

**GAZ ATOMİZE KALAY TOZU ÜRETİM PARAMETRELERİNİN
DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Serdar KÜÇÜKARSLAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KASIM 2006
ANKARA**

Serdar KÜÇÜKARSLAN tarafından hazırlanan GAZ ATOMİZE KALAY TOZU ÜRETİM PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI adlı bu tezin yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. İbrahim USLAN

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof. Dr. Bedri TUÇ

Üye : Prof. Dr. Süleyman SARITAŞ

Üye : Doç. Dr. İbrahim USLAN

Üye : Doç. Dr. Mustafa ÜBEYLİ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Nihat GEMALMAYAN

Tarih : 20 /11/ 2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Serdar KÜÇÜKARSLAN

**GAZ ATOMİZE KALAY TOZU ÜRETİM PARAMETRELERİNİN
DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Serdar KÜÇÜKARSLAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Kasım 2006**

ÖZET

Bu çalışmada, gaz atomizasyonu yöntemi ile kalay tozu üretimi gerçekleştirilerek üretim parametrelerinin toz özelliklerine etkileri, deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda öncelikle Gazi Gaz Atomizasyon Ünitesi'nin, nozul ve ergitme bölümlerine ait eksiklikler giderilmiştir. Yapılan çalışmalar süresince yakından eşlemeli Mannesmann tipi nozul kullanılmış; ergitme potası ile ara bağlantı elemanlarının tasarımı ve imalatı yeniden yapılmış ve bütün gaz bağlantıları tamamlanarak atomizasyon sistemi çalışır hale getirilmiştir. Atomizasyon gazı olarak hava kullanılmış ve kalay, 400 °C'ye aşırı ısıtılarak farklı basınçlarda ve farklı çıkıntı aparatları kullanılarak atomize edilmiştir. Tozların boyut ve dağılımı, lazerli toz boyutu ölçme cihazı ile tespit edilmiştir. Tozların şekli ve yüzey morfolojisi ise taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. En ince tozlar, 3 mm iç çapa sahip sıvı metal akış borusu ile 8 mm' lik çıkıntı aparatı kullanılarak 10 bar basınçta üretilmiş ve ortalama toz boyutu 68,50 µm olarak ölçülmüştür. Tozlar genellikle karmaşık şekilli olup, 10 µm ve daha küçük boyutlu tozlarda oldukça düzgün şekiller ve pürüzsüz toz yüzeyi görülürken; 100 µm ve daha büyük boyutlardaki tozlarda çubuksu bir yapı görülmüş ve hücreli yüzey yapısı belirginleşmeye başlamıştır.

Bilim Kodu : 914.1.092
Anahtar Kelimeler : Gaz atomizasyonu, nozul geometrisi, gaz basıncı, çıkıntı uzunluğu
Sayfa Adedi : 103
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. İbrahim USLAN

**INVESTIGATION OF PRODUCTION PARAMETERS OF GAS
ATOMISED TIN POWDERS
(M.Sc. Thesis)**

Serdar KÜÇÜKARSLAN

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
November 2006**

ABSTRACT

In this study, the effects of production parameters on gas atomised tin powder properties have been investigated experimentally. First, incompleted parts of the nozzle and the melting system in Gazi Gas Atomisation Unit have been supplied. During this investigation, close-coupled Mannesmann type of nozzle has been used. The melting tundish and some connection elements have been designed and manufactured. So, the atomisation unit has been completed. Air has been used as the atomisation gas and tin has been atomised by heating up to 400 °C and by using the different protrusion lengths under the different pressures. Particle size and distribution have been measured by laser scattering instrument. Powder shape and surface structure have been examined by using scanning electron microscope. The finest powders have been produced under 10 bars pressure by using the melt delivery tube with 3 mm diameter and 8 mm protrusion apparatus and mean powder size has been measured as 68,50 µm. Powders have generally irregular shapes and powders smaller than 10 µm have spherical shape and smooth surface. Powders coarser than 100 µm have ligamental shape and cellular surface shape.

Science Code : 914.1.092

Key Words : Gas atomization, nozzle geometry, gas pressure, protrusion length

Page Number : 103

Advisers : Assoc. Prof. Dr. İbrahim USLAN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren tez danışmanım Doç. Dr. İbrahim USLAN'a, imalat aşamasındaki değerli katkılarından dolayı Makine Mühendisi Mehmet ALKAN'a, laboratuvar çalışmaları sırasındaki desteklerinden dolayı Teknisyen Kadir YILMAZ ve Arş. Gör. arkadaşlarım Ümit KESKİN ve Yusuf ATAK'a, tozların boyut ölçümleri sırasındaki yardımlarından dolayı Arş. Gör. Levent URTEKİN'e, ayrıca maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. TOZ METALURJİSİ.....	4
2.2. Toz Metalurjisinin Uygulama Alanları.....	5
2.3. Toz Metalurjisinde Temel Basamaklar.....	7
2.4. Toz Üretim Teknikleri.....	8
2.4.1. Mekanik yöntemler.....	8
2.4.2. Kimyasal yöntemler.....	10
2.4.3. Elektroliz yöntemi.....	11
2.4.4. Atomizasyon yöntemleri.....	12
2.5. Tozların Karıştırılması.....	17
2.6. Tozların Sıkıştırılması (Presleme).....	18
2.7. Tozların Sinterlenmesi.....	19
3. GAZ ATOMİZASYONU.....	22
3.1. Gaz Atomizasyon Mekanizmaları.....	24

Sayfa

3.2. Gaz Atomizasyonunda Üretim Değişkenleri.....	27
3.2.1. Toz boyutu ve dağılımı.....	28
3.2.2. Toz şekli, yüzey morfolojisi ve mikroyapısı.....	34
3.2.3. Tozların kimyasal bileşimi.....	37
3.3. Gaz Atomizasyonunda Kullanılan Nozul Tipleri.....	38
3.3.1. Serbest düşmeli nozul sistemi.....	39
3.3.2. Yakından eşlemeli nozul sistemi.....	40
3.3.3. Gaz atomizasyonunda nozul geometrisi.....	41
3.3.4. Nozul tasarımında temel parametreler.....	48
3.3.5. Nozul gaz akışı.....	49
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	54
4.1. Gaz Atomizasyon Ünitesi.....	54
4.1.1. Gaz sistemi.....	56
4.1.2. Isıtma ve ergitme.....	57
4.1.3. Atomizasyon kulesi.....	57
4.1.4. Siklon.....	58
4.1.5. Nozul.....	59
4.2. Atomizasyon Çalışmaları.....	60
4.3. Toz Boyutu Analizi.....	63
4.4. Tozların Şekil ve Yüzey Morfolojilerinin Tespiti.....	65
5. DENEYSEL NETİCELER.....	66
5.1. Toz boyutu ve Dağılımı.....	66
5.2. SEM Çalışmaları.....	76

Sayfa

6. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	82
6.1. Öneriler.....	86
KAYNAKLAR.....	88
EKLER.....	94
EK-1. Gazi Gaz Atomizasyon Ünitesi'nin şematik resmi.....	95
EK-2. Çıkıntı aparatlarının teknik resmi.....	96
EK-3. Ergitme potasının teknik resmi.....	98
EK-4. Akış memesinin teknik resmi.....	99
EK-5. Açma-kapama mekanizmasının teknik resmi.....	100
EK-6. Açma-kapama çubuğunun teknik resmi.....	101
EK-7. Montaj resmi.....	102
ÖZGEÇMİŞ.....	103

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Mannesmann tipi nozula ait büyüklükler.....	59
Çizelge 4.2. Mannesmann tipi nozul için atomizasyon değişkenleri.....	63
Çizelge 5.1. Yapılan deneylerde elde edilen toz boyutlarıyla ilgili değerler.....	69

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. T/M parçaların pazar payları.....	6
Şekil 2.2. Toz metal parçaların üretim aşamaları.....	7
Şekil 2.3. Bilyalı öğütme.....	9
Şekil 2.4. Öğütmede çarpışmanın etkisi.....	9
Şekil 2.5. Mekanik alaşımlama yöntemi.....	10
Şekil 2.6. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi.....	11
Şekil 2.7. Elektroliz yöntemi ile toz üretimi.....	12
Şekil 2.8. Düşey gaz atomizasyon ünitesi.....	13
Şekil 2.9. Su ile atomizasyon işlemi.....	14
Şekil 2.10. Tozların genel yüzey yapıları.....	14
Şekil 2.11. Döner disk atomizasyonu.....	15
Şekil 2.12. Döner elektrot atomizasyon yöntemi.....	15
Şekil 2.13. Vakum atomizasyon yöntemi.....	16
Şekil 2.14. Ultrasonik gaz atomizasyonu.....	17
Şekil 2.15. Karıştırıcı.....	18
Şekil 2.16. Presleme işlemi.....	19
Şekil 2.17. Çift küre sinterleme modeli.....	20
Şekil 3.1. Yatay gaz atomizasyon ünitesi.....	23
Şekil 3.2. Düşey gaz atomizasyon ünitesi.....	23
Şekil 3.3. Yassı tabakadan damlacık oluşumu.....	25
Şekil 3.4. Gaz atomizasyonunda mevcut üç aşamanın şematik gösterimi, See modeli.....	26

