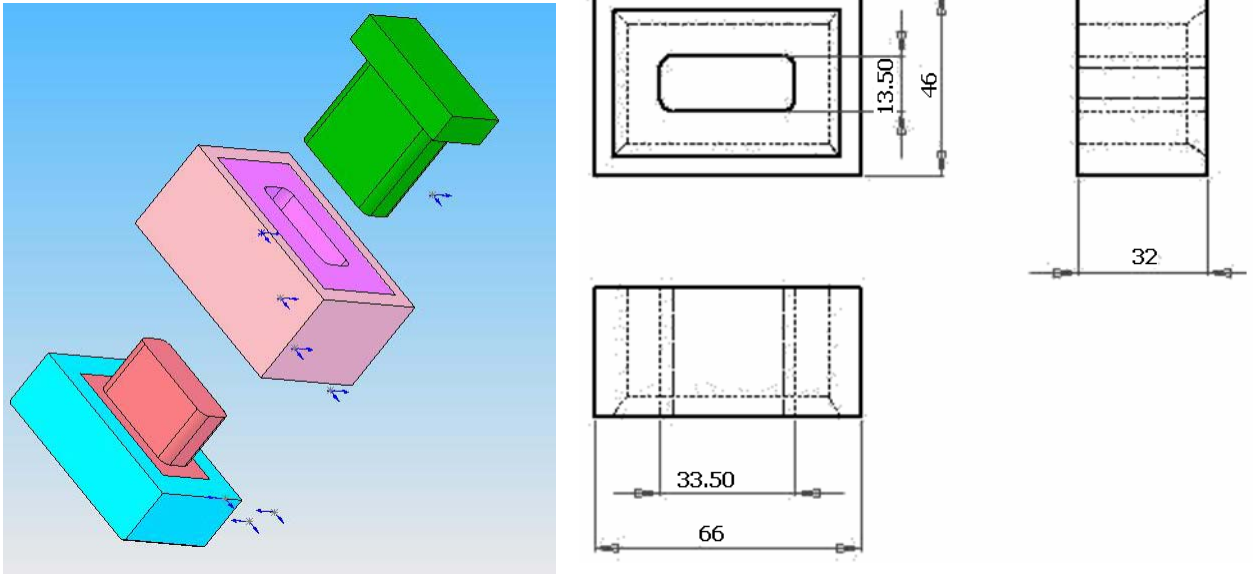
Karıştırılan tozlara ait DTC-DSC grafikleri SAÜ Mühendislik Fakölteşi Metalurji ve Malzeme Mühendisliğı laboratuvarlarında bulunan SDT Q600 model termal analiz cihazıyla oluşturulmuştur.

4.2.3 Toz yoğunluk ölçümleri

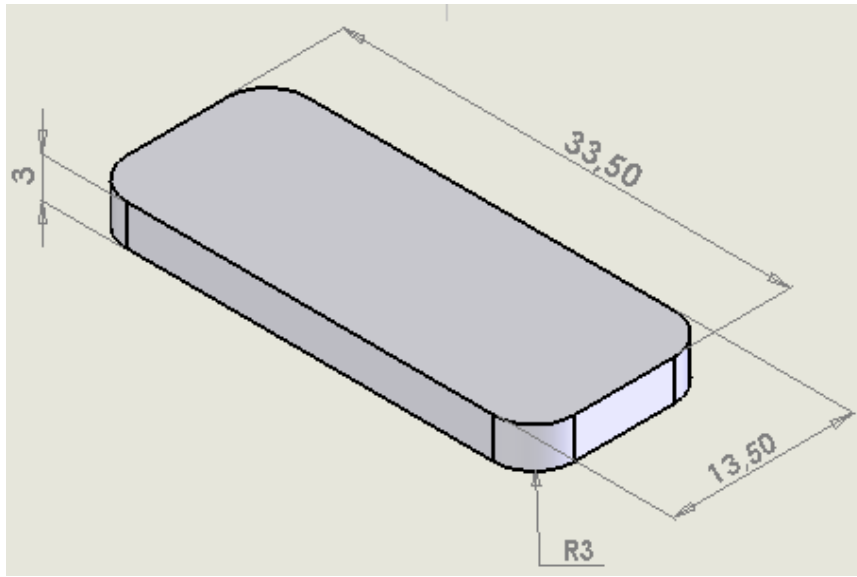
Hazırlanan toz karışımlarının yoğunlukları “Hall Akışmetresi” vasıtasıyla ölçölmüş olup 5 ölçümün ortalaması yoğunluk değeri olarak belirlenmiştir.

4.2.4. Toz şekillendirme işlemleri

Hazırlanan toz karışımları TSE TS 205-1 EN ISO 7438 standardında numune üretmek amacıyla, tek eksenli olarak preslenmiştir. Şekillendirme için kullanılan kalıp Şekil 4.1.’de görölmektedir. Hareketli kalıp yüzeylerindeki sürtünme kuvvetlerinin azaltılması amacıyla her presleme işlemi öncesinde zımba ve kalıp iç duvarı çinko stearat – alkol karışımı püskürtölerek yağlanmıştır. Kalıptan çıkan numunelerin boyutları 13.5 x 33.5 x 3 mm³’tür (Şekil 4.2). Sıkıştırma işlemi için manuel kontrollü hidrolik pres kullanılmış olup tüm numuneler 400 MPa’da preslenmiştir.



Şekil 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan tek eksenli toz sıkıştırma kalıbı ve kesit ölçüleri



Şekil 4.2. Üretilen numunelerin şekli ve ebatları

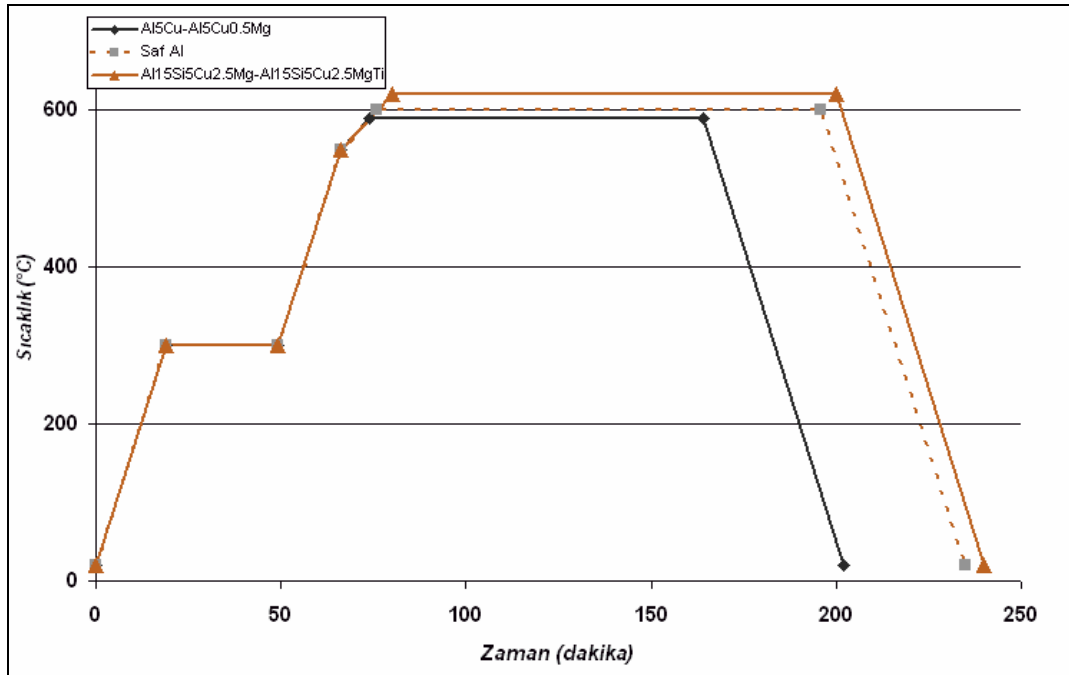
4.3. Sinterleme

Preslenmiş numuneler azot gaz akışı altında 300°C’de yarım saat bekletilmek suretiyle çinko stereat kontaminasyonundan arındırılmıştır. Numuneler daha sonra 590 – 620 °C arasında değişen sıcaklıklarda Protherm marka Honeywell DC2500 kontrol üniteli tüp fırında 2 saat süreyle sinterlenmiştir. Sinterleme işlemlerinde kullanılan düzenek Şekil 4.3.’te, sinterleme süresi ve sinterleme sıcaklıklarının alaşım türüne göre hazırlanmış grafik ise Şekil 4.4.’te verilmiştir.



Şekil 4.3. Sinterleme işlemlerinde kullanılan fırın ve düzenek

Yağlayıcının uçurulması sonrasında tüp fırın içindeki hava vakum pompası yardımıyla vakumlanmış daha sonra yüksek debide azot ile fırın içindeki atmosferin inert olması sağlanmıştır. Ayrıca numunelerin gaz akışı yönünde birkaç santimetre önüne karbon karası dolu bir kayıkçık konularak olası oksidasyonun önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Sinterleme atmosferi olarak BOS A.Ş.'den temin edilen %99.98 saflıkta azot gazı kullanılmıştır.



Şekil 4.4. Kompaktların sinterlemesinde kullanılan sinter rejimi

4.4. Sinter Sonrası İşlemler

4.4.1. Mikroyapısal analizler

Numuneler optik ve taramalı elektron mikroskobu incelemeleri öncesinde bakalit içerisine gömülmüş, sırasıyla 400-600-800-1000 ve 1200 mesh`lik SiC zımparalarla zımparalanmış, 3 ve 1 mikronluk alümina süspansiyon ile parlatılmıştır. Saf Al numuneler Keller çözeltisi (1 ml HF, 1.5 ml HCl, 2.5ml HNO₃, 95 ml H₂O) ile dağlanmıştır. Optik mikroyapı incelemelerinde Nikon Eclipse L150 metal mikroskobu, CANON EOS dijital fotoğraf makinesi kullanılmıştır. SEM incelemeleri JEOL marka JSM6060 LV model taramalı elektron mikroskobunda yapılmıştır. EDX incelemelerinde IXRF 5000 EDX analiz cihazı, XRD analizlerinde Shimadzu XRD-6000 cihazı kullanılmıştır.

4.4.2. Yoğunluk ölçümleri

Numunelerin sinter sonrası yoğunluklarının belirlenmesinde Arşimet prensibinden faydalanılmıştır. Numunelerin yaş ve kuru ağırlık ölçümlerinde Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi metalografi laboratuvarında bulunan Precise marka 0,0001 gr hassasiyetli terazi kullanılmıştır.

4.4.3. Üç nokta eğme dayanımı ölçümleri

Üç nokta eğme testleri Instron Series IX Version 8.30.00 model test cihazı ile TSE TS 205-1 EN ISO 7438 standardına uygun olarak yapılmış olup eğme hızı olarak 2 mm/dk seçilmiştir. 5 numuneden elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması eğme deneyi sonucu olarak belirlenmiştir.

4.4.4. Sertlik Ölçümleri

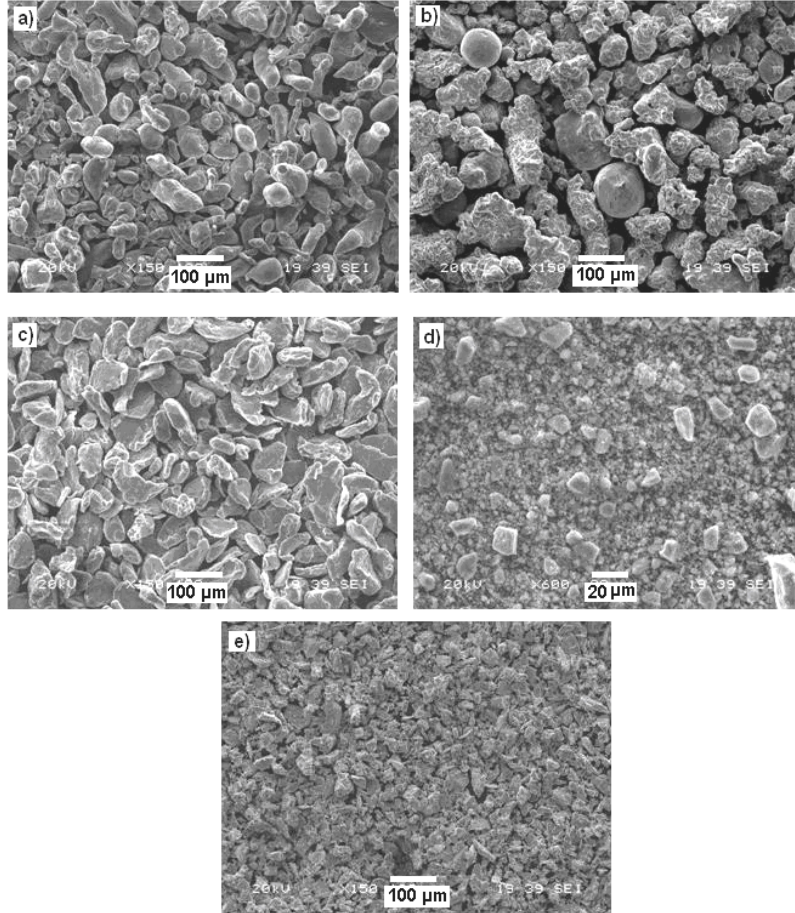
Mikrosertlik ölçümleri METKON marka MH-3 model sertlik cihazı ile yapılmıştır. Her bir numune üzerinde seçilmiş 5 noktaya 25 gr yük 15 saniye süre ile uygulanmış, tespit edilen değerlerin ortalaması sertlik değeri olarak kabul edilmiştir.

BÖLÜM 5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1 Tozların Özellikleri

5.1.1 Tozların Fiziksel Özellikleri

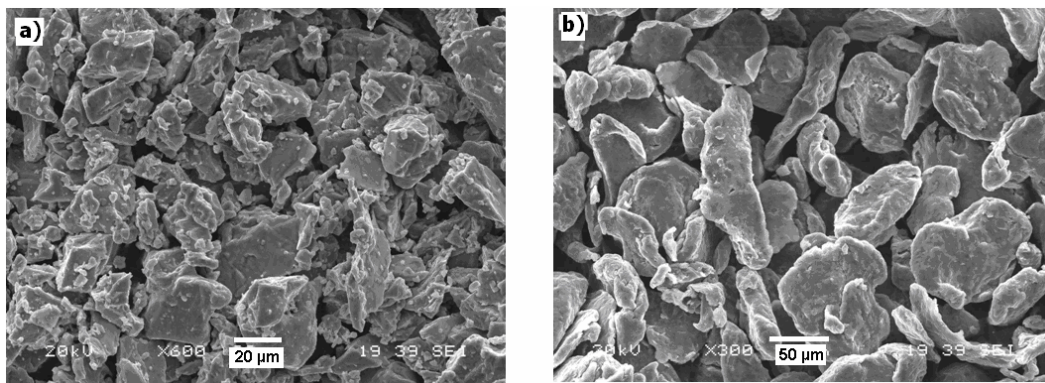
Kullanılan malzemenin fiziksel özelliklerinin araştırılması amacıyla tedarik edilen tozlar taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile morfolojik incelemeye tabi tutulmuştur. Şekil 5.1.'de tozlara ait SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 5.1. Kullanılan tozların SEM görüntüleri a) Alüminyum, b) Bakır, c) Magnezyum, d) Silisyum ve e) Titanyum.

