

**GAZ ATOMİZASYON YÖNTEMİ
İLE Al 2024 TOZU ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

**2012
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

Zafer ÖZTÜRK

**GAZ ATOMİZASYON YÖNTEMİ İLE
Al 2024 TOZU ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Zafer ÖZTÜRK

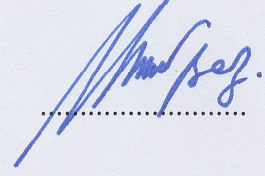
**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metal Eğitimi Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Ocak 2012**

Zafer ÖZTÜRK tarafından hazırlanan " GAZ ATOMİZASYON YÖNTEMİ İLE Al 2024 TOZU ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU" başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mustafa BOZ

Tez Danışmanı, Metal Eğitimi Anabilim Dalı

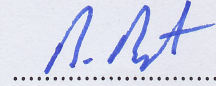


Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir. 13/01/2012

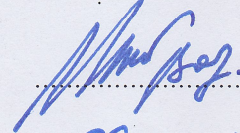
Unvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

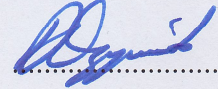
Başkan: Doç. Dr. Bülent BOSTAN (GÜ)



Üye : Doç. Dr. Mustafa BOZ (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK (KBÜ)

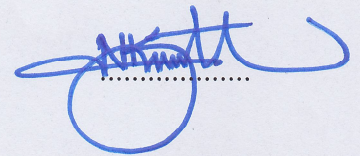


...../...../2012

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Zafer ÖZTÜRK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GAZ ATOMİZASYON YÖNTEMİ İLE Al 2024 TOZU ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Zafer ÖZTÜRK

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metal Eğitimi Anabilim Dalı**

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Mustafa BOZ

Ocak 2012, 76 sayfa

Bu çalışmada ilk olarak daha önce Karabük Üniversitesi'nde imal edilmiş olan gaz atomizasyon ünitesinin eksikleri giderilmiştir. Bu amaçla gaz atomizasyon ünitesi bünyesinde bulunan ergitme fırının bağlantıları kontrol edilerek tekrar yapılmıştır. Gaz atomizasyon çalışmalarında yakından eşlemeli dairesel yarıklı nozul kullanılarak Al 2024 tozu üretilmiştir. Yapılan deneyler sırasında nozul iç çapları 3 mm, 4 mm ve 5 mm olarak kullanılmış, atomizasyon gazı olarak Argon tercih edilmiştir. Ayrıca, her bir nozul için üretim esnasında argon gazının basıncı sırasıyla 2, 4, 6, 8 ve 10 bar olarak ayarlanmıştır. Üretilen Al 2024 tozlarının taramalı elektron mikroskobu görüntüleri alınmış ve lazerle boyut ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre nozul çapının küçülmesi ya da gaz basıncının artmasına bağlı olarak toz boyutunun küçüldüğü görülmüştür. En küçük ortalama toz boyutu (D_{50}) 3 mm nozul çapında 8 bar gaz basıncında 99 μm olarak kaydedilmiştir. Toz boyutunun küçülmesine bağlı

olarak toz Şeklinin Yapraksı ve Ligament' ten kũresele doğru değiştiği belirlenmiŐtir. Toz Şeklinin kũreselleŐmeye baŐlaması ile spesifik yũzey alanının arttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Sŕzcũkler : Toz metalurjisi, gaz atomizasyonu, Al 2024 tozu.

Bilim Kodu : 710.1.195

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

GAS ATOMIZATION METHOD OF Al 2024 POWDER PRODUCTION AND CHARACTERIZATION

Zafer ÖZTÜRK

**Karabük University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Metallurgy Education**

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Mustafa BOZ

January 2012, 76 pages

In this study, gas atomization unit was produced at Karabuk University, Division of the Metallurgy Department. Production of the powder was carried out by using closely matched nozzle. Powder production experiments were done in argon gas atmosphere Al 2024 material was used for powder production. During powder production, variety nozzle exit diameter in dimension of 3, 4 and 5 mm were used. In addition, 2, 4, 6, 8 and 10 bar argon gas pressures were performed for nozzle diameter. Effect of gas pressure and nozzle diameter on powder particle size and shape were investigated particle size distribution was made with lazer sizer device and SEM were also used to measure particle size and particle shape respectively. According to the results obtained from experiments decreasing diameter of nozzle or increasing of gas pressure was diminished due to the powder size. The smallest particle size average (D_{50}) was recorded 99 μm at 3 mm diameter nozzle and 8 bar of

gas pressure. Depending on the decreasing of the powder particle size its shape changed from spun and ligament to globular shape.

Key Words : Powder metallurgy, gas atomization, Al 2024 powder.

Science Code : 710.1.195

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıŐmasının yűrűtűlmesinde ve oluŐumunda, ilgi ve desteęini esirgemeyen engin bilgi ve tecrűbelerinden yararlandıęım danıŐmanım olan kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Mustafa BOZ' a, deneysel çalıŐmalar sırasındaki katkılarından dolayı deęerli hocam Sayın Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN' a, çalıŐmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen Őzcan AKAM, Mehtap HİDİROęLU, Bűnyamin ÇİÇEK' e ve aileme sonsuz teŐekkűrlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
TOZ METALURJİSİ.....	3
2.1.TOZ METALURJİSİNİN TARİHİ GELİŞİMİ	5
2.2. TOZ ÜRETİM YÖNTEMLERİ	6
2.2.1. Mekanik Yöntemler	7
2.2.1.1. Talaşlı Üretim.....	7
2.2.1.2. Öğütme	7
2.2.1.3. Mekanik Alaşımlama	9
2.2.2. Elektroliz	10
2.2.3. Kimyasal Yöntemler	10
2.2.3.1. Katının Gaz ile Bozunması	11
2.2.3.2. Isıl Bozunma.....	13
2.2.3.3. Sıvıdan Çökeltme	13
2.2.3.4. Gazdan Çökeltme	14
2.2.3.5.Katı-Katı Tepkimeli Sentez	15

2.2.4. Atomizasyon	15
2.2.4.1. Su Atomizasyonu Yöntemi	17
2.2.4.2. Vakum Atomizasyon Yöntemi	18
2.2.4.3. Döner Elektrod (REP) Yöntemi	18
2.2.4.4. Döner Disk Atomizasyon Yöntemi	19
2.2.4.5. Gaz Atomizasyon Yöntemi	20
2.3. KARIŞTIRMA	21
2.4. PRESLEME	22
2.5. SİNTERLEME	25
2.6. TOZ METALURJİSİNİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI	26
2.6.1. Toz Metalürjisinin Avantajları	26
2.6.2. Toz Metalürjisinin Dezavantajları	27
BÖLÜM 3	28
ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ	28
3.1. Alüminyum ve Alaşımlarının Özellikleri	28
3.2. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması	30
3.2.1. Dövme Alüminyum Alaşımları	30
3.2.2. Döküm Alüminyum Alaşımları	31
3.2.3 Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri	32
3.3. Al 2024 kimyasal ve mekanik özellikleri	33
BÖLÜM 4	34
GAZ ATOMİZASYON	34
4.1. Atomizasyon Mekanizmaları	37
4.2. Atomizasyon Sistemleri	39
4.3. Nozul Çeşitleri	40
4.3.1. Negatif Basınç Oluşumu	42
4.3.2. Geri Basınç Oluşumu	43
BÖLÜM 5	45
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	45

	<u>Sayfa</u>
5.1. GAZ ATOMİZASYON ÜNİTESİ.....	45
5.1.1. Ergitme Fırını.....	46
5.1.2. Gaz Sistemi	48
5.1.3. Nozul	49
5.1.4. Atomizasyon Kulesi.....	50
5.1.5. Toz tutma ve Sistem temizliği	51
5.2. ATOMİZASYON ÇALIŞMALARI.....	52
5.3. TOZLARIN KARAKTERİZASYONU	54
5.4. TOZ BOYUT ANALİZİ.....	55
BÖLÜM 6	56
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	56
BÖLÜM 7	67
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	67
7.1. SONUÇLAR.....	67
7.2.ÖNERİLER.....	68
KAYNAKLAR.....	69
EK AÇIKLAMALAR A. ÜRETİLEN Al 2024 TOZLARININ BOYUT ANALİZ RAPORLARI	72
ÖZGEÇMİŞ.....	76

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Toz metal parçaların üretim aşamaları	4
Şekil 2.2. Çeşitli üretim teknikleri ile üretilmiş toz şekilleri.....	6
Şekil 2.3. Bilyeli öğütme cihazı.....	8
Şekil 2.4. Öğütmede çarpışmanın etkisi.....	9
Şekil 2.5. Mekanik alaşımlama yöntemi	9
Şekil 2.6. Elektroliz yöntemi ile demir ve bakır tozu üretimi	10
Şekil 2.7. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi	11
Şekil 2.8. Oksit indirgemesi ile üretilmiş molibden tozlarının gözenekli yapısı.....	12
Şekil 2.9. Farklı sıcaklıklarda demir oksidin demire indirgenmesinde su ve hidrojenin kısmi basınç oranları.....	12
Şekil 2.10. Karbonil bozunması ile oluşturulmuş nikel tozu	13
Şekil 2.11. Su atomizasyon yöntemi.....	17
Şekil 2.12. Vakum atomizasyon yöntemi	18
Şekil 2.13. Plazma destekli döner elektrod sistemin şematik gösterimi	19
Şekil 2.14. Döner disk atomizasyonu.....	20
Şekil 2.15. Gaz atomizasyon Yöntemi.....	21
Şekil 2.16. Toz karıştırmada kullanılan bazı karıştırıcı tipleri.....	22
Şekil 2.17. Toz metal parçaların sıkıştırma basamakları	23
Şekil 2.18. Metalurjik açıdan sıkıştırma işlemi	24
Şekil 2.19. Çift ve tek etkili sıkıştırmada radyüs ve yükseklik (g/cm ³) ilişkisi.....	25
Şekil 3.1. Audi A8 model otomobilde kullanılan alüminyum parçaları	30
Şekil 4.1. Yatay atomizasyon ünitesinin şematik gösterimi.....	35
Şekil 4.2. Düşey gaz atomizasyon ünitesi	36
Şekil 4.3. Sıvı metal tabakasının bölünme mekanizması.....	38
Şekil 4.4. Atomizasyon sürecinde birincil ve ikincil parçalanma bölgeleri.....	39
Şekil 4.5. Atomizasyon sistemleri.....	40
Şekil 4.6. Farklı nozul geometrileri	41
Şekil 4.7. Dairesel yarık ve jet etkili nozulların şematik resimleri.....	42

Sayfa

Şekil 4.8. Metal akış borusu çıkışında basınç oluşumu	43
Şekil 4.9. Geri basınç oluşumunun şematik gösterimi	43
Şekil 5.1. Gaz atomizasyon ünitesi	46
Şekil 5.2. Metal ergitme fırını, grafit pota ve açma kapama çubuğu	47
Şekil 5.3. Raylar üzerinde hareket edebilen ergitme fırını	48
Şekil 5.4. Argon tüpü ve regülatörü	49
Şekil 5.5. Dairesel yarıklı ve sonik geometrili nozul	50
Şekil 5.6. Paslanmaz çelikten imal edilen atomizasyon kulesi.	51
Şekil 5.7. Toz toplama kabı	52
Şekil 5.8. SEM cihazı a) Zeiss Evol LS 10 b) FEI Quanta 600	54
Şekil 5.9. Malvern Mastersizer E partikül boyutu ölçme cihazı	55
Şekil 6.1. Üretilen Al 2024 tozlarının SEM görüntüsü	56
Şekil 6.2. Ortalama toz boyutuna gaz basıncının etkisi	57
Şekil 6.3. Spesifik yüzey alanı üzerine gaz basıncının etkisi	57
Şekil 6.4. Üretilen Al 2024 tozlarının SEM görüntüsü	59
Şekil 6.5. Ortalama toz boyutuna gaz basıncının etkisi	60
Şekil 6.6. Spesifik yüzey alanı üzerine gaz basıncının etkisi	60
Şekil 6.7. Üretilen Al 2024 tozlarının SEM görüntüsü	62
Şekil 6.8. Ortalama toz boyutuna gaz basıncının etkisi	63
Şekil 6.9. Spesifik yüzey alanı üzerine gaz basıncının etkisi	63
Şekil 6.10. Gaz basıncına bağlı ortalama toz boyutu	64
Şekil 6.11. Gaz basıncına bağlı spesifik yüzey alanı	65
Şekil 6.12. Üretilen Al 2024 tozlarının EDX analizi sonuçları	66
Şekil EK A.1. 3 mm 6 bar üretilen Al 2024 tozlarının boyut analiz raporu	73
Şekil EK A.2. 4 mm 6 bar üretilen Al 2024 tozlarının boyut analiz raporu	74
Şekil EK A.3. 5 mm 6 bar üretilen Al 2024 tozlarının boyut analiz raporu	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1. Dünyada üretilen tozların üretim yöntemlerine göre dağılımı.....	2
Çizelge 2.1. Tozun önemli özellikleri ve etki ettiği faktörler	6
Çizelge 3.1. Alüminyum'un genel özellikleri	29
Çizelge 3.2. Dövme alüminyum alaşımlar	31
Çizelge 3.3. Döküm alüminyum alaşımlar	31
Çizelge 3.4. Al 2024 alaşımının kimsayal kompozisyonu	33
Çizelge 5.1. Al 2024 malzemesinin kimyasal bileşimi.....	45
Çizelge 5.2. Atomizasyon değişkenleri	53

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Ar	: Argon
C	: Karbon
CO	: Karbonmonoksit
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
Fe ₃ O ₄	: Magnetit
Mo	: Molibden
Ni	: Nikel

KISALTMALAR

MA	: Mekanik Alaşımlama
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
T/M	: Toz Metalurjisi
Al 2024	: Alüminyum Bakır alaşımı (Duralüminyum)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Seramikler, mineraller, un, tuz, şeker ve tahılların hepsi tozdur. Birçok parçacık sistemlerinin çoğu eski tarihi kaynaklı olmasına rağmen teknik (mühendislik) ürünler için tozların değerlendirilip kullanılması ancak 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren gerçekleşmiştir. 1800'lü yıllarda tozlar, platinden laboratuvar gereçleri yapımında kullanılmıştır [1].

Toz metalurjisi uzun yıllar endüstride layık olduğu övgüyü alamamış, ancak hassas, kaliteli mühendislik bileşenlerinin üretimi için yerleşmiş bir süreç olmuştur. Bu yöntem ile bazı kompozit malzemeler, gözenekli metaller, özel yüksek alaşımlı ve refrakter metaller için kullanılan önemli bir üretim üretilmektedir [2].

Metalik toz veya bu tozların şekillendirilip sinterlenmesi ile metalik parça üretimi olarak tanımlanan Toz Metalurjisi (T/M) [3], farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal tozlarını, sağlam hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürür. İstenen mikroyapıda, fiziksel ve mekanik özelliklerde alaşım ve kompozit malzeme üretmekte mümkündür. Bu özellikleri ile T/M verimlilik ve hammadde gibi günümüz kaygılarını ortadan kaldıran farklı bir üretim tekniğidir. Bunların sonucu olarak T/M sürekli gelişmekte ve geleneksel metal şekillendirme işlemlerinin yerini almaktadır.

T/M yönteminde tozun üretimi oldukça önemli bir yer tutar. Birçok toz üretim tekniği arasından ticari olarak; mekanik yöntemler, kimyasal yöntemler, elektroliz yöntemi ve atomizasyon yöntemi kullanılır. Atomizasyon ile üretilmiş tozlar, diğer üretim yöntemleri ile elde edilemeyecek özelliklere ve avantajlara sahiptir. Sıvı metal demetinin basınçlı akışkanlar ile veya mekanik olarak küçük damlacıklara ayrılması

olarak tanımlanan atomizasyon işleminde gaz atomizasyonu, su atomizasyonu, santrifüj atomizasyonu, vakum atomizasyonu ve ultrasonik atomizasyon yöntemleri kullanılmaktadır [3].

Metal tozu üretim teknikleri içerisinde, ince ve küresel tozlar elde etmede en yaygın olarak kullanılan yöntem gaz atomizasyonu yöntemidir [1]. Bu yöntem ergitilebilen tüm metal ve alaşım tozlarının üretiminde kullanılabilir. Gaz atomizasyonunda, sıvı metal demetini parçalamak için basınçlı akışkan olarak hava, azot, argon, CO₂ ve helyum gibi gazlar kullanılır. Bu yöntemde gaz cinsi, gaz basıncı, gaz ve sıvı metal akış debileri ile nozul geometrisi gibi üretim parametreleri tozların fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkilemektedir [4]. Çizelge 1,1'de dünyada üretilen tozların üretim yöntemlerine göre miktarları verilmiştir.

Çizelge 1.1. Dünyada üretilen tozların üretim yöntemlerine göre dağılımı [1].

Toz Üretim Yöntemleri	Yıllık Üretim Miktarları (%)
Mekanik öğütme ve alaşımlama	12-15
Kimyasal yöntem	4-5
Elektrolitik yöntem	1-2
Atomizasyon teknikleri	70-80

Bu araştırmanın amacı, bir gaz atomizasyon ünitesinde farklı nozul çaplarında ve farklı gaz basınçlarında Al 2024 tozları üreterek tozların özellikleri incelemektir. Basınçlı akışkan olarak Argon gazı kullanılmıştır.

BÖLÜM 2

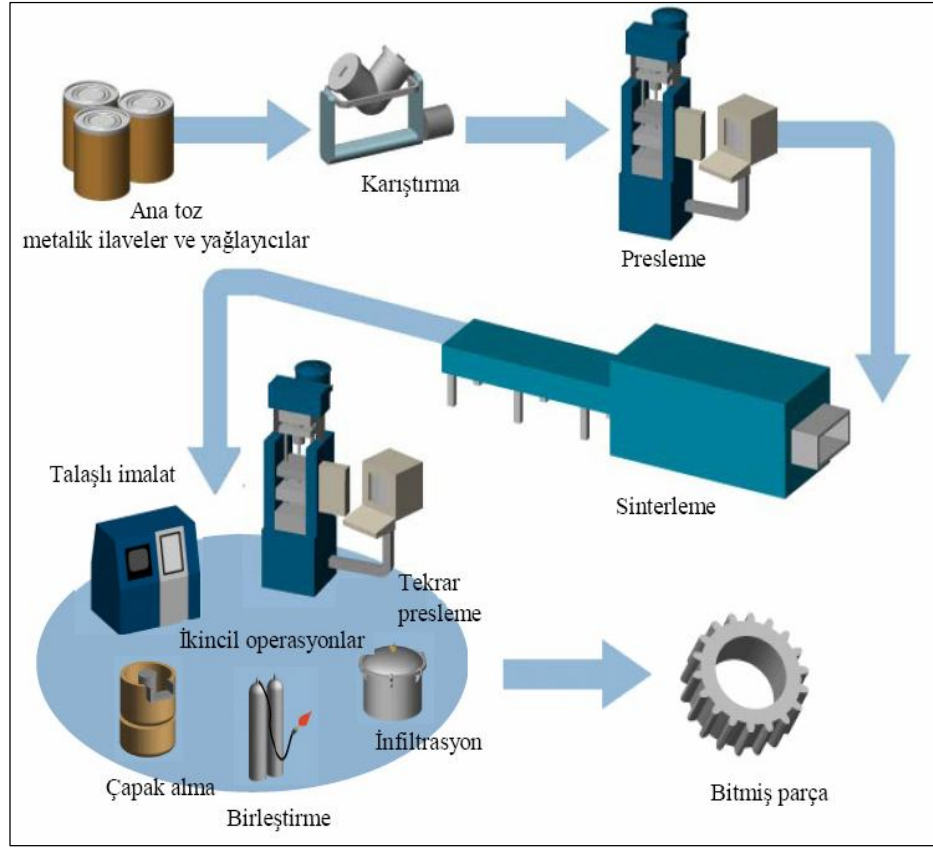
TOZ METALURJİSİ

Günümüzde Toz Metalurjisi (T/M) yöntemiyle parça üretimi çok yaygın olarak kullanılmakta ve giderek bilinen üretim yöntemlerine alternatif olmaktadır. İleri bir üretim yöntemi olan T/M, teknolojik malzemelerin üretilmesine uygun, küçük parçaların çok sayıda ve ekonomik üretimini sağlayan bir yöntemdir [5]. Bununla birlikte döküm gibi geleneksel üretim yöntemlerinde meydana gelen oksidasyon, segregasyon, gaz absorpsiyon gibi birçok problem T/M yöntemi kullanılması ile giderilmektedir [1].

T/M' nin hangi aşamasıyla ilgili olursa olsun başlangıç aşaması tozun üretilmesidir. Toz, boyutu 1 mm' den küçük, ince olarak bölünmüş katıdır. Bir tozun en önemli özelliği, yüzey alanının hacmine oranı, göreceli olarak yüksek olmasıdır [6].

T/M çeşitli metal ve seramik tozların imal edilmesi, karakterizasyonu ile bu tozların değişik ısı ve mekanik işlem prensipleri uygulanarak birleştirilmesi, kullanışlı mühendislik parçalarına dönüştürülmesini sağlayan bir imalat yöntemidir. Bu dönüşüm Şekil 2.1'de gösterildiği gibi toz üretme, istenilen tozların homojen bir şekilde karıştırılması, toz karışımının kalıp içerisinde sıkıştırılması ve toz tanelerinin birbirleriyle bağ oluşturmaları için atmosfer kontrollü ve gerekli sıcaklıkta-sürede sinterleme işleminin yapılması aşamalarını içerir [7].

Günümüz gelişen endüstrisi açısından yüksek çalışma performansı ve kaliteye sahip parçaların tek etapta talaşlı işleme gerek duyulmaksızın üretilmesi önem kazanmaktadır. Söz konusu veri bir parçanın mekanik özellikleri ve buna ek olarak fiziksel-kimyasal özellikleri, çalışma koşulları altında elverişli ve tekrarlanabilir üretim devamlılığının sağlanması açısından önemli bir rol oynamaktadır [8].



Şekil 2.1. Toz metal parçaların üretim aşamaları [6].

Toz metalurjisi ile üretilen parçalar bu gereklilikleri her geçen gün daha fazla yerine getirmektedir. Karışık şekilli parçaların üretiminin yanında diğer yöntemlerle üretilmesi zor parçalar, kısa sürede ve beklenen özelliklerde üretilmektedir. T/M ile ergime sıcaklığı yüksek olan metaller kolaylıkla şekillendirilebilirken, aynı zamanda kompozit malzeme üretimine olanak tanımaktadır. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen makine parçaları ek bir talaşlı işlem gerektirmemektedir. Beklenen mekanik özelliklere ve toz bileşimine bağlı olarak belirlenen sinterleme işlemi sonunda makine parçası olarak doğrudan kullanılabilir [4].

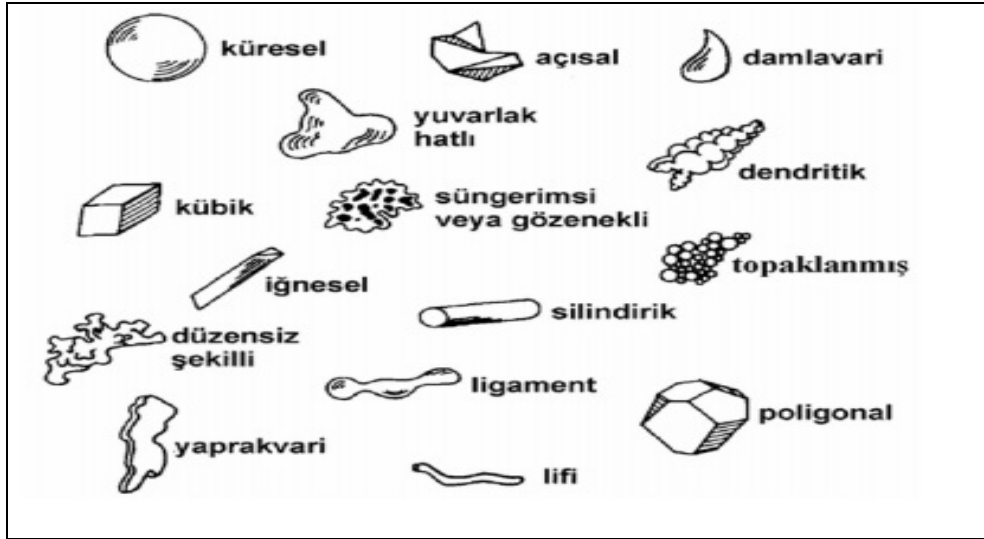
T/M bileşim esnekliği, aşım elementlerinin en az düzeyde ayrışması ve ince taneli mikroyapıların kolayca elde edilmesi gibi özellikler sunmaktadır [9].