Şekil	Sayfa
Şekil 3.5. See modelinin German tarafından farklı bir gösterimi.....	27
Şekil 3.6. Kümülatif frekans dağılımı.....	29
Şekil 3.7. Hava atomizasyonu için Lubanska bağıntısı.....	30
Şekil 3.8. He, Ar ve N ₂ gazları kullanılarak üretilen alüminyum tozlarının frekans dağılımı.....	31
Şekil 3.9. Farklı basınç ve ergiyik sıcaklıklarında Al toz boyutunun değişimi.....	32
Şekil 3.10. Azot atomize kalay tozlarının ortalama boyutuna gaz debisinin etkisi...32	
Şekil 3.11. Azot gazı hızının ve çarpma açısının toz boyutuna etkisi.....	33
Şekil 3.12. Farklı metal ve alaşımlar için toz boyutunun özgül gaz tüketimine göre değişimi.....	34
Şekil 3.13. Atomize alüminyum tozları.....	35
Şekil 3.14. Atomize çelik tozunun hücresel yapılı yüzeyi.....	35
Şekil 3.15. Bir toz yüzeyindeki uydu tozlar.....	36
Şekil 3.16. Nozul gaz jeti tipleri.....	38
Şekil 3.17. Serbest düşmeli nozul sistemi.....	39
Şekil 3.18. Yakından eşlemeli nozul sistemi.....	40
Şekil 3.19. Ses hızının altındaki ve üstündeki akışlar için nozul geometrisi.....	41
Şekil 3.20. Nozul geometrisi çeşitleri.....	41
Şekil 3.21. De Laval nozulunda akış.....	42
Şekil 3.22. Kesit alan oranı ile Mach sayısı arasındaki ilişki.....	43
Şekil 3.23. Ünal'a ait yakından eşlemeli daralan/genişleyen nozul tasarımı.....	44
Şekil 3.24. Gaz çıkış alanının toz boyutuna etkisi (Gaz basıncı 1,0 MPa, d = 3 mm, nozul açısı 15 °).....	45

Şekil	Sayfa
Şekil 3.25. Nozul gaz çıkış açısının toz boyutuna etkisi ($d=3$ mm, gaz çıkış alanı 15 mm^2).....	45
Şekil 3.26. Gaz cinsi ve basıncının toz boyutuna etkisi ($d=3$ mm, gaz çıkış alanı 15 mm^2 , nozul açısı 15°).....	46
Şekil 3.27. Tasarımlara ait metal akış borusu ve nozul geometrisi.....	47
Şekil 3.28. 1,47 MPa gaz basıncında üretilmiş azot atomize tozların genel görüntüsü.....	47
Şekil 3.29. Gaz basıncının bir fonksiyonu olarak metal akış borusu ucundaki basıncın borunun konumuyla değişimi.....	50
Şekil 3.30. Laval tipi nozulda gaz akışı.....	51
Şekil 3.31. Nozul çıkışında basınç birikmesi oluşumu.....	51
Şekil 3.32. Metal akış borusu ile gaz jetleri arasındaki atomizasyon rejimleri.....	52
Şekil 3.33. Gaz basıncının bir fonksiyonu olarak farklı çıkıntı uzunlukları için ergimiş kütle akış oranı.....	53
Şekil 3.34. Gaz /metal akış oranının toz boyutuna etkisi.....	53
Şekil 4.1. Mannesmann tipi nozul	59
Şekil 4.2. Lazer ışını teorisinin şematik resmi.....	64
Şekil 5.1. Malvern Mastersizer E toz boyutu analiz raporu (Deney 6 - toz toplama kabı).....	67
Şekil 5.2. Malvern Mastersizer E toz boyutu analiz raporu (Deney 6 – Siklon).....	68
Şekil 5.3. 5 bar basınçla üretilen hava atomize kalay tozu için tek modlu toz dağılım eğrisi (Deney - 4).....	70
Şekil 5.4. 10 bar basınçla üretilen hava atomize kalay tozu için tek modlu toz dağılım eğrisi (Deney - 5).....	70
Şekil 5.5. 20 bar basınçla üretilen hava atomize kalay tozu için iki modlu toz dağılım eğrisi (Deney - 6).....	71
Şekil 5.6. 10 bar basınçla üretilen hava atomize kalay tozu için üç modlu toz dağılım eğrisi (Deney -12).....	71

Şekil	Sayfa
Şekil 5.7. 5 bar basınçla üretilen hava atomize kalay tozlarının farklı çıkıntı uzunluklarındaki toz boyutu değişimi.....	72
Şekil 5.8. 10 bar basınçla üretilen hava atomize kalay tozlarının farklı çıkıntı uzunluklarındaki toz boyutu değişimi.....	72
Şekil 5.9. 6 mm çıkıntı aparatıyla üretilen hava atomize kalay tozlarının farklı basınçlardaki toz boyutu değişimi.....	73
Şekil 5.10. 4 mm çıkıntı aparatıyla üretilen hava atomize kalay tozlarının farklı basınçlardaki toz boyutu değişimi.....	73
Şekil 5.11. 2 mm çıkıntı aparatıyla üretilen hava atomize kalay tozlarının farklı basınçlardaki toz boyutun değişimi.....	74
Şekil 5.12. Toz boyutunun gaz basıncı ile değişimi (Nozul açısı 64°, gaz çıkış alanı 28,9 mm ² , sıvı metal akış borusu çapı 4 mm).....	74
Şekil 5.13. Toz boyutunun çıkıntı uzunluğu ile değişimi (Nozul açısı 64°, gaz çıkış alanı 28,9 mm ² , sıvı metal akış borusu çapı 4 mm).....	75

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Toz metalurjisinin çeşitli uygulama alanları.....	6
Resim 4.1. Gazi Gaz Atomizasyon Ünitesi.....	55
Resim 4.2. Gaz sisteminde kullanılan ekipmanlar.....	56
Resim 4.3. Bauer kompresör	56
Resim 4.4. Isıtma ve ergitme sistemi.....	57
Resim 4.5. Siklon	58
Resim 4.6. Akış memesi-çıkıntı aparatı - nozul bağlantısı	60
Resim 4.7. Deneylerde kullanılan çıkıntı aparatları ($h=2$ mm ve $h= 6$ mm).....	60
Resim 4.8. Varyak (voltaj değiştirici).....	61
Resim 4.9. Malvern Mastersizer E parçacık boyutu ölçme cihazı	64
Resim 5.1. Nozul çıkıntı ucunda meydana gelen metal yığılmaları	75
Resim 5.2. Hava atomize kalay tozlarının genel görüntüleri.....	76
Resim 5.3. Tozların birbirleriyle çarpışmaları sonucu meydana gelen uydulaşmalar.....	77
Resim 5.4. Damlacık-toz çarpışması sonucu oluşan sıvanmalar	78
Resim 5.5. Hava atomize ince tozlarda görülen topaklanmalar.....	78
Resim 5.6. Hava atomize kalay tozlarında meydana gelen pullaşmalar.....	79
Resim 5.7. Hava atomize kalay tozlarının oluşum aşamasına ait bazı örnekler.....	80
Resim 5.8. İri ve küçük tozlara ait yüzey yapıları.....	81

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Nozul gaz çıkış alanı, mm ²
A*	Boğaz alanı, mm ²
c	Ses hızı, m/s
d	Sıvı metal akış borusu çapı, mm
d_m, d₅₀	Ortalama toz boyut, µm
d_{vm}	Hacim ortalama çapı, µm
d_{vs}	Sauter ortalama çapı, µm
d₁₀	Tozların ağırlıkça % 10'unun kendisinden küçük olduğu toz çapı, µm
d_{15,9}	Tozların ağırlıkça % 15,9'unun kendisinden küçük olduğu toz çapı, µm
d_{84,1}	Tozların ağırlıkça % 84,1'inin kendisinden küçük olduğu toz çapı, µm
d₉₀	Tozların ağırlıkça % 90'ının kendisinden küçük olduğu toz çapı, µm
D	Sıvı metal demeti çapı, µm
F	Özgül gaz tüketimi, m ³ /kg
h	Çıkıntı uzunluğu, mm
K	Sabit katsayı
k	Özgül ısıların oranı (C _p /C _v)
M	Mach sayısı
P	Gaz basıncı, Mpa
q	Yoğunluk, kg/m ³
q_m	Sıvı metalin yoğunluğu, kg/m ³
t_{katı}	Katılaşma süresi

Simgeler**Açıklama** **$t_{k\ddot{u}re}$**

Küreselleşme süresi

T

Gazın sıcaklığı, °K

V

Akışkanın hızı, m/s

We

Gazın Weber sayısı

 α

Gaz çıkış açısı, °

 ν_g Gazın kinematik vizkozitesi, m²/s **ν_m** Sıvı metalin kinematik vizkozites, m²/s **σ_g**

Standart sapma

 σ_m Metalin yüzey gerilmesi, kg/s²**Kısaltmalar****Açıklama****T/M**

Toz Metalurjisi

SEM

Taramalı Elektron Mikroskobu

1. GİRİŞ

Toz Metalurjisi (T/M), metal tozlarının üretimi ve bu tozlardan makine parçaları üretim teknolojisinin bilgisidir ve günümüzde dünyanın pek çok ülkesinde teknolojik malzemelerin modern bir üretim tekniği olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

T/M uygulamalarının ilk örnekleri M.Ö. 3000 yıllarına kadar dayanmakla beraber, T/M'ne olan ilgi 19.yüzyılın sonlarından itibaren endüstrinin gelişmesine paralel olarak hızla artmıştır [1]. Toz metal dövme; sıcak izostatik presleme, yüksek sıcaklıkta sinterleme gibi T/M yöntemleri, uygulama sahalarının giderek artmasını sağlamaktadır. Bu ise T/M ile üretilmiş yeni parçaların artması ve yeni pazarlar meydana gelmesi demektir [2].