Kullanılan tozların SEM görüntüleri incelendiğinde atomizasyon yöntemiyle üretilmiş olan alüminyum ve bakır tozlarının göreceli olarak daha büyük tane boyutuna sahip ve düzensiz şekilde oldukları görülmektedir (Şekil 5.1-a ve 5.1-b). Magnezyum tozları ise tabakalı düzensiz şekilli yapıda olup, alüminyum ve bakıra oranla daha küçük taneli olduğu tespit edilmiştir. Silisyum tanelerinin tane boyut dağılımının diğer tozlara oranla daha geniş olduğu söylenebilir (Şekil 5.1-d). Bu durum tane boyutu dağılımı ölçümlerinde de teyit edilmiştir (Şekil 5.3). Titanyum tozlarının ortalama tane boyutu Al, Cu ve Mg'dan çok daha küçük olmakla birlikte Si tozlarından daha büyük olduğu görülmektedir.

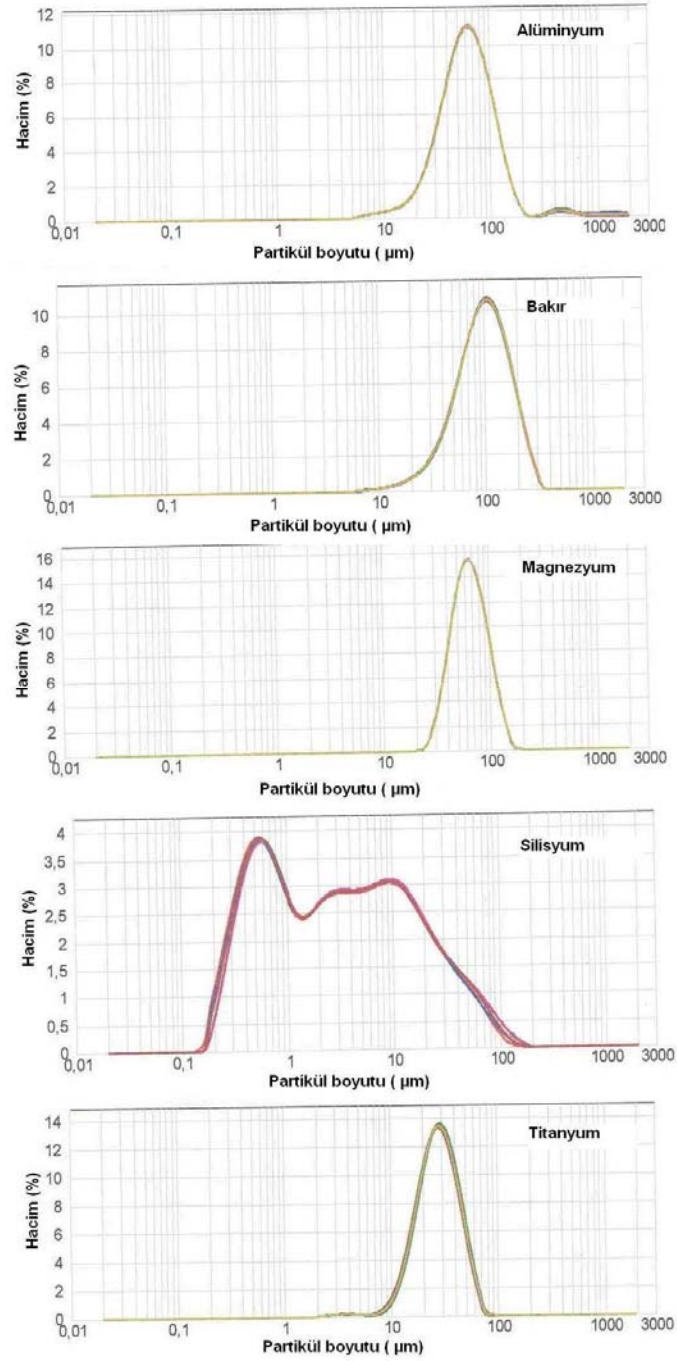
Toz morfolojileri incelendiğinde alüminyum ve bakır tanelerinin atomizasyon yöntemiyle üretilen tozların karakteristik özelliklerini taşıdığı söylenebilir. Ayrıca üretim yöntemleri hakkında kesin bilgi bulunmayan titanyum ve magnezyum tozları hakkında daha detaylı bilgi edinmek amacı ile yüksek büyütme SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 5.2.'de sunulan bu görüntüler incelendiğinde bu tozların elektrokimyasal yöntemlerle üretilip daha sonra mekanik olarak öğütüldüğü kanısına varılmıştır. Toz özelliklerinin incelenmesi sonucunda, bu çalışmada kullanılan Al, Cu, Mg ve Ti tozlarının ortalama tane boyutu, tane şekilleri ve boyut dağılımlarının yapısal T/M parça üretimi için uygun olduğu düşünülmüştür.



Şekil 5.2. Yüksek büyütme görüntüleri a)titanyum ve b)magnezyum tozları

Tozların tane boyut dağılımının belirlenmesi için *Malvern Mastersizer 2000* analiz cihazı kullanılmış ve elde edilen tane boyutu dağılımı grafikleri Şekil 5.3.'te

verilmiştir. Toz dağılımlarının mukayeseli olarak incelenebilmesi amacı ile grafikler alt alta ve aynı küçültme oranı ile sunulmuştur.



Şekil 5.3. Kullanılan tozlara ait toz boyut dağılımı grafikleri

Toz boyut dağılımı grafiklerinde de görüldüğü gibi, silisyum tozlarının tane boyutu dağılımı diğer tozlara nispeten daha geniştir (Şekil 5.3). Bunun sebebi olarak silisyumun iri kayaç formunda 5–10 cm çaplı blok kütleler halinde temin edilip daha sonra halkalı değirmende laboratuvar ortamında öğütülmüş olması gösterilebilir.

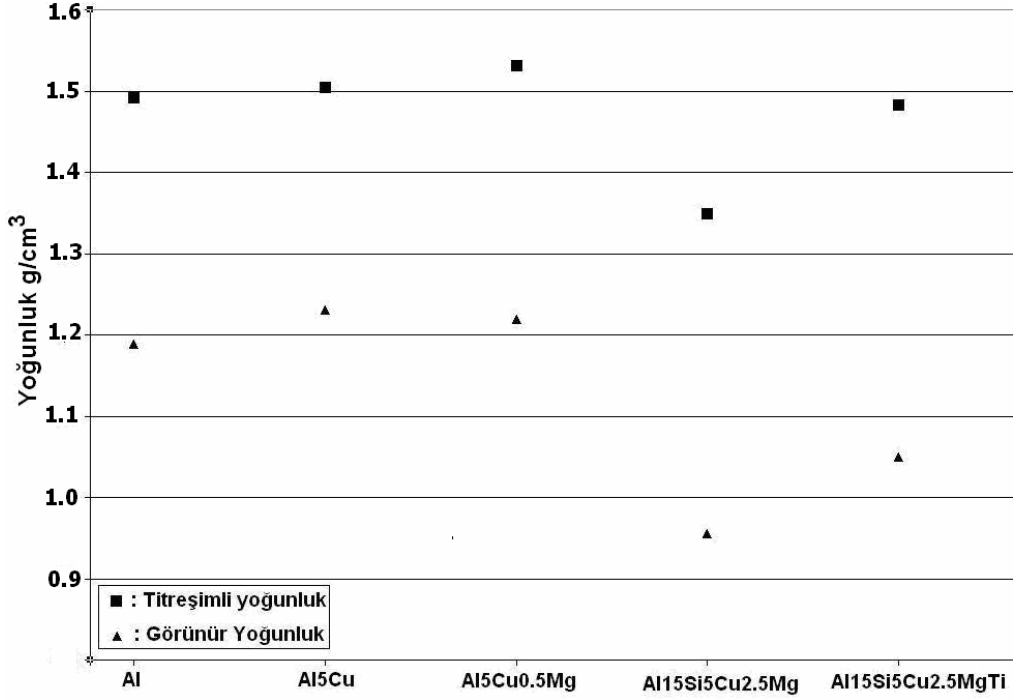
Halkalı değirmende 6 dakika süre ile öğütülen silisyum tozları öğütme sonrası 75 mikronluk elekten geçirilmiş ve partikül morfolojileri SEM`de incelenmiştir. SEM görüntüleri öğütme işleminin yeterince homojen olmadığını ortaya koymaktadır (Şekil 5.1-d ve Şekil 5.3). Bu durum Şekil 5.1-d`de yüksek büyütme oranlarında elde edilmiş SEM görüntüsünde de belirlenmiş olup silisyum tanelerinin çoğunlukla birkaç mikron boyutunda olduğu ancak az miktarda da olsa 20 µm boyutlu büyük kütleli tanelere rastlandığı görülmektedir. Alüminyum ve bakır tanelerinin ortalama tane boyutunun sırasıyla yaklaşık 60 ve 95 mikron olduğu yine tane boyut analizi grafiklerinde görülmektedir (Şekil 5.3). Bu tozların benzer prosesler sonucu ile üretilmesi sonucunda tane boyut dağılımı birbirine benzerdir. Alüminyum tozlarına ait grafik incelendiğinde bakır tozlarından farklı olarak yaklaşık 500 mikron boyutunda az miktarda (yaklaşık % 0.5) kümeleşmeler (aglomerasyon) olduğu görülmektedir. Genel olarak kümeleşmelerin olmadığı tane boyutu ve boyut dağılımı ile tane şekilleri açısından Al ve Cu ana toz yapılarının T/M imal süreçleri için uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durum Bölüm 5.2.`de sunulan sayısal verilerle uyuşmaktadır.

Ayrıca Şekil 5.3. incelendiğinde magnezyum ve titanyum tozlarına ait tane boyut dağılımı Al ve Cu tozlarına göre daha dar ve homojendir. Bu durum öngörülen alaşımlar için hazırlanan karışım tozlarının şekillendirme öncesi paketlenme davranışları üzerine olumlu etki sağlamıştır.

Alüminyum içerisine farklı oranlarda Cu, Mg, Si ve Ti ilavesi ile sinterleme işlemi sonrasında yüksek mekanik dayanıma sahip T/M Al alaşımlarının üretilmesi planlanmıştır. Bu amaçla Bölüm 4.1.`de açıklandığı şekli ile dört tür alaşım için karışımlar hazırlanmıştır. Bunlar; Al matris malzeme olmak üzere % ağırlıkça ilgili elementler içeren Al5Cu, Al5Cu0.5Mg, Al15Si5Cu2.5Mg ve Al15Si5Cu2.5MgTi yapısını sağlayacak element formda ön karışım tozlarıdır. Al tozları ise kontrol ve mukayese amaçlı katkısız olarak kullanılmak suretiyle yukarıda belirtilen karışım tozları ile birlikte benzer proseslerden geçirilerek preslenmiş ve sinterlenerek mekaniksel testler uygulanmıştır.

5.1.2. Tozların fiziksel özelliklerinin teknolojik özelliklere etkisi

Elementel düzeyde ön karışımları hazırlanan tozların görünür ve titreşimli yoğunlukları Şekil 5.4'te, toz akış davranışları ise Tablo 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.4. Hazırlanan toz karışımlarının görünür ve titreşimli yoğunlukları

Saf haldeki külçe alüminyumun yoğunluğu 2.70 g/cm^3 tür. Hesaplamalarda bu değer teorik yoğunluk olarak kabul edilmiştir. Alüminyum tozlarının görünür yoğunluğu yaklaşık 1.18 g/cm^3 , titreşimli yoğunluğu ise yaklaşık 1.48 g/cm^3 olarak ölçülmüştür. Görünür yoğunluk teorik yoğunluğun % 43'üne titreşimli yoğunluk ise yaklaşık % 54'üne eşit olup titreşim sonrası yoğunluk artış miktarı yaklaşık % 25 olmuştur. Bu değer alüminyum tozlarının presleme öncesi paketlenme yeteneklerinin iyi ve kabul edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir. Toz paketleme faktörünü etkileyen faktörler arasında şekil faktörü dışında en önemli ikincil faktörün toz boyut dağılımı olduğu düşünüldüğünde düzensiz şekilli alüminyum tozlarının titreşimle daha yüksek paketleme oranına sahip olmasının nedeni olarak tane boyut dağılımı aralığının çok dar olmaması ve ortalama tane boyutunun $60 \mu\text{m}$ olması gösterilebilir.

Bakır katkısıyla gerek görünür gerekse titreşimli yoğunluk değerlerinde artış görülmektedir. Bakırın teorik yoğunluğunun alüminyuma nispeten büyük olmasından dolayı görünür ve titreşimli yoğunlukların daha yüksek çıkması normal olarak kabul edilmiştir. Al içerisine ağırlıkça % 5 oranında Cu ilave edilmesi sonrasında elde edilen karışımın titreşim sonrası yoğunluk artış miktarı saf Al tozları ile elde edilen değere yakın çıkmıştır. Bu durum Al₅Cu karışım tozunun paketlenme yeteneğinin Al matris toz malzemedeki olduğu üzere iyi olduğunu göstermektedir.

Magnezyum ilavesi sonrası elde edilen Al₅Cu_{0.5}Mg karışım tozunun Al₅Cu'a göre görünür yoğunluğunda çok küçük miktarda düşme olurken titreşim sonrası yoğunluğunda artış olmuştur (Şekil 5.4). Magnezyum tozlarının tabakalı bir yapıda olmasından dolayı görünür yoğunluğun düşük çıkmış olması normal kabul edilebilir. Ayrıca, Mg tozlarının ortalama tane boyutu Al ve Cu tozlarına oranla daha düşüktür. Bu nedenle presleme öncesi paketleme yoğunluğunu arttırmak amacı ile kısa süreli uygulanan titreşimle birlikte magnezyum tozlarının nispeten daha büyük taneli olan bakır ve alüminyum tozlarının arasına girerek titreşim sonrası yoğunluğu artırdığı söylenebilir. Bu durum yine presleme ve sinterleme öncesi avantaj olarak kabul edilmiştir. Al içerisine Cu ve Cu-Mg ilavesinin tozların akış davranışı üzerine olumsuz etkileri olmadığı gibi küçük bir miktar akış hızı artışlarına da neden olduğu görülmüştür (Tablo 5.1).

Şekil 5.4'de görüleceği üzere silisyumun ilaveli karışım tozlarının görünür ve titreşimli yoğunlukları düşük çıkmıştır. Silisyum ve magnezyumun özgül ağırlıkları alüminyuma göre daha düşüktür. Karışım içerisine ağırlıkça % 15 silisyum ve % 2.5 magnezyumun ilave edilmesi sonrasında elde edilen yapıların görünür yoğunluklarının düşük olması nedeniyle normal kabul edilebilir. Ancak Al₁₅Si₅Cu_{2.5}Mg ve Al₁₅Si₅Cu_{2.5}MgTi karışım tozlarında titreşim sonrası yoğunluk artış miktarı sırasıyla ~% 42 ve % 41 olmuştur. Titreşim sonrası yoğunluk artış miktarlarındaki bu yüksek artışın nedeni Al, Cu ve Mg'a göre küçük tane boyutuna sahip Ti ve mikron boyutundaki Si tanelerinin Al ve Cu iri taneleri arasındaki boşlukları kolayca doldurmaları ve böylece karışımın paketlenme yeteneğini yükseltmiş olmalarıdır. Bununla birlikte karışımlarda Si tozlarının ilavesi akış davranışlarını olumsuz olarak etkilemiş ve hatta akış hızı ölçümleri düzenli bir akış

sağlanamadığı için Al15Si5Cu2.5Mg ve Al15Si5Cu2.5MgTi karışım tozları için yapılamamıştır (Tablo 5.1). Hazırlanan toz kompozisyonlarının akış davranışları ilgili standarda uygun olarak *Hall Akışmetresi* ile tespit edilmiştir. Akış değerlerinin tespitinde her karışım için 5 farklı ölçüm yapılmış ve elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması ilgili toz karışımına ait akış hızı olarak kabul edilerek Tablo 5.1`de sunulmuştur.