2.1. TOZ METALURJİSİNİN TARİHİ GELİŞİMİ

Günümüzde modern imalat yöntemleri arasında yerini alan toz metalurjisinin tarihi M.Ö. 3000 yıllarına kadar uzanmaktadır. Eski Mısırlılar bu tarihlerde demir oksidi indirgeyerek sünger demir elde etmişler sonra da sünger demirden istedikleri şekilde kütle oluşturmuşlardır. M.S. 400 yıllarında da Hindistan'da bir demirci ustası günümüzdeki toz metalurjisi yöntemine benzer yöntemlerle 6.5 ton ağırlığında kütle elde etmiştir. Thomas Edison tarafından Ekim 1879 yılında icat edilen elektrik lambasının üretiminde toz metalurjisi ciddi katkılar sağlamıştır. 1898 yılında Avusturya'da, 1905 yılında da Almanya'da T/M yöntemiyle çeşitli metallerden üretilen filamentler, elektrik lambalarında kullanılmışlardır. T/M'nin bugünkü anlamda gelişimi 1945 yılından sonra başlamıştır. İlk çağlarda insanlar, doğada saf haliyle buldukları metalleri eritmeden çekiçle döverek birleştirmeyi gerçekleştirmişlerdir. Eski ve orta çağlarda çok sert çelikten imal edilen silahlar, yüksek sıcaklıklarda dövülerek birleştirilen metal parçalarından meydana gelmekteydi. 1826 yıllarında Rusya'da tedavüle çıkarılan platin para, toz metalurjisinin ilk endüstriyel uygulaması olmuştur. 19. Asrın sonlarında, endüstride platin ve iridyum gibi yüksek sıcaklıkta ergiyen metallerin kullanılması denenmiştir. Kimyasal bir usulle platin toz haline getirilmekte, bu toz çok yüksek basınçta sıkıştırılmakta ve sonra ısıtılmaktadır. İlk bronz alaşımlı yataklar 1925'li yıllarda üretilirken, sinterlenmiş demir ve çelik esaslı makine parçaları 1945'lerden sonra üretilebilmiştir. 1950'li yıllardan itibaren demir ve çelik tozlarından üretilen dişliler, kamlar ve çeşitli konstrüksiyonlardan oluşan makine elemanları piyasaya egemen olmaya başlamıştır. 1960'larda dövme çelik parçalar, takım çelikleri ve izostatik preslenmiş süper alaşımlar gibi tam yoğun T/M gereçleri üretilmiştir. 1975'te toz enjeksiyon kalıplama ile ısı güdümlü roketler ile niyobyumlu ve radyasyon soğutmalı roket motorları üretilmiştir [10]. Günümüzde ise bakır ve bakır esaslı alaşım tozları, alüminyum ve paslanmaz çelik pazarları giderek genişlemektedir. Alüminyum tozlarından, boyalar, kaplamalar, alaşım elementi olarak kimyasallar, katı füze ve roket yakıtları, patlayıcılar ve piroteknik uygulamalarda. T/M ile yapılmış alüminyum parçalar otomobil üreticilerinin ilgisini çekmektedir. Uygulama olarak kam mili yatakları, ayna parçaları, amortisör parçaları, pompalar ve bağlantı kolları sayılabilir.

2.2. TOZ ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Metal tozlarının üretimi birçok teknikle gerçekleştirilir. Burada amaç toz üretimini belirli şekil ve boyut dağılım aralığında, herhangi bir kirlenme içermeksizin üretmektir [8]. Bir toz üretim yönteminin tercih edilmesi yöntemin anlaşılmasına, ekonomikliğine, elde edilen tozların özelliklerine ve bu özelliklerin kullanım yeri ihtiyaçlarını ne ölçüde karşılayabildiğine bağlıdır. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi tozun geometrik şekli üretim yöntemine bağlı olarak küreselden, dendritik formlara kadar çok farklı olabilmektedir. Aynı şekilde tozun yüzey durumu da yani düzgün veya gözenekli olması da yine üretim yöntemine göre değişiklik göstermektedir. Toz malzemelerin özellikleri ve etki ettiği faktörler, Çizelge 2.1’de verilmiştir [4].



Şekil 2.2. Çeşitli üretim teknikleri ile üretilmiş toz şekilleri [8].

Çizelge 2.1. Toz malzemelerin özellikleri ve etki ettiği faktörler [4].

Özellikler	Etkisi
Tozun boyutu (partikül boyutu)	Görünür (ham) yoğunluk
Boyut dağılımı	Akış davranışı
Toz şekli (partikül şekli)	Ham dayanım
Kimyasal kompozisyon	Sıkıştırılabilirlik
Yüzey özellikleri	Sinterleme
Mikroyapı	Şekillendirilebilirlik (Forging) tokluk

Birçok toz üretim yöntemi arasından günümüzde ticari olarak; mekanik yöntemler, elektroliz, kimyasal yöntemler ve atomizasyon yöntemleri kullanılır [9].

2.2.1. Mekanik Yöntemler

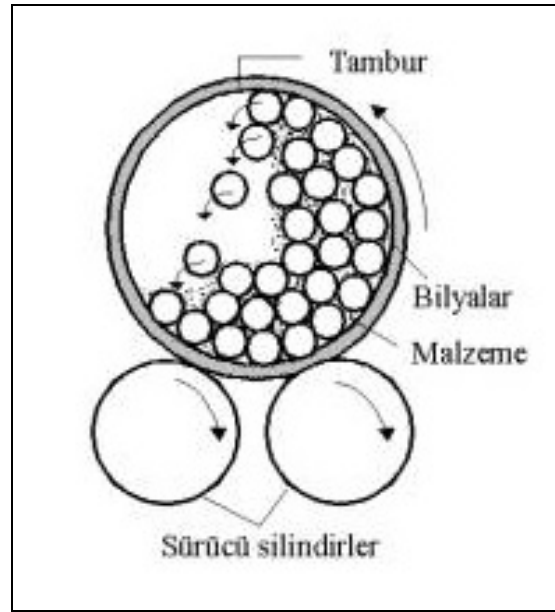
Mekanik yöntemler talaşlı üretim, öğütme ve mekanik alaşımlama olmak üzere üç grupta incelenebilir.

2.2.1.1. Talaşlı Üretim

Bu yöntemle tornalama, frezeleme ve taşlama gibi talaş kaldırma teknikleri kullanılarak çok iri ve karmaşık tozlar üretilir. Üretilen tozlar, öğütülerek ince tozlar haline getirilebilir. Toz özelliklerinin kontrolündeki zorluk, oksitlenme, yağlanma, kir tutma ve diğer malzeme hurdaları ile karışarak kirlenme problemleri olabilir. Yüksek karbonlu çelik tozları bu yöntemle üretilir [9].

2.2.1.2. Öğütme

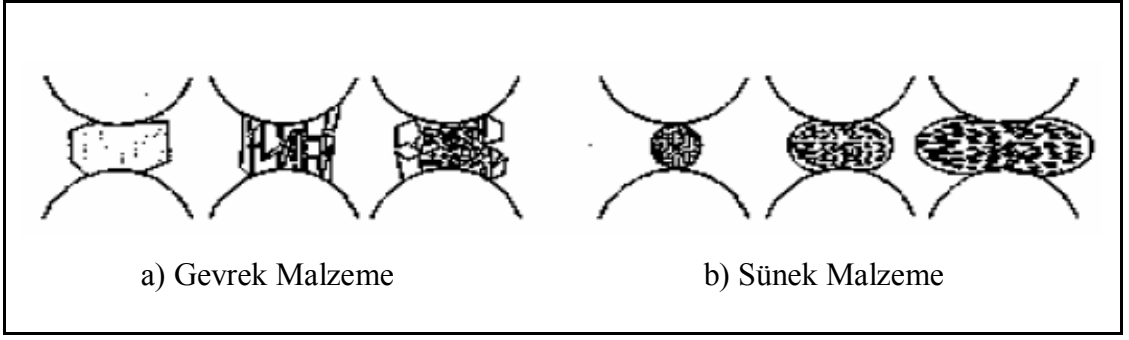
Öğütme sert bilyeler, çubuklar veya çekiçler kullanılarak yapılan mekanik darbe işlemlerini içerir. Gevrek malzemelerin ve diğer yöntemlerle üretilmiş kümeleşmiş tozların kırılması için kullanılan öğütme en çok bilyeli değirmenlerde yapılır. Öğütülecek metal, içinde büyük çaplı, sert ve aşınmaya karşı dayanıklı bilyelerin bulunduğu kaba yerleştirilir (Şekil 2.3). Kap döndürülerek veya titreştirilerek bilyeler harekete geçirilir [11]. Öğütme ile gevrek malzemelerin kırılması için gerekli darbe gerilmesi malzemenin kusur yapısına ve çatlak ilerleme davranışına bağlıdır. İri parçacıklar için daha küçük darbe gerilmesi gerekir. Öğütme sırasında toz boyutu küçüldükçe gerekli olan gerilme değeri artar. Sonuçta tozlar belirli bir boyuta kadar küçülür ve daha uzun süre çalışılması boyutu değiştirmez [1].



Şekil 2.3. Bilyeli Öğütme cihazı [1].

Sünek malzemelerin kırılması zor olduğu için öğütme işlemi genellikle bu tür malzemelere uygulanmaz bunun yerine bazı sünek malzemeler sıvı azot ile soğutularak Şekil 2.4.a'da görüldüğü gibi gevrek hale gelmesi sağlanır. Sünek malzemelerin öğütülmesinde, özellikle alüminyumun öğütülmesinde yapışmayı engelleyici yağlayıcılar kullanılır [4].

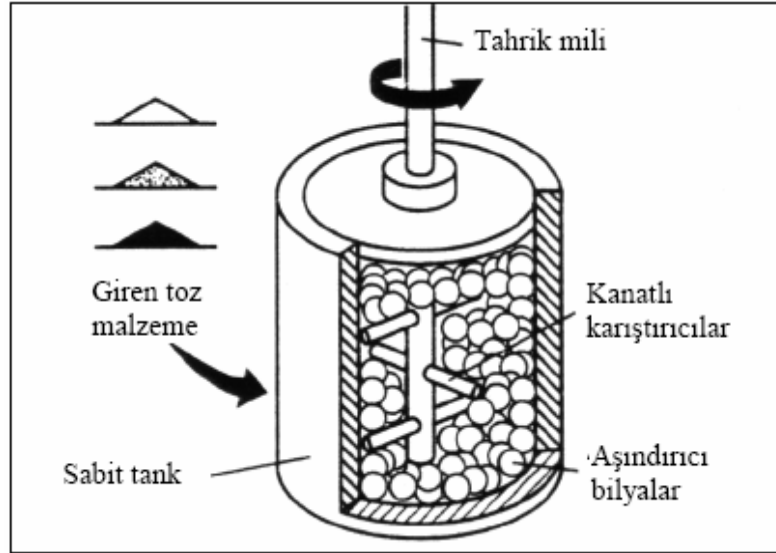
Metaller arası bileşikler, demir alaşımları, demir-krom, demir-silisyum v.b. gibi kırılgan malzemeler mekanik olarak bilyeli değirmenlerde öğütülürler. Eğer öğütülen malzeme sünek parçacıklardan oluşuyor ise (Şekil 2.4.b), çarpışma sonucunda şekil değiştirerek yassılaşırlar [9]. Homojen bir karışım için kaba konulacak bilyelerin hacmi ve öğütülecek malzeme miktarı çok önemlidir. Bilyelerin hacmi kap hacminin yaklaşık yarısı ve öğütülecek malzeme miktarı kap hacminin yaklaşık % 25'i oranında olmalıdır [6].



Şekil 2.4. Öğütmede çarpışmanın etkisi [1].

2.2.1.3. Mekanik Alaşımlama

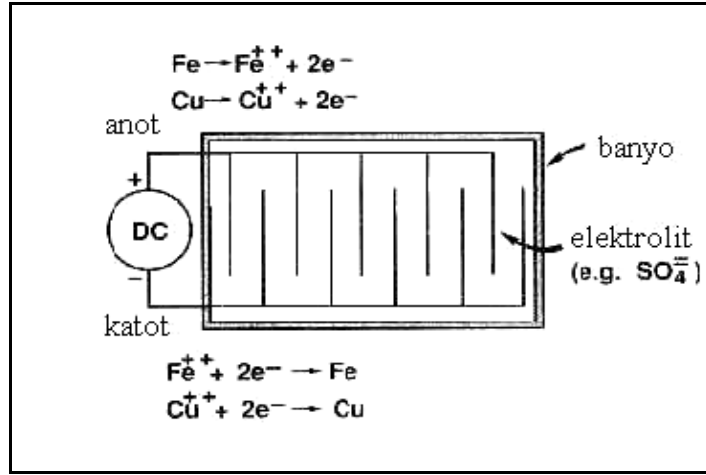
Mekanik alaşımlama (MA) yöntemi, kuru ve katı haldeki tozların birbirlerine soğuk kaynaklanmasını ve tekrar bu kaynakların kırılmasını sağlayarak daha ince ve homojen bir mikroyapıya sahip yüksek dayanımlı malzemelerin üretilmesinde kullanılır. MA yönteminde tozlar kapalı bir kap içerisine konulur ve bir şaft yardımıyla döndürülür (Şekil 2.5). Tozlar, mil üzerindeki kanatlar ve bilyeler yardımı ile deforme edilir [9].



Şekil 2.5. Mekanik alaşımlama yöntemi [9].

2.2.2. Elektroliz

Bir elektrik akımı tarafından aşılınan elektrolitte meydana gelen ayrışmaya elektroliz adı verilir. Elektrolit genellikle bir tuz eriyiğinin sulu çözeltisinden oluşur [1]. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi elektrik akımının iletimi ile elektroliz meydana gelir.



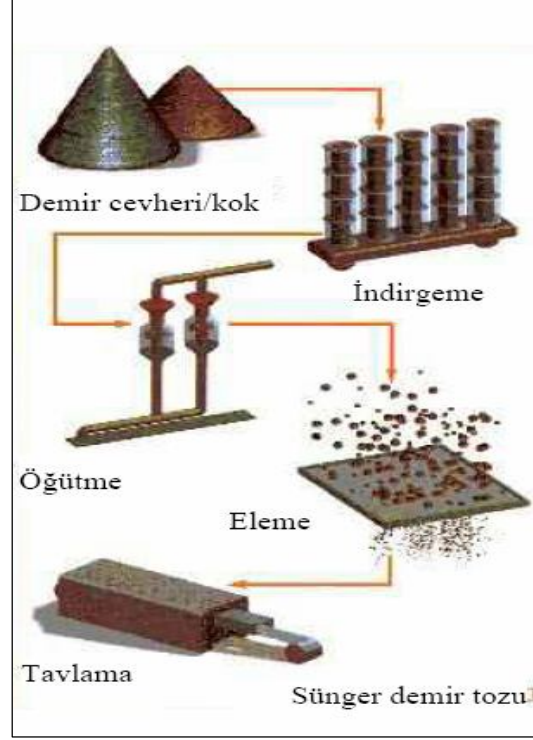
Şekil 2.6. Elektroliz yöntemi ile demir ve bakır tozu üretimi [1].

Elektroliz yöntemiyle, oksitlerden oluşan tozlar katoda akım vermek suretiyle elektrolitik banyoda çökertilir ya da iyi kırılabilme özelliğinde katot da toplanır. Banyo teknesi kurşun kaplıdır. Elektroliz yönteminde, elektrolitik banyoda çökertilen veya katotta toplanan metal kolaylıkla öğütülerek ince toz haline getirilir ve üretilen tozlar yıkanarak elektrolitten iyice temizlenir. Kurutma asal gazlar altında yapılarak oksitlenme önlenir. Elektroliz sırasında oluşan parçacıklar dendritik bir yapı gösterirlerse de daha sonraki işlemlerle bu yapı kaybolur. Elektrolitik tozların en büyük avantajı yüksek safiyetleri, dolayısıyla iyi sıkıştırılabilme özelliklerine sahip olmalarıdır [9]. Elektroliz yöntemi ile bakır, demir, krom, çinko, gümüş ve magnezyum gibi metallerin tozları üretilebilir [1].

2.2.3. Kimyasal Yöntemler

Kimyasal yöntemlerle malzemelerin çoğu toz şeklinde üretilebilmektedir. Parçacık boyutu ve şekli tepkime değişkenlerinin kontrolü ile ayarlanmaktadır. Kimyasal

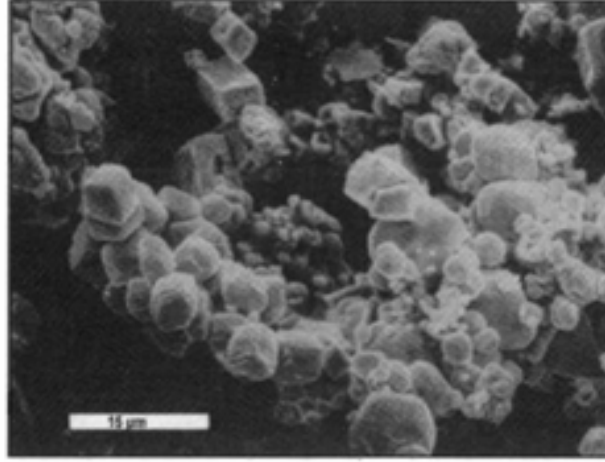
sentezlemenin birçok farklı yöntemi vardır: Tozlar katı, sıvı veya buhar fazı reaksiyonlarıyla oluşturulur.



Şekil 2.7. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi [9].

2.2.3.1 Katının Gazla Bozunması

Metal tozu üretmenin klasik bir şekli oksit indirgemesidir. İşlem manyetik ayrıştırılmış ve ince oksit tozlar olarak öğütülmüş demir oksit örneğinde olduğu gibi saflaştırılmış bir oksit ile başlar. Oksit, grafit ve kireç taşı gibi indirgeyiciler ile karıştırılır ve ısıtılır. Bu ilavelerden ortaya çıkan karbon monoksit gibi gazları içeren reaksiyonlar ile oksit indirgenir. Oksitlerin veya diğer bileşiklerin hidrojen veya CO ile indirgenmesi metallerin ergime sıcaklığının çok altında gerçekleştirilmektedir [12]. Son ürün, Şekil 2.8'de gösterildiği gibi paketlenme yoğunluğu düşük, köşeli tozlardır.

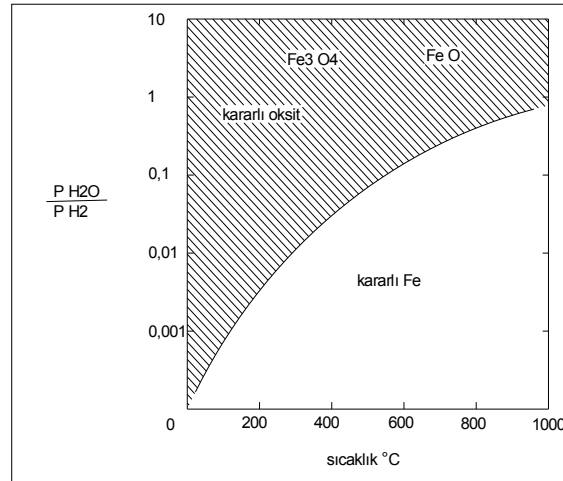


Şekil 2.8. Oksit indirgemesi ile üretilmiş molibden tozlarının gözenekli yapısı [1].

Katının gaz altında bozunmasının en bilinen örneklerinden birisi demir oksidin (FeO) indirgenmesi için geçerli olan tepkimedir [12].



Demir için, oksitlenme ve indirgenme arasındaki dengenin atmosfer bileşimi ve tepkime sıcaklığına nasıl bağlı olduğu Şekil 2.9'da gösterilmektedir.

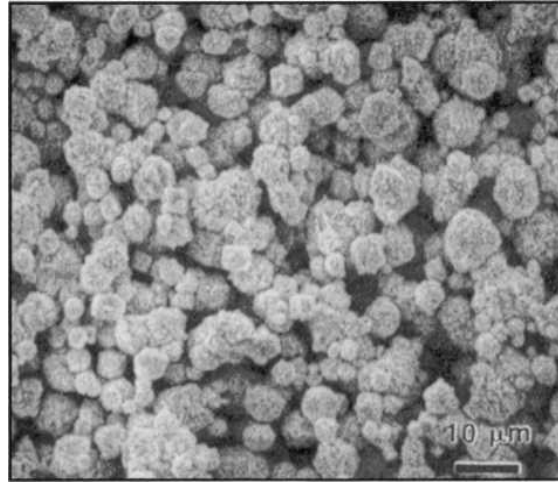


Şekil 2.9. Farklı sıcaklıklarda demir oksidin demire indirgenmesinde su ve hidrojenin kısmi basınç oranları [1].

Gaz ile indirgeme yöntemi kullanılarak üretilen diğer bazı metal tozları ise Cu, Ni, Co, Re' dur [12].

2.2.3.2 Isıl Bozunma

Toz parçacıkları buhar bozunması ve yoğuşturmanın birlikte kullanılması ile üretilebilir. En yaygın örnekler demir karbonil $\text{Fe}(\text{CO})_5$ ve nikel karbonil $\text{Ni}(\text{CO})_4$ öncüleridir. İşlem bir metal ile karbon monoksitin tepkimesiyle başlar. Örnek olarak, nikel karbonil üretmek için biçimlendirilebilir Ni ile CO eşzamanlı ısıtma ve basınç uygulanarak tepkimeye sokulur. Karbonil molekülü 43°C ' ye soğutulur ve sıvı hale getirilir ve saflaştırmak için kısmi damıtma kullanılır. Sıvı bir katalizörle birlikte tekrar ısıtıldığında buhar bozunması ile toz elde edilir. Elde edilen nikel tozları küçük parçacık boyutuna sahip olup yaklaşık %99,5 saflıktadır ve düzensiz, yuvarlak veya zincir şeklindedir. Şekil 2.10 karbonil yöntemi ile üretilmiş küçük parçacık boyutlu nikel tozlarını göstermektedir. Tepkime şartlarını kontrol ederek toz boyutunu 0,2–20 μm arasında elde etmek mümkündür. Büyük tozlarda küresel parçacıklara çok rastlanır. Bakır, krom, platin, rodyum, altın ve kobalt gibi diğer metaller karbonil işlemi için uygundur. Bununla birlikte, yüksek enerji ihtiyacı ve karbonil moleküllerinin sağlığa zararları yaygın kullanıma engel olmaktadır [1].

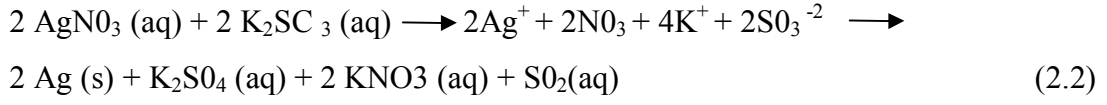


Şekil 2.10. Karbonil bozunması ile oluşturulmuş nikel tozu [1].

2.2.3.3. Sıvıdan Çökeltme

Sıvı çözeltilerde nitrat, klorür veya sülfat gibi bulunan metalik tuzlar çökelti veya çökelti oluşturan metali üretmek için işleme tabi tutulurlar. Çökeltilen veya çökelti

fazı haline getirilen metalik tuzlar, toz üretimi için uygun kaynak sağlar. Tuz suda eritilir ve ikinci bileşik tarafından çöktülür. Örnek olarak içerisinde gümüş nitrat bulunan çözeltideki reaksiyonu gösterilebilir;



Burada (aq) su içerisinde çözünme ve (s) katı anlamına gelmektedir. Elde edilen katı gümüş çökelti öğütülerek toz haline getirilir. Alternatif olarak, metal iyonları hidrojen ile tepkimeye girerek metal çöktülleri oluşturur. Yaygın örnekleri %99,8 saflıkta bakır, nikel ve kobalt tozlarıdır. Kimyasal olarak çöktülmüş tozlar 1 µm civarındadır. Fakat toz özellikleri işlem değişkenleri sayesinde ayarlanabilir. Küçük parçacık boyutları nedeniyle ürünlerin çoğu topaklanma eğilimi gösterir. Çöktüllerin reaktör içerisinde dolaştırılması ile daha büyük boyut oluşturulması mümkündür [1].