Amerika'daki verilere göre 1997 yılında T/M ile üretilmiş parçaların değeri 1,7 milyar dolar mertebesindeydi. Yapılan tahminlere göre bu rakamın daha da artacağı ve T/M ile üretilmiş parçaların ağırlığının 500 000 tonu aşacağı öngörülmektedir. Bu nedenle üreticiler yeni üretim tesisleri yatırımlarına ağırlık vermektedirler. Yabancı ülkelerde bu konudaki yatırımlar bu kadar büyük boyutlarda olmasına rağmen, ülkemizde halen endüstriyel olarak toz metal üretimi ciddi olarak ele alınmamıştır [2].

Toz Metalurjisi; tozların imalatı, karakterize edilmesi ve kullanışlı parçalara dönüştürülmesi çalışmalarını içermektedir. Genellikle karmaşık şekilli ve diğer üretim yöntemleri ile üretimi mümkün olmayan mukavemet, aşınma ve korozyona karşı dayanımı yüksek parçaların imalatında uygulanan ileri bir teknolojidir. Farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal tozlarını hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürür. İstenilen mikroyapıda, fiziksel ve mekanik özelliklerde alaşım ve kompozit malzeme üretmek mümkündür. Bu işlem; şekillendirme veya presleme ve daha sonra parçacıkların sinterleme yolu ile ısıl bağlanması olmak üzere iki temel basamaktan oluşmaktadır. T/M nispeten düşük enerji tüketimine, yüksek malzeme kullanımına ve düşük maliyete sahip

otomatikleşmiş işlemleri verimlice kullanır. Bu özellikleri ile T/M verimlilik, enerji ve hammadde gibi günümüz kaygılarını ortadan kaldıran farklı bir üretim tekniğidir.

Toz Metalurjisi'nde ilk aşama tozun üretilmesidir. Bir çok toz üretim tekniği arasından, ticari olarak; mekanik yöntemler, kimyasal yöntemler, elektroliz yöntemi ve atomizasyon yöntemleri kullanılır. Sıvı metal demetinin basınçlı akışkanlar ile veya mekanik olarak çok küçük damlacıklara ayrılması olarak tanımlanan atomizasyon işlemi için; su atomizasyonu, gaz atomizasyonu, santrifüj atomizasyon, vakum atomizasyonu ve ultrasonik gaz atomizasyonu yöntemleri kullanılmaktadır.

Metal tozu üretim teknikleri içerisinde, ince ve küresel tozlar elde etmede en yaygın olarak kullanılan yöntem gaz atomizasyonu yöntemidir [3]. Bu yöntem, ergitilebilen tüm metal ve alaşım tozlarının üretiminde kullanılabilir. Üretilen tozlar arasında paslanmaz çelik, pirinç, demir, alüminyum, magnezyum, çinko, kalay ve kurşun gibi metal ve alaşımların tozları sayılabilir. Gaz atomizasyonunda, sıvı metal demetini parçalamak için basınçlı akışkan olarak hava, azot, argon ve helyum gibi gazlar kullanılabilir.

Bu yöntemde gaz cinsi, gaz basıncı, gaz ve sıvı metal akış debileri ile nozul geometrisi gibi üretim parametreleri tozların fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkilemektedir.

Gaz atomizasyonunda nozul, akışkanın hızını arttırırken basıncını düşüren geometrik yapıdır. Nozul geometrisi, gaz akışını kontrol ettiği için atomizasyon işleminde son derece önemlidir. Gaz akışı ise nozul geometrisine göre değişmektedir. Nozul tasarımı ve geometrisini değiştirerek toz boyutu ve dağılımını kontrol etmek mümkündür.

Bu çalışmada, yakından eşlemeli Mannesmann tipi nozul kullanılmış, ergitme potası ve ara bağlantı elemanlarının tasarımı ve imalatı yapılarak, gaz atomizasyonu

yöntemi ile kalay tozu üretimi gerçekleştirilmiş ve elde edilen kalay tozunun özelliklerine bazı üretim parametrelerinin etkileri deneysel olarak araştırılmıştır.

2. TOZ METALURJİSİ

T/M; metal işleme teknikleri içinde en farklı üretim yöntemidir [4]. Bununla birlikte, metal tozu ve ondan kütleli gereçler ve şekillendirilmiş parçalar üretme teknolojisi ve sanatıdır [5].

Toz metalurjisinin amacı; metal ve metal alaşımlarının tozlarını ergitmeden, basınç ve sıcaklık yardımıyla dayanıklı cisimler haline getirmektir. Bu amaçla tozlar bir kalıp içinde preslenir ve meydana gelen şekil sinterlenerek gerekli mukavemete kavuşturulur. Tozların preslenmesi oda sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıklarda yapılır. “Sinterleme” adı verilen ısı işlemi ise, kullanılan metal tozunun ergime noktasının altındaki bir sıcaklıkta yapılmaktadır. Eğer kullanılan toz bir karışım ise; sinterleme işlemi bu tozlardan en yüksek ergime sıcaklığına sahip olan tozun ergime sıcaklığının altında yapılır. Sinterleme işlemi sonucu elde edilen parçalara bazen son şeklini vermek amacıyla ikinci bir işlem uygulanabilmektedir.

Toz metalurjisinin hangi aşamasıyla ilgili olunursa olunsun, başlangıç aşaması tozun üretilmesidir. Toz, boyutu 1 mm’ den daha küçük, ince olarak bölünmüş katıdır. Bir tozun en önemli özelliği, onun yüzey alanının hacmine oranının göreceli olarak yüksek olmasıdır. Tozlar katı ve sıvı arası, ortada bir davranış sergilerler. Örneğin tozlar, yer çekimi altında kapları veya ölü boşlukları doldurmak için akacaktır. Bu anlamda tozlar sıvı gibi davranırlar. Aynı zamanda tozlar bir gaz gibi sıkıştırılabilirler. Fakat metal tozlarının sıkıştırılması, bir metalin sıkıştırılması gibi tersinmezdir. Böylece bir metal tozu, bir katıdan beklenen özelliklere kolayca sıkıştırılabilir [4].

2.1. Toz Metalurjisinin Avantajları ve Dezavantajları

Bazı metallerin ergime sıcaklıklarının çok yüksek olması ve bu sıcaklıklara ulaşamaması (tungsten, molibden gibi), bazı özelliklerin ancak T/M ile sağlanabilmesi (kendinden yağlamalı yataklar gibi), süper alaşım ve sert metaller gibi

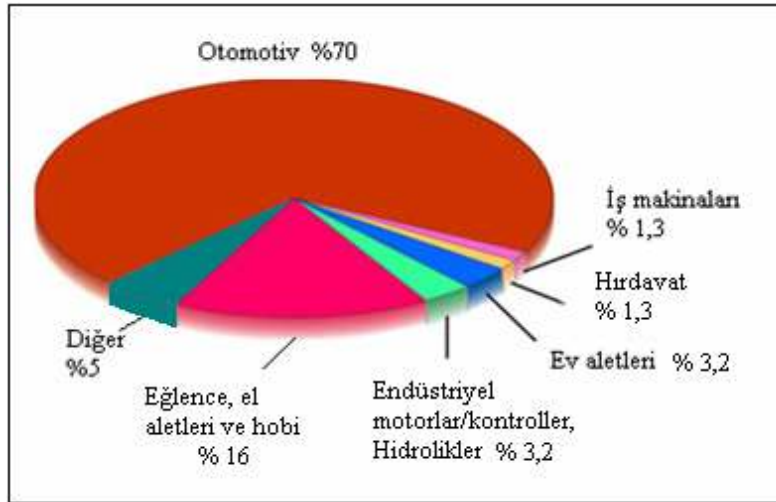
önemli malzemelerin bu yöntem ile üretilmesi toz metalurjisini zorunlu kılmıştır [6,7]. Çoğu zaman talaşlı imalat gerektirmemesi ve malzeme kullanım oranının % 100'lere ulaşabilmesi sayesinde hammadde kayıplarının en az düzeye indirilmesi, aynı parçadan çok sayıda üretim gerektiğinde uygulanabilen en iyi yöntem olması, boyut ve şekil kontrolü en önemli avantajlarındandır [7-9]. Bunlarla birlikte toz metalurjisini cazip kılan, çok yüksek hassasiyette, karmaşık şekilli ve yüksek kalitede parça üretiminin mümkün olmasıdır.

Bu avantajlarının yanında, metal tozlarının ve kullanılan takımların maliyetlerinin yüksek olması, toleransların talaşlı işlemlere göre daha kaba olması, T/M parçalarının düşük mekanik özelliklere sahip olması ve parça tasarımlarının sınırlı olması gibi dezavantajları mevcuttur.

2.2. Toz Metalurjisinin Uygulama Alanları

T/M oldukça yaygın bir alanda kullanılmaktadır. Tungsten lamba teli, diş dolguları, kendinden yağlamalı yataklar, otomotiv güç aktarma dişlileri, zırh delici mermiler, elektrik kontakları ve fırçaları, mıknatıslar, nükleer güç yakıt elemanları, ortopedik protezler, iş makinası parçaları, yüksek sıcaklık filtreleri, şarj edilebilir piller, boyalar, patlayıcılar, kaynak elektrotları, roket yakıtları, sert lehim bileşikleri ve katalizörlerde kullanım alanları bulurlar [4]. Bakır ve bakır esaslı alaşım tozları, alüminyum ve paslanmaz çelik tozu pazarları 2000 yılından itibaren giderek genişlemektedir.