Tablo 5.1. Hazırlanan toz karışımlarının akış hızları

Kompozisyon	Akıcılık (gr/s)
Al	25,12
Al5Cu	26,57
Al5Cu0.5Mg	26,20
Al15Si5Cu2.5Mg	-
Al15Si5Cu2.5MgTi	-

Silisyum içeren toz karışımlarında düzenli bir akış davranışı görülmemesinin sebebi, silisyum tanelerinin mikron boyutlarda olmasından dolayı diğer toz tanelerinin arasındaki boşluklara dolması ve bu nedenle sürtünme yüzeylerinin çok fazla artarak tanelerin rahatça hareketini engellemeleri olarak düşünülebilir.

5.1.3. Tozların termal özellikleri

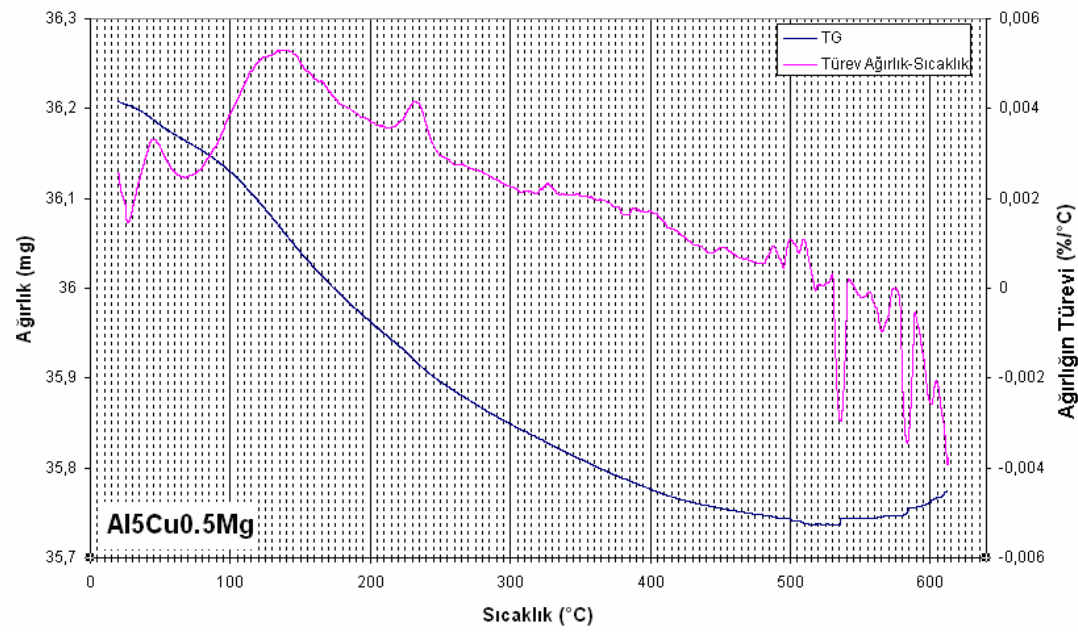
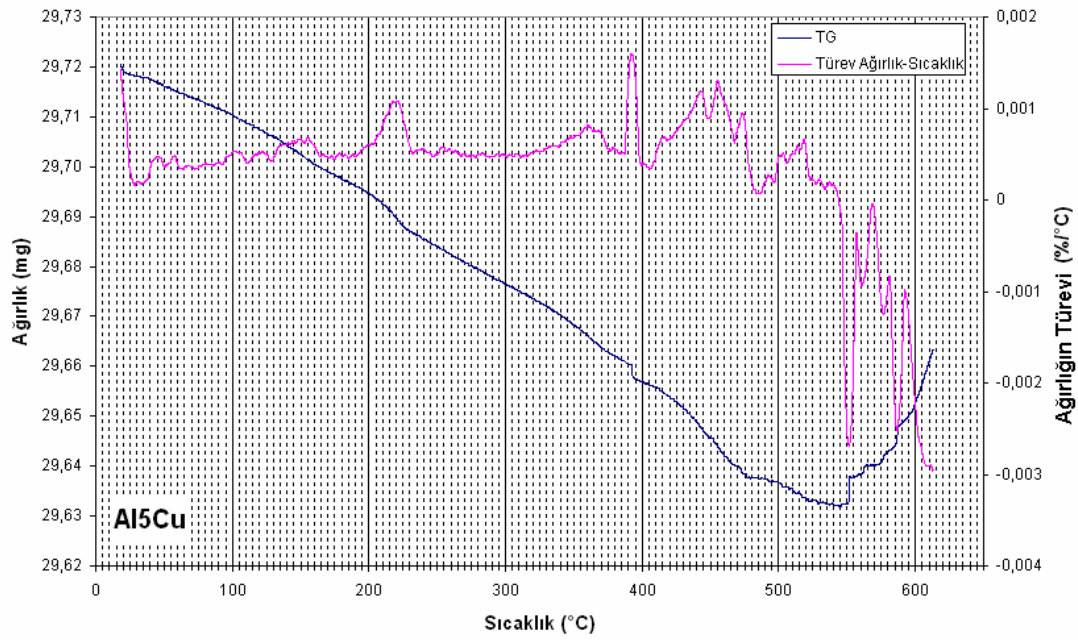
Tozlara ait termodinamik özelliklerin belirlenmesi amacıyla termal analizleri yapılmış olup elde edilen değerler Şekil 5.5`te grafiksel olarak sunulmuştur. Toz karışımlarının sıcaklıkla birlikte ağırlık değişimleri (*weight*) grafiklerde sol eksen ve ağırlık değişiminin türevi ise (*derivative weight*) sağ eksen de gösterilmiştir. Sıcaklığa bağlı kütle değişim grafiği (TG), karışım tozları içerisindeki küçük miktarlarda oluşabilecek intermetalik çözeltilerin ve ikinci fazların ergime sıcaklıklarının tespit edilmesinde yetersiz kalmıştır. Bu nedenle bilgilerin tam olarak elde edilebilmesi için sıcaklık – ağırlık değişiminin türevi ilişkisi grafikleri kullanılmıştır.

Şekil 5.6`da verilen Al-Cu ikili faz diyagramı incelenecek olursa; ağırlıkça % 5 Cu içeren Al-Cu alaşımının solidus eğrisini kestiği sıcaklığın yaklaşık olarak 518 °C,

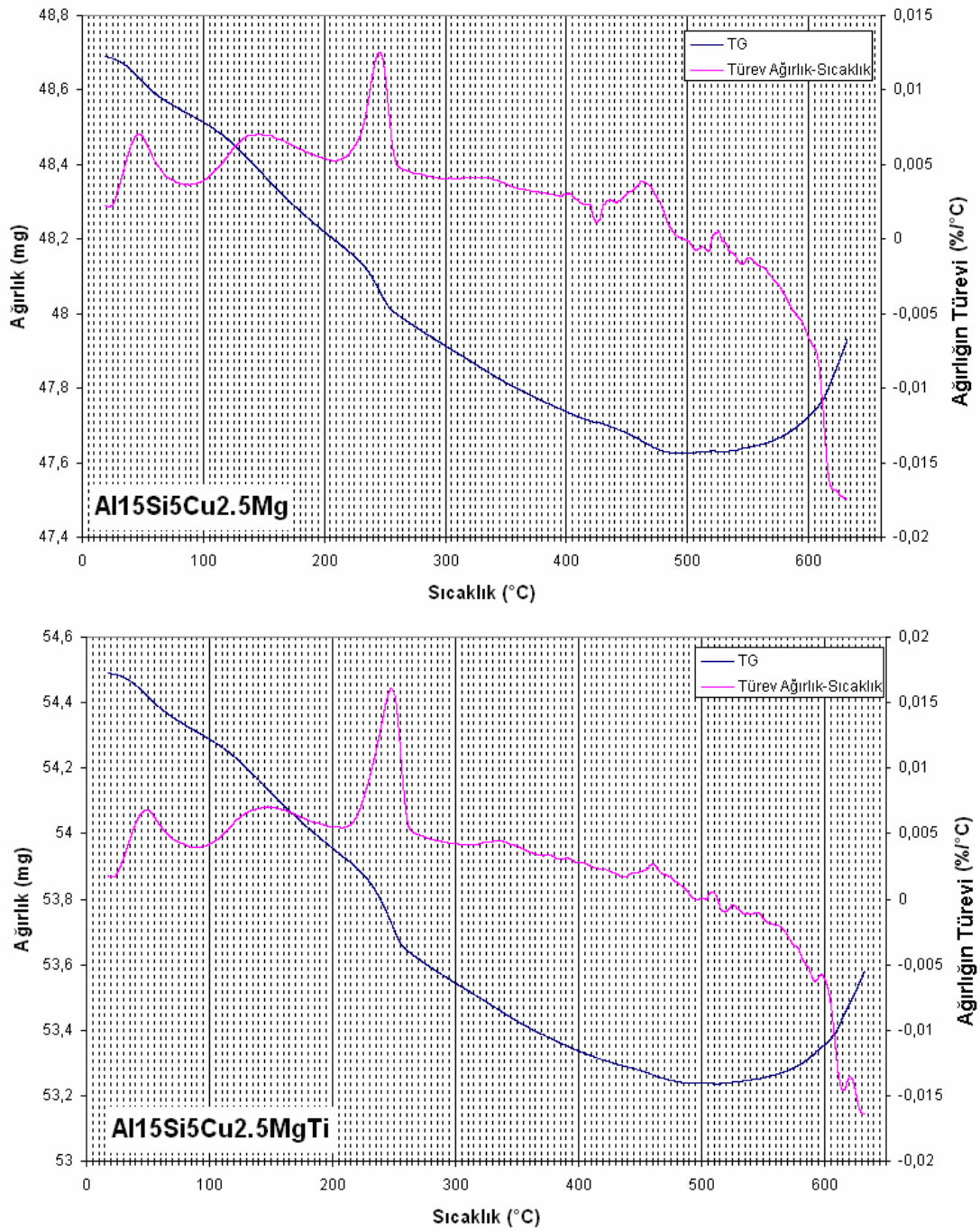
solvüs eğrisini kestiği sıcaklığın ise yaklaşık 574 °C ve sıvı hale geçtiği sıcaklığın yaklaşık 650 °C olduğu görülmektedir.

Faz diyagramlarından yararlanılarak Al₅Cu karışım tozu için termal analiz testlerinin 620 °C'ye kadar yapılmasına karar verilmiştir. Dolayısıyla tam sıvılaştırmanın olduğu noktanın pikini görmek bu nedenle mümkün olmamıştır. Ancak, Şekil 5.5`de Al₅Cu için 550 ve 580 °C civarında görülen iki büyük endotermik pikin sırasıyla solidus ve solvüs geçişleri olduğu tahmin edilmektedir. Dolayısıyla bu iki pikin gösterdiği sıcaklık değerleri arasında yapılacak sinterleme işleminin katı faz sinterleme ve 580 °C ve üzeri sıcaklıklarda yapılacak sinterlemenin ise sıvı faz sinterleme işlemi olacağı görülmüştür.

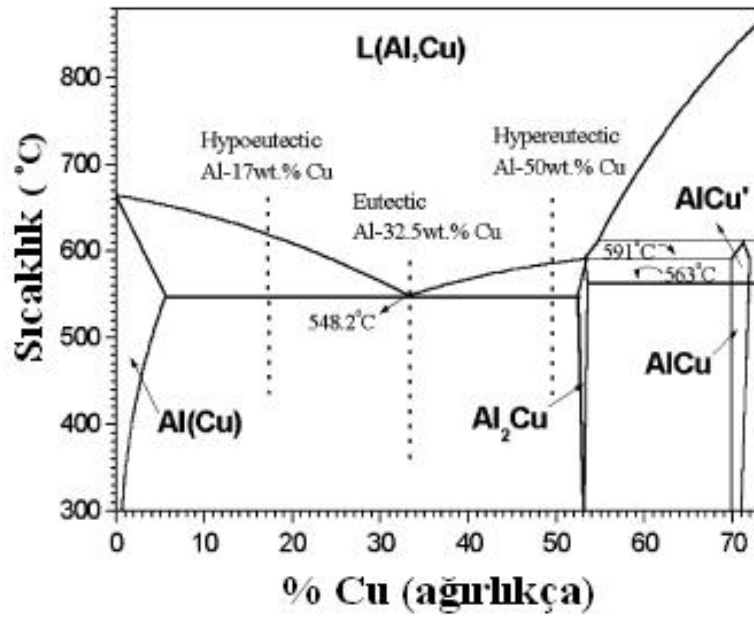
Şekil 5.5.`te verilen Al₅Cu_{0.5}Mg alaşımının termal analiz eğrileri incelendiğinde ise Al+CuAl₂ bölgesinden Al bölgesine geçiş sıcaklığının Al₅Cu bileşimindeki alaşıma göre daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştiği ancak ötekiğin oluşma sıcaklığının çok fazla değişmediği görülmüştür.



Şekil 5.5. Toz karışımlarının termal analiz grafikleri

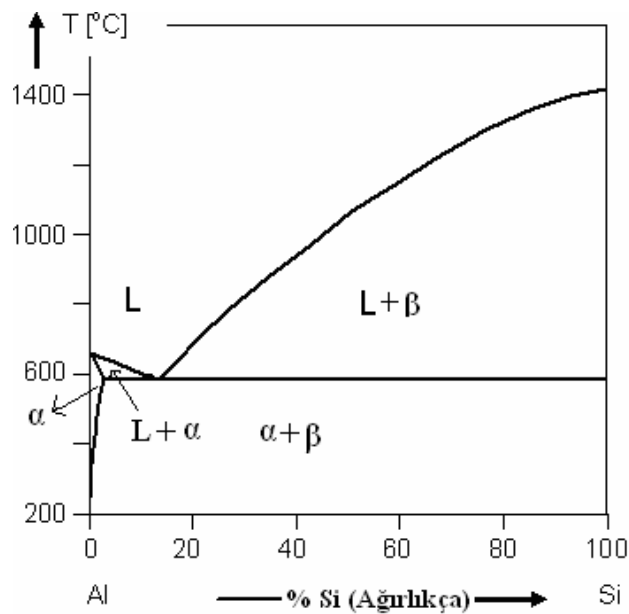


Şekil 5.5. Devamı



Şekil 5.6. Al-Cu faz diyagramı [40]

Al-Si faz diyagramı Şekil 5.7'de görülmektedir. Bu faz diyagramında ötektik nokta % 11.7 Si içeriğinde ve ergime ise 577 °C'de oluşmaktadır. Bu faz diyagramına göre içerisinde sadece % 85 alüminyum ve % 15 silisyum olan bir parça sinterlenirse, 580 °C sıcaklıkta Al-Si ötektiğini oluşturacak ve 617 °C'de ise tamamen sıvı faza geçecektir.