2.2.3.4 Gazdan Çöktme

Gaza dayalı tepkimeler küçük tozların az kirlilik ile üretilmelerinde kullanılır. Örnek bir işlem molibden oksidin (MoO_3) saf hidrojen ile tepkimeye girmesi sonucu molibden tozu üretilmesidir. Vanadyum, niyobyum, volfram, hafniyum, titanyum, gümüş, kobalt, nikel veya zirkonyum gibi metallerin klorürleri, florürleri veya oksitleri gazdan çöktme işlemi için uygundur. Uçucu klorürler (veya diğer tuz buharları) kullanıldığında metal tozları yüksek sıcaklıkta hidrojen tepkimesi ile üretilir. 1000 °C sıcaklıkta örnek bir tepkime aşağıdaki gibidir:



Burada bakır 0,2 µm katı parçacık şeklinde çöktülür ve diğerlerinin tamamı buhardır. Nano ölçekli tozların homojen çekirdeklenmesi elektron ışını, lazer, plazma veya endüksiyon alanı kullanılarak çeşitli buharlardan elde edilir. Bu parçacıklar 10–1000 nm boyut aralığındadır ve kolayca topaklanır. Kompozit tozlar veya ısıya dayanıklı kaplamalar bunun gibi buhar fazı tepkimeleri ile oluşturulur. Pahalı bir toz

üretim yolu olmasına rağmen parçacık boyutu, saflığı, şekli ve topaklanması buhar tepkimesi koşulları ile ayarlanabilir. Çoğunlukla ürün sünger parçacıktır, bununla birlikte küresel çok kristalli topaklar da oluşturulabilmektedir [12].

2.2.3.5. Katı-Katı Tepkimeli Sentez

Çok sayıda bileşik termodinamik olarak kararlıdır. Fe₃Al, NiTi, TiC veya Ti₅Si₃ gibi bileşikler ısı açığa çıkararak oluşmaya örnektirler. Nikel ve alüminyumun eşit atomlu intermetalığı olan NiAl oluşumunu ele alalım. Bu intermetalik 1649 °C'de ergir iken nikel 1453 °C ve alüminyum 660 °C'de ergir. NiAl tepkimeli sentezi yaklaşık 600 °C civarında aşağıdaki gibi başlar:



Eğer tepkime kontrol edilmez ise açığa çıkan ısı NiAl ürünü eritmeye yeterlidir. Alüminyum tozları, telleri, folyoları veya saclarının nikel ile karışımı; ısıtma veya kıvılcım ile tepkimenin başlatılması sonucu kendiliğinden tepkimeye girerek bileşik oluşturur. Çoğunlukla katı hal yanması olarak adlandırılır ve çok iyi bilinen buhar fazı patlamasına benzemektedir (hidrojen ve oksijen patlama ile enerji açığa çıkararak suyu oluşturur). Katı-katı tepkimeli sentez yoluyla toz üretimi bileşenlerin karıştırılarak gevşek paketli yataklanmasını gerektirir. Yatak tutuşturularak kendiliğinden ilerleyen tepkime dalgası başlatılır. Dalga 10 mm/s hız ile yayılarak ürünün üretilmesini sağlar. Eğer ısı tepkime bölgesinden uygun bir şekilde çekilebilirse, gözenekli kek ürün oluşur ve öğütülerek toz haline getirilir. İntermetalik ve seramik tozların üretiminde bu yöntemin çok sayıda değişik biçimi mevcuttur. Bazı çok bilinen bileşikler alüminyum, silisyum, karbon, bor ve titanyum esaslıdır. Örnek NiTi, Ni₃Al, Ni₃Si, TiAl, TiC, SiC, Ti₅Si₃, NbAl₃, Fe₃Al, TiB₂, WC ve TaAl₃ [1].

2.2.4. Atomizasyon

Atomizasyon ergimiş metalin mekanik olarak ya da belirli bir hıza sahip sıvı veya gaz akımı ile küçük damlacıklara ayırma işlemidir. Günümüzde atomizasyon

yöntemiyle metal tozu üretimi önemli bir yer tutmaktadır. Bu yöntemde toz; sıvı metalin katı bir yüzeye veya birbirleri ile çarpışmadan önce küçük damlacıklar halinde katılaşması ile elde edilir [12]. Yöntem çoğunlukla metaller, alaşımlar ve intermetalikler için kullanılmakla birlikte son zamanlarda polimer ve seramiklere de uygulanmaktadır. Atomizasyon yöntemi, iyi işlem kontrolü ile farklı malzemelere uygulanabilirliğinden dolayı cazip bir yöntemdir [10]. Temel prensip, ergimiş haldeki metal çok ince şerit halinde akıtılır ve bu esnada bir su veya gaz jeti ile çok küçük parçacıklara ayrılarak soğutulur. Hava, azot helyum ve argon sıklıkla kullanılan gazlardandır ve su ise çok sık tercih edilen sıvıdır [7]. Atomizasyon üç ana bölümden meydana gelir [4].

1. Ergitme
2. Atomizasyon (Eriyik metal damlalarını daha küçük boyutlarda parçalamak)
3. Katılaşma ve soğuma

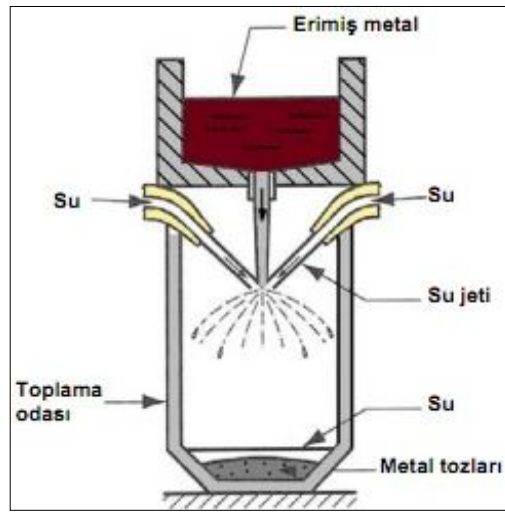
Bu işlemlerden sonra yüzey oksitlerinin azaltılması, gazlardan uzaklaştırma ve toz boyutu dağılımı gibi ürünün istenen özelliklere getirilmesi için ilave işlemler yapılmaktadır [6].

Pratikte bu yöntem ergitilebilen bütün metallere uygulanabilir, ticari olarak tozlar arasında, demir, takım çelikleri, alaşımlı çelikler, bakır, pirinç, bronz, alüminyum, kurşun, kalay, çinko, kadminyum gibi metal tozları sayılabilir [12].

Atomizasyon tekniğinde kullanılan yöntemler; su atomizasyonu yöntemi, vakum atomizasyon yöntemi, döner elektrod yöntemi, döner disk yöntemi ve gaz atomizasyonu yöntemi olarak sıralanabilir [4].

2.2.4.1. Su Atomizasyon yöntemi

Şekil 2.11’de şematik olarak gösterilen su atomizasyonu yöntemi ince toz boyutu elde etmek için günümüzde en çok tercih edilen ve en düşük maliyetli atomizasyon yöntemidir. Su atomizasyon yöntemi, ergime derecesi 1600 °C altında olan metallerin tozlarının üretilmesinde çok sıkça kullanılan atomizasyon yöntemidir. Bu yöntem demir, paslanmaz çelik ve diğer birçok malzemenin düzensiz şekilli tozlarının üretilebileceği en ekonomik yöntemdir [13].

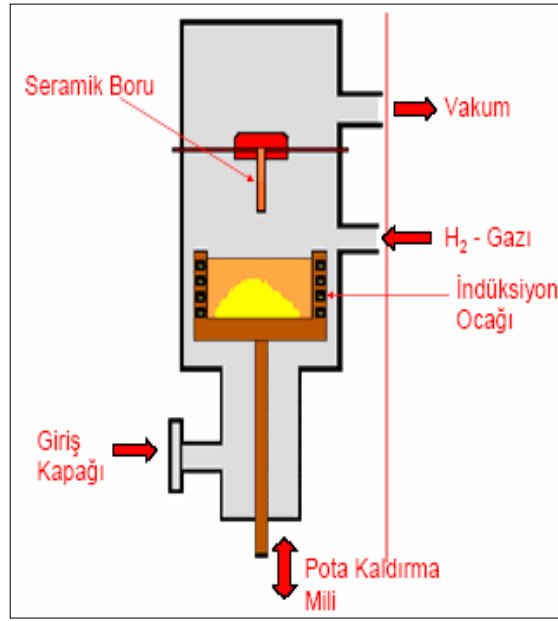


Şekil 2.11. Su atomizasyon yöntemi [14].

Ergiyik metal düşey yönde akıtılırken yüksek basınçlı ve özel tasarımlı su jetleri ile parçalanır. Uygulamalı çalışmalar sonucu elde edilen toz malzemelerin ortalama tane boyutu ve dağılımına, suyun basıncı ve hızı, metal eriyik akış açısı, eriyik viskozitesi, eriyik yoğunluğu, eriyik yüzey gerilimi, sıvı metal akış hızının soğutma suyu akış hızına oranı gibi parametreler etki etmektedir. Su atomizasyon yöntemi ile elde edilen tozların genelde ortalama tane boyutu 30 -1000 µm arasında olmaktadır. Tipik toz şekli düzensiz olup bu tozların sıkıştırma sonrası ham dayanımları yüksektir ve yapısal parçaların imalinde kullanılır. Atomize edilen metal ve kullanılan suyun reaksiyonu ise sistemin dezavantajlarından [4].

2.2.4.2. Vakum Atomizasyon Yöntemi

Vakum atomizasyon yöntemi, basınçlı gaz altındaki metale ani olarak vakum uygulanması sonucu gazın genişmesi ve metalin atomize olması ile gerçekleştirilen bir metottur (Şekil 2.12). Bu yöntem sayesinde Ni, Co, Cu ve Al esaslı küresel alaşım tozları temiz ve yüksek saflıkta elde edilir [15].



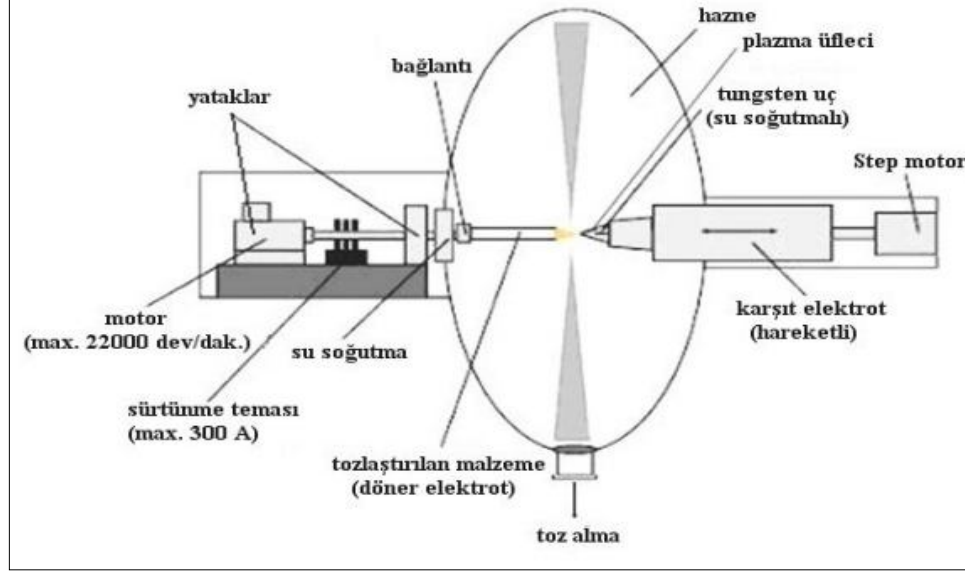
Şekil 2.12. Vakum atomizasyon yöntemi [15].

Vakum altındaki sıvı metal önce belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır, bundan sonra bu bölüme hidrojen gazı doldurulur. Potadaki sıvı metalde hidrojen gazı çözüldükten sonra potayı yukarı taşıyan mil potayı yukarı iterek seramik boruyu potaya daldırır. Üst kısımda vakum olduğu için sıvı metal memeden geçerek parçalanır. Böylece metal ve alaşımlarından ince küresel tozlar üretilir [9].

2.2.4.3. Döner Elektrod Yöntemi

Bu yöntemde tozu elde edilecek metalden yapılmış bir elektrod ile ergimeyen tungsten elektrod arasında ark oluşturulur [4]. Elektrodun ucu plazma arkı veya tungsten elektrod ile ertilir. Uç kısımda ergime oluştuğunda, ergiyik damlacıklar halinde fırlatılır ve toplama odası içindeki koruyucu ortamda katılaşır (Şekil 2.13).

Döner elektrod atomizasyonunda tozları korumak amacıyla işlem çoğunlukla koruyucu ortam altında gerçekleştirilir [10].



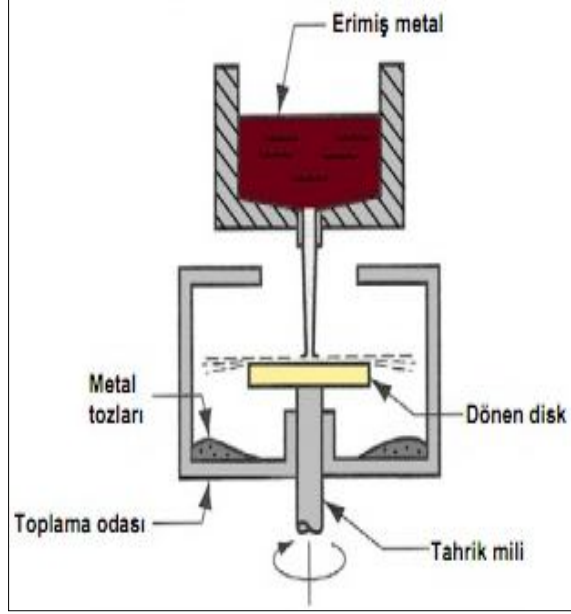
Şekil 2.13. Plazma destekli döner elektrod sistemin şematik gösterimi [8].

Döner elektrod yöntemi, yüksek paketlenme yoğunluğu ve kolay akış özelliklerine sahip, temiz ve küresel şekilli tozlar oluşturur. Bu yöntemin olumsuz tarafları düşük üretim hızları, yüksek donanım ve işletme maliyeti ile büyük parçacık boyutudur. Bunlara ilaveten, eğer katı bir katot kullanılırsa atomize edilmiş tozlarda genellikle kirlilik vardır. Bundan dolayı, pek çok yüksek performans uygulamalarında plazma ergitme tekniği tercih edilir [10].

2.2.4.4. Döner Disk Atomizasyon Yöntemi

Döner disk atomizasyonu (Şekil 2.14) sıvı metal veya alaşımın yüksek hızda dönmekte olan disk üzerine akıtılıp, merkezkaç kuvvet etkisiyle parçalanarak toz elde etme işlemidir [16]. Disk üzerine düşen sıvı metal damlacıkların katılaşması büyüklüklerine bağlı olarak disk üzerinde veya diskten savrulduktan sonra gerçekleşir. Tozların katılaşmasını hızlandırmak veya ısının süratle uzaklaştırılmasını sağlamak amacıyla katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç değişik soğutma ortamı kullanılır. Sıvı metal damlacıklarını soğutulan bir katı yüzeye çarptırarak yapılan

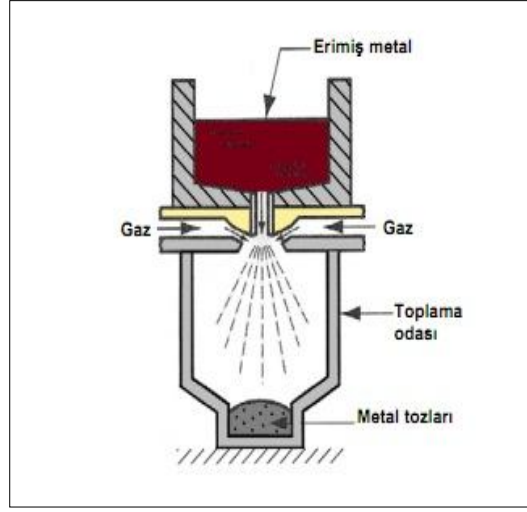
soğutmada katı-sıvı ara yüzeyinde kondüksiyon ısı transfer katsayısı yüksek olduğundan soğuma hızı da yüksek olur [17].



Şekil 2.14. Döner disk atomizasyonu [14].

2.2.4.5. Gaz Atomizasyon Yöntemi

Gaz atomizasyon düşük hızda akıtılan ergimiş sıvı metale göre yüksek hızlı gaz aktarılması ile meydana gelir. Basınçlı gaz ile atomizasyon da prensip olarak su atomizasyonu yöntemine benzer, ancak burada akışkan olarak su yerine gaz kullanılır [6]. Basınçlı gaz tüpünden boru ile nozula ulaşan gaz potadaki sıvı metali beraberinde sürükleyerek atomizasyon odasına pulverize ederek dağıtılır (Şekil 2.15). Soğuyan metal tozu bu odanın tabanındaki bir hazne içinde toplanır.



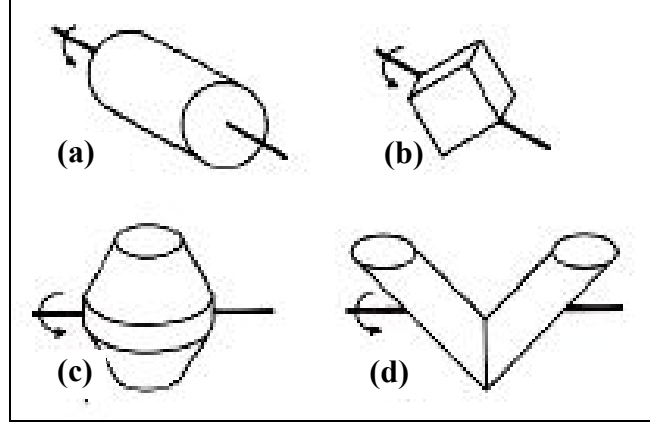
Şekil 2.15. Gaz atomizasyon yöntemi [14].

Gaz atomizasyonu yapılan çalışmanın en önemli bölümü olduğu için ayrıca Bölüm 4’de detaylı bir şekilde incelenecektir.

2.3. KARIŞTIRMA

T/M teknolojisinin toz imalatından sonraki önemli bir aşaması, homojen bir şekilde karıştırılmasıdır. Metalik tozlar, yağlayıcılar ve isteğe bağlı alaşım elementleriyle homojen bir karışım elde etmek için karıştırılır. Karışım, imalatı yapılacak parçanın ağırlığına göre, % olarak karışım elementlerinin ağırlığı belirlenerek oluşturulur. Karışım içerisine, genellikle % 0.5–1.5 arası yağlayıcı ilave edilmektedir. Yağlayıcı olarak çinko stearat, stearik asit, metalik stearatlar ve parafin en çok kullanılanlarıdır. Yağlayıcının temel amacı, toz taneleriyle takım yüzeyleri ve kalıp duvarları arasındaki sürtünmeyi azaltmak, tozların sıkıştırma sırasında kolay kaymalarını sağlamaktır. Karıştırma işlemi, Şekil 2.16’da verilen prizmatik, V şekilli ve çift taraflı konik kaplar tarafından gerçekleştirilir. Karıştırma işleminde karıştırıcı doluluk oranı, minimum % 30–40 oranında olması tavsiye edilmektedir. Karıştırma devri 20–30 dev/dakika hızda, 20–30 dakika süreyle yapılmaktadır. Optimum karıştırma işlemi, ham yoğunluğu ve sinterleme sonrası yoğunluğu etkilemektedir. Eğer, uygun karıştırma yapılmazsa, partiküller arasında mekanik kilitleme meydana gelerek sinterleme sonrası daha büyük gözenekli yapı meydana gelir ve bu ise mekanik özelliklerin kötüleşmesine neden olmaktadır. Yüksek hızda karıştırma

homojenliği ortadan kaldırır ve toz tanelerinde plastik deformasyon meydana getirebilmektedir. İlave edilen yağlayıcının miktarı arttıkça, ham yoğunluk değerlerinin düştüğü ve ham biriketlerin sıyırma sırasında daha çok deformasyona uğradığı tespit edilmiştir [7].



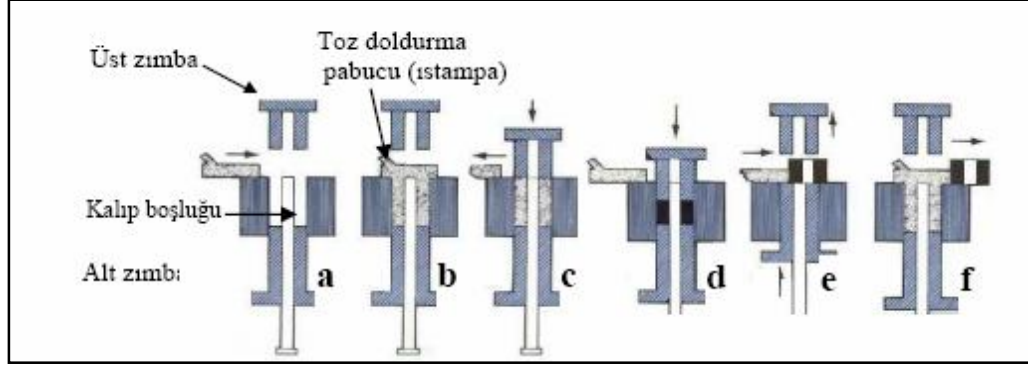
Şekil 2.16. Toz karıştırmada kullanılan bazı karıştırıcı tipleri. a) Silindirik şekilli, b) Kübik, c) Çift taraflı konik, d) V şekilli [6].

2.4. PRESLEME

Toz metalürjisindeki en önemli ve üçüncü işlem basamağı preslemedir. Preslemenin temel amacı, toz parçacıklarının istenilen şekle dönüştürülmesi için, yapıya kendi ağırlığını taşıyabilecek kadar yoğunluk kazandırılmasıdır. Presleme, aksenal, izostatik ve hacim deformasyonu olarak üç farklı yöntemde gerçekleştirilir. Aksenal presleme; tek ve çift etkili olabildiği gibi soğuk, sıcak ve ılık presleme şeklinde de olabilmektedir. İzostatik presleme soğuk ve sıcak olmak üzere iki farklı şekilde uygulanabilir. Hacimsel deformasyon işlemleri ise, toz dövme, toz ekstrüzyon ve toz haddeme olarak uygulanmaktadır. Şekillendirme ve presleme yöntemine karar verilirken aşağıdaki parametreler dikkate alınır:

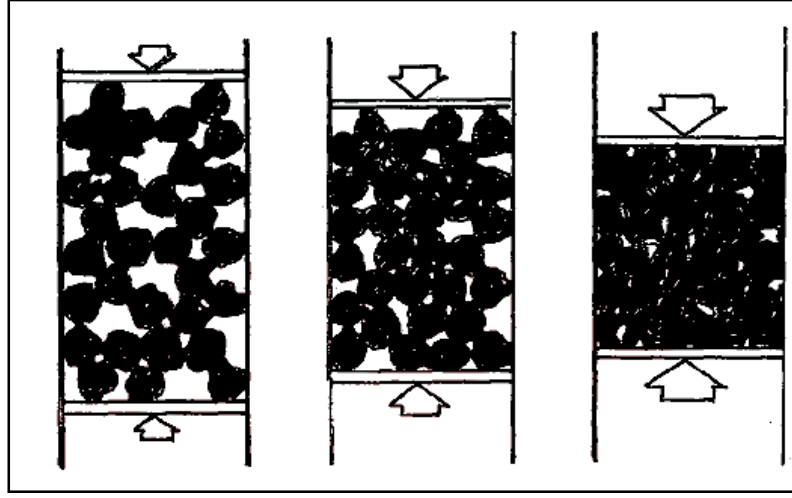
1. Kullanılacak tozun tipi (küresel, sünger, pul) ve toz imalat yöntemi
2. Bağlayıcı ve yağlayıcı kullanımı
3. Rijit kalıp kullanımı
4. Üretilecek malzemeden istenilen özellikler

Genellikle endüstriyel uygulamalarda, Şekil 2.17’de sistematik olarak gösterilmiş olan çift etkili presleme işlemi kullanılmaktadır.



Şekil 2.17. Toz metal parçaların sıkıştırma basamakları [6].