T/M'den yapılmış alüminyum parçalar özellikle otomobil üreticilerinin ilgisini giderek artan oranda çekmektedir. Uygulama olarak kam mili yatakları, ayna parçaları, amortisör parçaları, pompalar ve bağlantı kolları sayılabilir. Paslanmaz çeliklerde ise daha çok 400 serisi ekzost flanşlarında, ABS sistemlerinin sensör parçalarında giderek kullanımı artmaktadır. Paslanmaz çelikler ayrıca kilitlerde ve bazı parçalarda kullanılabilmektedir [2].



Şekil 2.1. T/M parçaların pazar payları

T/M parçaların dünya genelindeki pazar payları Şekil 2.1’de verilmiştir. Bu pazarın %70’i otomotiv endüstrisi tarafından kullanılmaktadır. Avrupa yapımı arabalar 7 kg, Japon yapımı arabalar ise 5 kg T/M parçaya sahip olduğu halde, Amerikan arabaları 16 kg’dan daha fazla T/M parça içermektedir.

Resim 2.1’de ise T/M uygulamalarına ait bazı örnekler görülmektedir.



Resim 2.1. Toz metalurjisinin çeşitli uygulama alanları

bu uygulama, bir tozun şeklini, özelliklerini ve yapısını bitmiş bir ürüne dönüştürür. Gerektiğinde elde edilen ürün ikincil işlemlere tabi tutulur.

2.4. Toz Üretim Teknikleri

Metal tozlarının kalitesi üretim tekniklerine bağlıdır [11]. Malzemelerin çoğu, özelliklerine uygun bir teknik kullanılarak toz haline getirilebilir. Uygun teknikler arasında tercih yapılırken, üretim tekniğinin ekonomik olması önemli bir husustur. Bir çok toz üretim tekniği arasından, ticari olarak şu teknikler kullanılmaktadır [4, 8]:

1. Mekanik yöntemler
2. Kimyasal yöntemler
3. Elektroliz yöntemi
4. Atomizasyon yöntemleri

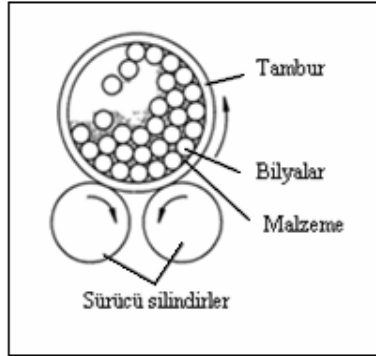
2.4.1. Mekanik yöntemler

Mekanik yöntemler talaş kaldırma, öğütme ve mekanik alaşımlama olmak üzere üç grupta incelenir.

Talaş kaldırma yönteminde, metallerin işlenmesi sonucu oluşan büyük miktarlardaki talaş, mekanik yöntemle elde edilen karmaşık şekilli iri bir tozdur. Talaş öğütülerek daha ince tozlar haline getirilebilir. Kırılgan malzeme tozlarının üretiminin yapıldığı bu yöntemde temel ilke, parçalanacak malzeme ile sert bir cisim arasında bir darbe meydana gelmesini sağlamaktır. Ancak bu yöntemde tozların özelliklerini kontrol etmek zordur [4].

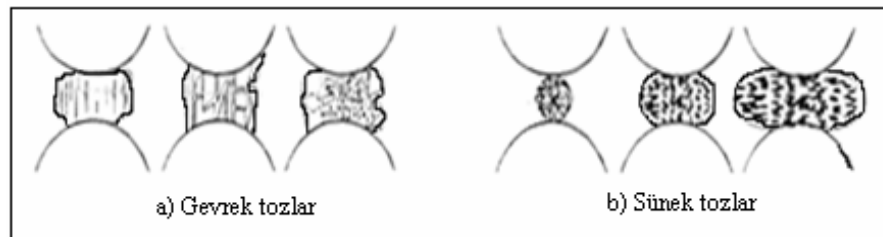
Öğütme yöntemi, diğer tekniklerle üretilmiş ancak kümeleşmiş tozların kırılması için kullanılan bir yöntemdir ve en çok bilyalı değirmenlerde yapılmaktadır. Öğütülecek metal, içinde büyük çaplı, sert ve aşınmaya karşı dayanıklı bilyaların bulunduğu kap

içine, önceden kaba bir biçimde kırılmış olarak yerleştirilir. Kap döndürülerek veya titreştirilerek bilyalar harekete geçirilir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Bilyalı öğütme [4].

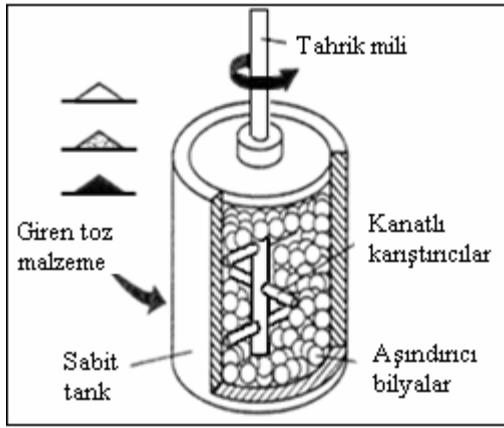
Eğer öğütülen parçalar gevrek ise, çok küçük tozlara bölünür. Sünek parçalar ise, çarpışma sonucunda şekil değiştirerek yassılaşırlar (Şekil 2.4) ve ancak aşırı gerinim sertleşmesi sonucunda gevrekleşerek küçük tozlara bölünebilirler. Öğütmenin su, alkol ve heptan gibi bir hidrokarbon sıvı içinde yapılması hem öğütme süresini kısaltır, hem de daha ince tozlar üretilmesini sağlar [5]. Homojen bir karışım için kaba konulacak bilyaların hacmi ve öğütülecek malzeme miktarı çok önemlidir. Bilyaların hacmi kap hacminin yaklaşık yarısı ve öğütülecek metal miktarı kap hacminin yaklaşık % 25'i oranında olmalıdır [4].



Şekil 2.4. Öğütmede çarpışmanın etkisi [12].

Mekanik alaşımlama yöntemi ise, kuru ve katı haldeki tozların birbirlerine periyodik olarak kaynaklanmasını ve tekrar bu kaynakların kırılmasını sağlayarak daha ince ve homojen bir mikroyapıya sahip yüksek dayanımlı kompozit malzemelerin

üretmesinde kullanılır [13,14]. Bu yöntemin uygulamaları günümüzde genellikle bakır ve alüminyum alaşımları ile termoelektrik uygulamalar için gerekli olan malzemeleri kapsamaktadır [15]. Mekanik alaşımlama yönteminde tozlar kapalı bir kap içerisine konulur ve tahrik mili döndürülür (Şekil 2.5). Tozlar, mil üzerindeki kanatlar ve bilyalar yardımı ile deforme edilir ve bu tozlarda kırılma ve soğuk kaynaklaşmalar meydana gelir [10].



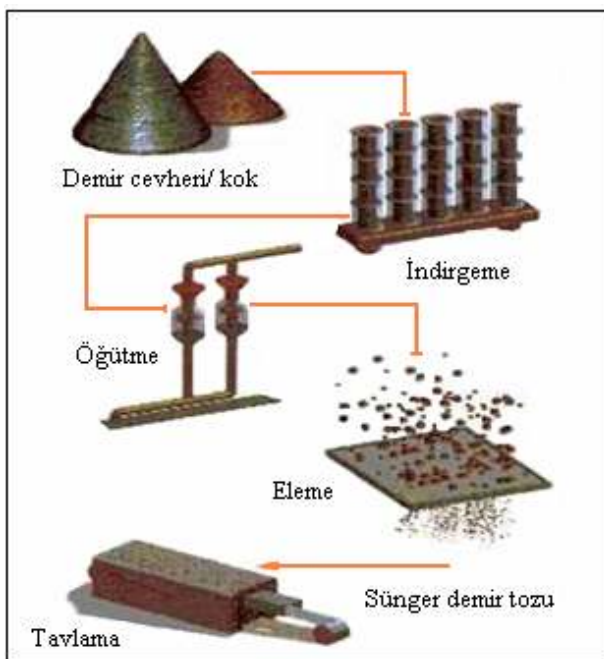
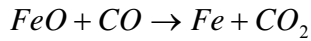
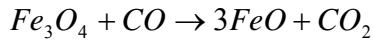
Şekil 2.5. Mekanik alaşımlama yöntemi [10].

2.4.2. Kimyasal yöntemler

Metal tozlarının bir çoğu kimyasal tekniklerle üretilebilir. En çok kullanılan yöntem ise, oksitlerin CO veya H₂ gibi indirgeyici gazlarla kimyasal olarak indirgenmesidir [4]. Demir, bakır, tungsten, molibden, nikel ve kobaltın oksitlerinden indirgeme yoluyla tozların üretilmesi, çok bilinen endüstriyel yöntemlerdir.

Kimyasal yöntemle üretilen sünger-demir tozu bu yöntemin önemli bir uygulama örneğidir. Sünger demir, demir oksit cevherinin uygun nitelikte indirgeyici elemanlara indirgenerek süngerimsi bir kütleye dönüştürülmesiyle elde edilir. Magnetit (Fe_3O_4), kok ve kireç taşı ile karıştırılır ve seramik kaplara doldurulur. Karışım seramik kaplar içerisinde 1260 °C sıcaklıktaki fırınlarda 68 saat bekletilir [5]. Kireç taşı kükürdünü absorbe eder. İndirgemenin tamamlanması ile sünger demir

elde edilir. Elde edilen sünger demir külçeleri yüksek sıcaklıkta (1260 °C) birbirine kaynaklanmış tozlardan oluştuğundan öğütülerek istenilen tane büyüklüğüne getirilir. Şekil 2.6’da kimyasal yöntemle demir tozu üretimi görülmektedir.