Şekil 5.7. Al-Si faz diyagramı [41]

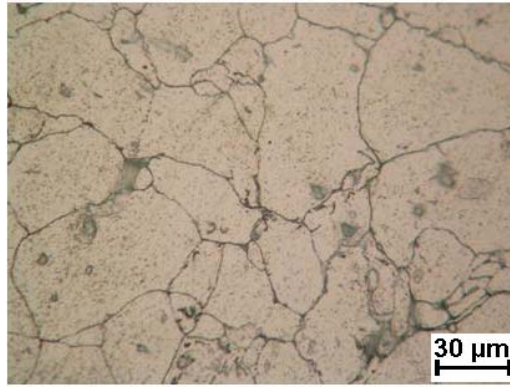
Silisyum ilaveli numunelere ait termal analiz sonuçları incelendiğinde Al₁₅Si₅Cu_{2.5}Mg alaşımında 580 °C yakınlarında bir ekzotermik reaksiyon tespit edilmiştir. Bu noktanın ötektik bölgeye geçiş sıcaklığı olduğu tahmin edilmektedir. Al₁₅Si₅Cu_{2.5}MgTi alaşımında ötektiğe giriş noktası olarak belirlenen sıcaklık daha belirgindir ve yaklaşık olarak 595 °C'dir. Al₁₅Si₅Cu_{2.5}MgTi alaşımı için 625 °C civarında ise bir endoterm daha tespit edilmiş olup bu noktanın sıvı faza geçiş noktası olabileceği düşünülmüştür.

5.1.4. Sinterleme

Karışım tozları 400 MPa basınçla tek yönlü ve çift etkili dikdörtgen şekilli kalıp içerisinde kalınlıkları 3 mm olacak şekilde 33.5 x 13.5 mm² boyutlarında preslenerek tabletler oluşturulmuştur. Kompakt haline getirilen tozlar 580–620 °C'de 0.5–2 saat süre ile sinterlenmiştir. Sinter sonrası numunelerde gözle görülür boyutsal değişim meydana gelmemiştir. Saf alüminyum içeren numunelerde bu sıcaklıkta herhangi bir sıvı faz oluşması beklenmemektedir. Dolayısıyla bu sıcaklıkta saf alüminyum içeren numunelerde sinterleme atom taşınımıyla gerçekleşecek, başka bir deyişle sinterleme mekanizması katı faz sinterleme olacaktır.

Alüminyum tozlarının katı faz sinterlenmesinde en büyük engel alüminyum taneleri yüzeyinde bulunan oksit tabakasıdır. Alüminyum tozları yüzeyinde bulunan oksit tabakasının sinter için gereken koşulları belirlemek için göz önünde bulundurulması zorunludur. Bu oksit tabakasının üretim süreçlerinde sinterlemede ve nihai ürünün mekanik özellikleri üzerinde büyük etkilere sahip olduğu bilinmektedir. Özellikle katı faz sinterlemede oksit tabakası sinter süresinin uzamasına sebep olur. Sinter süresinin az olması katı faz sinterlemede taneler arasında boyunların oluşmasını engeller ve sinterleme tam olarak gerçekleşmez, sürenin fazla olması durumunda ise tane büyümesi gerçekleşir. Tane üzerindeki oksit film tabakası sinterleme sonrası mikroyapıda tane sınırlarında birikerek kalarak malzemelerin mekanik mukavemetinin düşmesine neden olmaktadır.

Bununla beraber, oksit tabakasının presleme esnasında oluşan mekanik kuvvetle kırılması ve sinterlemede kırılan ve taneler arasında temas eden yüzeylerde soğuk kaynak oluşması mümkün olabilmektedir. Flumerfelt yaptığı çalışmada[42], oksit tabakası kalınlığının 27 \AA 'a kadar olması durumunda, alüminyum katyonlarının difüzyonuna imkan vermesinden dolayı tozların temas noktalarında boyun oluşumunun mümkün olduğunu ortaya çıkarmıştır. Sinterlenmiş saf alüminyuma ait mikroyapının optik mikroskop görüntüsü Şekil 5.8'de görülmektedir.



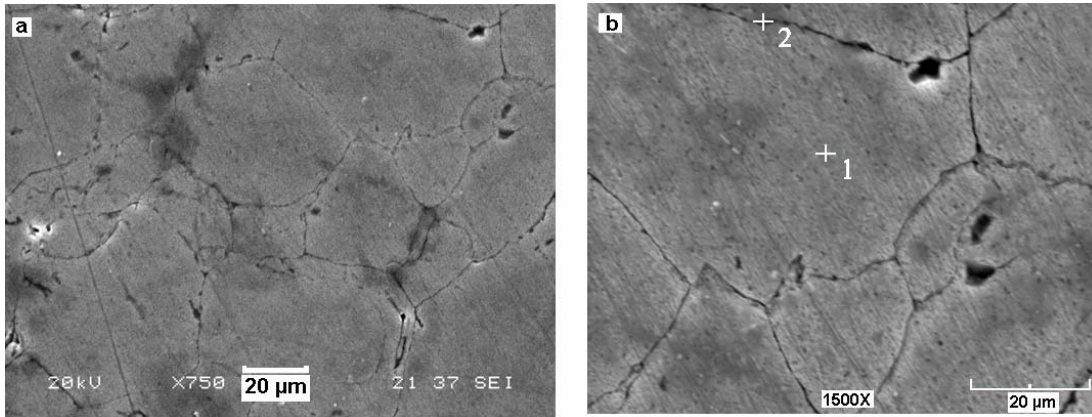
Şekil 5.8. 600°C 'de 2 saat süre ile sinterlenmiş saf alüminyum numunenin optik mikroyapı görüntüsü

Saf alüminyum numunenin sinter sonrası mikroyapısı incelendiğinde alüminyum taneleri ve bir ağ şeklinde bağlantılı oksit film tabakasından oluşan tane sınırları rahatlıkla gözlenebilmektedir. Mikroyapı incelemelerinde saf Al'lu numunelerin sinter sonrası anormal tane büyümesi gerçekleşmemiş olduğu görülmüştür. Mikroyapıda tane büyümesi mukavemete olumsuz etkisi nedeniyle T/M ile imalatta istenmeyen bir durumdur. Tane büyüklüğü sinterleme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak 1/2 ila 1/3 oranında artabilmektedir [43].

Sinter süresinin az olması katı faz sinterlemede taneler arasında boyunların oluşmasını engeller ve sinterlemenin yetersiz olmasına neden olduğundan istenmeyen bir durumdur. Ayrıca, optik mikroyapı görüntüsü üzerinde yapılan incelemeyle tane boyut dağılımının geniş olmasından dolayı farklı boyutlara sahip tanelerin mikroyapı içerisinde homojen dağıldığı ve buradan yola çıkarak büyük alüminyum tanelerinin arasındaki boşluklara nispeten daha küçük tanelerin yerleştiği söylenebilir. Bu durum sinter sonrası yoğunluk ölçümlerinde de teyit edilmiştir.

Sinter sonrası saf Al numunelerde teorik yoğunluğun ortalama % 98'ine kadar ulaşılmıştır.

Saf alüminyuma ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ve EDX analizi yapılan alan görüntüsü Şekil 5.9'da verilmiştir. Saf alüminyum numunelerin sinterlemesi katı faz sinterleme ile gerçekleştiğinden bu tanelerde alüminyum dışında başka bir element görülmesi beklenmemekte olup yapılan EDX analizi sonuçları Tablo 5.2'de verilmiştir. Aynı zamanda yüksek büyütmelerde yapılan incelemelerde özellikle taneler arasında yaklaşık 4-5 μm büyüklüğünde gözeneklerin bulunduğu görülmüştür. Gözeneklerin bazılarının keskin köşeli bir yapıya sahip olması nedeniyle sergilemesinin dayanım değerlerini olumsuz etkilediği söylenebilir.



Şekil 5.9. Yüksek safiyette Al tozundan üretilmiş numunenin (a) SEM görüntüsü ve (b) EDX analizi yapılan noktalar

Tablo 5.2. Saf alüminyum numuneye ait Şekil 5.9-b'de belirtilen noktalardan yapılan EDX analiz sonuçları (% ağırlık)

Analiz yapılan nokta	Al	O
1	100	--
2	94.572	5.428

EDX analiz sonuçlarına göre tane merkezi olarak gösterilebilecek olan bir bölgeden seçilen 1 numaralı noktanın tamamıyla alüminyumdan oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 5.2-b). 2 numaralı noktadan (tane sınırları) yapılan analizde, bu bölgede yüksek miktarda alüminyum ve az miktarda oksijene rastlanmıştır. Bunun sebebi olarak,

sinter öncesinde alüminyum tozları yüzeyinde bulunan oksit film tabakası gösterilebilir. Şekillendirme öncesinde tane yüzeyi olan bölgeler preste yapılan şekillendirmeden sonra taneler arası temas noktası haline dönüşmekte bu temas noktaları ise sinter sırasında tane sınırı olmaktadır. Dolayısıyla ham tozların yüzeyindeki oksit, sinter sonrasında tane sınırlarında kalıntı arayüzey oksiti olarak tespit edilmektedir. Gerek birbiri ile ağ şeklinde örülmüş oksit tane sınırı film tabakasının varlığı ve gerekse köşeli düzensiz dağılmış gözenekler Al sinter numunelerin mukavemetinin düşük olmasına neden olmaktadır (bk. Bölüm 5.2).

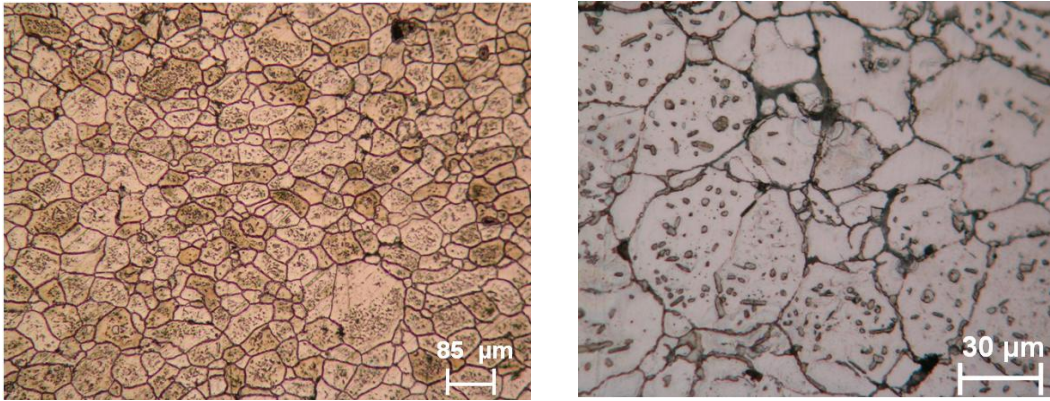
T/M alüminyum ürünlerin dayanımlarının artırılmasında 2 yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi, alüminyum tozları içine çeşitli elementler oksit, karbür, nitrür fazlarında katılarak kompozit oluşturmak; ikincisi ise Al tozları içine çeşitli elementel tozlar katarak kararlı ikincil fazlar (intermetalikler) oluşturmaktır. Alüminyum matris içine bu şekilde ince ve homojen şekilde dağıtılmış ikincil fazlar dislokasyon hareketini sınırlayıcı rol oynayarak alüminyum ürünlerin dayanımını büyük oranda artırılabilir. [44].

Literatürde alüminyum, bakır ve magnezyum üçlü sisteminde oluşan çökeltiler üzerine çeşitli çalışmalar mevcuttur. Al, Cu ve Mg karışımlarının sinterlenmesi esnasında Al_2Cu ve Al_2CuMg çözümleri oluşmaktadır. Al esaslı toz metalurjisi çalışmalarında bakırın büyük oranda kullanılmasının sebebi Al içindeki yüksek çözünürlüğüdür. Böylelikle Al-matris yapı içerisinde mevcut Al-Cu katı çözümleri, saf alüminyumlu sistemlere göre daha tok hale getirmektedir [44].

Al_2Cu ikincil fazının mikroyapıda çökmesiyle birlikte mekanik özelliklerde önemli miktarda olumlu değişimler meydana gelmektedir. Alüminyum içine küçük miktarda katılan elementlerin birkaç etkisi vardır. İlk olarak yaşlandırma ile sertleştirilebilen alaşımlarda çökme prosesini etkileyerek dayanımın artışı sağlayabilirler. İkinci olarak da tane boyutunu inceltmede kullanılabilirler. Alüminyum, bakır ve magnezyumdan oluşan mikroyapıda tetragonal Al_2Cu (θ') ve ortorombik Al_2CuMg (S') çökeltileri oluşmaktadır [44].

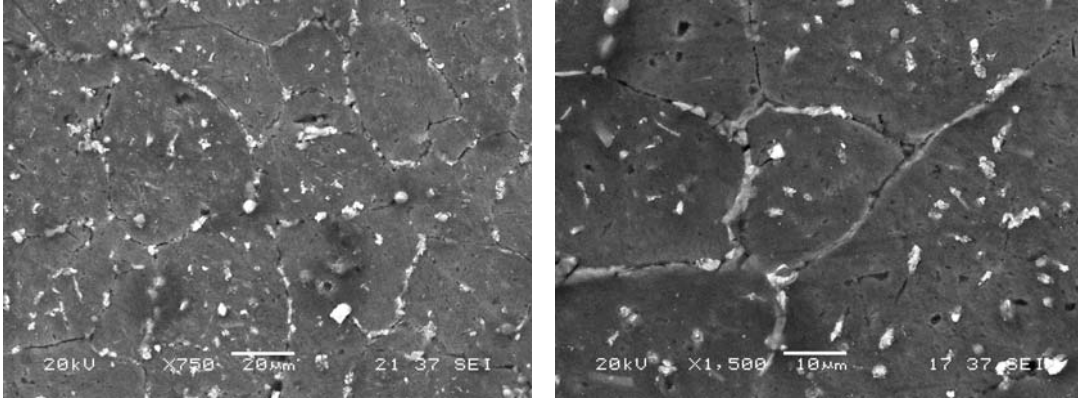
Al-Cu faz diyagramı incelendiğinde (Şekil 5.6) 590 °C'nin Al+Sıvı bölgesinde kaldığı görülmektedir. Dolayısıyla bu sıcaklıkta Al₅Cu ve Al₅Cu_{0.5}Mg alaşımlarında gerçekleşen sinterleme mekanizması sıvı faz sinterlemedir. Al-Cu faz diyagramında ağırlıkça %5 bakır bölgesinde ve 590 °C sıcaklıkta manivela kuralı uygulandığında alaşımın % 10'unun sıvı olduğu tespit edilmiştir. Oluşan sıvı fazın kapiler etki ile taneler arasındaki gözenekleri doldurması beklenmektedir. Oluşan ötektik taneleri ıslatma kabiliyetinden dolayı taneler arası bağı kuvvetlendireceğinden üretilen T/M malzemelerin dayanımının artması sağlanması beklenmektedir.

Al₅Cu numunelere ait sinter sonrası optik mikroskopla tespit edilmiş mikroyapı görüntüleri Şekil 5.10'da verilmiştir.