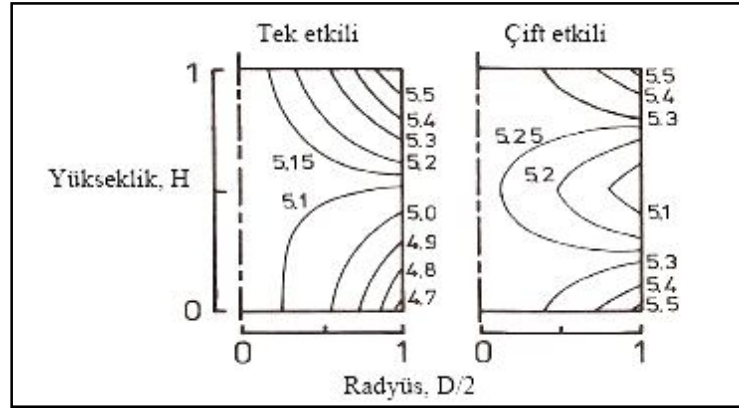
Çift etkili preslemede, zımbaların her ikisi de hareketlidir. Şekil 2.17.a ilk aşamadır ve imal edilecek parçanın kalıbı daha önceden tasarlanmış olup, bu aşamada kalıp prese montajlanır. Şekil 2.17.b ikinci aşamada, toz parçacıkları kalıp doldurma pabucundan kalıba serbest akış durumunda doldurulur. Üçüncü aşamada, kalıp boşluğuna doldurulan toz, sistemin titreşim mekanizmasıyla sıkıştırma öncesi titreşimli yoğunluk kazandırma işlemi yapılarak doldurulan tozun kalıpta düzgün bir şekilde yerleşmesi sağlanır. Bu sırada da, ıstampa ile kalıp yüzeyinde artan tozlar diğer toz haznesine itilir ve üst zımba sıkıştırmak için dişi kalıp boşluğuna yerleşir (Şekil 2.17.c). Dördüncü aşamada, sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir. Bu aşamada, toz taneleri sıkıştırmanın etkisiyle belli bir değerde yoğunluk ve mukavemet kazanarak briket hale gelmektedir. Beşinci aşamada ise mukavemet ve yoğunluk kazandırılmış ham briket, belli bir sıyırma kuvvetiyle alt zımba tarafından kalıp boşluğundan çıkartılır. Altıncı ve son aşamada (Şekil 2.17.f), kalıp boşluğundan çıkarılan ham briket toz doldurma pabucu tarafından itilir ve ikinci parçanın preslenmesi için toz doldurma işlemi gerçekleştirilir. Şekil 2.18’de görüldüğü gibi, presleme işlemi metalurjik açıdan üç aşamada incelenir [7].



Şekil 2.18. Metalurjik açıdan sıkıştırma işlemi [10].

1. İlk aşamada, presleme basıncının uygulamasından sonra, toz tanelerinin yer değiştirmesi ve yeniden pozisyon belirlemesi sağlanır. Bu aşamada, plastik şekillendirme yoktur, ancak bir kısım toz tanelerinde kırılma olabilir. Parçacık boyutu, şekli, toz boyut dağılımı ve taneler arası sürtünme önemli rol oynar.
2. İkinci aşamada elastisite ve plastik deformasyon faktörleri baskındır. Parçacıklar arası soğuk şekillendirmeye bağlı olarak bağlar oluşabilir. Ayrıca, tanelerin mekanik kilitlenmeleri ve tane-tane etkileşimleri bu aşamada gerçekleşir.
3. Presleme basıncının arttığı ve preslemenin son aşamasında, toz tanelerinin kırılması, boşlukların dolması ve toz taneleri arasında soğuk kaynaklanma oluşmakta ve böylece ham yoğunluk kazandırılmaktadır. Toz preslemede temel problem tozlar ile kalıp cidarları arasındaki sürtünmedir. Sürtünme kuvveti uygulanan kuvvetin alt bölgede azalmasına neden olmaktadır. Toz kompaktlarda basınç-yoğunluk ve mukavemet arasındaki ilişki, kalıp malzemesinin pekleşme oranı, yüzey sürtünme katsayısı ve toz taneleri ile kimyasal reaksiyon eğilimine bağlıdır. Ayrıca, preslenebilir toz şekli, büyüklüğü, yağlayıcı durumu ve presleme oranı ile ilişkilidir [7].

Tek eksenli preslemede toz kompaktın alt bölgesi ile üst bölgesi arasında yoğunluk farklılığı oluşmaktadır. Bu farklılık, Şekil 2.19’da görüldüğü gibi çift etkili presleme ile dengelenebilmekte ve bu sayede sinterleme sonrası özellikler iyileştirilebilmektedir [7].



Şekil 2.19. Çift ve tek etkili sıkıştırımda radyüs ve yükseklik (g/cm^3) ilişkisi [7].

2.5. SİNERLEME

Sinterleme seramik, metal ve kompozit malzemeler için ortak bir işlemdir [18]. Sinterleme, ısıtma ile beraber bir partikülün bir diğerine bağlanarak yapıya daha yüksek bir dayanım kazandırılması işlemidir [19]. Demir esaslı alaşımlar için sinterleme sıcaklığı genellikle 1100–1150 °C arasındadır. Bazı durumlarda sinterleme sıcaklığı 1250 °C ye kadar çıkabilir. Sinterleme işleminin süresi uygulamanın çeşidine göre 10 ile 60 dakika arasında değişebilir. Sinterleme fırınlarında kullanılan bant genellikle elek tipindedir ve malzemeler bir kap içine yerleştirildikten sonra bant üzerine yerleştirilir. Diğer tip (arabalı, askılı vs.) fırınlar da kullanılmaktadır. Sinterleme sırasında oluşacak oksidasyonu engellemek için kullanılan atmosfer kırılmış amonyak veya azot gibi atmosferlerdir. Sinterlenmiş parçalarda örneğin demir esaslı alaşımlarda karbon içeriğinin kontrolü nihai özellikler açısından önemlidir. Sinterleme işlemi aşağıdaki kademelerden oluşur.

1. Yağlayıcıların giderilmesi
2. Sinterleme
3. Soğutma

Sinterleme fırınının ilk bölgesinde yağlayıcının uçması sağlanır. Aynı zamanda toz tanecikleri üzerindeki oksitler fırın içinde redüklenirler ve birbirine temas eden taneciklerde ilk bağlanma başlar. Sinterlenmenin ana mekanizmaları yüzey ve hacim difüzyonudur. Difüzyon ile katkı maddelerinin toz içine difüze olmaları sağlanır. Termodinamik kurallarına göre enerjiyi minimize edebilmek için porozitelerin yuvarlanması ve küçüklerin büyüklerin gelişimine yardımcı olabilmek için kaybolduğu gözlenir. Sinterleme fırınının soğutma bölgesinde parçaların hava ile temas ederek oksitlenmelerini engellemek amacıyla oksitlenmeden koruyucu bir gaz altında soğumaları sağlanır. Soğuma sıcaklığı 500-850 °C civarındadır ve malzemenin mekanik özellikleri meydana gelen faz dönüşümleri nedeniyle soğutma hızı ile yakından ilişkilidir. Sinterleme sırasında boyutta orta derecede değişim görülür. Birçok malzeme küçüldüğü halde, bakır gibi bazı alaşımlarda boyutta artış görülür. Baskı kalıbı tasarlanırken bu değişimlerin de göz önünde bulundurulması gerekir [20].

2.6. TOZ METALURJİSİNİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

2.6.1. Toz Metalürjisinin Avantajları

1. Üretim hızının yüksek olması: Seri üretime uygunluğundan dolayı üretim hızlı olarak gerçekleşir.
2. Talaşlı imalata gerek kalmaması: Bu yöntemle elde edilen hassasiyet ve yüzey kalitesinin çoğu ürün için yeterli olmasından dolayı ilave talaşlı işleme gerek kalmaz.
3. Karmaşık şekilli parçaların üretilebilir olması: Dişli çark gibi imalatı zor parçalar, toz yöntemiyle üretilebilir.
4. Yakın toleransların ve düzgün yüzeylerin elde edilmesi
5. Ergime kayıplarının olmaması

6. Yoğunluk ve ergime noktalarındaki farklılıklardan ötürü başka yollarla imalatı mümkün olmayan alaşım ve karışımların imalinin mümkün olması.
7. Hurda miktarının oldukça az olması veya hiç olmaması [1].

2.6.2. Toz Metalürjisinin Dezavantajları

1. Kalıp maliyetinin yüksek olması: Bu işlemde kalıbın yüksek sıcaklık, aşınma ve basınca maruz kaldığından kalıplar dayanımı yüksek ve pahalı malzemelerden yapılmaktadır.
2. Metal Tozlarının maliyetinin dövme ve döküm malzemelerinden daha pahalı olması.
3. Yüksek gerilme dayanımlarının düşük olması.
4. Parça kesiti boyunca özelliklerin değişim göstermesi.
5. Karmaşık şekilli parçalarda yoğunluğun homojen olmaması.
6. Tozların kalıp içerisindeki akıcılığının sınırlı olmasından dolayı parçanın şeklinin kısıtlı olması.
7. Çok uzun depolamada tozların oksitlenmesi [1].

BÖLÜM 3

ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ

3.1 Alüminyum ve Alaşımlarının Özellikleri

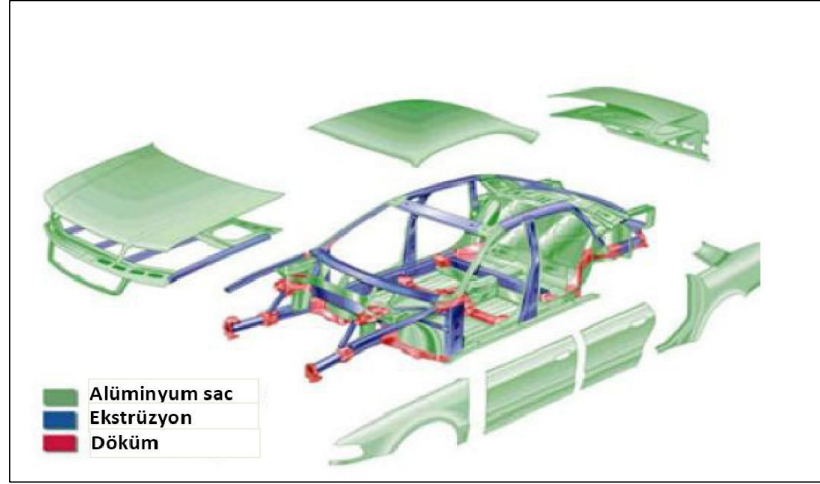
Metallerin gelişme sürecinde, alüminyum kadar önemli rol oynayan az sayıda metal bulunur. Alüminyum 1800'li yılların başında keşfedilen bir metal olmasına karşın, kendine has özellikleri ile çok eski çağlardan beri bilinen, ağaç, bakır, demir ve çelik gibi birçok malzemedен daha çok önem kazanmış ve daha çok miktarda kullanım alanına sahip olmayı başarmıştır [21].

Alüminyum beyaz renkte, yumuşak bir elementtir, özgül ağırlığı $2,7 \text{ gr/cm}^3$, ergime derecesi $658 \text{ }^\circ\text{C}$ ' dir. Doğada genellikle boksit cevheri halinde bulunur. Alüminyum soy olmayan metallerden olmasına rağmen, yüzeyinde çok ince fakat yoğun bir oksit tabakasının bulunması, onu kimyasal etkenlerden özellikle korozyona karşı çok iyi korumaktadır. Bu tabaka, alkaliler ve klordan kolayca etkilenmektedir. Saf alüminyum; kimyasal maddeler için depo ve alet, beslenme ve gıda maddeleri endüstrisinde, ev ve büyük mutfak aletleri imalatı ve paketleme gayesi için çok uygundur. Alüminyumdan üretilmiş yapısal bileşenler uzay ve havacılık sektörü için vazgeçilmezdir. Saf alüminyum yumuşak ve sünek olduğu için kolaylıkla tel ve levha haline getirilebilir. Akıcılığının az, çekmesinin fazla olması dökümünü güçleştirir. Endüstrinin pek çok kolunda milyonlarca farklı ürünün yapımında kullanılmakta olup dünya ekonomisi içinde çok önemli bir yeri vardır. Hafiflik ve yüksek dayanım özellikleri gerektiren taşımacılık ve inşaat sanayinde geniş kullanım alanı bulur [22]. Alüminyumun genel özellikleri Çizelge 3.1' de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Alüminyum'un genel özellikleri [22].

Alüminyumun genel özellikleri	
Sembol	Al
Atom ağırlığı	13
Kristal yapısı	YMK ($a=4,091\text{Å}$)
Yoğunluğu (25 °C)	2,7 gr/cm ³
Ergime Noktası	660 °C
Buharlaştırma Noktası	2450 °C
Çekme dayanımı	4–9 kg/mm ²
Akma dayanımı	1–3 kg/mm ²
% uzama	60
Kopma uzaması	% 30–40

Alüminyum üretimi önceki yüzyılın sonundan itibaren bilinmekte olup, üç ana kademedeki yapılır. Birinci aşama boksit madeninden Al_2O_3 elde edilmesidir. Bu aşama Bayer prosesi olarak adlandırılan bir prosesle gerçekleştirilir. Bayer prosesi çeşitli madencilik aşamalarını içerir. Ancak alüminadan (Al_2O_3) alüminyum üretimi ise 950–970 °C arasında alüminyum oksidin redüksiyonuna dayanır. Bu aşama Hall-Heroult yöntemi olarak bilinen bir indirgeme işlemi olan elektroliz aşamasıdır. Buradan çıkan alüminyum %99.5-99.9'dan daha fazla saf değildir. Saf alüminyum (%99.99) elde etmek için ayrıca rafinasyon işlemi uygulanmalıdır [22]. Alüminyum yarı mamul veya mamuller üretildikten sonra belirli fiziksel özelliklere sahip olmaları için bazı işlemlerden geçirilirler. Endüstride kullanılan alüminyum alaşımları; dövme ve döküm alüminyum alaşımları olarak üretilmektedir. Özellikle dövme alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ısıl işlem uygulanamayan (soğuk şekil değiştirme sertleştirmeli) ve ısıl işlem uygulanabilen (çökeltme sertleştirmeli) birçok türü Şekil 3.1' de görüldüğü gibi taşıt yapım endüstrisinde (otomobil, raylı taşıt, zırhlı taşıt vb.), uçak, uzay araçları yapımı ve gemi yapım endüstrisinde geniş uygulama alanı bulmaktadır [21].



Şekil 3.1 Audi A8 model otomobilde kullanılan alüminyum parçalar [23].

3.2. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları, alaşım elementlerinin farklı etkileri dolayısı ile birbirinden çok farklı özelliklere sahiptirler ve bunlar genellikle dövme ve döküm alüminyum alaşımları olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar [21].

3.2.1. Dövme Alüminyum Alaşımları

Dövme grubuna giren alaşımlar Cu, Mg, Mn, Si ve Ni gibi elementler içerirler (Çizelge 3.2), çoğu kez önce sürekli döküm yöntemi ile külçe biçiminde elde edildikten sonra, homojenleştirme tavı uygulanır, haddeleme veya ekstrüzyon ile biçimlendirilirler. Döküm yapısında tane sınırlarında oluşan sürekli gevrek fazlar, şekillendirme sırasında parçalanır ve ana kütleyle dağılır ve böylece alaşım soğuk şekillendirmeye uygun duruma geçer [21].

Çizelge 3.2. Dövme alüminyum alaşımlar [22].

Dövme Alaşımlar	
1XXX Ticari saflıkta Al(> % 99 Al)	Yaşlandırılmaz
2XXX Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3XXX Al-Mn	Yaşlandırılmaz
4XXX Al-Si ve Al-Mg-S	Eğer magnezyum varsa yaşlandırılabilir
5XXX Al-Mg	Yaşlandırılmaz
6XXX Al-Mg-Si	Yaşlandırılabilir
7XXX Al-Mg-Zn	Yaşlandırılabilir

3.2.2. Döküm Alüminyum Alaşımları

Döküm Alüminyum alaşımlarının büyük çoğunluğu silisyum içerir (Çizelge 3.3), %11,7 Si içeren alaşım ötektik bileşimde olduğundan çok üstün döküm özelliklerine sahiptir. Bu alaşımın korozyona direnci ve kaynak kabiliyeti de oldukça iyidir. Döküm alüminyum alaşımlarına bir miktar bakır katılması, talaş kaldırma özelliklerini geliştirir, buna karşın, korozyon direncinde azalmaya neden olur. Döküm alüminyum alaşımlarına silisyumdan başka magnezyum katılarak çökelme yolu ile sertleştirilebilen ve deniz suyunun korozif etkilerine dirençli alaşımlar elde edilir [21].

Çizelge 3.3. Döküm alüminyum alaşımlar [22].

Döküm Alaşımlar	
1XX.X Ticari saflıkta Al	Yaşlandırılmaz
2XX.X Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3XX.X Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si	Biraz yaşlandırılabilir
4XX.X Al-Si	Yaşlandırılmaz
5XX.X Al-Mg	Yaşlandırılmaz
6XX.X Al-Mg-Zn	Yaşlandırılabilir
7XX.X Al-Sn	Yaşlandırılabilir

3.2.3 Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri

Ticari olarak sadece yüksek elektrik iletkenliği istendiği uygulamalarda kullanılan saf alüminyum, mekanik ve döküm özelliklerini iyileştirmek için çeşitli alaşım elementleri kullanılır. Başlıca kullanılan alaşım elementleri, bakır, silisyum, magnezyum, çinko, krom, kalay, manganez, demir, nikel, titanyum, zirkonyum, fosfor, sodyum, lityumdur [24].

1XXX: Bu alaşımları ağırlık itibarıyla en az % 99 alüminyum olan içerisinde silisyum ve demir içerirler. % 0,12 bakır ilave edilerek dayanım artışı sağlanabilir. Bu alaşımlar büyük oranda haddelenerek levha veya folyo haline getirilerek kullanılırlar.

2XXX: Al-Cu alaşımları. Esas alaşım elementi bakırdır. Başta magnezyum olmak üzere diğer alaşım elementleri de bulunabilir, yüksek mukavemet istenen havacılık sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

3XXX: Al-Mn alaşımları. Esas alaşım elementi mangandır. Boru, sıvı tankları ve mimari uygulamalarda kullanılmaktadır.

4XXX: Al-Si alaşımları. Esas alaşım elementi silisyumdur. Termal genleşme katsayısı düşük, aşınma direnci ve korozyon dayanımı yüksek alaşımlardır. Kaynaklı yapılarda, levha üretiminde, otomobil parçaları üretiminde kullanılmaktadır.

5XXX: Al-Mg alaşımları. Esas alaşım elementi magnezyumdur. Magnezyum oranı arttıkça sertlik ve mukavemet artar fakat süneklik azalır. Deniz suyu korozyonuna karşı direnci yüksek olduğundan, bu ortamda çalışacak yapıların imalatında kullanılmaktadır.

6XXX: Al-Mg-Si alaşımları. Esas alaşım elementleri magnezyum ve silisyumdur. Şekillendirilme kabiliyeti yüksek olan bu alaşımlar özellikle ekstrüzyon ile üretilen parçaların imalatında sıklıkla kullanılır.

7XXX: Al-Zn alaşımlar. Bakır esas alaşım elementi olup, magnezyum, krom ve zirkonyum ilave alaşım elementleridir. 7XXX serisi, alüminyum alaşımlarının en yüksek mukavemete sahip olanıdır. Uçak parçaları yapımı ve diğer yüksek dayanım istenen yerlerde kullanılır.

8XXX: Al-Li alaşımları: Esas alaşım elementi lityum olup, kalay eklentisi de yapılabilmektedir. Özellikle uçak ve uzay yapılarında kullanılmaya başlanan bu

malzeme, iyi yorulma direnci ve iyi tokluk özelliklerine sahiptir. Fakat diğer Al alaşımları ile karşılaştırıldığında üretim maliyetleri yüksektir [21].

3.3. Al 2024 kimyasal ve mekanik özellikleri

Duralüminyum olarak da bilinen Al 2024 alüminyum alaşımı, bakırlı bir işlem alaşımı olup alüminyum alaşımları arasında en sert, elastisite modülü ve mukavemet değerleri en yüksek olanlardan biridir [25]. Bileşiminde % 4.9 Cu'nun yanında % 1,8 Mg bulundurulur (Çizelge 3.4). Bu alaşımın kullanım bulduğu en önemli alan uçak ve uzay sanayi kollarıdır. Özgül mukavemet (Akma gerilmesi/yoğunluk) ve/veya özgül elastisite modülünün (Elastisite modülü/yoğunluk) önemli olduğu yerlerde, örneğin uçak ve uzay yapılarının dişli ve bağlantı elemanlarında, iskeletlerinde, süspansiyon parçalarında, uçak gövde ve kanatlarında, ortopedik taban, perçin ve çekici tekerlekleri yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bazı askeri cihaz ve teçhizatlarında, dizel motor pistonlarında, uçak motoru silindir başlarında, jet motor pervanelerinde ve kompresör halkalarında kullanılırlar [26].

Çözeltiye alma ısıl işleminden sonra oda sıcaklığında doğal veya yapay olarak yaşlanır. İçinde magnezyum (Mg) bulunması nedeni ile üretimi özel yöntemler ile mümkün olmasına karşın, diğer ısıl işleme tabi tutulabilen alüminyum alaşımlarına göre şekillendirilebilme yeteneği iyidir. Bu alaşımın iyi olan fiziksel ve mekanik özelliklerine karşılık korozyona karşı dayanımı zayıftır. Talaşlı işlenebilirlik özelliği iyidir [27].

Çizelge 3.4. Al 2024 alaşımının kimsayal kompozisyonu.

Ağırlık %	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Cr	Zn
Maksimum	4,9	0,5	1,8	0,9	0,5	0,15	0,1	0,25
Minimum	3,8		1,2	0,3				

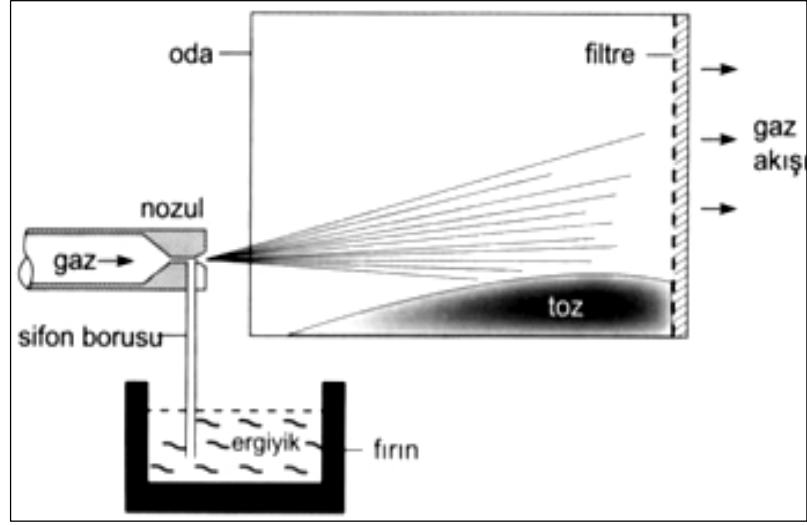
BÖLÜM 4

GAZ ATOMİZASYON

Hava, azot, argon ve helyumun sıvı metal demetini parçalayan gaz olarak kullanılması gaz atomizasyonu olarak adlandırılır. Sıvı malzeme nozul çıkışında parfümün püskürtülmesi gibi hızlı gaz genişmesi sayesinde parçalanır. Donanım tasarımı, ergitilmiş malzemenin besleme mekanizmasına ve ergitme ve toz toplama odasının yapısına göre değişiklik gösterir. Bununla birlikte ana fikir enerjinin (hızlı genişleyen gazdan) sıvı metal demetine aktararak damlacık oluşturması ve bunların parçacık olarak hemen katılaşmasıdır [20]. Sıvı metal damlacıkları parçalanması sonrasında küreselleşir, soğur ve katılaşarak, tipik tane boyut dağılımları 1 μm ' den 1 mm'ye kadar değişen metal tozları meydana getirir [28]. Gaz ve sıvı metalin fiziksel özellikleri üretilen tozların şekilleri için çok önemlidir [29]. Düzenli bir gaz atomizasyon işlemi için aşağıdaki şartlar sağlanmalıdır.