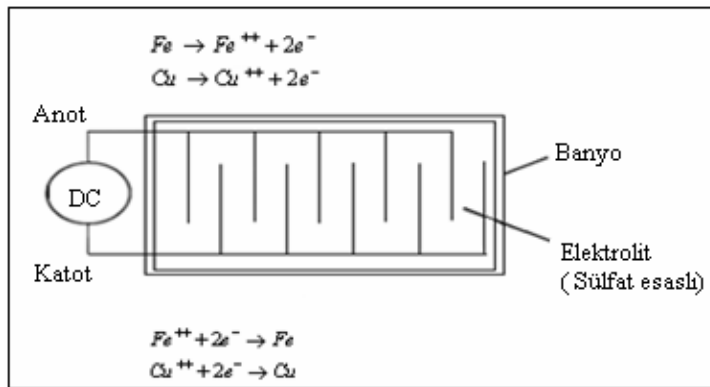


Şekil 2.6. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi

2.4.3. Elektroliz yöntemi

Elektroliz yönteminde, oksitlerden oluşan tozlar katoda akım vermek suretiyle elektrolitik banyoda çökertilir ya da iyi kırılabilme özelliğinde katotta toplanır. Banyo teknesi kurşun kaplıdır, elektrolit olarak ise bakır sülfat veya sülfürik asit kullanılır. Anot bakır, katot ise antimonlu kurşundur [10]. Elektroliz yöntemi ile bakır, demir, çinko, mangan ve gümüş gibi metallerin yüksek saflıklı tozları elde edilir (Şekil 2.7). Elektroliz yönteminde, elektrolitik banyoda çökertilen veya katotta toplanan metal kolaylıkla öğütülerek ince toz haline getirilir ve üretilen tozlar

yıkılarak elektrolitten iyice temizlenir. Kurutma asal gazlar altında yapılarak oksitlenme önlenir [5]. Elektroliz sırasında oluşan parçacıklar dentrik bir yapı gösterebilir de daha sonraki işlemlerle bu yapı kaybolur. Elektrolitik tozların en büyük avantajı, yüksek saflıkları ve dolayısıyla iyi sıkıştırılabilirlik özelliklerine sahip olmalarıdır. Ancak elektrolizin kullanım alanı, tozların pahalı olması nedeniyle sınırlıdır [5].



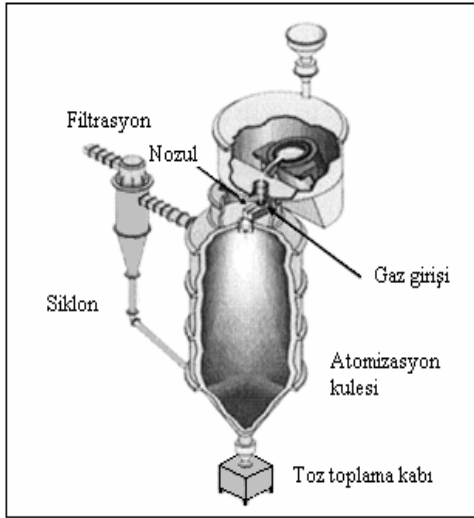
Şekil 2.7. Elektroliz yöntemi ile toz üretimi [2].

2.4.4. Atomizasyon yöntemleri

Atomizasyon, bir sıvı demetinin farklı boyutlardaki çok sayıda damlacıklara ayrılmasıdır. Bir sıvının atomizasyonunda temel prensip, bir potanın dibindeki delikten akmakta olan ergimiş sıvı metal üzerine yüksek basınçlı gaz veya sıvı püskürtülmesidir (Şekil 2.8). Atomizasyon gazı olarak genellikle hava, azot ve argon kullanılır; su ise çok sık tercih edilen bir sıvıdır. Burada gaz veya sıvı, ergiyik haldeki metal demetini farklı boyutlarda çok sayıda damlacıklara ayırır. Damlacıklar daha sonra katılarak metal tozlarını oluştururlar. Atomizasyon yöntemi üç ana bölümden oluşur:

1. Ergitme
2. Atomizasyon
3. Katılma ve soğuma

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

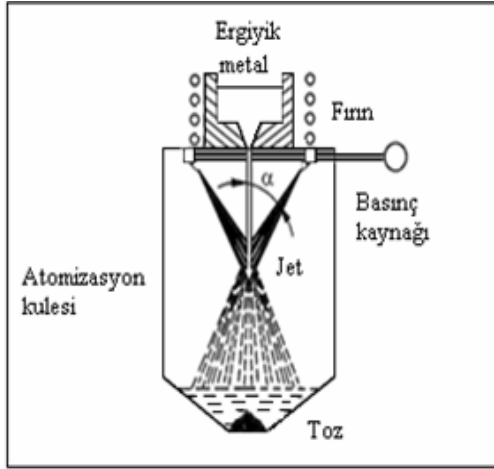


Şekil 2.8. Düşey gaz atomizasyon ünitesi [10].

Bütün metal tozları aynı teknik kullanılarak üretilemez [16]. Atomizasyon, metal tozlarının üretiminde etkin bir şekilde kullanılmakta olup [17], paslanmaz çelik, pirinç, demir, alüminyum, çinko, kalay ve kurşun gibi metal ve alaşımları için oldukça iyi sonuçlar verir [16]. Ayrıca atomizasyon, alüminyum alaşımlarının ticari miktarlardaki üretiminde en yaygın ve en ekonomik yoludur [18].

Atomizasyon yöntemlerinden su atomizasyonu, sıvı metalin su jeti ile parçalanması, gaz atomizasyonu ise gaz jeti ile parçalanması olarak tanımlanır. Çevresel olarak yerleştirilmiş olan memelerde oluşan basınçlı su jetleri sıvı metali keserek parçalar. Oluşan damlacıklar tankın dibine doğru hareket ederken soğuyarak katılaşır ve dibe çöklerler. Su çok iyi bir soğutucu olduğundan, suyla atomizasyon tankları kısadır (1 m civarında). Su ile atomizasyon işlemi Şekil 2.9’da gösterilmiştir.

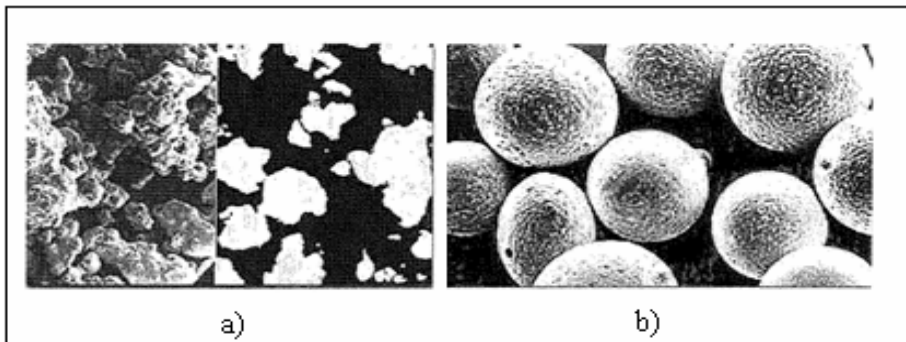
Gaz atomizasyonu da benzer şekilde oluşur. Ancak gazlar iyi soğutucu olmadıkları için gaz atomizasyon tankları daha uzundur [5].



Şekil 2.9. Su ile atomizasyon işlemi [4].

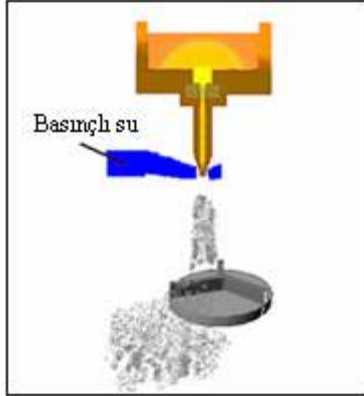
Her iki yöntemde, tozun ortalama boyutu üretim parametreleri ayarlanarak çok esnek bir şekilde kontrol edilebilir. Su atomize tozlar genel olarak karmaşık şekilli olup, yüzeyde yüksek oksit oranına sahiptirler (Şekil 2.10a). Su atomize tozların ortalama tane boyutu 30-1000 μm arasındadır. Su atomizasyonu ekonomik bir yöntem olmasına rağmen küresel tozların üretilmesi için uygun bir teknik değildir [19].

Gaz atomize tozlar ise küresel veya küresele yakın şekillidirler (Şekil 2.10b). Asıl gaz kullanıldığı takdirde oksit oranı daha düşüktür. Bu yöntemle üretilen tozların ortalama tane boyutu 20-300 μm arasındadır [20].



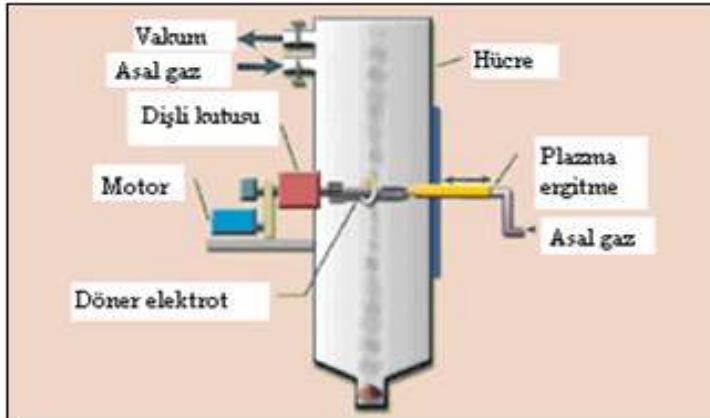
Şekil 2.10. Tozların genel yüzey yapıları
a) Su atomize tozlar b) Gaz atomize tozlar

Ergiyik metalden merkezkaç kuvveti vasıtasıyla toz üretilmesi olarak bilinen santrifüj atomizasyon yönteminde, sıvı metal dönen bir disk üzerine akıtılır (Şekil 2.11). Disk üzerindeki set ve yarıklara çarpan sıvı metal parçalanarak şekildeki gibi saçılır. Saçılan parçacıklar soğutulularak katılaşmaları sağlanır [2, 17].