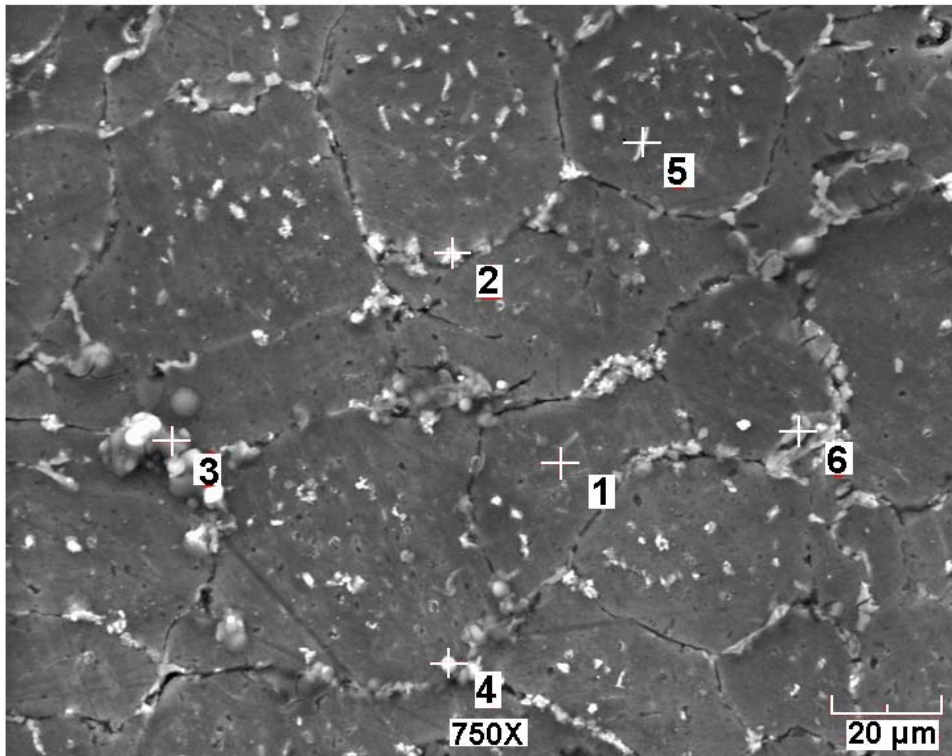
Şekil 5.10. Al₅Cu numuneye ait 590 °C'de 1.5 saat sinterleme sonrası mikroyapı görüntüsü

Şekil 5.10'daki optik mikroyapı görüntüleri incelendiğinde tanelerin boyutlarının değişken olduğunu, büyük ve nispeten küçük taneler görmenin mümkün olduğunu, genel olarak tane boyutunun başlangıç tane boyutu olan 63 μm'den küçük olduğu sadece birkaç tanenin 63 μm'dan daha büyük olduğu görülmektedir. Al₅Cu alaşım numunelerinden sinter sonrasında taramalı elektron mikroskop (SEM) ile elde edilen mikroyapı görüntüleri Şekil 5.11.'de verilmektedir.



Şekil 5.11. Al5Cu numuneye ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelendiğinde, özellikle tane sınırlarında ana yapıdan ve oksit fazdan farklı değişik fazların var olduğunu görülmektedir (Şekil 5.11'de gri alanlar). Tane sınırları dışında, tane içlerinde de noktasal olarak irili ufaklı farklı fazların oluştuğu tespit edilmiştir. Bu fazların elementel dağılımının tespit edilmesi amacıyla yapılan EDX analizleri Şekil 5.12 ve Tablo 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.12. Al5Cu numunede EDX analizi yapılan noktalar

Tablo 5.3. Şekil 5.12.'de belirtilen noktalardan yapılan EDX analiz sonuçları (% ağı.)

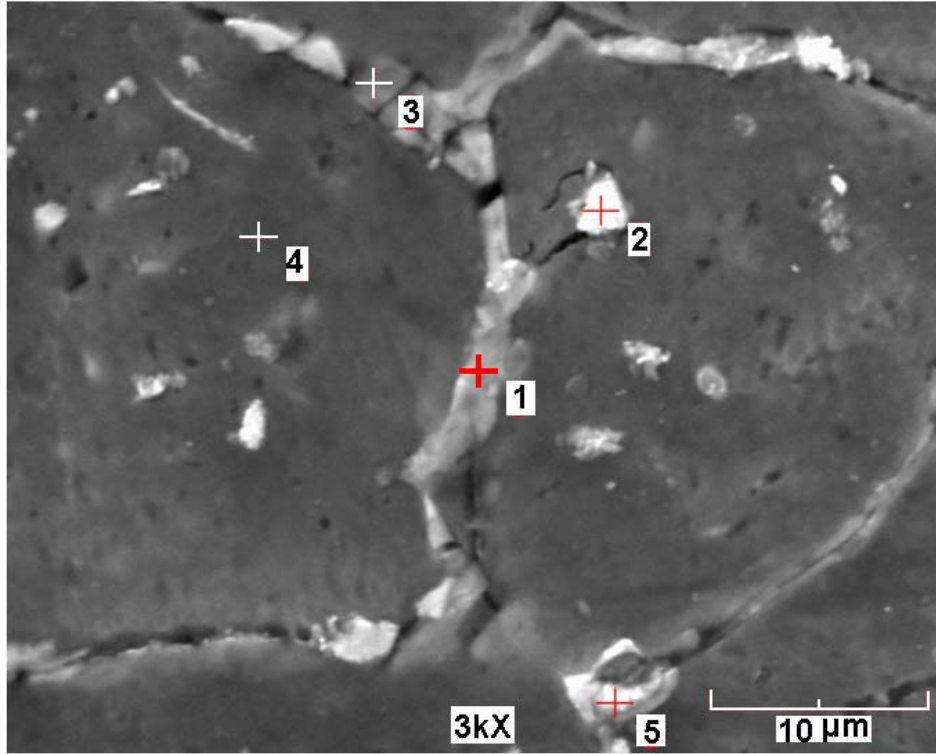
Analiz yapılan nokta	Al	Cu	O	Fe
1	97.131	2.869	--	--
2	53.025	26.594	20.381	--
3	47.103	1.479	51.418	--
4	54.379	45.621	--	--
5	77.539	13.647	8.814	--
6	45.861	33.959	12.423	7.757

EDX incelemelerinde mikroyapıda elementel halde tamamıyla bakır olan bölgeye rastlanmamıştır. Bu durum bakır tanelerinin Al taneleri içinde tümüyle çözünmesine ve özellikle tane sınırlarında Al_2Cu çözültisi oluşturmasına bağlanmıştır. Ayrıca bakır tane içerisinde çok ince şekilde yayılarak Al_2Cu oluşturmuştur. Bu durum Fogagnolo ve arkadaşlarının benzer bir alaşım kullanarak yaptığı çalışmayla için uyumludur [45].

EDX analizi sonuçları incelendiğinde, tanelerin merkeze yakın bölgelerinde yüksek oranda alüminyuma rastlandığı (Şekil 5.12'de 1 nolu nokta) ve bu bölgelerde az miktarda bakır bulunduğu görülmektedir. Bu noktalarda bakırın elementel olarak yayıldığı ve Al_2Cu çözültisi şeklinde tane içinde çökeldiği düşünülmektedir. Tane sınırlarına yakın bölgelerdeki oksijen oranındaki artış bu bölümlerin elementel bakır ve alüminyumun yüzeyinde bulunun oksit tabakasından kaynaklanan oksit fazlarla kaplandığı düşünülmektedir. Yine yapılan analizlerde tespit edilen küçük miktarda demirin (Tablo 5.3'te 6 nolu analiz) Al ve Cu tozlarının üretim tekniğinden gelen safsızlıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Taramalı elektron mikroyapıyla yüksek büyütme oranlarında elde edilen bu mikroyapı görüntüsü üzerinde alınan daha detaylı EDX analizleri Şekil 5.13'te ve Tablo 5.4'te verilmiştir. Şekildeki SEM görüntüsü incelendiğinde taneler arasındaki fazın taneler içerisindeki fazlardan farklılık gösterdiği tespit edilmekle beraber bu bilginin literatürle uyumlu olduğu görülmektedir. Daha küçük büyütmede yapılan EDX analizi sonuçları incelendiğinde oluşan sıvı fazın taneler arasında bulunduğu, ayrıca bazı taneler arasında katı faz sinterleme etkisi görüldüğü ve taneler arasında temas noktalarında boyunlar oluştuğu tespit edilmektedir. Ayrıca, bazı tanelerin deformasyonla şekil değiştirdiği ve bu şekil değişimi sonrasında tane yüzeyindeki

oksit film tabakalarının kısmen kırılarak taneler arası etkili bağ oluşumuna katkı sağladığı gözlenmektedir (Şekil 5.13). Bu mekanizmanın görülmesi Al5Cu ve Al5Cu0.5Mg alaşımlarında elde edilen mukavemet artışlarının nedenlerinden biri olarak kabul edilebilir.



Şekil 5.13. Al5Cu alaşımından elde edilen SEM görüntüsü ve EDX analizi yapılan noktalar

Tablo 5.4. Şekil 5.13' te belirtilen noktalardan alınan EDX analiz sonuçları (% ağı.)

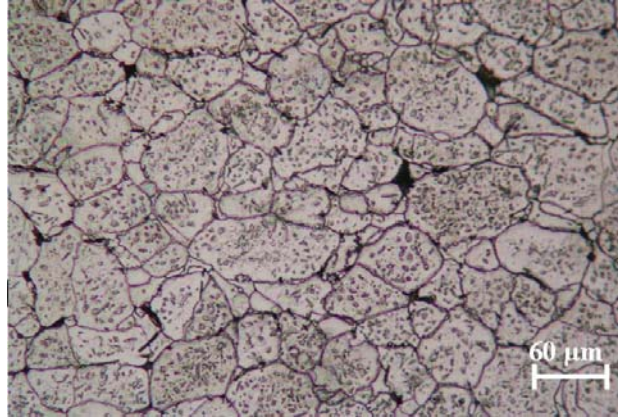
Analiz yapılan nokta	Al	Cu	O	Fe
1	55.513	28.679	7.381	8.427
2	58.024	29.167	12.809	-
3	64.352	22.356	9.762	3.531
4	95.763	1.372	2.866	-
5	36.871	21.284	40.436	-

Analiz sonuçlarına göre tane sınırlarında bakır konsantrasyonu tane içindeki bölgelere göre oldukça yüksektir. Özellikle tane içi bölge olarak nitelendirilebilecek 4 numaralı noktada bakır konsantrasyonu % 1.3'e kadar düşmüştür. Bakırın alüminyum içindeki difüzyon katsayısı 600 °C'de yaklaşık $5.01 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$ 'dir ve bu sıcaklıkta yeterli

süre beklenilmesi durumunda bakır atomlarının alüminyum içine büyük oranda yayınacağı söylenebilir[46]. Şekil 5.13'te 4 numaralı noktadaki oksijen miktarı da yine tane sınırlarından taneye doğru oksijenin yayılması ile açıklanabilir. Yine tane sınırı dışındaki bölgelerden alınan analiz sonuçları bakırın sadece tane sınırlarında değil yapının genelinde dağılmış olduğunu göstermektedir.

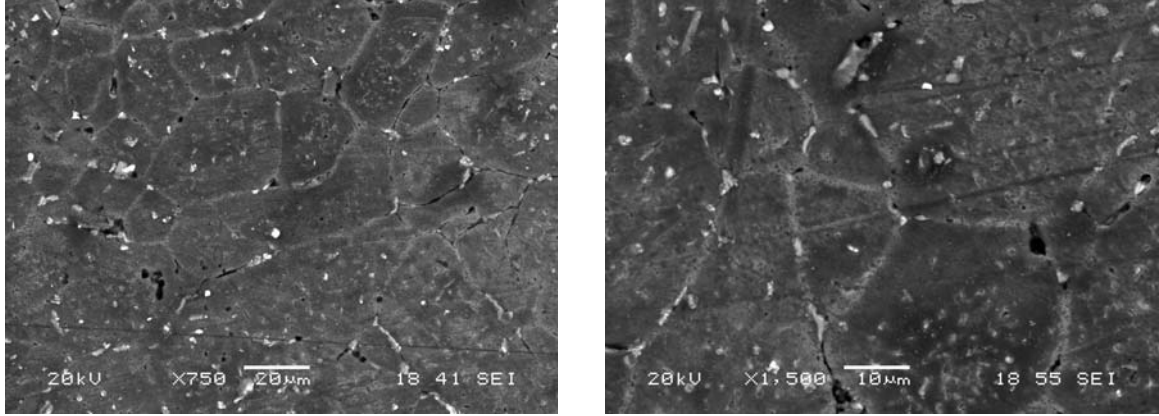
5.1.5. Mikro-düzeyde alaşımlama ve magnezyumun etkisi

Ağırlıkça % 0.5 Mg Al5Cu sistemine ilave edilerek Al5Cu0.5Mg alaşımı elde edilmiştir. Al5Cu0.5Mg alaşımına ait 590 °C'de 90 dakika sinterlenen numunenin mikroyapı görüntüsü Şekil 5.14.'te verilmektedir.



Şekil 5.14. Al5Cu0.5Mg numuneye 590°C'de 1.5saat yapılan sinter sonrası optik mikroyapı görüntüsü

Al5Cu0.5Mg numunenin mikroyapısı incelendiğinde tane sınırlarının Al5Cu numunelerine oranla daha ince ve düzensiz olduğu ve kısmen homojen dağılmış mikro ve makro düzeyde porozitelerin varlığı da dikkat çekmektedir. Tane içlerinde yer alan koyu lekelerin ikincil fazlar olduğu düşünülmektedir. Aynı numuneye ait SEM görüntüleri Şekil 5.15'te sunulmuştur.



Şekil 5.15. Al5Cu0.5Mg numuneye ait farklı büyütmelelerde alınmış SEM görüntüleri

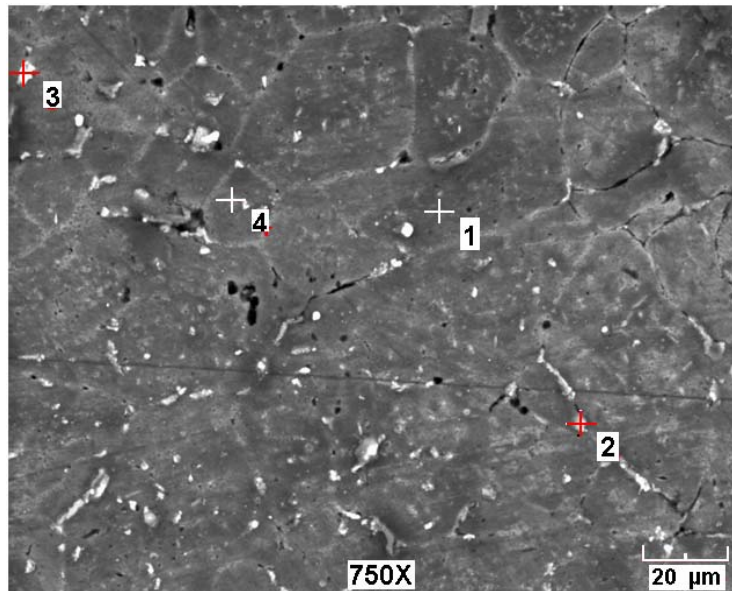
Şekil 5.15'te görülen Al5Cu0.5Mg numuneye ait SEM görüntüleri incelendiğinde tane sınırlarındaki boşlukların diğer iki numuneye (Al ve Al5Cu) göre daha az olduğu izlenimi edinilmektedir. Sinterleme esnasında oluşan sıvı fazın kapiler etkiyle beraber tanelerin arasına girerek taneleri ıslattığı ve sinterleme işleminin bu yüzden diğer 2 numuneye göre daha iyi sonuç verdiği düşünülebilir. Al5Cu0.5Mg alaşımında mukavemetin yüksek çıkması bunu doğrular nitelikte olmakla birlikte, bu alaşım için elde edilen % teorik yoğunluk değerinin Al5Cu ile aynı çıkmış olması dayanım artışının salt gözeneklilikle değil başkaca faktörlere bağlı olduğu sonucunu ortaya koymaktadır. Bu durum tezin ilerleyen bölümlerinde detaylıca incelenecektir.