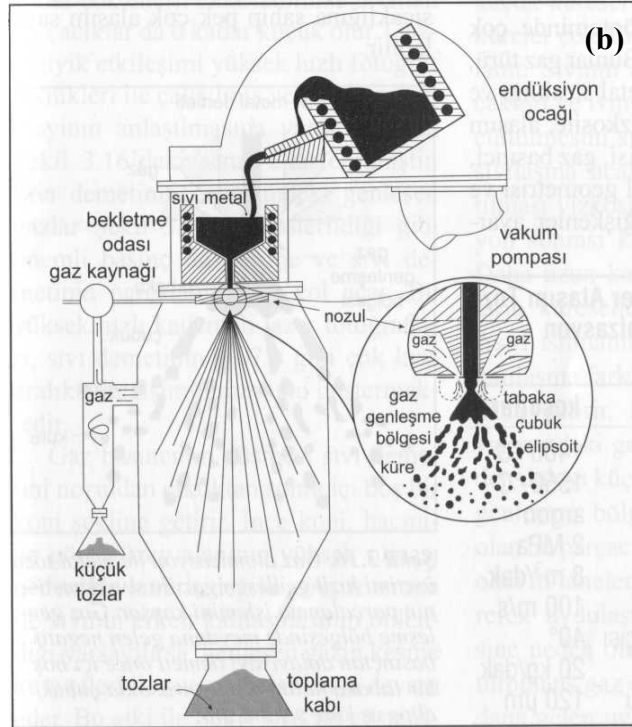
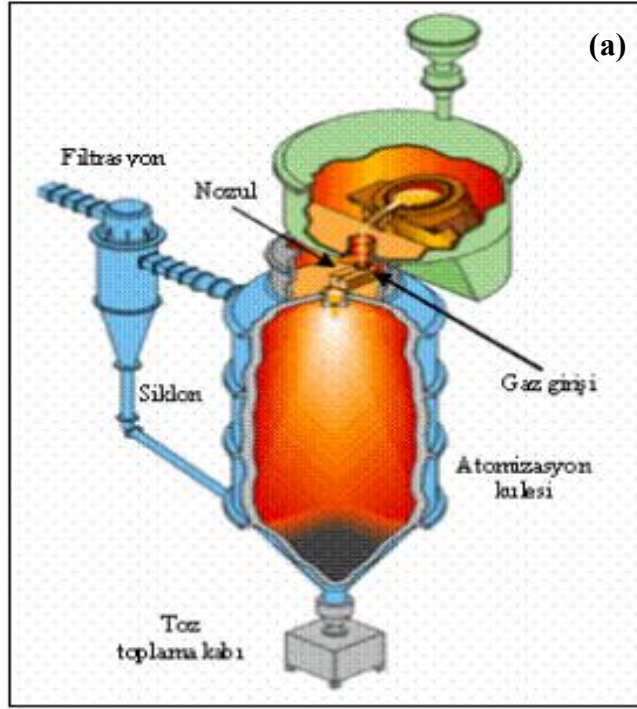
1. Yüksek gaz kinetiği
2. Metal akış borusu ucunda negatif basınç oluşumu
3. Metal akış borusu ucunda radyal basınç farkı

Düşük sıcaklık atomizasyon üniteleri Şekil 4.1'de gösterildiği gibi yatay olarak tasarlanır. Nozuldan çıkan yüksek hızlı gaz, sifon etkisi meydana getirerek sıvı metali gaz genişleme bölgesine çeker. Yüksek gaz hızı daha küçük damlacıklar oluşturur [30]. Toz toplama odası boyunca uçuşan damlacıklar ısı kaybederek parçacıklar halinde katılaşır. Yatay atomizasyon ünitelerinde geniş filtre alanı tozları tutarken gaz geçişine müsaade eder. Yüksek sıcaklıkta ergiyen metaller için, tozların oksitlenmesini önlemek amacıyla, asal gaz doldurulmuş kapalı bir oda kullanılır [20].



Şekil 4.1. Yatay atomizasyon ünitesinin şematik gösterimi [10].

Yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin atomizasyonunda, içi asal gaz ile doldurulan kapalı bir kuleye sahip düşey gaz atomizasyon üniteleri kullanılır. Şekil 4.2’de düşey gaz atomizasyonu ünitesi olarak gösterilmiştir. Ergiyik endüksiyon ocağı ile sıvılaştırma eğrisinin çok üzerinde bir sıcaklığa (aşırı ısıtma) ısıtılarak soğuk nozula gönderilir. Farklı bir tasarım olarak, sıvı metal demetinin çevresinde dairesel olarak yerleştirilmiş çoklu nozullarla gaz jetleri oluşturulabilir.



Şekil 4.2. Düşey gaz atomizasyon ünitesi: a) 3 boyutlu görünümü b) Şematik görünümü [10].

Gaz atomizasyonunda sıvı metal demetini küçük damlacıklara ayırmak için N₂, Ar, CO₂ ve He gibi gazlar veya hava kullanılır [10]. Asal gazlar, süper alaşımlar ve titanyum reaktif metaller atomize edildiğinde veya oksijen miktarının düşük seviyelerde olması istediğinde kullanılır ve küresel tozlar elde edilir. Hava atomize tozlar karmaşık şekillidir [4].

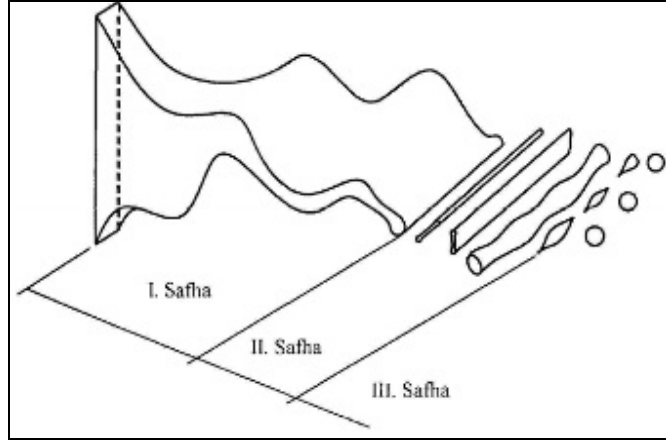
Gaz atomizasyon yönteminde çok sayıda değişken vardır: Bunlar gaz türü, ortam atmosferi, sıvı metal sıcaklığı ve nozula girdiği andaki viskozite, alaşım türü, sıvı metal akış debisi, gaz basıncı, gaz debisi ve hızı, nozul geometrisi ve gaz sıcaklığıdır. Bu değişkenler ayarlanarak kullanıma göre gerekli özelliklerde tozlar üretilebilir [10]. Gaz atomizasyon yönteminin ana üstünlüğü ürün homojenliği ve üretilen tozun küresel şekilli olmasının sağladığı iyi paketlenme özellikleridir [31].

Pratik olarak, gaz atomizasyonu 100 kg/dakika'ya kadar üretim hızlarına çıkabilir. Basınç tipik olarak 5 MPa'nın altında olup, bazı özel durumlarda 18 MPa kadar çıkabilir. Teknik büyük ölçekli olarak pek çok alaşıma uygulanmaktadır; Bunlar arasında çelikler, takım çelikleri, paslanmaz çelikler, kobalt alaşımları, alüminyum alaşımları, nikel alaşımları, değerli metaller (altın, gümüş) ve sert lehim gibi düşük ergime sıcaklığına sahip pek çok alaşım sayılabilir [20].

4.1. Atomizasyon mekanizmaları

Bir nozuldan atmosfere aniden çıkan sıvı metal demeti, onu çevreleyen gazın fiziksel özelliklerine, atomizasyon ortamının hız ve basıncına ve nozul tasarımına bağlı olarak, silindirik kolon, yassı tabaka veya konik bir yüzey şeklini alır. Atomizasyon işlemi üç aşamada meydana gelir [4].

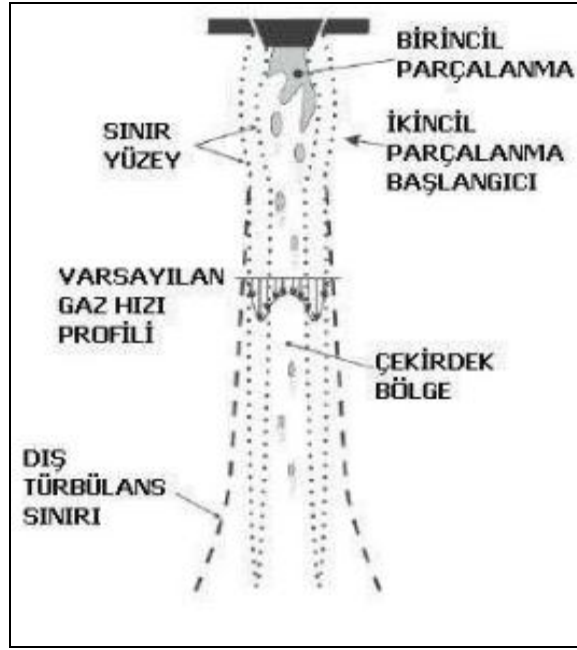
1. Sıvı metalden tabakaların oluşması
2. Tabakalardan çubuk oluşması
3. Çubuklardan tanecik oluşması ve katılaşma



Şekil 4.3. Sıvı metal tabakasının bölünme mekanizması [4].

Atomizasyon Şekil 4.3. görüldüğü gibi öncelikle, tabaka üzerinde kritik bir genliğe ulaşana kadar dalgalar büyür. Sonra dalganın tepe ve dip bölgelerinde yırtılmalar oluşur ve yarım dalga boyuna karşılık gelen kısımlar kırılır. Kırılan bu kısımlar yüzey gerilmesinin etkisiyle kararsız çubuk haline gelerek damlacıklar oluşur. Ergiyik metallerin atomizasyonu, toz oluşumu sırasında sıcaklığın düşmesi sonucu, metal damlacıkların katılaşması nedeniyle diğer sıvıların atomizasyonundan ayrılır. Sıvı metal damlacıkların katılaşma hızı önemlidir çünkü bu hız tozların şeklini belirler [32]. Ergiyik metallerin gaz ile atomizasyonunu Şekil 4.4’de görüldüğü gibi üç aşamada tanımlamışlardır:

1. Birincil bölünme
2. İkincil bölünme
3. Katılaşma

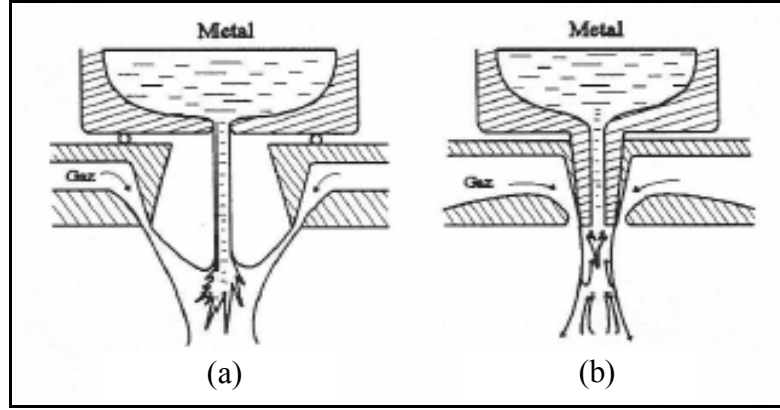


Şekil 4.4. Atomizasyon sürecinde birincil ve ikincil parçalanma bölgeleri [4].

Birinci aşamada sıvı metal demeti, yüzeyinde kararsızlığın başlayıp büyümesinde etkili olan türbülans sebebiyle dinamik basıncın değiştiği yüksek hızlı gaz akış bölgesine girer. Artan dinamik basınç, sıvı metal demetinden malzeme kopmasına sebep olur. Eğer dinamik basınç, yüzey kuvvetinden kaynaklanan yeniden yapılanma kuvvetini aşarsa ikincil bölünme meydana gelir. Üçüncül aşamada ise katılaşma ve küreselleşme zamanına bağlı olarak metal parçacık şekillenir [6].

4.2. Atomizasyon Sistemleri

Atomizasyon sistemleri, serbest düşmeli ve yakından eşlemeli olmak üzere iki çeşittir. Serbest düşmeli (Şekil 4.5-a) sistemlerde sıvı metal, gaz jeti ile temas edinceye kadar serbest olarak akar. Sıvı metal yerçekiminin etkisinde belli bir süre aktıktan sonra gaz jeti ile temas eder. Yakından eşlemeli sistemlerde, sıvı metal nozul gaz çıkış bölgesine seramik bir akış borusu ile gönderilir. Yakından eşlemeli (Şekil 4.5-b) sistemlerde daha iyi enerji aktarımı gerçekleştiği için atomizasyon verimleri yüksektir.



Şekil 4.5. Atomizasyon sistemleri (şematik): a) Serbest düşmeli, b) Yakından eşlemeli [4].

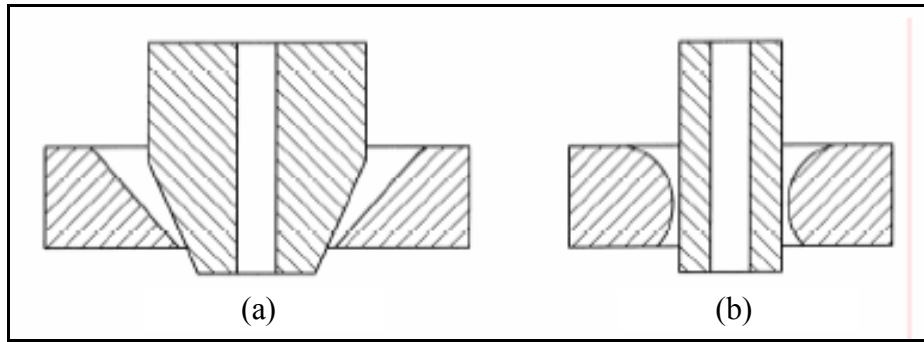
Yakından eşlemeli sistemler yüksek verimde çalışmalarına rağmen bazı zorluklara sahiptir. Bunlardan en önemlisi metal akış borusu ucunda oluşan basınçtır. Bu basınç negatif ya da pozitif olabilir. Yüksek atomizasyon basınçlarında, sıvı metal akışının kararlılığı, nozul ve metal akış borusunun boru ucunda negatif basınç oluşturacak geometride tasarlanmasıyla kontrol edilebilir. Yakından eşlemeli sistemlerde karşılaşılan sorunlardan bir diğeri ise yüksek atomizasyon basınçlarında sıvı metalin, metal akış borusu içinde katılaşması sorunudur. Sıvı metalin katılaşması sonucu atomizasyon işlemi sona erer. Bu yüzden metal ergime sıcaklığının 100–200 °C üzerine ısıtılır. Aşırı ısıtılmış metal atomizasyon bölgesine girmeden önce seramik akış borusunun içinden geçer. Sıvı metalin seramik akış borusu içersinde katılaşmasını önlemek amacıyla seramik boru direnç telleri ile ısıtılır. Bu sistemlerde serbest düşme sistemlerine göre daha kolay bölünme gerçekleşir ve daha ince boyutlarda, sıkıştırılma kapasitesi ve akıcılığı yüksek küresel tozlar üretilir [3].

4.3. Nozul Çeşitleri

Nozul parçası, gaz iletim sisteminde yüksek hızlı gaz jeti ve sıvı metal arasındaki etkileşimi sağlayan önemli bir parçadır. Atomizasyon işleminde nozul geometrisi oldukça önemli bir yere sahiptir. Nozul, toz üretim ünitesine monte edildikten sonra geometrisinde herhangi bir değişiklik oluşmadığı için atomizasyon ünitesinin sabit parçalarından bir tanesidir. Bu yüzden atomizasyon işlemi gaz basıncı, gaz tipi, sıvı

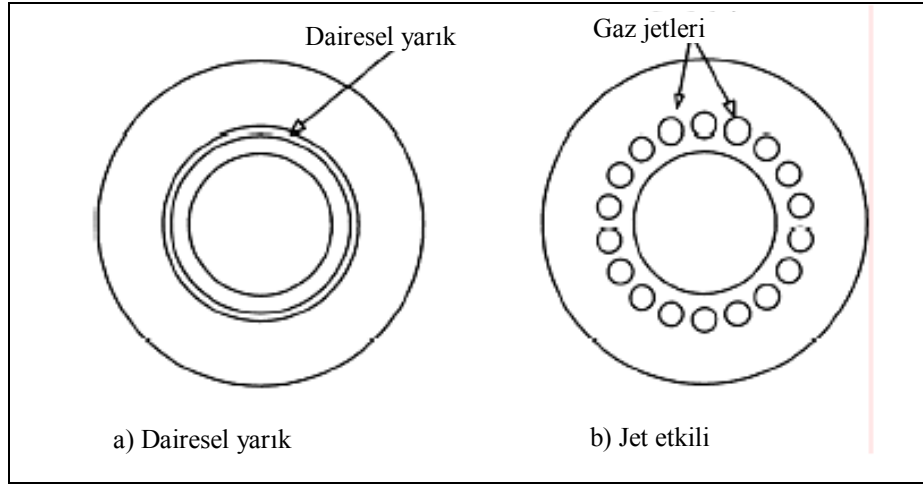
metal akış hızı, akış borusunun çıkıntı mesafesi ve sıvı metalin aşırı ısıtılması gibi işlem parametrelerinin optimizasyonu ile gerçekleştirilir. Buna rağmen bazı parametrelerdeki değişim oldukça sınırlıdır. Örneğin helyum gazının kullanımı ortalama toz boyutunu düşürür fakat azot gazının kullanımı ekonomiktir. Nozullar geometrilerine göre ikiye ayrılırlar (Şekil 4.6) ;

1. Süpersonik Nozullar (daralan-genişleyen geometri)
2. Sonik Nozullar (daralan geometri).



Şekil 4.6. Farklı nozul geometrileri: a) Sonik geometri b) Süpersonik geometri [33].

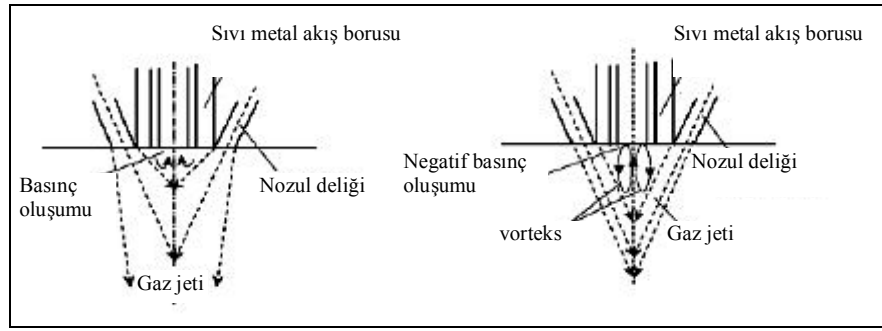
Sıvı metaller yüksek yüzey gerilmesine sahip olduğu için atomizasyonlarında genellikle süpersonik geometri nozullar kullanılır. Sonik geometriye sahip nozullar ile oldukça yüksek basınç değerlerinde ses üstü hızlara ulaşılırken, süpersonik geometriye sahip nozullarda ise daha düşük atomizasyon basınçlarında ses üstü hızlara ulaşmak mümkündür. Nozullar sahip oldukları gaz çıkış geometrilerine göre jet etkili veya dairesel yarıkli olmak üzere ikiye ayrılır (Şekil 4.7). Yüksek verimli atomizasyon işlemi için yapılması gereken en önemli aşama uygun şartlarda çalışabilecek bir nozul tasarımının yapılmasıdır.



Şekil 4.7. Dairesel yarıklar ve jet etkili nozulların şematik resimleri [33].

4.3.1 Negatif Basınç Oluşumu

Sıvı metal akış borusu ucunda oluşan gaz akışı ve negatif basınç oluşumu gaz dinamiğine bağlıdır. Gaz atomizasyonu işlemi esnasında sıvı metal akış borusunun ucundaki gaz basıncı atomizasyon değişkenlerinin durumuna göre pozitif veya negatif olabilir (Şekil 4.8). Negatif basınç oluşumu sonucunda sıvı metal potadan metal akış borusuna doğru çekilir. Pozitif basınç oluşumu sonucu metal akışı gerçekleşmediği gibi pota içinde püskürme oluşabilir. Bu yüzden negatif basınç oluşumu istenen bir durumdur. Metal akış borusu ucunda oluşan negatif basınç, sıvı metale etki eden dolaşım bölgesindeki gaz akış kuvvetlerinin toplamıdır. Atomizasyon işleminde gaz akışı nozul geometrisine bağlıdır. Yapılan araştırmalarda, süpersonik geometrili nozulların, sonik geometrili nozullara göre daha kuvvetli negatif basınç oluşumu gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Negatif basınç oluşumuna etki eden en önemli faktörlerden biri metal akış borusunun nozul gaz çıkışına göre konumudur. Genel olarak metal akış borusu çıkıntı mesafesinin artması sonucu daha etkili negatif basınç oluşumu gerçekleşir fakat borunun uzaması sıvı metalin donması problemini beraberinde getirir. Metal akış borusunun nozul çıkışının 10 mm altında olduğu konumda maksimum negatif basıncın oluştuğunu tespit etmişlerdir [34].

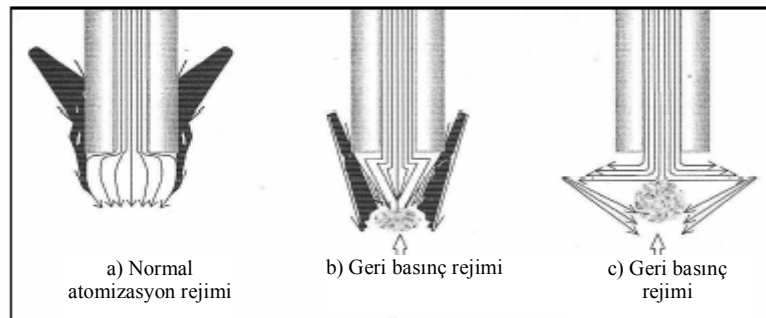


Şekil 4.8. Metal akış borusu çıkışında basınç oluşumu [33].

Negatif basınç ölçümleri atomizasyon işleminin verimliliğinin araştırılması açısından oldukça önemlidir. Yüksek basınçlı gaz atomizasyonunda negatif basınç bölgesi, metal akış borusu ucundaki sıvı metal beslemesini kontrol edebilir. Negatif basınç oluşumu daha dengeli bir sıvı metal beslemesi sağlar ve böylelikle toz boyut dağılımı daha kolay kontrol edilir.

4.3.2. Geri Basınç Oluşumu

Atomizasyon işlemi esnasında akış borusunun ucunda oluşan basınç değerinin pozitif olması durumunda sıvı metal akışı yavaşlar hatta bazı durumlarda durur veya ters yönde akış özelliği gösterir. Bu basınç değerinin atmosfer basıncından büyük olması durumunda gaz, akış borusu içerisine girer ve bu durum genellikle metalin katılaşmasına sebep olur. Bu duruma ters akış durumu denir. Chen ve diğerleri [35], yaptığı araştırmalarda metal akış borusu çıkıntı mesafesinin değişmesi ile birlikte atomizasyon işleminde 3 farklı aşamanın gerçekleşebileceğini gözlemlemiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Geri basınç oluşumunun şematik gösterimi [4].

Metal akış borusu, nozul gaz çıkışının alt bölgelerinde yerleştirilmesi sonucu gaz boru çeperlerine çarpar ve bu çeperler boyunca hareket ederek sıvı metal ile buluşur. Bu aşamaya normal aşama denir. Metal akış borusu çıkıntı mesafesi azaldıkça atomizasyon hızı azalır ve sıfır olur. Bu aşama geri basınç oluşumu aşamasıdır. Bu aşamada gaz jetleri metal akış borusunun uç çevresinde buluşurlar ve sıvı metalin akmasına izin vermezler. Geri basınç oluşumu atomizasyon gaz basıncına, nozul geometrisine ve metal akış borusu çıkıntı mesafesine bağlıdır. Metal akış borusu çıkıntı mesafesinin daha da azalmasıyla birlikte gaz jetlerinin buluşma noktası bir miktar aşağı yönde kayar. Bu aşamada da geri basınç bölgesi mevcuttur fakat metal akış borusunun hemen ucunda değil belli bir miktar alt bölgededir [33].

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinde daha önceden yapılmış olan gaz atomizasyon ünitesindeki eksikler giderilmiştir. Gaz atomizasyon ünitesinde tozu üretilen Al 2024' ün spektral analiz sonuçları Çizelge 5.1'de verilmiş olup, üretilen tozun gaz basıncı ile nozul iç çapının toz tane boyutu ve toz şekline etkisi araştırılmıştır.