Şekil 2.11. Döner disk atomizasyonu [2].

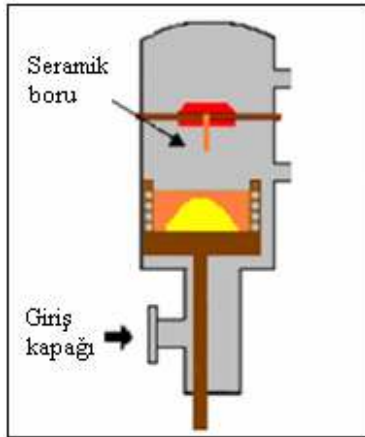
Döner elektrot kullanılarak yapılan santrifüj atomizasyon yöntemi ise, dönmekte olan elektrotun ergiyen ucundaki sıvı metal damlalarının atomize olması esasına dayanır [21]. Uzay çalışmalarında kullanılan aşırı temiz ileri titanyum alaşımları ve vücut protezleri için gerekli kobalt, krom ve titanyum alaşım tozları döner elektrot yöntemiyle üretilmektedir [8]. Şekil 2.12’de döner elektrot atomizasyon yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Döner elektrot atomizasyon yöntemi [2].

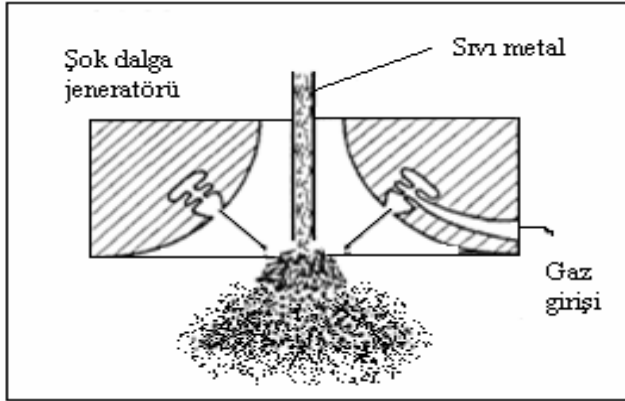
Bu yöntemde tozu elde edilecek metalden yapılmış elektrot ile ergimeyen tungsten elektrot arasında ark oluşturulur. Ergiyen elektrotun döndürülmesiyle, elektrik arkı altında oluşan damlacıklar savrulur ve tankta toplanır. Oksidasyonu önlemek için toz toplama tankı helyum, argon gibi asal gazlarla doldurulur.

Vakum atomizasyonu yöntemi, basınçlı gaz altındaki sıvı metale ani olarak vakum uygulanması sonucu gazın genleşmesi ve metalin atomize olmasıyla gerçekleştirilen bir yöntemdir [21]. Bu yöntemde, silindirik bir tankın alt kısmında sıvı metal potası, üst kısmında da vakum atomizasyon odası bulunmaktadır. Vakum altındaki sıvı metal önce belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır, bundan sonra bu bölüme hidrojen gazı doldurulur. Potadaki sıvı metalde hidrojen gazı çözündükten 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 elde edilir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Vakum atomizasyon yöntemi [2].

Ultrasonik gaz atomizasyonu yönteminde ise, yüksek basınçlı gaz, rezonans boşluklarının birinden diğerine ivmelendirilerek ultrasonik ses dalgaları oluşturulur (Şekil 2.14) ve yüksek katılma hızına bağlı olarak çok ince ve küresel şekilli tozlar üretilir [22, 23]. Ultrasonik atomizasyonla ilgili olarak Lang, Bougulavskii ve Eknadiosyants tarafından çeşitli çalışmalar yapılmıştır [23].



Şekil 2.14. Ultrasonik gaz atomizasyonu [24].

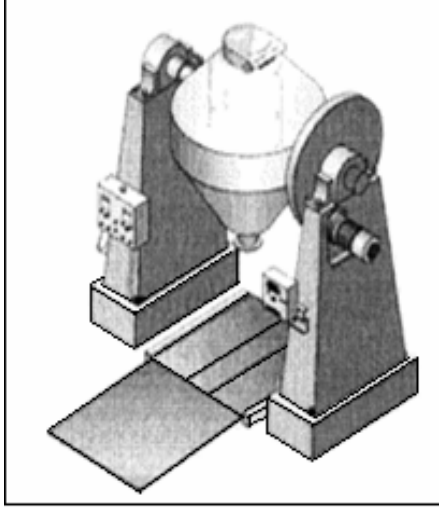
Literatürde santrifüj hidrolik atomizasyon ile gaz atomizasyonu yönteminin birleştirildiği yeni bir atomizasyon tekniği ile ilgili çalışmalar yapılmıştır [19]. Bu yöntemde ergimiş metal filmi, yüksek hızlı gaz jetleriyle atomize edilir. Bu yöntemin amacı, düşük özgül gaz tüketimi ve dar bir aralıkta toz dağılımına sahip küçük parçacıklar elde etmektir. Diğer atomizasyon teknikleriyle karşılaştırıldığında arzu edilebilir bir yöntemdir ancak dikkatli bir şekilde yapılması gerekmektedir [19].

Atomizasyon tekniğiyle bir tozun ortalama boyutu, toz boyutu dağılımı, toz şekli, yüzey kompozisyonu da dahil olmak üzere kimyasal bileşimi ve mikroyapısı kontrol edilebilir. Bu temel özellikler, tozların ve bitmiş parçaların görünür yoğunluk, sıkıştırılabilirlik ve tokluk gibi mühendislik özelliklerini belirler [24]. Bunların yanı sıra, atomizasyon yöntemlerindeki yüksek toz üretim hızı, ekonomik olarak bir üstünlüktür.

2.5. Tozların Karıştırılması

Tozların karıştırılması V veya Y tipi karıştırıcılar diye bilinen çift borulu ve çift-koni karıştırıcılarda yapılmaktadır (Şekil 2.15). Karıştırma işlemi, tozların tane boyutuna ve şekline göre yığılmasını önlerken, akma hızını ve görünür yoğunluğunu da değiştirir. Karıştırma işleminin uzun tutulması taneciklerin kırılarak küreselleşmesine ve önemli ölçüde plastik deformasyona uğramasına sebep olabilir. Bu da tozun

sıkıştırılabilme özelliğini azaltıp, şekillendirme sırasında gerekenden daha fazla soğuk işlem gerektirir.



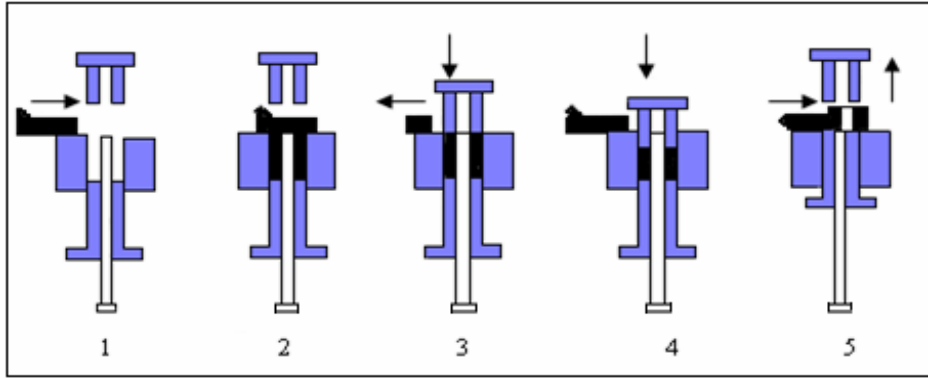
Şekil 2.15. Karıştırıcı [10].

2.6. Tozların Sıkıştırılması (Presleme)

Sıkıştırma, bir yük altında serbest yapıdaki toz parçacıklarının istenilen şekle dönüştürülmesi için yoğunluk kazandırma işlemi olarak tanımlanır. Tozların sıkıştırılmasındaki amaç; ham yoğunluk ve dayanım elde edilmesidir [8].

Metal tozları, özel olarak hazırlanmış çelik kalıp içerisinde basınç etkisiyle sıkı bir hale getirilir. Bu işlem için genellikle hidrolik, mekanik ve pnömatik presler kullanılmaktadır. Preslerin uyguladıkları basınç değerleri 70 ile 700 MPa arasındadır ve pratikte kullanılan basınç değerleri ise genellikle 145 - 450 MPa arasındadır.

Bir çok halde preslemeden önce tozlar 400 - 800° C arasında bir ısıtmaya tabi tutulur. Böylece oksitler; nem, karbon, kükürt ve fosfor mümkün mertebe ortamdaki uzaklaştırılmış olur. Ayrıca ısı işlem tozların sertliklerini de azaltır ve tozların sıkıştırılabilirliği artar. Presleme sıcak veya soğuk yapılabilir [25]. Şekil 2.16'da tipik eksenel presleme işleminin basamakları görülmektedir.