Alüminyum tozu sinterleme işlemlerinde, özellikle elementel haldeki tozlardan hazırlanan alüminyum alaşımlarının sinterlenmesinde yapılacak küçük miktarda magnezyum katkısının yüksek sıcaklıklardaki faz dönüşümlerine büyük etkisi olduğu bilinmektedir. Magnezyum, alüminyum T/M proseslerinde faydalı ve reaktif bir alaşım elementi olarak kullanılmaktadır. Magnezyum katkısı ile alüminyum oksidin ince bir tabaka şeklinde tane sınırlarında devamlılığı engellenmiştir (Şekil 5.14). Ayrıca Mg ilavesi ile alaşım içerisindeki ötekliklerin oluşum sıcaklıkları aşağıya çekilmiş ve böylece daha ince ve homojen çökeltilerin dağılmasına yardımcı olunmak suretiyle alaşımın dayanımı artmıştır. Bu bulgular literatür verileri ile uyumludur [47]. Sercombe'ye göre [48], magnezyumun alüminyum taneleri üzerindeki oksit film tabakası ile spinel ($MgAl_2O_4$) oluşturmak üzere reaksiyona girmesinden dolayı magnezyum katkısı alüminyum tozları yüzeyindeki oksit

tabakasını kısmi olarak ortadan kalkmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda bu durum sıvı faz sinterleme işleminde ıslatma işlemini kolaylaştırmaktadır .

Schaffer yaptığı çalışmada [46], alaşıma katılacak % 0.15 civarında magnezyumun oksit tabakasının kırılmasına sebep olarak taneler arası bağlanmayı artırırken bu miktardan daha fazla miktarda magnezyumun katı eriyik mukavemetlenmesine sebep olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Al5Cu0.5Mg numunelerde mikroyapıdaki elementel dağılımı belirlemek amacıyla yapılan EDX analizinin alındığı noktalar Şekil 5.16'da analiz sonuçları Tablo 5.5'te görülmektedir.

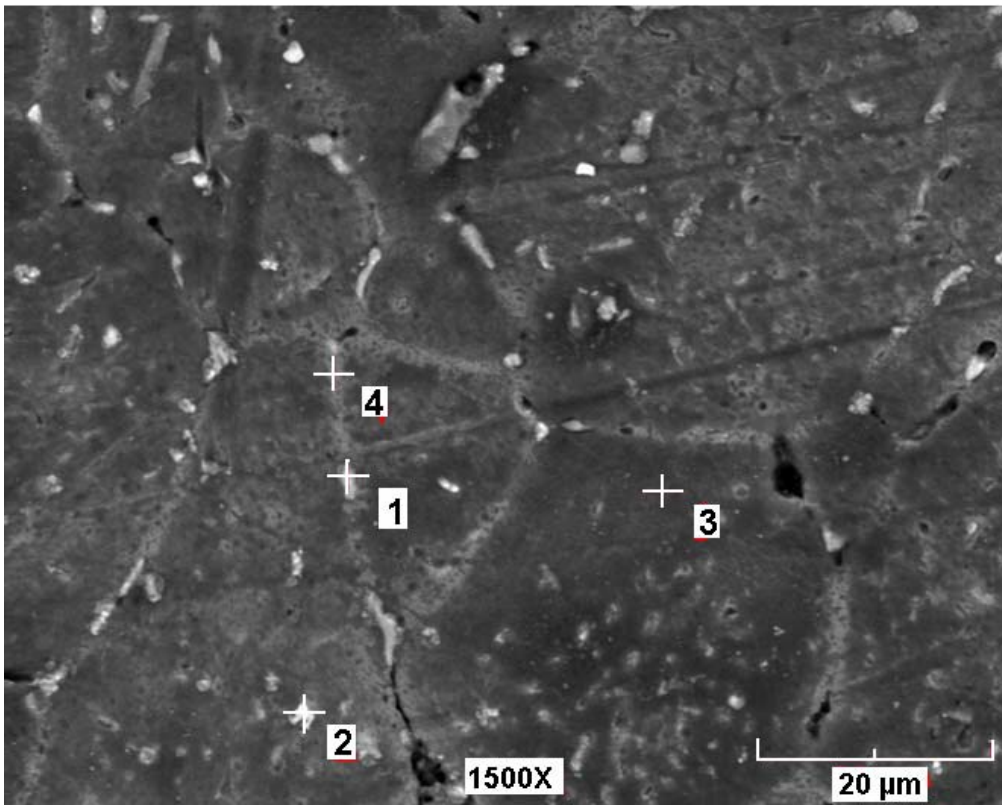


Şekil 5.16. Al5Cu0.5Mg numuneye ait SEM görüntüsü ve EDX analizi yapılan noktalar

Tablo 5.5. Şekil 5.16'da belirtilen noktalardan alınan EDX analizi sonuçları (%ağ.)

Analiz yapılan nokta	Al	Cu	Mg	O
1	97.388	1.425	1.187	--
2	58.935	5.407	0.280	34.727
3	59.671	10.741	1.025	28.562
4	97.737	1.759	0.503	--

EDX analizi yapılan noktaların bazıları tane sınırında bazıları ise tane içinde seçilmesine rağmen seçilen tüm noktalarda magnezyum bulunduğu tespit edilmiştir. Bu durum magnezyumun gerek elementel halde gerekse oluşan katı çözeltiliye girerek tüm mikroyapıda dağıldığının kanıtı olarak gösterilebilir. Bazı bölgelerde tane içi ve tane sınırında bulunan oksijenin de yine sinter öncesi tozların yüzeyindeki oksitlerden oluştuğu ve tanelere yayındığı da söylenebilir. Bu alaşımın sinterlenmesinde de yine θ' ve S' katı çözeltilerinin oluşması beklenmektedir. Bütün bu bulgular Mg'un mikro-düzeyde Al5Cu içerisine ilavesinin mukavemeti önemli ölçüde arttırmasının nedenlerini açıklar niteliktedir. Tane içi ve taneler arasındaki analizin daha açık yapılabilmesi için daha büyük büyütmede bir SEM görüntüsü üzerinden alınan EDX analiz noktaları Şekil 5.17'de gösterilmiştir.



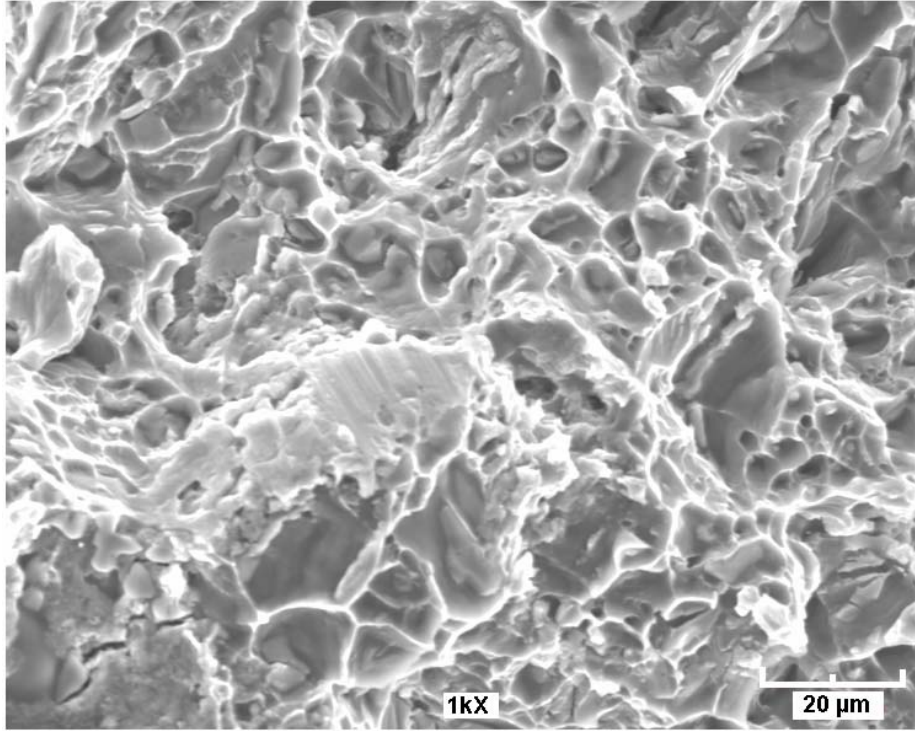
Şekil 5.17. Al5Cu0.5Mg alaşımına ait SEM görüntüsü ve EDX analizi yapılan noktalar

Tablo 5.6. Şekil 5.17.'de belirtilen noktalardan alınan EDX analizi sonuçları (% ağı.)

EDX analizi yapılan nokta	Al	Cu	Mg	O
1	70.685	17.713	1.316	10.286
2	72.445	13.136	0.628	13.791
3	93.965	3.295	0.531	2.209
4	94.720	2.267	0.897	2.116

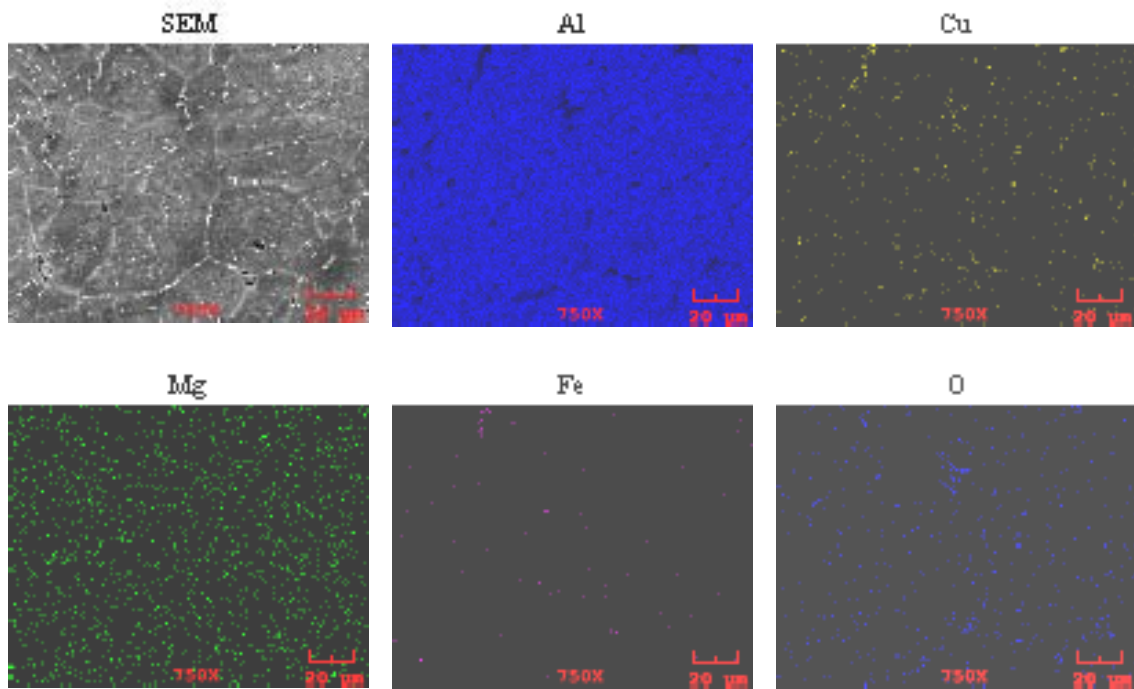
Yapılan EDX analizi yine tane içlerinde ve tane sınırlarında bir miktar magnezyumun bulunduğunu ortaya çıkarmıştır. Magnezyumun spinel faz oluşturup oluşturmadığı SEM sonuçları ile tam olarak tespit edilememekle beraber mikroyapıda bazı bölgelerde yoğun olmak üzere oksijen varlığı tespit edilmiştir. Mikroyapı içerisinde çeşitli noktalarda yapılan analizlerde yüksek bakır veya magnezyum konsantrasyonuna rastlanmış olmaması bu elementlerin mikroyapıda tamamıyla ince bir şekilde dağıldığını kanıtlamaktadır. Bu durum $Al_5Cu_0.5Mg$ üçlü sisteminde Al_5Cu ikili sisteme nazaran daha yüksek mukavemet elde edilmesinin bir diğer nedenlerindedir.

$Al_5Cu_0.5Mg$ numunelerin kırılma türünü belirlemek amacıyla 3 nokta eğme testi sonrasında kırılan yüzeyden SEM görüntüleri alınmıştır. Kırılma yüzeyinden alınan SEM görüntüsü ve Şekil 5.18.'de verilmiştir. Üç nokta eğme testi sonrası kırılmayan numuneler kırılma yüzeylerinin incelenmesi için daha sonra amaçlı olarak kırılmışlardır. Bu durum elde edilen numunelerin plastik deformasyon kabiliyetlerinin yüksek olduğunu göstermektedir. Kırılma yüzeyi incelendiğinde kırılmanın genelde tane sınırlarından olduğu ve bazı bölgelerde ise taneden kırılmanın meydana geldiği belirlenmiştir. Kırılmanın sünek kırılma olduğu kırık yüzey incelemelerinden kolaylıkla anlaşılmaktadır.



Şekil 5.18. Al5Cu0.5Mg alaşımına ait kırılma yüzeyi görüntüsü

Elementlerin mikroyapıda dağılımlarını tespit için SEM mikroyapı görüntüsü üzerinde elementel haritalama yapılmıştır (Şekil 5.19).



Şekil 5.19. Al5Cu0.5Mg numuneye ait elementel haritalama görüntüleri

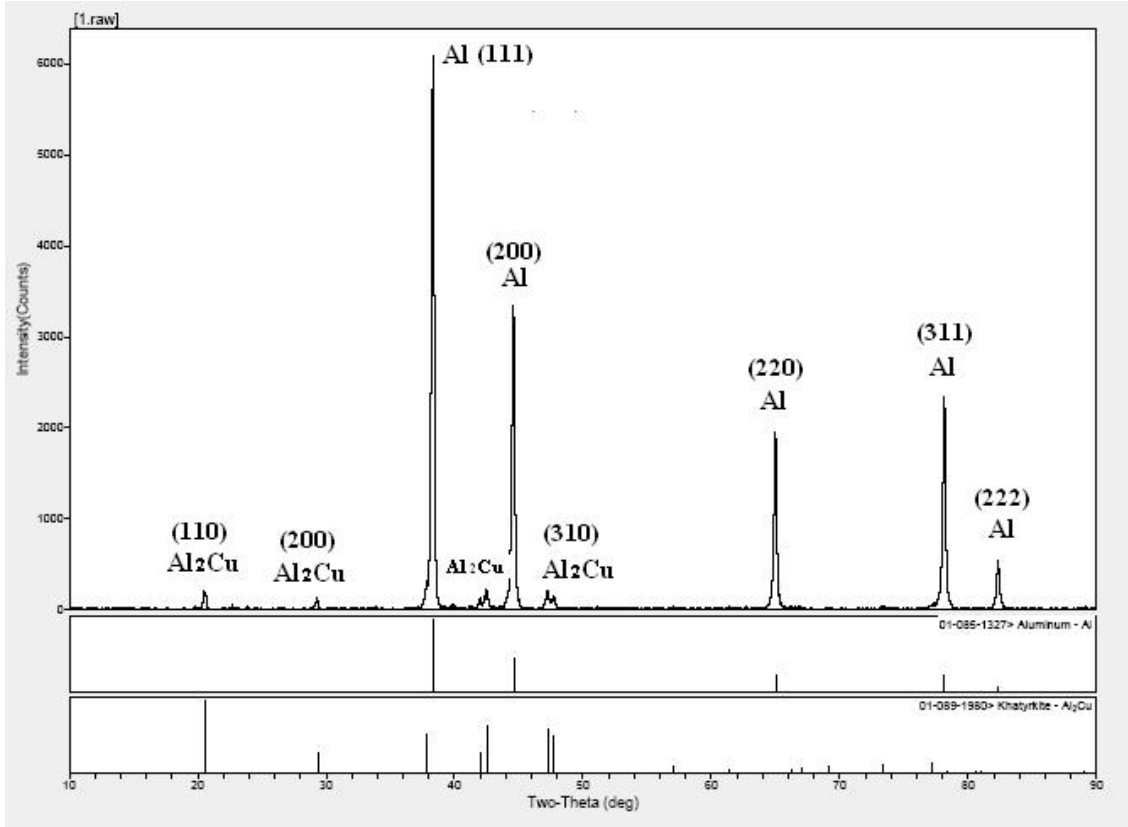
Elementel haritalama görüntülerine göre bakırın özellikle tane sınırlarında ve tane sınırına yakın bölgelerde olmak üzere yapının genelinde homojen olarak dağıldığı tespit edilmiştir. Bakırın çözeltiye girerek veya elementel olarak mikroyapıda dağıldığı ve belli oranda tane içerisine difüz ettiği söylenebilir.