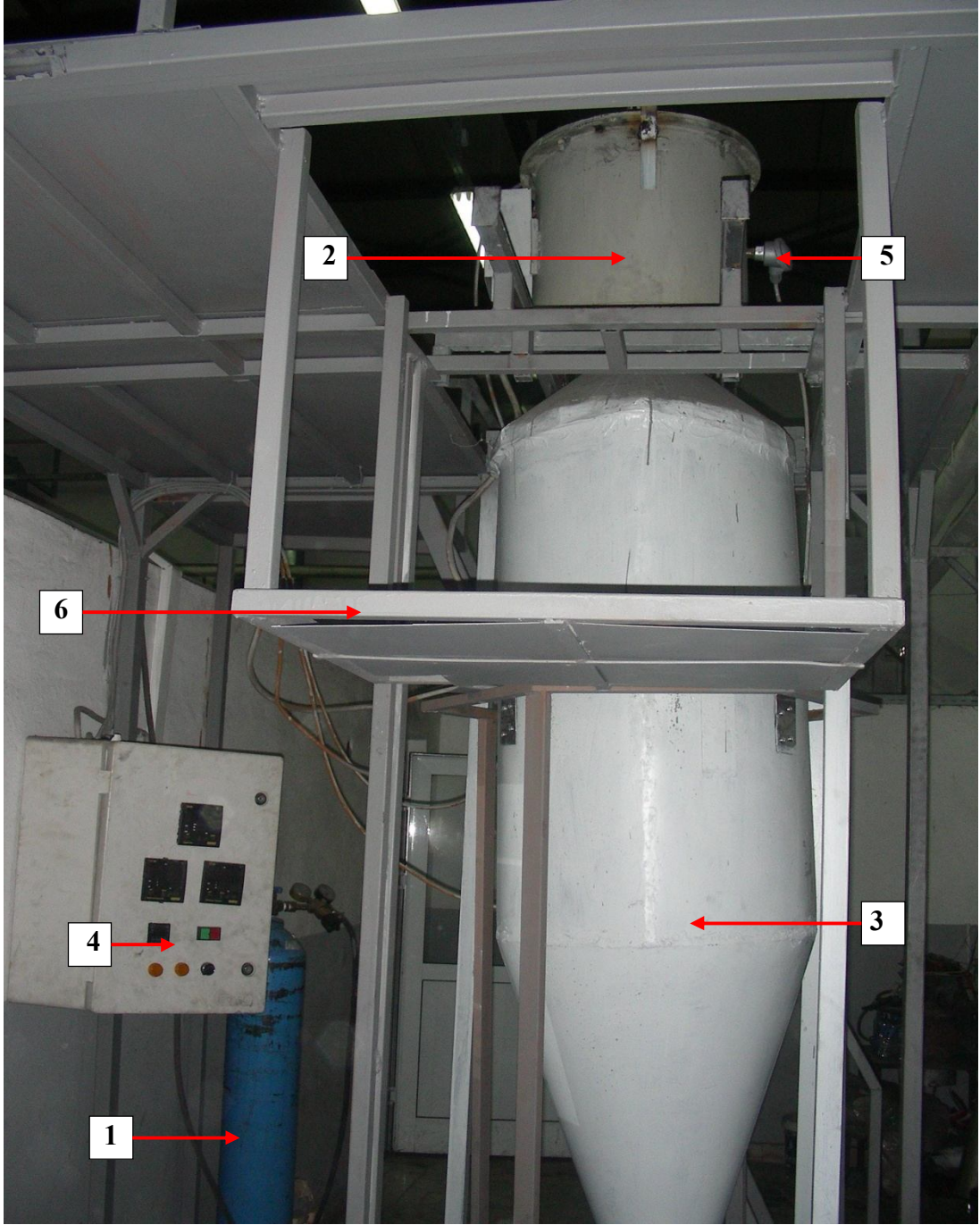
Çizelge 5.1. Al 2024 malzemesinin kimyasal bileşimi.

Ağırlık %	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Cr	Zn
Al 2024	93,35	4,8	0,2	1,1	0,35	0,18	0,006	0,05	0,04

Üç ayrı nozul iç çapı ve her çap için beş farklı gaz basıncı ile yapılan atomizasyon çalışmalarından elde edilen Al 2024 tozlarının şekil ve morfolojileri taramalı elektron mikroskobu ile toz boyutu ise lazer ışın toz boyutu ölçme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

5.1. GAZ ATOMİZASYON ÜNİTESİ

Atomizasyon ünitesi Şekil 5.1'de görüldüğü gibi ergitme fırını, gaz sistemi, nozul, atomizasyon kulesi, toz toplama kabı ve platform olmak üzere altı ana bölümden oluşmaktadır.

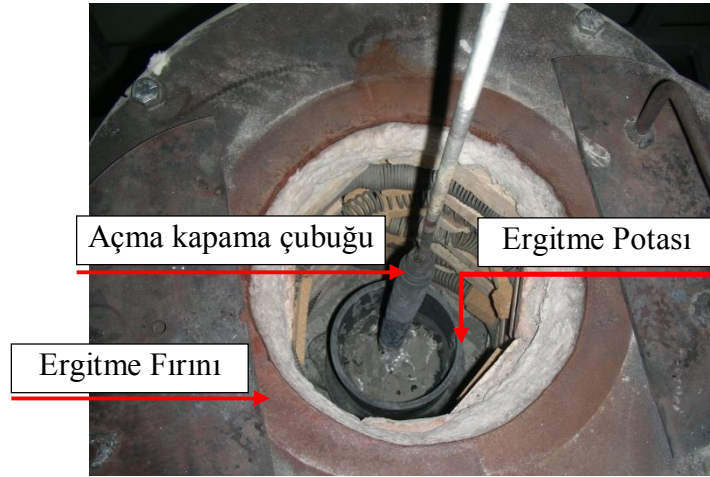


Şekil 5.1. Gaz atomizasyon ünitesi 1-Gaz sistemi, 2-Ergitme fırını, 3-Atomizasyon kulesi, 4-Kontrol panosu, 5- Termokupl, 6- Platform.

5.1.1 Ergitme Fırını

Ergitme işlemi, atomizasyon kulesi üzerindeki fırın içersine yerleştirilmiş paslanmaz çelik potada gerçekleştirilmiştir. Fırın 1250 °C sıcaklığa çıkabilecek kapasitededir. Ergitme fırını atomizasyon kulesinin üstünde yatay şekilde hareket edebilmesi için

raylı bir sistem üzerine yerleştirilmiştir. Bu sayede atomizasyon kulesinin temizliği daha basit ve ergitme fırınına yeni malzeme yüklemesi daha kolay şekilde yapılabilmektedir. Fırının toplam 2 ayrı noktasına termokupol yerleştirilmiş ve bunlar elektronik bir kontrol tablosuna bağlanarak ısıtma işleminin hassas bir şekilde kontrol edilmesine imkan sağlamıştır. Ergitme fırını, pota ve açma kapama çubuğu Şekil 5.2 ve 5.3'te görülmektedir. Ergitme işlemi 850–875 °C aralığında gerçekleştirilmiştir. Sıvı metal gerekli sıcaklığa ulaştıktan sonra açma-kapama çubuğu manuel olarak çekilmiş ve metal akışı sağlanmıştır. Metalin ergitme işlemi sırasında havanın etkilerinden korunabilmesi için fırının alt ve üst kısımlarına küresel vanalar konulmuş, bu vanalar sayesinde fırının içerisine düşük basınçta argon gazı verilerek ergitilen metal oksitlenmeye karşı korunmuştur.



Şekil 5.2. Metal ergitme fırını, grafit pota ve açma kapama çubuğu.



Şekil 5.3. Raylar üzerinde hareket edebilen ergitme fırını.

5.1.2. Gaz Sistemi

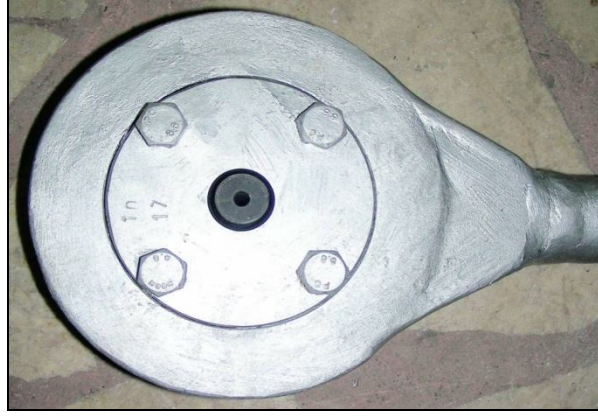
Yapılan deneylerde atomizasyon gazı kaynağı olarak Şekil 5.4'te verilen 200 bar işletme basıncına sahip basınçlı tüp ve atomize gaz olarak da argon kullanılmıştır. Gaz basıncı ayarı, tüpün çıkışına yerleştirilen bir regülatör yardımı ile yapılmıştır. Regülatör çıkışına bir küresel vana yerleştirilerek atomizasyon işlemi başladıktan sonra manometrede okunan basınç değeri atomizasyon gaz basıncı olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5.4. Argon tüpü ve regülatör.

5.1.3. Nozul

Şekil 5.5’de görüldüğü gibi, deneylerde dairesel yarıkli, sonik geometrili üç farklı çapta uca sahip, yakından eşlemeli nozul kullanılmıştır. Nozulun uçları 3, 4 ve 5mm olarak imal edilmiştir. Yakından eşlemeli sistemlerde sıvı metal akış borusunun da ısıtılması büyük önem taşımaktadır. Metal akış borusunun yeterli ısıtılamaması halinde ergimiş metalin, metal akış borusu ucundaki sıcaklığı düşecek ve sıvı metal debisinin düşmesine neden olacaktır. Küçükarslan, gaz atomize kalay tozu üretim parametrelerinin deneysel olarak araştırılması konusunda yaptığı çalışmada, yüksek basınçlarda oluşan geri basıncın etkisiyle ergimiş metalin, akış borusu ucunda donması ve akış borusunu tıkamasına neden olacağını belirtmiştir [6]. Bu sebeple, bu çalışmada kullanılan nozul ve metal akış borusu ergitme fırınının iç kısmına yerleştirilerek akış borusu ucundaki katılaşmanın önüne geçilmiştir.



Şekil 5.5. Dairesel yarıklı ve sonik geometrili nozul.

5.1.4. Atomizasyon Kulesi

Gaz Atomizasyon Ünitesi'nin atomizasyon kulesi Şekil 5.6'da görüldüğü gibi paslanmaz çelikten imal edilmiş olup çevresinde bir adet gözetleme noktası mevcuttur. Çapı 60 cm, toplam yüksekliği ise 150 cm'dir. Kule yüksekliği, sıvı metal damlacıklarının kule tabanına inmeden katılaşabilmelerine imkan verecek yükseklikte ve kule çapı, damlacıkların kule çeperine çarpmayacak boyuttadır. Atomizasyon kulesinin temizliğinin kolay yapılabilmesine imkan sağlamak için kule üzerindeki ergitme fırını, raylı olarak tasarlanmış ve kule üzerinde hareket ettirilebilir durumdadır.



Şekil 5.6. Paslanmaz çelikten imal edilen atomizasyon kulesi.

5.1.5. Toz Tutma ve Sistem Temizliği

Atomizasyon ünitesine bağlı Şekil 5.7'deki gibi bir adet toplama kabı mevcuttur. Toz toplama kabı atomizasyon ünitesinin en alt kısmına yerleştirilmiş ve paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Yapılan her deney sonrasında atomizasyon ünitesinin iç kısmı bir kompresör kullanılarak, basınçlı hava yardımı ile temizlenmiştir. Üretilen tozlar toz tutma kabından alındıktan sonra plastik kaplarda muhafaza edilmiştir.



Şekil 5.7. Toz toplama kabı.

5.2. ATOMİZASYON ÇALIŞMALARI

Gaz atomizasyon ünitesinde yapılan çalışmalar süresince yakından eşlemeli nozul sistemi kullanılarak gaz atomize Al 2024 tozu üretimi gerçekleştirilmiştir. Atomizasyon çalışmaları sırasında sıvı Al 2024, ergime sıcaklığının üzerine (875 °C) aşırı ısıtılmıştır. Atomizasyon çalışmaları sırasında gerçekleştirilen işlemler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

1. Öncelikle deneyde kullanılacak metal akış borusu nozula monte edilmiş ve nozul ise ergitme fırınının tabanına yerleştirilmiştir.
2. Ergitme potası fırının alt tabanına ve nozul' un üstüne monte edilmiştir.
3. Açma - kapama çubuğu çelikten yapılmış ve sızdırmazlık sağlayacak şekilde ayarlanarak fırın içerisindeki potanın merkezine yerleştirilmiştir.
4. Ergitme fırını içindeki potaya, her bir deney için yaklaşık 300 g Al 2024 kütle halinde konularak fırın çalıştırılmış ve 875 °C'ye aşırı ısıtılmıştır.
5. Atomizasyon gaz basıncı, basınç ayar vanası ile istenilen basınç değerlerine ayarlanmış ve nozula gaz gönderilmiştir.

6. Açma-kapama çubuğunun yukarı doğru kaldırılmasıyla ergimiş Al 2024'ün akması ve dairesel yarıklı nozul yardımı ile parçalanması sağlanmıştır. Metal akışının tamamlanmasından sonra gaz akışı durdurulmuş ve atomizasyon işlemi tamamlanmıştır.
7. Atomizasyon kulesi ile toz toplama ünitesi bağlantı noktalarından sökülerek, toz toplama kabında biriken tozlar alınarak kilitli poşetler içinde muhafaza edilmiştir.
8. Toz toplama kabı, siklon ve kule iç yüzeyine yapışan tozlar temizlendikten sonra, bir sonraki deney için ünite hazır hale getirilmiştir. Ünitenin montajı tekrar yapılarak yeni bir deney için yukarıda sıralanan işlemler tekrar edilmiştir.

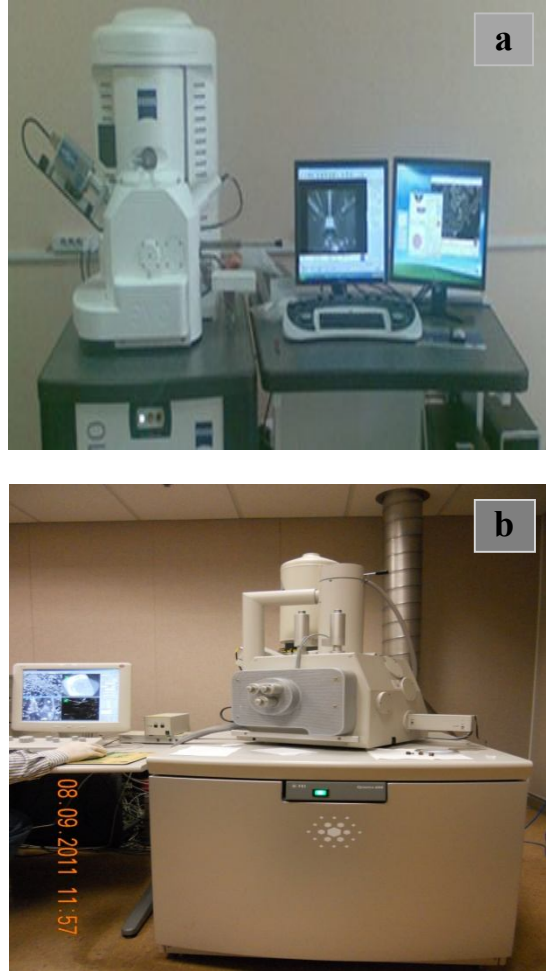
Al 2024 toz üretimi için yapılan deneylerde atomizasyon gazı olarak argon kullanılmıştır. Yakından eşlemeli nozul ile yapılan her bir deneydeki atomizasyon değişkenlerine ait bilgiler Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Atomizasyon değişkenleri.

Numune Kodu	Deney No	Nozul Çapı (mm)	Gaz Basıncı (Bar)
A	A1	3	2
	A2		4
	A3		6
	A4		8
	A5		10
B	B1	4	2
	B2		4
	B3		6
	B4		8
	B5		10
	B6		12
C	C1	5	2
	C2		4
	C3		6
	C4		8
	C5		10

5.3. TOZLARIN KARAKTERİZASYONU

Gaz atomizasyonu yöntemi ile üretilen Al 2024 tozlarının karakterizasyonu amacı ile, toz tane şeklini belirleyebilmek için SEM görüntüleri alınmış ve toz tane boyutunun belirlenebilmesi için de toz boyut analizi yapılmıştır. Üretilen tozların SEM görüntüleri (Şekil 5.8 a ve b) Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama merkezinde, Zeiss marka Evol LS 10 model cihazdan ve Amerika Birleşik Devletlerinden “Department of Metallurgical and Materials Engineering at the Colorado School of Mines” laboratuvarlarında FEI QUANTA 600 marka cihazdan alınmıştır.



Şekil 5.8. SEM cihazı a) Zeiss marka Evol LS 10 b) FEI QUANTA 600.

5.4. TOZ BOYUT ANALİZİ

Gaz atomizasyonu ile elde edilen Al 2024 tozlarının boyut analizi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Malzeme Laboratuvarında Şekil 5.9'da gösterilen ve Fraunhofer'in lazer ışınının kırınımı teorisine göre çalışan Malvern Mastersizer E lazerle parçacık boyutu ölçme cihazında yapılmıştır. Bu teoriye göre, katı cisimler ışığı çapları ile ters orantılı olarak kırarlar. Bu amaçla; içinde uygun bir taşıyıcı ortamda süspansiyon halinde bulunan tozların pompa yardımıyla lazer ışınlarının önünden geçmesini sağlayan hazne, ışın yoluna yerleştirilir. Bu hazneden ve daha sonrada seçilen lens üzerinden geçip tarayıcı üzerine düşen kırılmış ışının açısı ve şiddeti tarayıcıda ölçülür. Bu teoriye göre hesaplanan toz boyutları, ölçüm sırasında otomatik olarak bilgisayara kaydedilir ve birçok istatistiki bilgi ile birlikte toz dağılımı grafik olarak elde edilir.

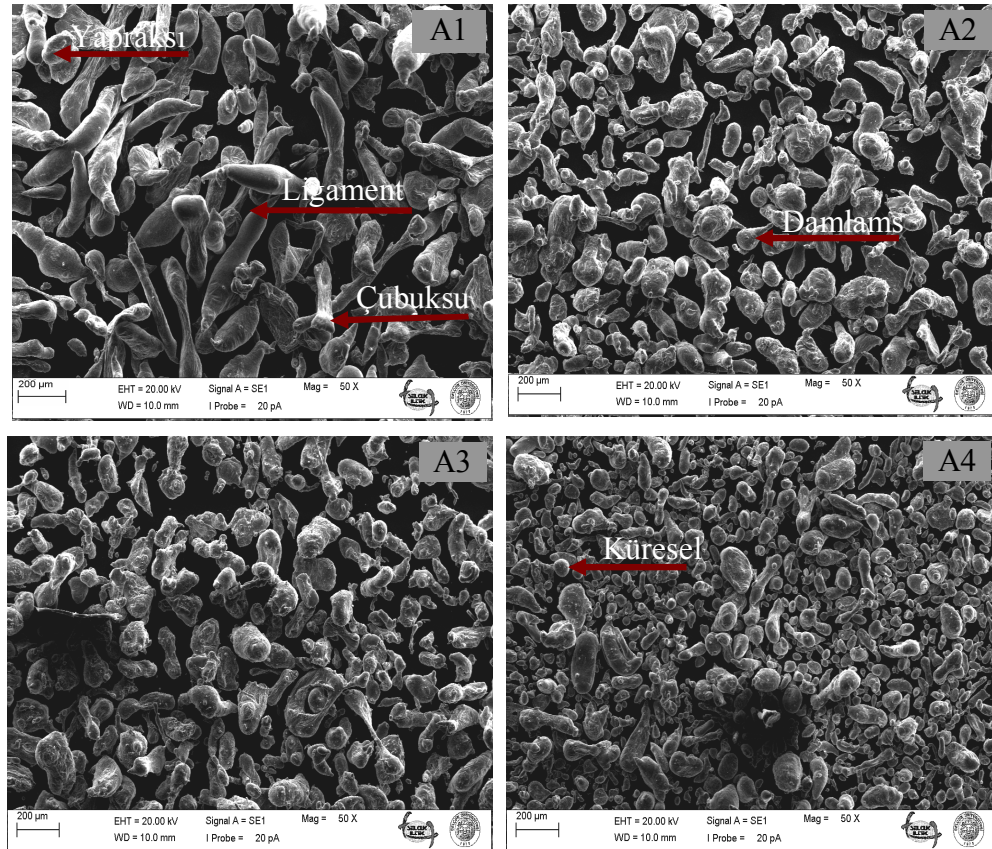


Şekil 5.9. Malvern Mastersizer E partikül boyutu ölçme cihazı.

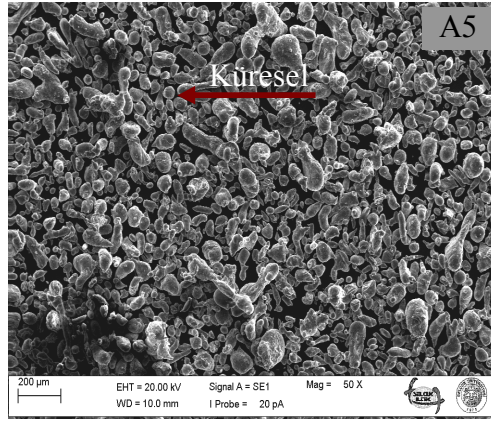
BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

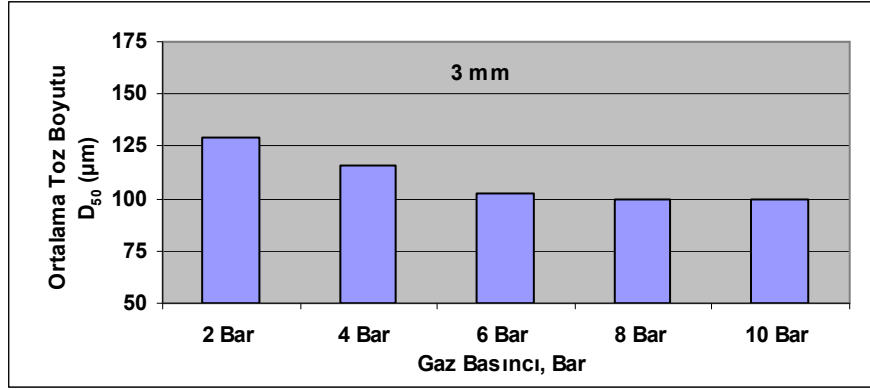
Farklı nozul çapı ve farklı gaz basınçları kullanılarak üretilen atomize Al 2024 tozlarının parametrelere göre özellikleri aşağıda verilmiştir. 3 mm iç çapa sahip nozul ile 2, 4, 6, 8 ve 10 bar basınçlarda üretimi yapılan atomize Al 2024 tozlarına ait SEM görüntüleri Şekil 6.1’de, gaz basıncına bağlı olarak ortalama toz tane boyutu dağılımı Şekil 6.2’de ve üretilen tozların gaz basıncına bağlı olarak spesifik yüzey alanındaki değişim ise 6.3’te gösterilmiştir.



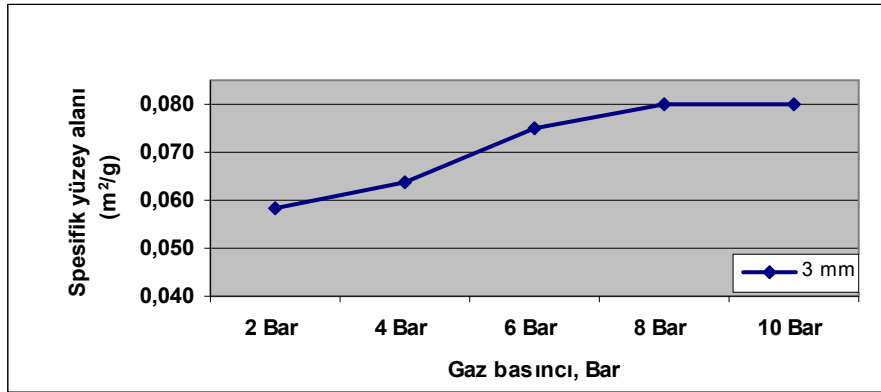
Şekil 6.1. Üretilen Al 2024 tozlarının SEM görüntüsü, A1) 3 mm nozul çapı ve 2 bar gaz basıncı, A2) 3 mm nozul çapı ve 4 bar gaz basıncı, A3) 3 mm nozul çapı ve 6 bar gaz basıncı, A4) 3 mm nozul çapı ve 8 bar gaz basıncı, A5) 3 mm nozul çapı ve 10 bar gaz basıncı.



Şekil 6.1. (devam ediyor).



Şekil 6.2. Ortalama toz boyutuna gaz basıncının etkisi.



Şekil 6.3. Spesifik yüzey alanı üzerine gaz basıncının etkisi.

Şekil 6.1'deki A1 kodlu numunede toz parçacıklarının SEM görüntüleri incelendiğinde, parçacık dağılımlarının homojen bir şekle sahip olmadığı görülmektedir. Üretilen A1 2024 tozlarının genel olarak ligament ve damlamsı şekle sahip olduğu fakat az da olsa lifli ve yapraksı yapıların da yer aldığı görülmektedir.

Bu karışık şekillenmeye, atomizasyon sırasındaki 2 bar gaz basıncının sıvı metal demetini yeterince küçük parçalara ayıramadığı, parçacıkların küreselleşmeye fırsat bulamadan katılaştığı ligament ve çubuksu şeklindeki tanelerin oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir.