Şekil 2.16. Presleme işlemi

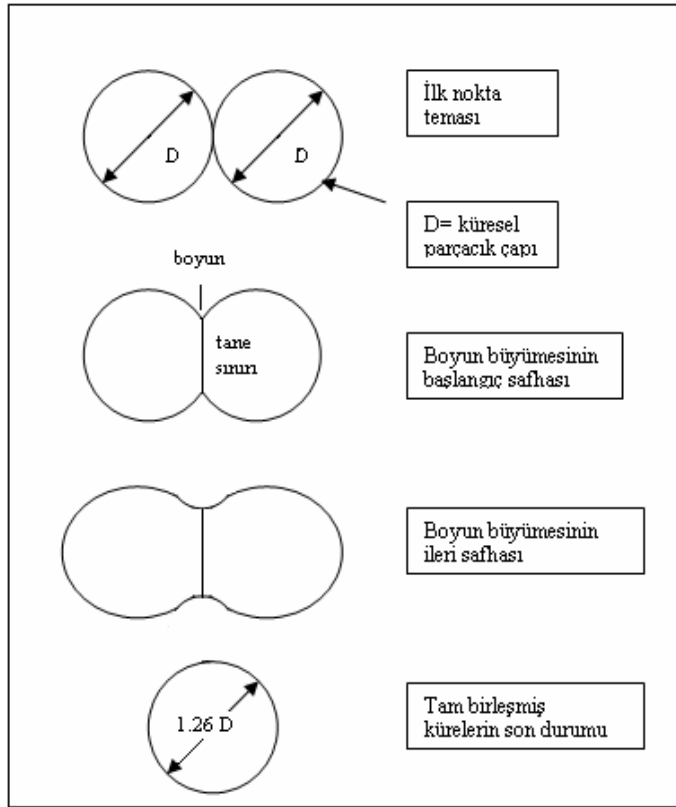
1. İşlem başlangıcı 2. Toz doldurma 3. Presleme başlangıcı
4. Preslemenin sona ermesi 5. Preslenmiş parçanın çıkarılması

2.7. Tozların Sinterlenmesi

Sinterleme, gözenekli yapıda bir şekil kazandırılmış tozların yüzey alanının küçülmesi, parçacık temas noktalarının büyümesi ve buna bağlı olarak gözenek şeklinin değişmesine ve gözenek hacminin küçülmesine neden olan ısı olarak aktive edilmiş malzeme taşınımıdır.

Sıkıştırılmış toz parçalar arasındaki bağlantı soğuk kaynak ve mekanik kilitleme benzeri zayıf bağlar olup kristal kafes içerisindeki bağ dayanımına oranla çok zayıf kalmaktadır. Bu sebeple; sıkıştırılmış ham yoğunluktaki T/M parçalara mukavemet ve yüksek yoğunluk kazandırmak amacıyla ergime noktasının altındaki sıcaklıkta ısıtım işlemi uygulanır.

Sinterlemenin başlaması noktasal olarak temas halinde bulunan toz parçacıklarının katı hal bağına dönüşümü ile olur. Sinterleme işlemi sırasında, nokta teması başlayan, ara parçacık bağının gelişmesi ile devam eden mekanizmaya çift-küre sinterleme modeli denilmektedir. Bu modelde, parçacık temasının sonucunda oluşan boyun büyümesiyle yeni bir tane sınırı oluşur ve iki parçacık tek bir parçacık oluşturacak şekilde birleşir. Şekil 2.17’de çift küre sinterleme modeli gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Çift küre sinterleme modeli [4].

Sinterleme sıcaklığı, tek bileşenli sistemlerde metalin ergime sıcaklığının $2/3$ veya $4/5$ 'i alınarak tespit edilirken, birden fazla bileşenli sistemlerde, ergime sıcaklığı yüksek olan bileşenin ergime sıcaklığının altında, ergime sıcaklığı düşük olan bileşenin ergime sıcaklığının üzerinde seçilebilir. Demir alaşımları $1000 - 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$, refrakter metaller $2000 - 2900\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındaki sıcaklıklarda sinterlenirler [25].

Sinterleme süresi kullanılan malzemeye göre değişir. Elmas alaşımları ve refrakter metaller için yarım saatten az bir zaman çoğu durumda yeterlidir. Sert alaşımlar ve mıknatıs alaşımlarında olduğu gibi birçok hallerde de birkaç saat süren bir sinterleme uygulanmalıdır.

Sinterleme zamanı ve sıcaklığı arasında basit bir bağıntı vardır. Sinterleme sıcaklığı yükseldikçe sinterleme zamanı kısalırken; düşük bir sinterleme sıcaklığı sinterleme zamanının uzamasına sebep olur.

Toz kütlelerinde ise sahip oldukları büyük yüzeylerden dolayı yüzey enerjisi bulunur. Sinterleme sırasında tozların birbirleriyle bağlanması ve toz yüzeylerinin düzelmesiyle yüzey alanları azalır ve buna bağlı olarak yüzey enerjisi de azalır.

3. GAZ ATOMİZASYONU

Demir dışı metallerle birlikte alüminyum alanına 1920'li yıllarda giren gaz atomizasyonu, geleneksel ve hızlı katılaşmış tozların üretiminde en yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. [8, 26].

Atomizasyonda gaz jeti üç fonksiyonu yerine getirir. Başlangıçta sıvı metal demetini kesip parçalamak için gerekli kinetik enerjiyi damlacıklara aktarır. Daha sonra damlacıkları gaz akışı içinde ivmelendirir ve son olarak ise uçuşma esnasında onların soğumasına sebep olur [27]. Gaz jeti, hava veya N_2 , Ar, CO_2 ve He gibi asal gazlar olabilir. Asal gazlar sayesinde daha küresel tozlar elde edilebilir [28].

Süper alaşımlar ve titanyum gibi reaktif metaller atomize edildiğinde veya oksijen miktarının düşük olması istendiğinde asal gazlar kullanılır [8]. Bu teknik hem deneysel, hem ticari miktarlardaki toz üretiminde üstünlük sağlar [29]. Gaz atomize tozlar çeşitli üstün özelliklere sahiptir:

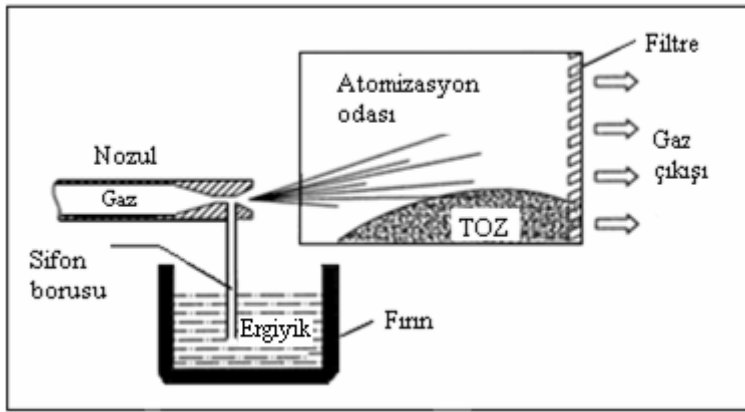
1. Küresel toz şekli
2. Ergitilen metalle aynı kimyasal bileşim
3. Küçük çaplı tozlarda hızlı katılaşmış yapılar

Bu üstün özellikler, gaz atomize tozların bir çok uygulama ve üretim için tercih edilmesine neden olur [30].

Gaz atomizasyon birimleri metal besleme mekanizmaları, ergitme ve toz toplama bölümlerinin yapısı bakımından farklılık gösterirler. Ancak, hepsinde sıvı metal demetine enerji aktarmak suretiyle toz üretilmektedir.

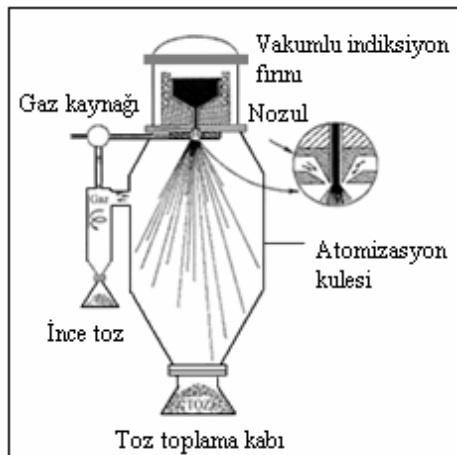
Düşük ergime sıcaklığına sahip metaller için gaz atomizasyon üniteleri yatay olarak tasarlanırlar (Şekil 3.1). Bu tip ünitelerde, nozuldan geçen yüksek hızdaki gaz, sifon etkisi yapar ve ergiyik metal gaz genleşme bölgesine çekilir. Burada metal demetinin

püskürtülüp parçalanmasıyla elde edilen damlacıklar, toz toplama odasındaki uçuşma sırasında ısı kaybına uğrar ve katılaşır. Ünitenin sonundaki filtre sayesinde gaz tahliye edilirken toz, toplama odasında tutulur [4]. Yatay gaz atomizasyon üniteleri çinko ve alüminyum için elli yılı aşkın bir süredir kullanılmaktadır. Ancak bu tasarımda bir gaz israfı söz konusudur [31].



Şekil 3.1. Yatay gaz atomizasyon ünitesi [32].

Yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin atomizasyonunda ise, içi asal gazla doldurulan kapalı bir kuleye sahip düşey gaz atomizasyon ünitesi kullanılır ve böylece oksitlenme önlenir. Düşey gaz atomizasyonunun temsili resmi Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.2. Düşey gaz atomizasyon ünitesi [32].