Magnezyumun bakıra nispeten daha geniş bir alanda homojen olarak dağıldığı görülmektedir (Şekil 5.19). Bu durum toz karışımının hazırlanmasında kullanılan yöntemin seçilmiş tozlar için uygun olduğunu göstermektedir. Yine mikroyapıda özellikle tane sınırlarında yoğun olmak üzere mikroyapının bütün bölgelerinde magnezyuma rastlanmış olması magnezyumun çözelti halinde veya elementel olarak alüminyum taneleri içine yayındığını göstermektedir. Ayrıca magnezyumun çökeltinin büyümesini engelleyerek çözeltinin büyümeden mikroyapı içinde ince kalmasını da sağladığı söylenebilir. Magnezyumun alüminyum içinde yeralan atomu şeklinde bulunmakta, kristal kafeste hataya yol açarak dayanım artışını sağlayacağı da düşünülmektedir.

EDX analizlerinde tespit edilen demirin ise mikroyapı içinde heterojen olarak özellikle bazı bölgelerde ve çoğunlukla tane sınırlarında bulunduğu görülmektedir. Tane sınırlarında yoğun olmak üzere mikroyapının çeşitli bölgelerinde oksijen varlığı da dikkat çekmektedir (Şekil 5.19). Bu durumun ayrışma olmadan yapıda dağılmış olan demirin üretilen alaşımların mekanik özellikler üzerine olumsuz etkilerini sınırlamış olduğunu söylenebilir.

Sinter sonrası yapıda var olduğu öngörülen element ve çökeltilerin varlığının ve miktarlarının saptanabilmesi için X-Işını Difraksiyon Spektroskopisi (XRD) yapılmış olup elde edilen XRD eğrileri ve tespit edilen fazlar Şekil 5.20’de verilmektedir.

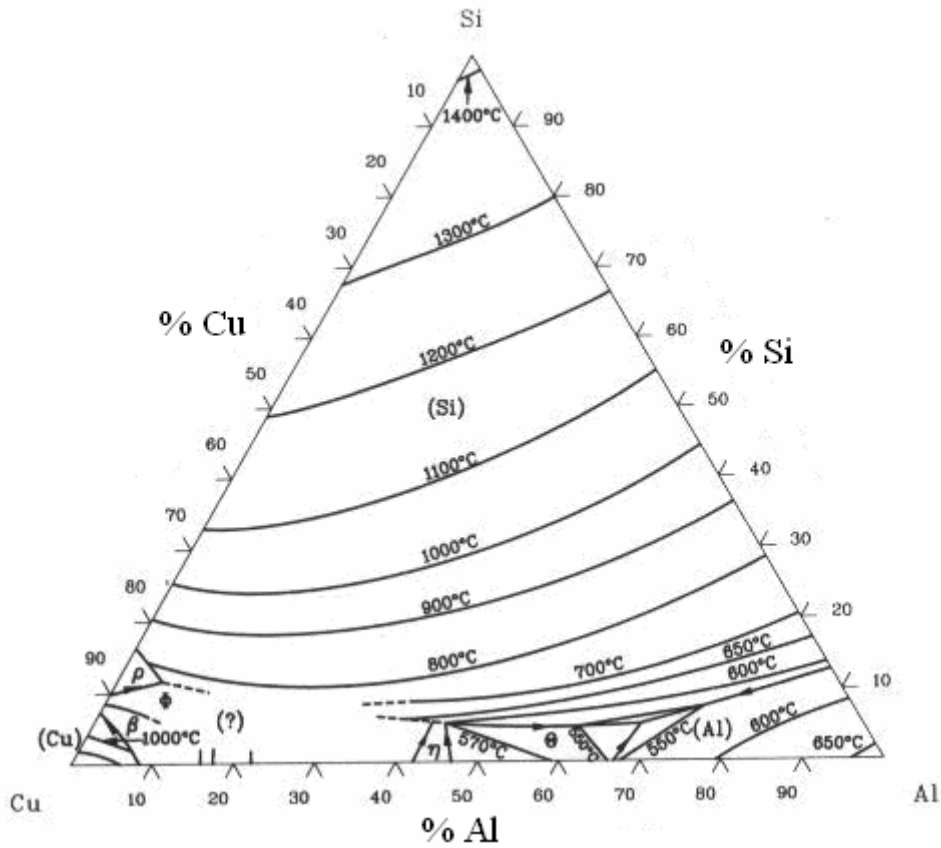
Şekil 5.20’deki XRD grafiğinde saptanan piklerin, 01-085-1327 kart numaralı alüminyum ve 01-089-1980 kart numaralı Al_2Cu (Khatyrkite) pik değerleri ile uyumlu oldukları tespit edilmiştir. Yapıda tanımlanamamış pik bulunmamaktadır. EDX analizlerinde saptanan bazı elementlerin XRD analizinde saptanamamasının nedeni bunların oluşturduğu fazların XRD analizinin minimum yakalayabileceği değer altında kalmış olmalarıdır.



Şekil 5.20. Al₅Cu_{0.5}Mn numuneye ait XRD grafiği

5.1.6. Al₁₅Si₅Cu_{2.5}Mg alaşımları

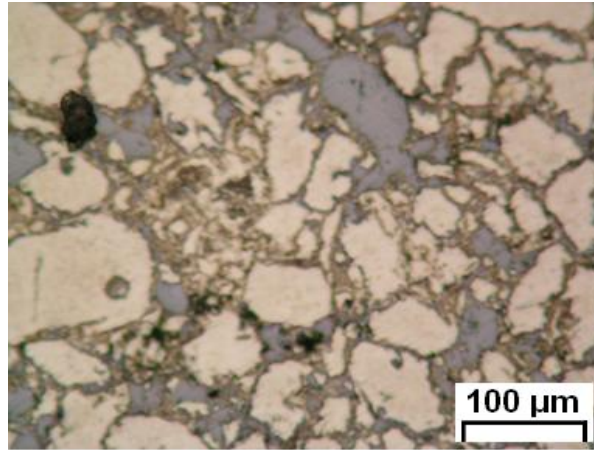
Endüstriyel uygulamalarda üretilen 4000 serisi alaşımlarda makro düzeyde alaşımlama yapıldığı için Al-Si ikili faz diyagramında yapılacak hesaplamaların bu çalışma için referans kabul edilebilirliği düşüktür. Bu yüzden mevcut araştırmada üretilen alaşımlarda ana alaşım elementleri olan alüminyum, silisyum ve bakırı içeren üçlü sisteme ait katılma diyagramını incelenmesinin sinterleme parametrelerine karar verilmesi açısından faydalı olacağı düşünülmüştür. Al-Si-Cu üçlü sistemine ait katılma diyagramı Şekil 5.21’de görülmektedir.



Şekil 5.21. Al-Si-Cu üçlü sistemine ait katılaşma eğrileri (%ağ.) [38]

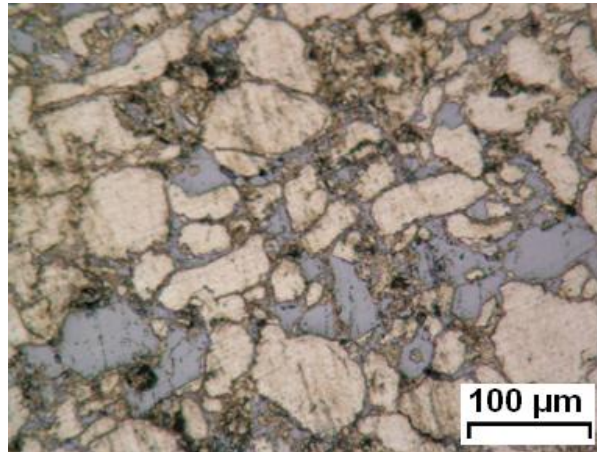
Al-Si-Cu üçlü sistemi incelendiğinde sistemin yaklaşık olarak 635 °C’de sıvılaştığı görülmektedir. Ancak magnezyum ve titanyumun sıvının oluşmaya başladığı sıcaklığa etkisi bu sistemde göz ardı edilmektedir. Magnezyumun Al_5Cu yapısına ilavesi ile ötektik oluşum sıcaklıklarının öne çekildiği DTA/TG eğrileri ile önceki bölümlerde gösterilmiştir.

Mikroyapıda Al_2Cu ve Al-Si ötektikleri nedeniyle oluşan sıvı fazın Al taneleri arasında bağlanma sağlaması ve dayanımı artırması beklenmektedir. Silisyum içeren $Al_{15}Si_5Cu_{2.5}Mg$ ve $Al_{15}Si_5Cu_{2.5}MgTi$ karışımlarının sinterleme sıcaklığı olarak 620 °C seçilmiş olup bu sıcaklıkta 2 saat süre ile azot altında bekletilmişlerdir. $Al_{15}Si_5Cu_{2.5}Mg$ alaşımının sinter sonrası mikroyapısı Şekil 5.22’de görülmektedir. Bu durum bir sonraki bölümde ele alınmıştır.



Şekil 5.22. Al15Si5Cu2.5Mg alaşımı 620°C’de 2 saat sinter sonrası optik mikroyapı görüntüsü

Mikroyapı görüntüsü incelendiğinde beyaz ve gri bölgelerin oranlarından beyaz bölgelerin alüminyum ana metali ve gri bölgelerin ise silisyumca zengin Al-Si ötektik fazları olduğu görülmektedir. Ayrıca mikroyapıda makro ve mikro düzeyde gözenekler bulunması ve özellikle makro gözeneklerin heterojen olarak dağılması nedeniyle alaşımın dayanımının düşmüş olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 5.23. Al15Si5Cu2.5MgTi alaşımının 620°C (2sa.) sinterleme sonrası optik mikroyapı görüntüsü

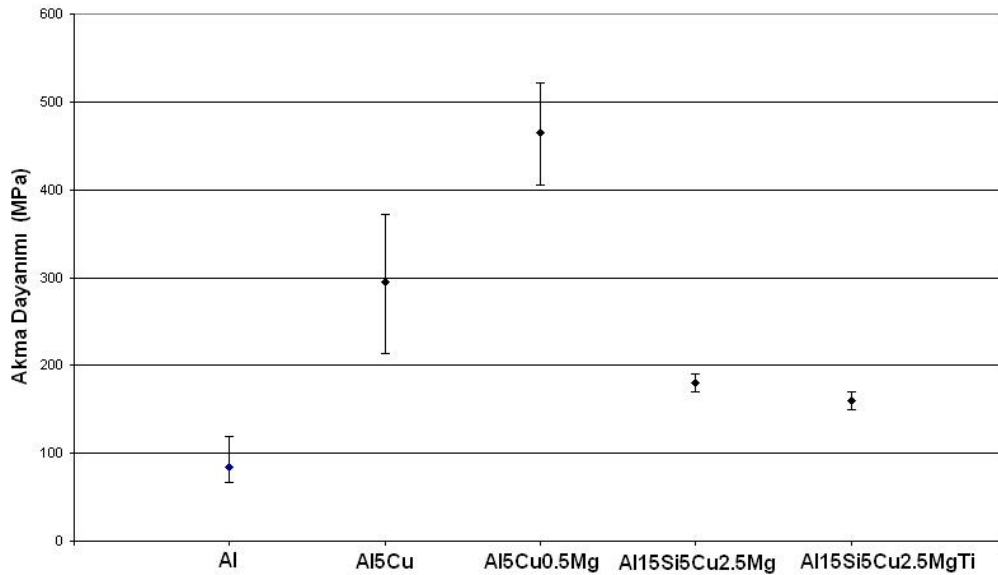
Al15Si5Cu2.5MgTi alaşımına ait sinter sonrası mikroyapı görüntüsü ise Şekil 5.23.’de verilmektedir. Şekil 5.23’te görüldüğü gibi Al15Si5Cu2.5Mg alaşımına Ti katkısının mikroyapının genel görüntüsü üzerinde çok büyük etkisi olmamıştır. Her iki alaşımında mikroyapı görüntüleri benzerdir. Bu alaşımın mikroyapısında da mikro ve makro düzeyde ve heterojen dağılmış gözenekler tespit edilmiştir. Silisyum içeren alaşımların mekanik testlerinde istenilen düzeyde dayanım değerleri elde

edilememiş olması bu numunelerin ileri analizlerinin (SEM, EDX, XRD) yapılmasına gerek olmadığına karar verilmiştir.

5.2. Mekanik Özellikler

5.2.1. Eğme dayanımı testi sonuçları

Numunelere gerekli standartlara göre 3 noktadan eğme testi uygulanmıştır. 5 numuneye uygulanan testin ortalaması alınarak bulunan değer ilgili alaşımın eğme testi sonucu olarak kabul edilmiştir. Eğme testi yapılmadan önce numunelerin yüzeyleri herhangi bir çentik etkisinin engellenmesi amacıyla 1200 grid'lik zımpara ile zımparalanmıştır. Numunelerin çekme gerilmesine maruz kalan yüzeylerinin kenar ve köşeleri ise 1200 grid'lik zımpara ile 1mm yarıçapında yuvarlatılmıştır. Test sırasında hız olarak 2 mm/dk seçilmiştir. 3 noktadan eğme testinde kullanılan 2 destek arası uzaklık 25 mm'dir. Numunelerin eğme testi sonucunda elde edilen değerler Şekil 5.24.'te görülmektedir.



Şekil 5.24. Sinterlenen numunelerin eğme dayanımı değerleri

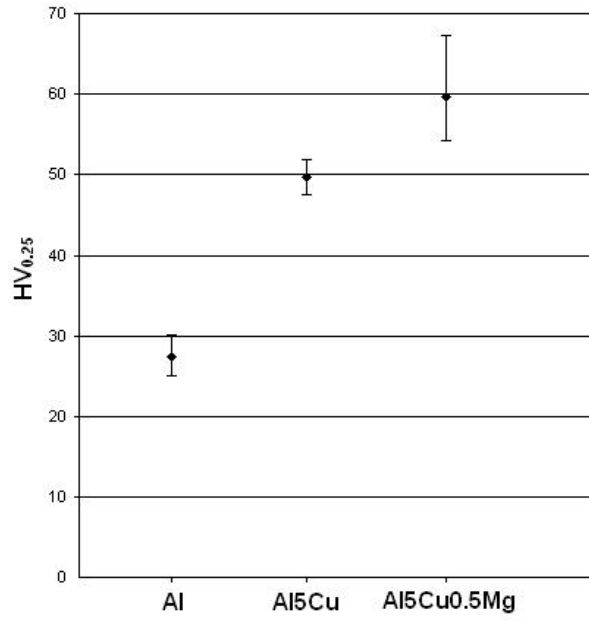
Bir önceki bölümde, mikroyapısal analiz sonuçları üzerinde alüminyum içine katılan alaşım elementlerinin gerek sinterleme mekanizmasının değişmesi suretiyle gerekse mikroyapı içinde ikinci fazlar oluşturmak suretiyle alaşımların dayanımlarını arttırıcı etki yaptığı üzerinde durulmuştu. Özellikle Al5Cu ve Al5Cu0.5Mg alaşımından elde edilen değerler literatürde rapor edilen değerlerin üzerindedir [17].