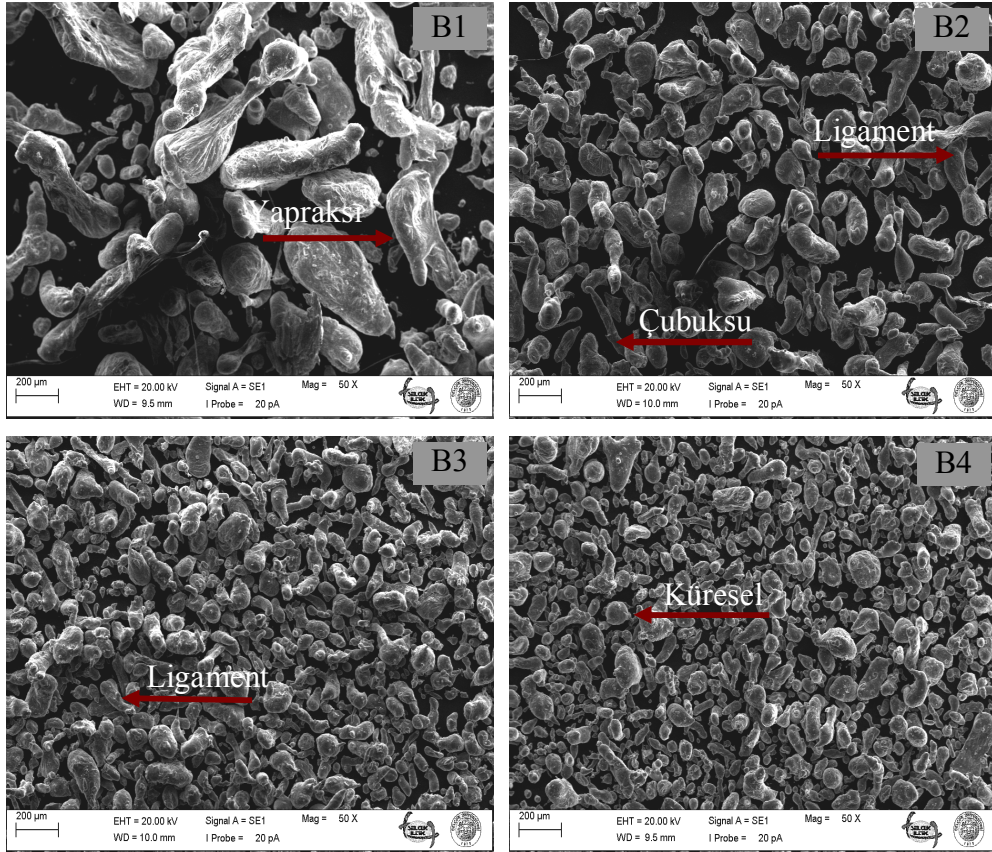
A2 ve A3 kodlu numunelerin SEM görüntülerine bakıldığında üretilen toz parçacıklarının şekillerinin neredeyse tamamının damlamsı ve ligament şekilden meydana geldiği ve çok az miktarda da küresel tozların olduğu görülmektedir. A1 kodlu numuneye göre daha yuvarlak hatlı bir toz şeklinin oluşmuş olması gaz basıncındaki artıştan kaynaklanmıştır. Bu deneyde gaz atomizasyon yöntemi ile üretilmesi planlanan küresel toz şekli istenilen boyutta elde edilememiştir. Ancak A4 ve A5 kodlu numunelerdeki 8 ve 10 bar gaz basınçlarının toz tane boyutunun küçülmesine sebep olduğu, yapıda daha fazla küçük ve küresel tane şeklinin yer aldığı, ayrıca yapı içerisinde ligament tozların da varlığı tespit edilmiştir.

Şekil 6.2’de 3 mm nozul iç çapında, gaz basıncına bağlı olarak toz boyutundaki değişim incelendiğinde, 2 ile 8 bar gaz basıncı arasında basıncın artmasına bağlı olarak toz boyutunun küçüldüğü, 8 ila 10 bar gaz basınçlarında ise toz boyutunda kayda değer bir değişimin olmadığı görülmektedir. 2 bar gaz basıncındaki toz boyutu 129 μm , 4 bar gaz basıncında 116 μm , 6 bar gaz basıncında 103 μm , 8 bar gaz basıncında 99 μm ve 10 bar gaz basıncında ise 100 μm olarak kaydedilmiştir. Şekil 6.3’de, 2-10 bar gaz basıncına bağlı olarak meydana gelen spesifik yüzey alanındaki değişim sırasıyla 0,058 m^2/g , 0,064 m^2/g , 0,076 m^2/g , 0,080 m^2/g ve 0,080 m^2/g olarak kaydedilmiştir. 2 ile 8 bar arasında gaz basıncının artması ile toz boyutunun küçüldüğü (Şekil 6.2) ve üretilen tozların yüzey alanlarının arttığı görülmüştür. Ancak 8 ila 10 bar gaz basınçları aralığında üretilen tozların spesifik yüzey alanlarında bir değişiklik görülmemiştir.

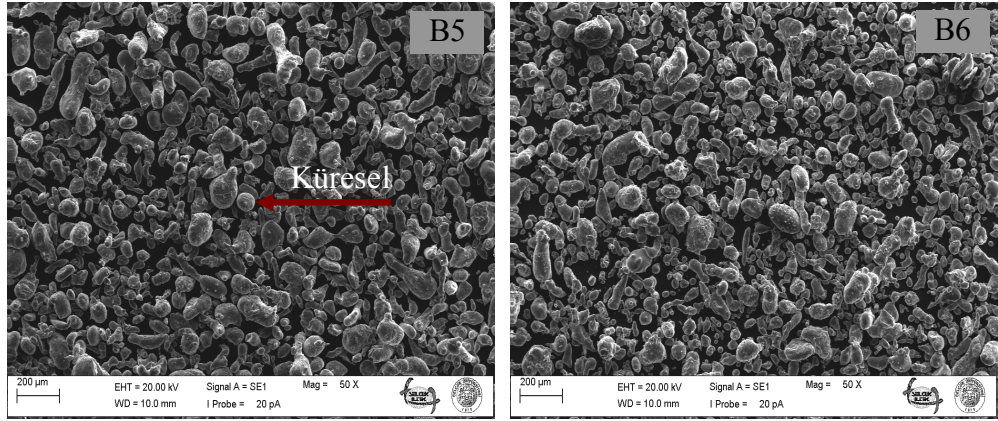
Küçükarslan, yaptığı gaz atomizasyon çalışmalarında gaz basıncının artışı ile ortalama toz boyutunun küçüldüğünü belirtmiştir. Yapmış olduğumuz bu deneysel çalışmanın literatür ile benzerlik arz ettiği görülmektedir [6].

Birim kütle başına düşen alan olarak bilinen spesifik yüzey alanının; aynı küreselliğe sahip toz boyutunun küçülmesi ile spesifik yüzey alanının arttığı kaydedilmiştir [10]. Bu çalışmada gaz basıncının artmasına bağlı olarak toz boyutunun küçüldüğü ve spesifik yüzey alanının ise arttığı tespit edilmiştir. Ancak 8 ile 10 bar arasında gaz basıncının artmasına rağmen toz boyutunun sabit kalması ile spesifik yüzey alanında da bir değişiklik meydana gelmemiştir.

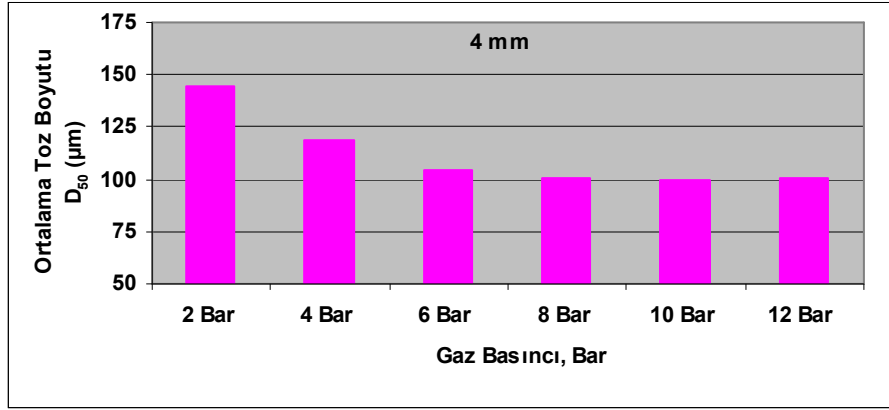
4 mm çapında iç çapa sahip nozul ile 2, 4, 6, 8, 10 ve 12 bar basınçlarda üretimi yapılan Al 2024 tozlarının SEM görüntüleri Şekil 6.4'te verilmiştir.



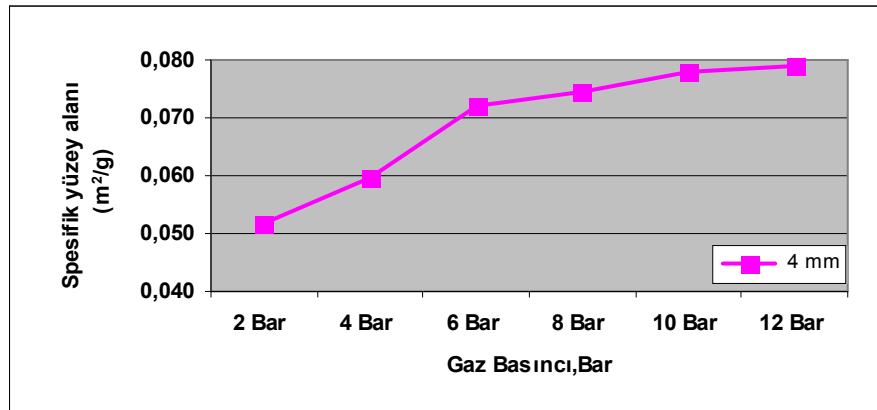
Şekil 6.4. Üretilen Al 2024 tozlarının SEM görüntüsü, B1) 4 mm nozul çapı ve 2 bar gaz basıncı, B2) 4 mm nozul çapı ve 4 bar gaz basıncı, B3) 4 mm nozul çapı ve 6 bar gaz basıncı, B4) 4 mm nozul çapı ve 8 bar gaz basıncı, B5) 4 mm nozul çapı ve 10 bar gaz basıncı, B6) 4 mm nozul çapı ve 12 bar gaz basıncı.



Şekil 6.4. (devam ediyor).



Şekil 6.5. Ortalama toz boyutuna gaz basıncının etkisi.



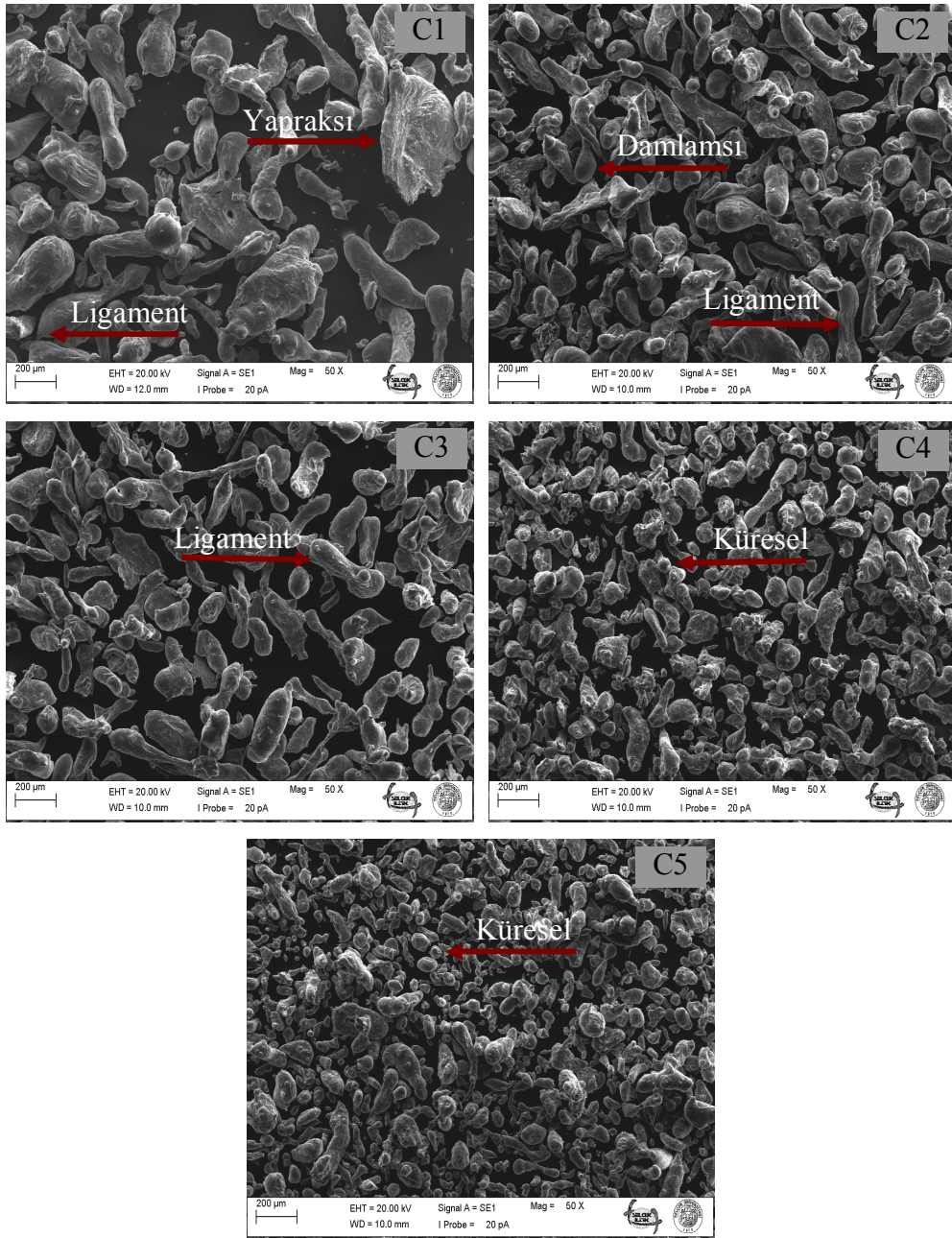
Şekil 6.6. Spesifik yüzey alanı üzerine gaz basıncının etkisi.

4 mm nozul çapı ve farklı gaz basınçlarında elde edilen Al 2024 tozlarının görüntüleri Şekil 6.4'te incelendiğinde, ilk beş deneydeki gibi atomizasyon sırasındaki gaz basıncının toz şekline ve boyutuna etkisi açık bir şekilde

görülmektedir. B1 ve B2 kodlu numunelerdeki yapının çoğunlukla yapraksı ve ligament şekilli tozlardan oluştuğu, yapı içerisinde çok az miktarda çubuksu ve damlamsı şekilli tozların da yer aldığı görülür. B3 ve B4 kodlu numunelerde, yapının tamamının ligament ve damlamsı şekilli tozlardan meydana geldiği, bununla birlikte gaz basıncının artmasına bağlı olarak B5 ve B6 kodlu numunelerde ise genel olarak küçük damlamsı ve küresel toz şekli ile beraber az miktarda da ligament tozların oluştuğu görülmüştür. Şekil 6.5’de 2-12 bar aralığında, artan gaz basıncına bağlı olarak ortalama toz boyutundaki değişim sırasıyla 145 µm, 119 µm, 104 µm, 102 µm, 100 µm ve 100 µm olarak elde edilmiştir.

Şekil 6.6’da spesifik yüzey alanı artan gaz basıncına bağlı olarak sırasıyla 0,052 m²/g, 0,060m²/g, 0,072 m²/g, 0,075 m²/g, 0,078 m²/g, 0,079 m²/g olarak kaydedilmiştir. Şekil 6.6 incelendiğinde, gaz basıncının artmasıyla toz boyutunun küçüldüğü ve spesifik yüzey alanının arttığı anlaşılmıştır. Ancak 10 ve 12 bar gaz basınçlarında toz boyutunun sabit kalmasına rağmen spesifik yüzey alanının arttığı görülmüştür. Bunun sebebinin Şekil 6.4 ve Şekil 6.5’te de görüldüğü gibi toz boyutunun sabit kalmasına rağmen, toz şeklinin küresellikten uzaklaştığı, bunun ise spesifik yüzey alanını artırdığı bilinmektedir.

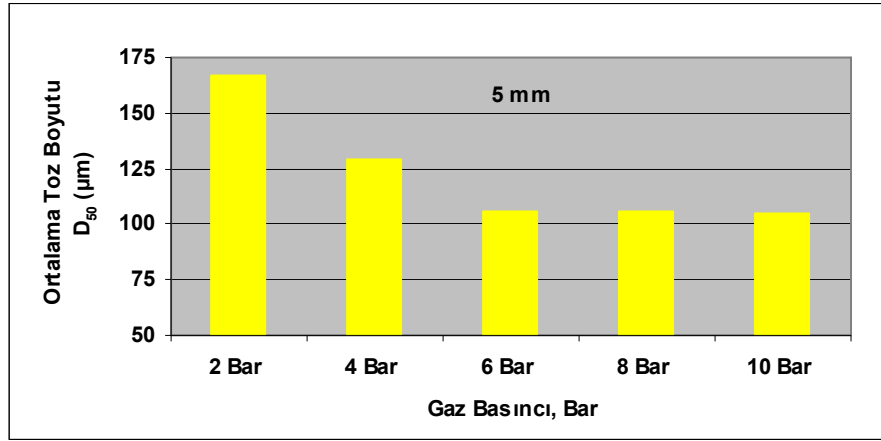
5 mm çapında iç çapa sahip nozul ile 2, 4, 6, 8 ve 10 bar basınçlarda üretimi yapılan Al 2024 tozlarının SEM görüntüleri Şekil 6.7’de verilmiştir.



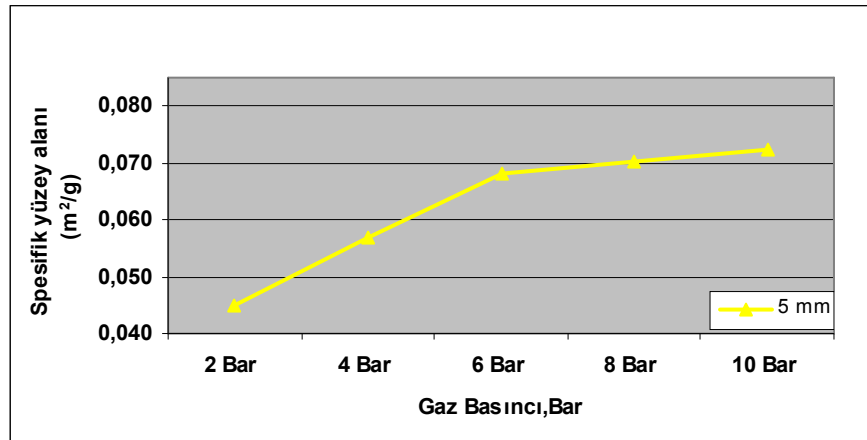
Şekil 6.7. Üretilen Al 2024 tozlarının SEM görüntüsü, C1) 5 mm nozul çapı ve 2 bar gaz basıncı, C2) 5 mm nozul çapı ve 4 bar gaz basıncı, C3) 5 mm nozul çapı ve 6 bar gaz basıncı, C4) 5 mm nozul çapı ve 8 bar gaz basıncı, C5) 5 mm nozul çapı ve 10 bar gaz basıncı.

Şekil 6.7’de verilen numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde 2 bar gaz basıncı ile üretilen C1 kodlu numunenin tamamına yakınının yapraksı ve ligament şekilli tozlardan oluştuğu görülür. 4 bar gaz basıncı ile üretilen C2 kodlu numunede tozların ligament ve damlamsı olduğu, 6 bar gaz basıncı ile üretilen C3 kodlu numunenin ise daha küçük ligament ve damlamsı şekilli oldukları görülmüştür. C4 ve C5 kodlu

numunelerin SEM görüntüleri incelediğinde ise gaz basıncının artmasına bağlı olarak toz şeklinin genel olarak ligament ve küresel şekilli oldukları ancak istenilen küresel yapının üretilmesi için gaz basıncının yeterli olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte Şekil 6.8'deki, 5 mm nozul iç çapı sabit tutularak yapılan deneylerde 2-10 bar gaz basıncı aralığında, gaz basıncına bağlı olarak toz boyutu sırasıyla 167 μm , 129 μm , 106 μm , 106 μm ve 105 μm olarak elde edilmiştir. Şekil 6.8'deki veriler neticesinde gaz basıncının artması ile toz boyutunun küçüldüğü, 2-6 bar gaz basıncı aralığında toz boyutundaki küçülmenin daha büyük olduğu, 6-10 bar gaz basıncı aralığında ise toz boyutunda çok küçük bir azalmanın olduğu görülmüştür. Şekil 6.9'da ise gaz basıncının artması ile spesifik yüzey alanının arttığı tespit edilmiştir.



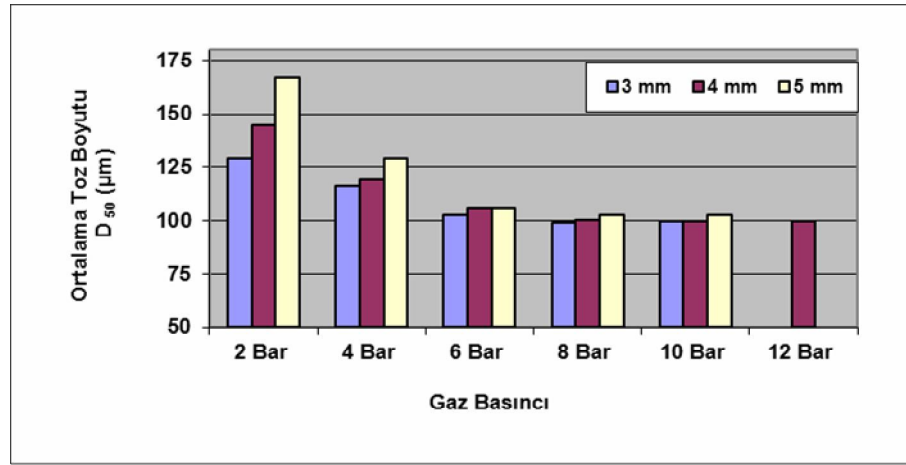
Şekil 6.8. Ortalama toz boyutuna gaz basıncının etkisi.



Şekil 6.9. Spesifik yüzey alanı üzerine gaz basıncının etkisi.

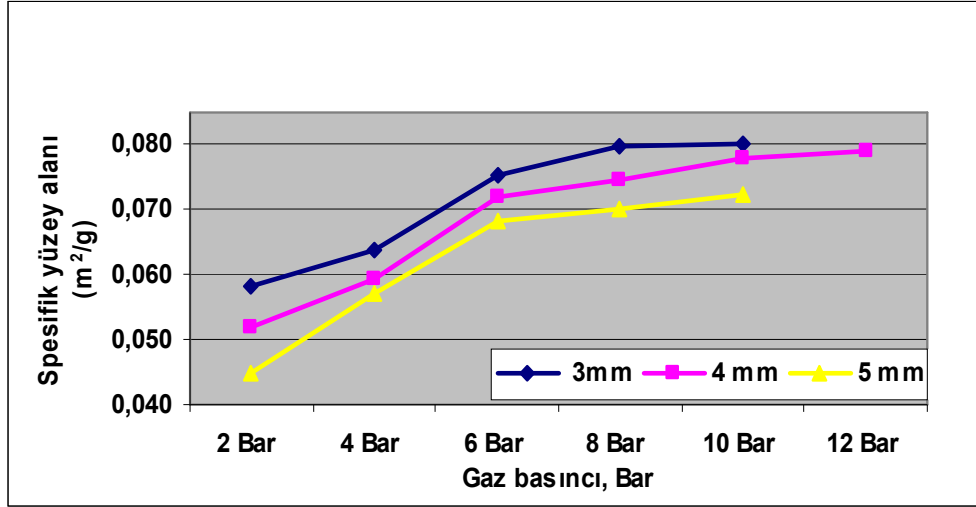
Şekil 6.9’da gaz basıncına bağlı olarak spesifik yüzey alanı değerleri incelendiğinde, bu değerler 0,045 m²/g, 0,057 m²/g, 0,068 m²/g, 0,070 m²/g, 0,072 m²/g olarak kaydedilmiş olup gaz basıncının artmasıyla toz şeklinin değiştiği (Şekil 6.7.) ve toz boyutunun küçüldüğü (Şekil 6.8.), buna karşın spesifik yüzey alanının da arttığı görülmüştür.

Farklı nozul çaplarında ve farklı gaz basınçlarında üretilen Al 2024 tozlarının, nozul iç çapına ve gaz basıncına bağlı olarak ortalama toz tane boyutu ve spesifik yüzey alanları toplu olarak Şekil 6.10 ve 6.11’de verilmiştir.



Şekil 6.10. Gaz basıncına bağlı ortalama toz boyutu.

Nozul iç çapının artması ile ortalama toz boyutunun arttığı ve buna karşın, gaz basıncının artması ile de ortalama toz boyutunun küçüldüğü Şekil 6.10’da görülmektedir. Ebeoğlu, farklı gaz basınçlarının toz boyutlarına etkisini araştırmış ve gaz basıncının artmasıyla toz boyutunun küçüleceğini belirtmiştir [3]. Bu çalışmadaki sonuçlar değerlendirildiğinde literatür ile benzerlik arz etmektedir. Ancak 2-8 bar gaz basıncı aralığında toz boyutunda ciddi bir küçülme olurken, 8 bar gaz basıncından sonra kayda değer bir küçülmenin olmadığı da söylenebilir. Şekil 6.10’da görüldüğü gibi en küçük toz boyutu 3 mm nozul çapında ve 8 bar gaz basıncında 99 µm, en büyük toz boyutu ise 5 mm nozul çapında ve 2 bar gaz basıncında 167 µm olarak elde edilmiştir. Bu nedenle 100-200 µm aralığında toz elde etmek için 8 bar üzerindeki gaz basınçlarında çalışmaya gerek olmadığı yaptığımız çalışmaya dayanılarak söylenebilir.



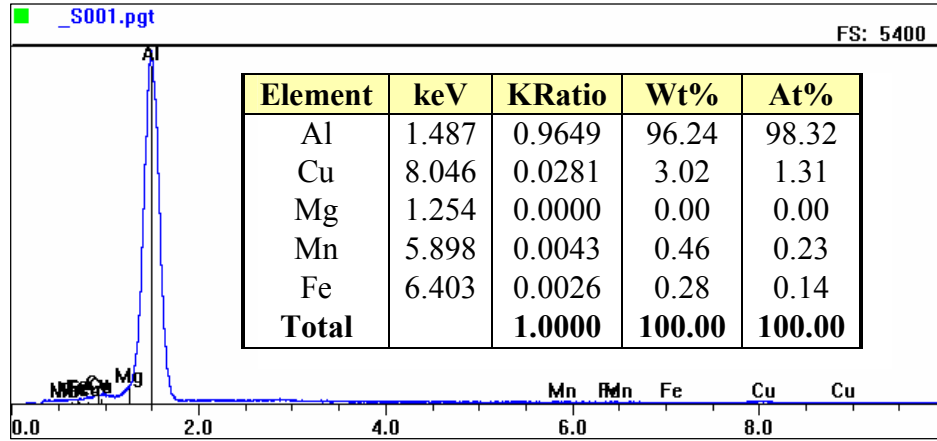
Şekil 6.11. Gaz basıncına bağlı spesifik yüzey alanı.

3, 4 ve 5 mm nozul iç çaplarında ve 2, 4, 6, 8 ve 10 bar gaz basınçlarında yapılan bu çalışmada, nozul çapının artmasına bağlı olarak spesifik yüzey alanının azaldığı ve buna karşın gaz basıncının artması ile de spesifik yüzey alanının arttığı Şekil 6.11’de görülmektedir.

Tozların spesifik yüzey alanlarının toz şekline ve toz boyutuna bağlı olarak değiştiği bilinmektedir [10]. Bu çalışmada gaz basıncının artmasına bağlı olarak tozların iri yapraklı şekilden küçük küresel doğru değiştiği SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. Bu sonucun da literatürle uyumlu olduğunu doğrulamaktadır.

Küçükarslan [6] yaptığı çalışmada, sıvı metal akış borusundaki değişimin sıvı metal demetinin kalınlığını ve gaz ile sıvı metal demeti arasındaki ısı transferini etkilediğini vurgulamış, daha büyük çaptaki sıvı metal demeti ile daha iri tozlar üretilebileceğini belirtmiştir. Şekil 6.11’e göre aynı basınçlarda nozul iç çapının küçülmesi ile daha küçük ve küresel tozlar elde edilirken, buna bağlı olarak da spesifik yüzey alanının arttığı görülmüştür.

Diğer yandan üretilen tozların EDX analizleri “Department of Metallurgical and Materials Engineering at the Colorado School of Mines” laboratuvarlarında yapılmış ve Şekil 6.12’de verilmiştir.



Şekil 6.12. Üretilen Al 2024 tozlarının EDX analizi sonuçları.

Üretilen tozların EDX analizleri (Şekil 6.12) incelendiğinde ağırlık olarak Alüminyum % 96.24, Bakır %3.02 ve yapı içerisinde eser miktarda Mn ve Fe görülmektedir. Çizelge 5.1 ile kıyaslandığında üretilen tozların kimyasal içeriklerinde önemli sayılmayacak kadar bir değişim görülmüştür. Ancak bu değişimin SEM' den (Scanning Electron Microscopy) alınan deney sonuçlarının alaşım elementlerinin tam konsantrasyon değerlerini vermediğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. SONUÇLAR

Gaz atomizasyon yöntemi ile Karabük Üniversitesi gaz atomizasyon ünitesinde farklı parametrelerde yapılan deneylerde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Gaz basıncının artması ile toz şeklinin yapraksı ve ligamentten küresele doğru değiştiği görülmüştür.
2. Gaz basıncındaki artış ile ortalama toz boyutunun küçüldüğü spesifik yüzey alanının ise arttığı tespit edilmiştir.
3. Nozul çapının küçülmesine paralel olarak ortalama toz boyutunun küçüldüğü ve toz şeklinin küçük ve küresel şekil aldığı anlaşılmıştır.
4. En küçük boyutlu tozlar 3 mm nozul çapında ve 8 bar gaz basıncında 99 mikron, en büyük tozlar ise 5mm nozul çapında ve 2 bar gaz basıncında 167 mikron olarak kaydedilmiştir.
5. Küresel ya da küresele yakın Al 2024 tozu elde edebilmek için 3, 4 ve 5 mm nozul çaplarında minimum gaz basıncının 6–8 bar olması gerektiği anlaşılmıştır.

7.2. ÖNERİLER

1. Ergitme fırınının daha yüksek sıcaklıklara çıkabilecek şekilde yeniden tasarlanıp imal edilmesi yüksek ergime dereceli metal tozu üretimi için faydalı olacaktır.
2. Değişik atomizasyon gazları kullanılarak bunların toz şekli ve boyutuna etkisi araştırılabilir.
3. Farklı metallerin ya da alaşımların tozları üretilerek incelenebilir.
4. Farklı nozul çeşitleri kullanarak toz şekli ve boyutuna etkisi araştırılabilir.
5. Alüminyum içerisine farklı oranlarda Silisyum ilave edilerek, silisyum'un toz şekli ve boyutuna etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

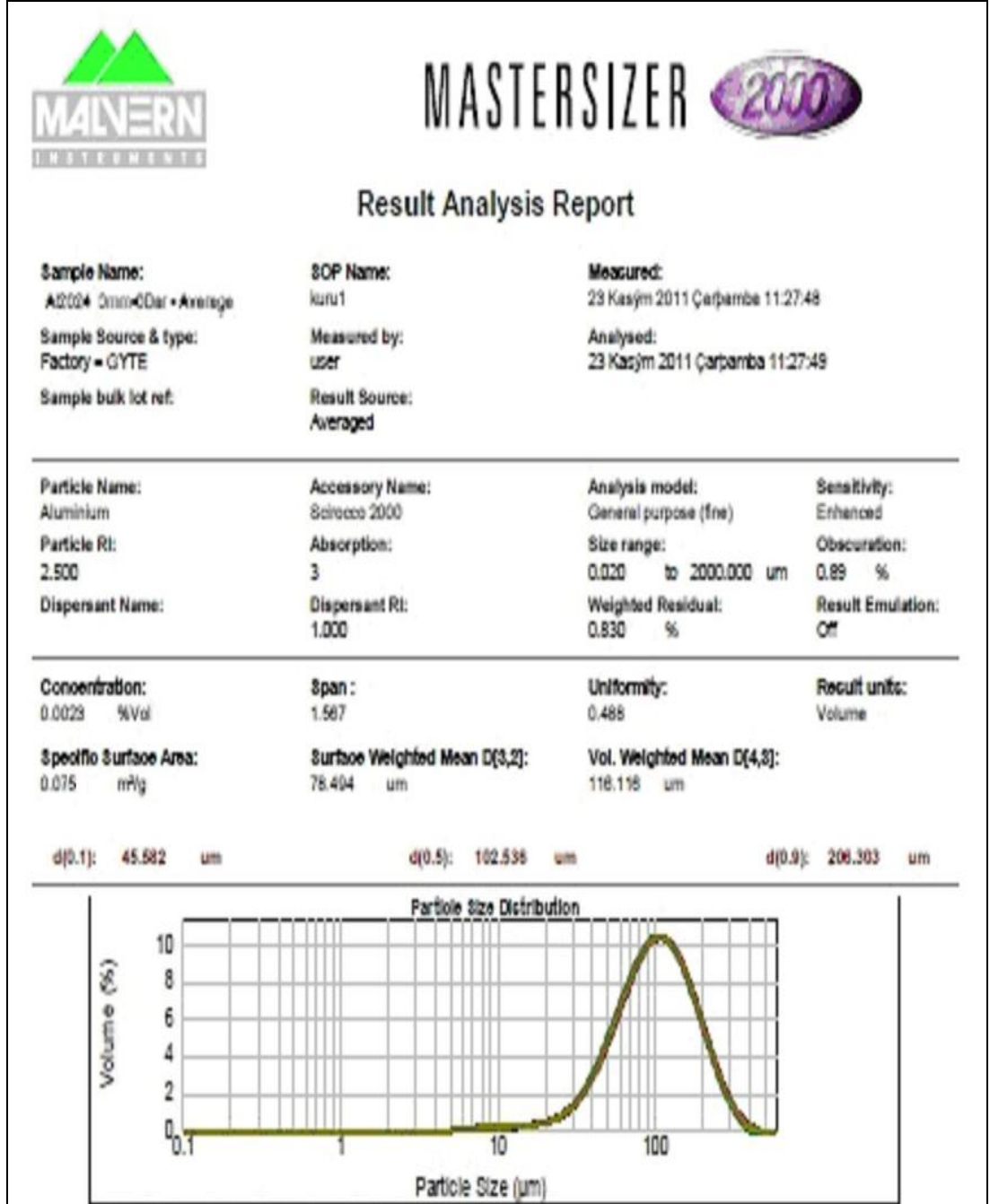
1. İncekara, M., “Elektroliz yöntemi ile bakır tozu üretilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 1-12, (2008).
2. Tajdari, M., Ghaffarnajad, M.A. and Khoogar, A.R.,” Shear strength prediction of Ni–Ti alloys manufactured by powder metallurgy using fuzzy rule-based model” **Materials Design**, 31 (3): 1180-1185, (2010).
3. Ebeoğlu, A.R., “Gaz atomizasyonu ile üretilen Al-Sn alaşım tozlarının özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kütahya, 23-28, (2008).
4. Yıldız, E.S., “Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretiminde nozul geometrisinin toz boyutuna etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kütahya, 5-14, (2007).
5. Ünlü, B.S., Kurgan, N. ve Yılmaz, S.S., “Toz metal çeliklerin mikroyapı ve mekanik özellikleri”, **Mühendis ve Makine**, 50 (588): 11-12, (2009).
6. Küçükarslan, S., “Gaz atomize kalay tozu üretim parametrelerinin deneysel olarak araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 21-50, (2006).
7. Yalçın, B., “Toz metalurjisi yöntemiyle imal edilen titanyum alaşımı implantların temel özelliklerinin araştırılması”, Doktora Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta, 6-25, (2007).
8. Karagöz, Ş., Yamanoğlu, R. ve Atapek, Ş.H., “Metalik toz işleme teknolojisi ve prosesleme kademeleri açısından parametrik ilişkiler”, **Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 22 (3): 78-80, (2009).
9. Aydın, M., “Gaz atomizasyon yönteminde yeni bir nozul tasarımı ve toz üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, **Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kütahya, 1-16, (2005).
10. German, R.M., “Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri”, Çeviri Editörleri: Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., **Türk Toz Metalurjisi Derneği**, Ankara, 61-130, (2007).
11. Kılınç, Y. ve Uslan, İ., “Titreşimli yatay atritör imalatı ve alumina öğütme davranışının incelenmesi”, **Mühendis ve Makine**, 44(517): 25-26 (2003).

12. Özçelik, S., “Cu ve Fe esaslı T/M yatak malzemelerinin aşınma özelliklerinin deneysel incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Konya, 21-23, (2007).
13. Yılmaz, N.F., “Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü**, Gaziantep, 7-25, (1996).
14. İnternet: İstanbul Teknik Üniversitesi “İmal usulleri ders notları” <http://web.itu.edu.tr/vuralmu/MAK-351.htm> (2011).
15. Tokdemir, M., “Lazer kaynağı ile birleştirilmiş Demir esaslı T/M malzemelerin kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi”, Doktora Tezi, **Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Manisa, 9-11, (2007).
16. Öztürk, S., Arslan, F. ve Öztürk, B., “Su soğutmalı döner disk atomizasyonu ile üretilen AA 2024 alaşım tozlarının soğuma hızına atomizasyon parametrelerinin etkisi”, **Mühendis ve Makine**, 44 (517): 44-45, (2003).
17. Angers, R., Tremblay, R., Desrosiers, L. and Dube, D.,”Rotating disk coatings centrifugal atomization of aluminium and magnesium alloys” **Metallurgical Quarterly Canadian**, 35 (3): 291-297, (1996).
18. Gren, D.J., Guillon O. and Rödel J., “Constrained sintering A delicate balance of scales”, **Journal of the European Ceramic Society**, 28 (7): 1451-1466, (2008).
19. Özüdoğru, R.E., ”WC-Co sement karbürlerin üretimi ve karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 8-10, (2008).
20. Sarı, D., “Elektroliz yöntemi ile toz üretiminde anot yüzey alanı ve bakırsülfat oranının toz boyutu ve şekline etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 13-65, (2010).
21. Tanrıöver, L., “AA 5052/2024 Alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle birleştirilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ , 6-12, (2008).
22. Binal, A., “AA 2024-T3 Alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında işlem parametrelerinin mikro yapı ve mekanik özelliklere etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, **Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Eskişehir, 4-7, (2006).
23. Türköz, M., “Al2024 ve Al5754 Alaşımli alüminyum saçların şekillendirilebilme kabiliyetinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Konya, 5-7, (2009).

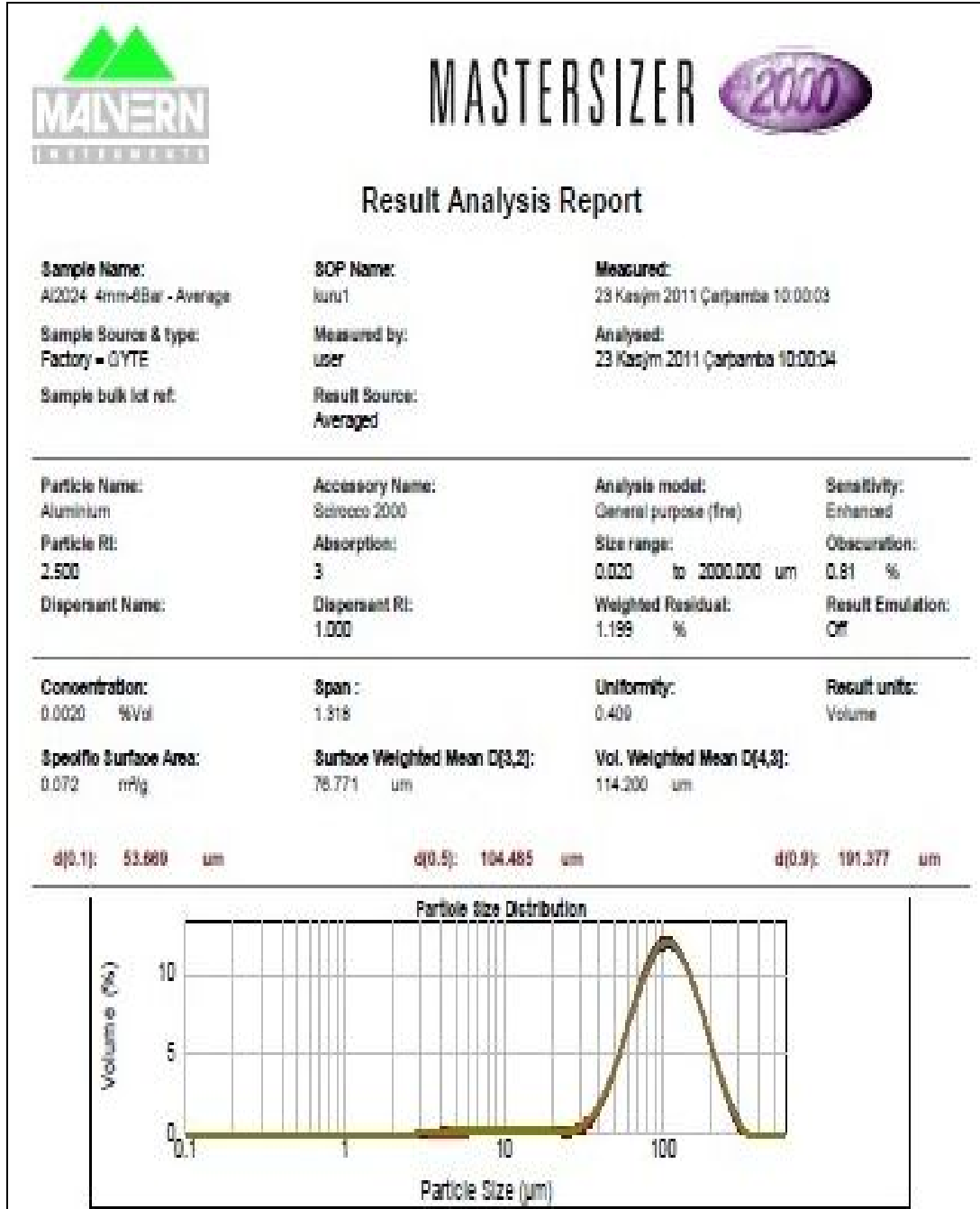
24. Tıkaç, G., “Uçak endüstrisinde kullanılan alüminyum alaşımlarının TIG kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliğinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 17-19, (2006).
25. Özel, S., “Alüminyum alaşımı ve bronzu yüzeyine oksit ve karbür bileşiklerinin plazma sprej yöntemiyle kaplanmasının araştırılması”, Doktora Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 6-9, (2009).
26. Kalay, Y.E., Ögel, B. ve Yıldırım, R.O.,” Tek ve çok katmanlı AA 2024 plakaların düşük hızlarda darbe karakterizasyonu”, **Savunma Teknolojileri Kongresi**, ODTÜ, Ankara, 59-67, (2004).
27. Atik, E., Meriç, C. ve Şahan, A.,”TIG kaynak yöntemiyle birleştirilmiş 2024 alüminyum alaşımının kaynak bölgesinin çökeltme sertleşmesi bakımından incelenmesi”, **DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi**, 3 (3): 75-83, (2001).
28. Ting, J., Peretti, M.W. and Eisen, W.B., The effect of the wake-closure phenomenon on gas atomisation performance, **Materials Science and Engineering A**, 326 (1): 110-121, (2002).
29. Antipas, G.S.E.,” Modelling of the break up mechanism in gas atomization of liquid metals”, **Computational Materials Science**, 46 (4): 955–959, (2009).
30. Anderson, I.E. and Terpstra, R. L., “Progress toward gas atomization processing with increased uniformity and control” **Materials Science and Engineering A**, 326 (1): 101–109, (2002).
31. Oğuz, Ş., “Atomizasyon ünitesi imalatı ve kalay tozu üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 18-21, (2011).
32. Ünal, R., “Improvements to close-coupled gas atomisation nozzle for fine powder production”, **Powder Metallurgy**, 50 (1): 66-71, (2007).
33. Ünal, R. ve Aydın, Ö., “Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile gaz atomizasyon nozulu modellenmesi”, Proje no: 107M189, **Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi**, Kütahya, 3-13, (2008).
34. Le, T., and Henein, H., “ Effect of nozzle geometry and position on gas atomisation”, **The International Journal of Powder Metallurgy**, 32 (4): 353-363, (1996).
35. Chen, Y.M., Su, Y.H., R.W. and Tsao, C.Y.A., “Modelling atomisation rate during gas atomisation”, **Acta Mater**, 46 (3): 1011-1023, (1998).

EK AÇIKLAMALAR A.
ÜRETİLEN AI 2024 TOZLARININ BOYUT ANALİZ
RAPORLARI

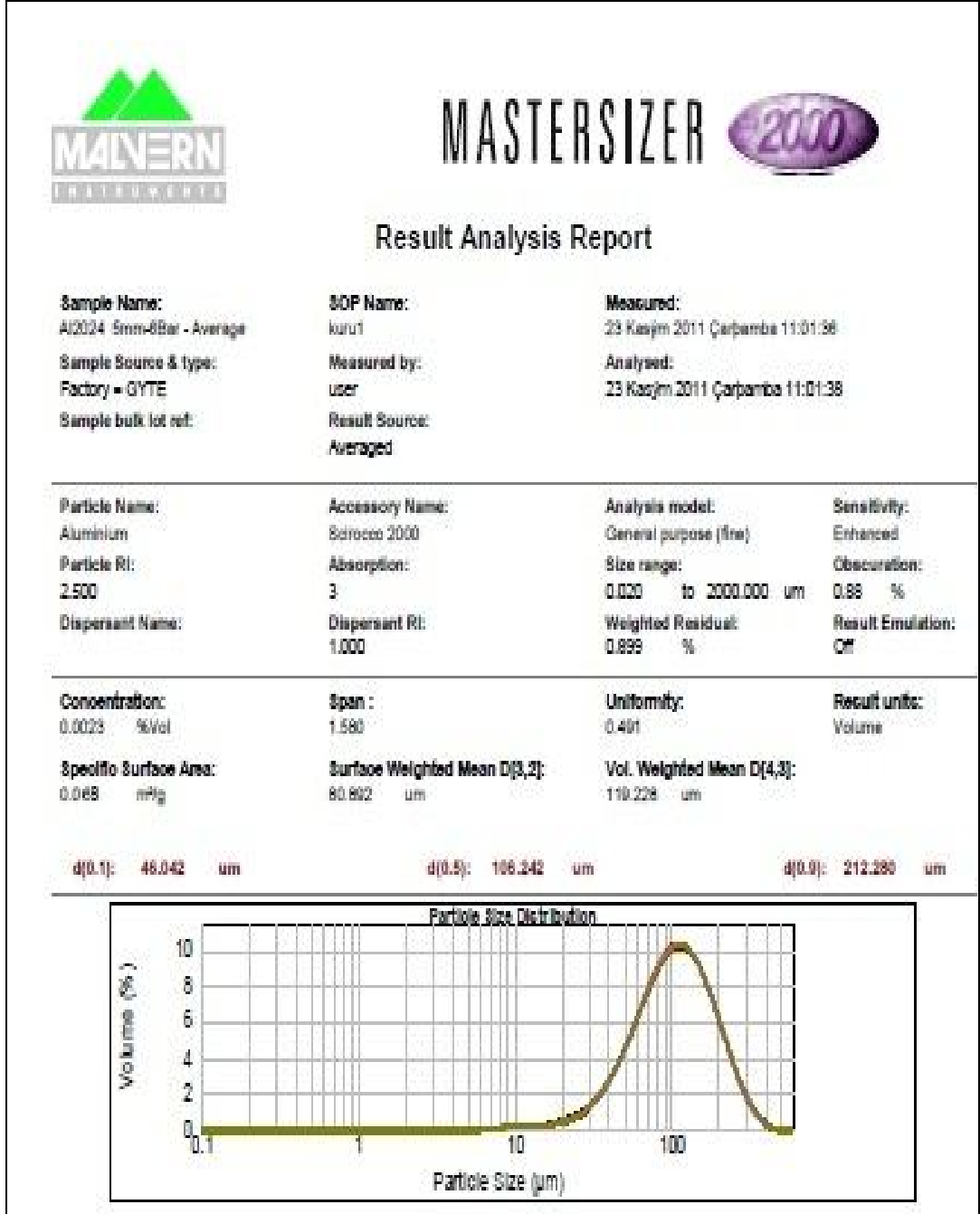
Şekil EK A.1. 3 mm 6 bar üretilen Al 2024 tozlarının boyut analiz raporu.



Şekil EK A.2. 4 mm 6 bar üretilen Al 2024 tozlarının boyut analiz raporu.



Şekil EK A.3. 5 mm 6 bar üretilen Al 2024 tozlarının boyut analiz raporu.



ÖZGEÇMİŞ

Zafer ÖZTÜRK 1982' de Tekirdağ'da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamlayıp Tekirdağ Endüstri Meslek Lisesinden mezun oldu. 2005 yılında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü'ne girdi; 2009 yılında mezun olduktan sonra aynı yıl başlamış olduğu Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı yüksek lisans programına halen daha devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : 100. yıl mah. İnci sitesi
A blok Kat 2 Daire 4 KARABÜK

Tel : (546) 299 54 89

E-posta : zafer_ozturkk@windowlive.com