Silisyum ilaveli Al15Si5Cu2.5Mg ve Al15Si5Cu2.5MgTi alaşımlarında ise Al referans matris malzemesine göre sırasıyla % 100 ve % 83 mukavemet artışları elde edilmiş olmasına karşın Al5Cu ve Al5Cu0.5Mg alaşımlarının üzerinde bir dayanım artışına ulaşamamıştır. Her iki karışımda da elde edilen dayanım değerlerinin Al5Cu ikili alaşım sisteminden elde edilen değerler çok altında kaldığı görülmektedir (Şekil 5.24). Bunun sebebi kullanılan silisyumun külçe halde alınıp öğütülmesi, öğütülen külçelerin tedarik edilmeden önce saklanma koşullarının bilinmemesi, saflığının T/M işlemlerinde kullanılmak için yeterli olamayacağı gibi etkenler gösterilebilir. Bilindiği gibi T/M işlemlerinde küçük miktardaki inklüzyon ve kalıntı elementler, elde edilecek nihai ürünün mikroyapı ve dayanımına önemli oranda etki etmektedir. Kullanılan silisyumun gerek tedarik ve üretim sürecinde ve gerekse toz haline getirilmesi sırasında içine karışabilecek yabancı maddelerden dolayı da söz konusu Al-Si esaslı alaşımların eğme dayanımını düşürmüş olabileceği düşünülmektedir.

Sinterleme işlemleri sonrasında Arşimet prensibi kullanılarak numunelerin yoğunlukları tespit edilmiştir. Saf alüminyumda teorik yoğunluğun %98'ine ulaşılabilmişken bu değer Al5Cu alaşımı için % 94.14 ve Al5Cu0.5Mg alaşımı için ise % 94.37 olarak tespit edilmiştir. Bu değerler T/M yönteminde üretim için kabul edilebilir sınırlar içindedir.

5.2.2. Kompozisyonların sertlik değişimleri

Eğme dayanımları tespit edilen numunelerin mikrosertlik değerleri Şekil 5.25'te sunulmuştur. Sertlik değeri ölçümlerinde 25 gr yük 15 saniye süre ile uygulanmış olup her alaşım üzerinde alınan 10 izin ortalaması alaşımın sertlik değeri olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.25. Sinterlenmiş numunelerin mikrosertlik değerleri

Alaşımın tamamında sertleşme mekanizması olarak çökeltilerin oluşması ve bu çökeltilerin dislokasyon hareketlerini engellemesi gösterilebilir. Saf alüminyum numunede herhangi bir çökeltme reaksiyonu olmadığından sertlik değerleri de nispeten daha düşük olmuştur. Alaşımarda oluşan çökeltilerin belli yerde toplanması yerine alaşımın içinde homojen olarak dağılması mukavemet ve sertlik artışları için tercih edilmektedir. Bu durumun Al5Cu ve Al5Cu0.5Mg alaşımında başarılı bir şekilde sağlanmış olduğu önceki bölümdeki mikroyapı incelemelerinde belirtilmiştir.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu çalışmanın genel amacı; özellikle ağırlığın önemli olduğu otomotiv sektörü gibi yapısal uygulamalarda faydalanmak üzere piyasada kullanılanlara alternatif hafif Al alaşımlarının toz metalurjisi üretim teknolojisi kullanarak geliştirilmesidir. Bu amaçla biri saf alüminyum olmak üzere farklı elementler kullanmak suretiyle 5 ayrı kompozisyona sahip alüminyum alaşımı üretilmiştir. Bu alaşımların sinter öncesi özellikleri (toz akıcılığı, yoğunluğu, morfolojisi, termal analizleri) ile sinter sonrası mikroyapı sonuçları incelenmiş ve bu çalışmalara paralel olarak bunların eğme dayanımı, sertlik gibi mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir.

Deneysel sonuçlarının değerlendirilmesi ile aşağıdaki bulgular ortaya çıkmıştır:

1. Deneysel sırasında özellikle ana alaşım elemanı bakır ve magnezyum olan Al alaşımı numunelerin tek eksenli kalıpta rahat şekillendiği ancak silisyumlu numunelerde tozların presleme öncesi ve sonrası şekillendirilme işlemleri esnasında problemler yaşanmıştır. Silisyum ilaveli tozlarda düzenli akış sağlanamamıştır. Ayrıca bu tozların preslenmesinde tabakalaşma gibi sorunlarla karşılaşmıştır.
2. Al₅Cu ve Al₅Cu_{0.5}Mg alaşımlarının sinterlenmesi saf Al, Al₁₅Si₅Cu_{2.5}Mg ve Al₁₅Si₅Cu_{2.5}MgTi alaşımlarına göre daha düşük sıcaklıkta gerçekleşmiştir.
3. Bakır ilavesi alüminyum alaşımlarının eğme dayanımlarının önemli oranda artmasını sağlamıştır.
4. Al₅Cu yapısına mikro düzeyde magnezyum ilavesi dayanım ve sertlik değerlerinin daha da artmasına neden olmuştur.

5. Si ilave edilen alüminyum alaşımlarında ise kullanılan silisyum tozlarının saflık oranını düşük olması nedeniyle arzu edilen mukavemet değerlerine ulaşamamıştır.

6.2 Öneriler

- Bu çalışmada toz metalurjisi üretim tekniği ile elde edilen Al5Cu ve Al5Cu0.5Mg alaşımlarının mekanik özelliklerinin sinter sonrası çeşitli ısı işlemler uygulanması suretiyle mukavemetlerinin daha da arttırılabileceği düşünülmektedir.
- Al5Cu ve Al5Cu0.5Mg alaşımlarının plastik deformasyon davranışlarının belirlenmesi amacı ile yapılacak çekme deneyi ile akma ve çekme dayanımları ile kopma % uzama değerleri belirlenebilir.
- Saf ticari silisyum tozları temin edilmesi ile bu çalışmada düşük dayanım elde edilen Al15Si5Cu2.5Mg ve Al15Si5Cu2.5MgTi alaşımları ve farklı kompozisyonlara sahip Al-Si alaşımlarının T/M tekniği ile üretilebilirliği ve çeşitli mekanik özellikleri araştırılabilir.
- Bu çalışmada üretilen alaşımların otomotiv sektöründe sac levha olarak kullanılacağı düşünüldüğünde üretilen kompakt parçaların sinterleme sonrası haddelenmesi suretiyle soğuk deformasyona tabi tutulması sonrasında malzemenin mekaniksel davranışları incelenebilir.
- Gerçekleştirilen bu çalışmalar rehberliğinde, Al5Cu ve Al5Cu0.5Mg alaşımının içerisine farklı elementel tozların mikro düzeyde ilavesi ile farklı kompozisyonlara sahip alüminyum alaşımları üretilerek daha üstün mekanik özelliklere sahip olan malzemeler geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] HAAN P., MUELLER M.G., PETERS A., “Does the hybrid Toyota Prius lead to rebound effects? Analysis of size and number of cars previously owned by Swiss Prius buyers”, *Ecological Economics* 58 (2006) 592– 605
- [2] MacASKILL I.A., “Development of Aluminum-Nickel-Magnesium Powder Metallurgy Alloys”, MSc Thesis, Dalhousie University, Canada, 2005
- [3] GWILLIAM K., KOJIMA M., JOHNSON T., “Reducing Air Pollution from Urban Transport, Air Quality Thematic Group of the World Bank Report”, 2004
- [4] KOST R., “Progress Report for Automotive Lightweighting Materials”, U.S.Department of Energy, U.S.A., 2002
- [5] TUNG S.C., McMILLAN M.L., “Automotive Tribology Overview of Current Advances And Challenges For The Future”, *Tribology International* 37 (2004) 517–536
- [6] KELLY G., “Joining of Carbon-Fibre Reinforced Plastics for Automotive Applications”, Trita-Ave 2004:25, ISBN 91-7283-824-8
- [7] Internet Sitesi - AZoM™ Pty.Ltd - The A to Z of Materials and AZojomo - The "AZo Journal of Materials Online" Titanium Alloys for Automotive Applications, <www.azom.com/details.asp?ArticleID=1753> (Son giriş 07.05.2007; 23:10).
- [8] PARAJULI A., “Modelling Freight Modal Energy Use”, University of Queensland Transport Futures, Australia, March 2004
- [9] THÜMMLER F., OBERACKER R., “An Introduction to Powder Metallurgy”, Cambridge University Press, ISBN 0-901716-26-X, 1993
- [10] PATON B.C., “On The Development Of Aluminium Powder Metallurgy Alloys”, MSc Thesis, Dalhousie University, CANADA, 2004
- [11] “Japanese PM shows three years` growth as automotive parts make steady gains”, Metal-Powder.net, MPR June 2005

- [12] “European Powder Metallurgy Association Annual Report” 2003
- [13] İnternet Sitesi-JFE Steel Corporation-Products and Services-Iron Powders-Applications-“Friction Parts”
<www.jfe-steel.co.jp/en/products/ironpowders/youto.html>(son giriş 07.08.2007)
- [14] İnternet Sitesi-University of Michigan Collaborative Research Laboratory-“ Dimensional Variation Analysis For Light Weight Vehicle Structures”
<gmcr1.engin.umich.edu/research/area3.html> (Son giriş 10.05.2007; 00:53)
- [15] İnternet sitesi-European Powder Metallurgy Association [EPMA]-“Choosing PM”
<www.epma.com/about_pm/web_pages/nma_application_order.htm#automotive> (Son giriş 10.05.2007; 00:56)
- [16] ALLIN J.M., CAWLEY P., LOWE M.J.S., Adhesive Disbond Detection of Automotive Components Using First Mode Ultrasonic Resonance, NDT&E International 36 (2003) 503–514
- [17] ASM Metals Handbook, Volume 7 Powder Metallurgy, Ohio, USA, 1976
- [18] İnternet Sitesi- University of Queensland Division of Materials - “Background Powder Metallurgy”
<www.materials.uq.edu.au/powdermetallurgy/background.html> (son giriş 07.08.2007)
- [19] UPADHYAYA G.S., Sintered Metallic and Ceramic Materials, John Wiley & Sons Ltd, England, 2000, ISBN: 0471981559
- [20] İnternet sitesi-Metal Powder Industries Federation (MPIF)-“All you need to know about powder metallurgy”
<www.mpif.org/IntroPM/process.asp?linkid=2>(Son giriş 10.05.2007; 01:00)
- [21] KURT A.O., Toz Üretim Yöntemleri ve Sinterleme dersi ders ve laboratuvar notları, 2007, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
- [22] UPADHYAYA G.S., Powder Metallurgy Technology, Cambridge International Science Publishing, England, 2002, ISBN: 1898326401
- [23] KURT A.O., “A Study of Compaction of Metal Powders” M.Sc. Thesis, UMIST, U.K., 1995.
- [24] GERMAN R.M., “Powder Metallurgy& Particulate Materials Processing”, MPIF, New Jersey, USA, 2005, ISBN: 0-9762057-1-8

- [25] GERMAN R.M., "A-Z of Powder Metallurgy", Elsevier Ltd., New York, USA, 2005, ISBN:1 8561 74298
- [26] AMSTEAD B.H., OSTWALD P.F., BEGEMON M.L., Manufacturing Processes, John Wiley & Sons Ltd., 1987, ISBN: 0-471-85403-4
- [27] MUSSMAN S., "Hot Isostatic Pressing, Materials World", Vol. 7, no. 11, pp. 677-78, November 1999
- [28] SUK J.L.K, Sintering, Densification, Grain Growth and Microstructure, Elsevier, 2005, ISBN: 07506 63855
- [29] ALTINKÖK N., "Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Al₂O₃/SiC Partikül Destekli Metal Matriks Kompozit Üretimi ve Mekanik Davranışlarının İncelenmesi", Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002
- [30] Durmuş H.K., "CO₂ Lazer Kaynağıyla Birleştirilmiş Alüminyum Matriksli Kompozitlerin Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006
- [31] CHANG H., "Powder Metallurgy Preparation of New Silver-Tin Oxide Electrical Contacts From Electrolessly Plated Composite Powders", PhD Thesis, Department of Metallurgical Engineering, University of Utah, USA, 1990
- [32] DWIGHT J., "Aluminium Design and Construction, Taylor & Francis Group", 1999, ISBN 0-203-02819-8
- [33] CHAWLA S.L., GUPTA R.K., "Materials Selection for Corrosion Control", ASM International, USA, 1997, ISBN: 0-87170-474-9
- [34] İnternet sitesi-International Aluminum Institute-"IAI Statistics"-
<www.world-aluminum.org/iai/stats/index.asp> (Son giriş 10.05.2007;01:03)
- [35] SMITH W.F., "Mühendislik Malzemelerinin Yapı ve Özellikleri- Demir Dışı Alaşımlar", Çeviri: M.Erdoğan, Nobel Yayın, Ankara, 2001, ISBN: 975-591-297-5
- [36] CHEN W.F., LUI E.M., "Handbook of Structural Engineering", CRC Press, 2005, ISBN 0-8493-1569-7
- [37] MARTIN J.W., "Materials for Engineering", IOM Communications Ltd, 1997, ISBN: 1861250126
- [38] ASM Metals Handbook Volume 2- "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials", OHIO, USA, 1974

- [39] BISHOP D.P., CAHOON J.R., CHATURVEDI M.C. , KIPOUROS G.J., CALEY W.F. , “On Enhancing The Mechanical Properties of Aluminum P/M Alloys, Materials Science and Engineering”, Vol: A290 pp: 16–24 (2000)
- [40] İnternet Sitesi-Aluminium Learning-
<www.aluminiumlearning.com/html/images/phase/Al_Cu.gif > (Son giriş 10.05.2007;01:25)
- [41] İnternet sitesi-Technische Fækultat der Christian-Albrechts-Universität Zu Kiel-“Spiking and Epitaxial Si in Contact Holes”- < www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_6/advanced/t6_4_1.html > (Son Giriş 10.05.2007;01:20)
- [42] FLUMERFELT J.F., “Aluminum Powder Metallurgy Processing”, PhD Thesis, Iowa State University, Iowa, USA, 1998
- [43] GERMAN R.M., “Powder Metallurgy Science, Metal Powder Industry”, USA, 1984
- [44] KLOC L., SPIGARELLI S., CERRI E., EVANGELISTA E., LANGDON T.G., “Creep Behavior of An Aluminium 2024 Alloy Produced by Powder Metallurgy”, Acta Mater. Vol. 45. No. 2, pp. 529-540. 1997
- [45] FOGAGNOLO J.B. ,AMADOR D.,RUIZ-NAVAS E.M. ,TORRALBA J.M., “Solid Solution in Al–4.5 wt% Cu Produced By Mechanical Alloying”, Materials Science and Engineering A, 433 (2006) 45–49
- [46] SCHAFFER G.B., SERCOMBE T.B., LUMLEY R.N., “Liquid Phase Sintering of Aluminium Alloys”, Materials Chemistry and Physics, 67 (2001) 85–91
- [47] ANDERSON I. E.,FOLEY J.C., “Determining The Role of Surfaces and Interfaces In The Powder Metallurgy Processing of Aluminum Alloy Powders”, Surface and Interface Analysis. 2001; 31: 599–608
- [48] SERCOMBE T.B., “On The Sintering of Uncompacted, Pre-Alloyed Al Powder Alloys”, Materials Science and Engineering A 341 (2003) 163_/168

ÖZGEÇMİŞ

Azim GÖKÇE 1980 yılında Merzifon/Amasya'da doğdu. İlköğretimini tamamladıktan sonra 1998 yılında Merzifon Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2003 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi'nden mezun oldu. 2004 yılı sonunda Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen aynı göreve devam etmektedir.