Bu tip ünitelerde, indüksiyon fırını ile ergime sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa aşırı ısıtılmış olan ergiyik metal, nozul içerisine akıtılır. Atomizasyon kulesi, iri damlacıkların kule çeperlerine çarpmadan katılaşmasına imkan verecek ölçülerde olmalıdır. Kuleler paslanmaz çelikten imal edilirler. Atomizasyon işleminde kullanılan gazın, kule iç basıncını yükseltmesine engel olmak için bu gazın kule dışına tahliyesi önemlidir. Bu amaçla siklon kullanılır. Siklon, aynı zamanda ince tozların tutulması amacıyla da kullanılır [4].

Yatay üniteye atomize edilmiş tozlar, düşey olarak atomize edilmişlere göre daha iridir ve daha geniş aralıkta bir toz dağılımına sahiptir [33].

Gaz atomizasyonunda genellikle hava ve azot kullanılır. Alternatif bir gaz da helyum gazıdır. Helyum gazı aynı zamanda soğuma hızını da arttırır. Gaz atomizasyonunda gaz basıncı normal olarak 0,5-9 MPa arasındadır. Hacimsel gaz debisi ise 0,002- 0,24 m³/s arasında değişmektedir. Gazın nozuldan çıkış hızı nozul tasarımına bağlı olup 20 m/s'den ses üstü hızlara kadar çıkmaktadır. Metalin aşırı ısıtması ise 75-100 °C arasında değişir [9].

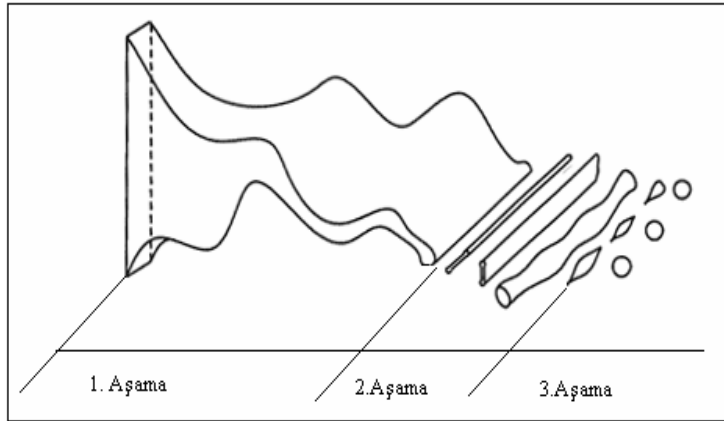
3.1. Gaz Atomizasyon Mekanizmaları

Bir nozuldan atmosfere aniden çıkan sıvı demeti, sıvının ve onu çevreleyen gazın nozul tasarımına bağlı olarak [34], silindirik sütun, yassı tabaka veya konik bir yüzey şeklini alabilir [31]. Bu damlacık şekillenme mekanizmaları üç aşamadan meydana gelmektedir [8]:

1. Hızla artan genlikteki sinüs dalgasının başlaması,
2. Dalganın büyümesiyle çubuk (ligament) oluşması,
3. Çubuğun bölünmesiyle küresel damlacıkların oluşması.

Gordon [31], Dombrowski ve Johns [35] sıvıların atomizasyon mekanizmaları ile ilgili modelleme çalışmaları yapmışlardır.

Gordon yapmış olduğu çalışmada, hava jetine maruz sıvı damlaların parçalanması, damlacıkların çapı ve bunun oluşum zamanıyla ilgili bir model ortaya koymuştur. Dombrowski ve Johns ise, yassı tabakadan damlacık oluşumu için fiziksel bir model geliştirmişlerdir (Şekil 3.3).



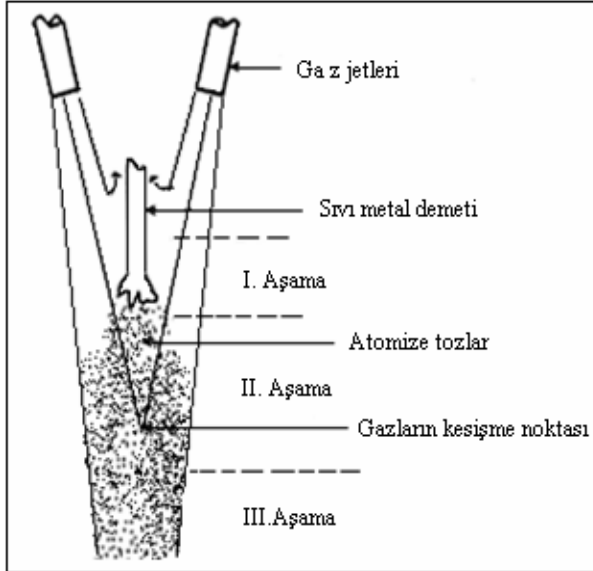
Şekil 3.3. Yassı tabakadan damlacık oluşumu [20, 35].

Bu modelde 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 [20,35]. Ergiyik metallerin atomizasyonu, toz oluşumu sırasında sıcaklığın düşmesi sonucu, metal damlacıkların katılaşması nedeniyle diğer sıvıların atomizasyonundan ayrılır [34].

Literatürde, ergimiş metallerin atomizasyonu ile ilgili mekanizmaların modellenmesi See ve Johnston [36], Mehrotra [34, 37], Bürger ve ark. [38, 39], Putimsev [40] ve Ünal [41] tarafından çalışılmıştır. See ve Johnston, yaptıkları çalışmalar sonucunda ergiyik metallerin gaz ile atomizasyonunda üç aşama tanımlamışlardır:

1. Birincil bölünme
2. İkincil bölünme
3. Katılaşma

Bu aşamalar Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



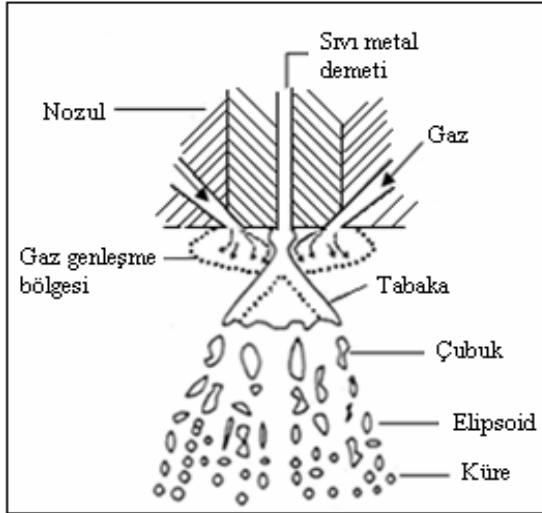
Şekil 3.4. Gaz atomizasyonunda mevcut üç aşamanın şematik gösterimi, See modeli [36, 38].

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.

See ve Johnston'ın gaz atomizasyonu ile metal tozu oluşum modelinin aşamaları, German [4] tarafından daha açık bir şekilde gösterilmiştir (Şekil 3.5). Gaz genleşme bölgesindeki emme basıncı sebebiyle eriyiğin, önce içi boş ince bir konik tabaka şeklini, daha sonra da çubuk, elipsoid ve küre şeklini aldığı görülmektedir.

Ünal [41] ise alüminyum tozlarının oluşum mekanizmasını, yakından eşlemeli nozullar kullanarak atomizasyon işlemi esnasında çekmiş olduğu fotoğraflarla incelemiştir. Yapmış olduğu çalışmada, birincil bölünmede yaklaşık olarak 500 μm

çapındaki damlacıkların oluştuğu, daha ince tozların ise ikincil bölünmenin ürünü olduğunu belirtmiştir.



Şekil 3.5. See modelinin German tarafından farklı bir gösterimi [4, 42].

Yapılan çalışmalardan da görüldüğü gibi bunların hepsinde ortak nokta, gaz atomizasyonu işleminin birkaç safhada meydana geldiği ve birinci safhada sıvı metalin tabaka ve/veya çubuksu yapıya dönüştüğü, daha sonra bunu ikincil bölünmenin takip ettiğidir. En son safha ise damlacıkların katılaşması olarak açıklanır. Tozların soğuma ve katılaşması atomizasyon kulesi içinde havada uçarken meydana gelir. Sıvı metal damlacıklarının katılaşma hızı önemlidir; çünkü katılaşma hızı tozların şeklini belirler [43].

3.2. Gaz Atomizasyonunda Üretim Değişkenleri

Gaz atomizasyonunda toz özelliklerini belirleyen çok sayıda üretim değişkeni mevcuttur. Bu değişkenleri, sıvı metal ile ilgili olanlar ve gaz sistemi ile ilgili olanlar olarak iki gruba ayırabiliriz. Sıvı metal ile ilgili olan üretim değişkenleri; ergiyik metalin sıcaklığı, viskozitesi, yüzey gerilmesi ve akış debisidir. Gaz sistemi ile ilgili üretim değişkenleri ise; gazın cinsi, basıncı, debisi, hızı ve nozul geometrisidir [4]. Bu üretim değişkenleri; görünür yoğunluk, akıcılık, mukavemet,

sıkıştırılabilirlik, sinterleme, tokluk gibi mühendislik özelliklere etki eden tozun boyutunu, dağılımını, şeklini, yüzey morfolojisini, mikroyapısını ve kimyasal içeriğini belirler [24].

3.2.1. Toz boyutu ve dağılımı

Toz boyutu, ortalama boyut ve toz boyutu dağılımı ile belirlenebilir [11]. Bir tozun boyutunu ifade etmek için çeşitli ortalama çap ölçüleri kullanılır [44]. Bunlardan en yaygın olan, boyut dağılımı grafiğindeki toplam yüzde eğrisinin %50 değerine karşılık gelen kütle ortanca çapıdır (d_m veya d_{50}). Kullanışlı olan ortalama çap ölçüleri ise, Sauter ortalama çapı (d_{vs}) ve hacim ortalama çapıdır (d_{vm}).

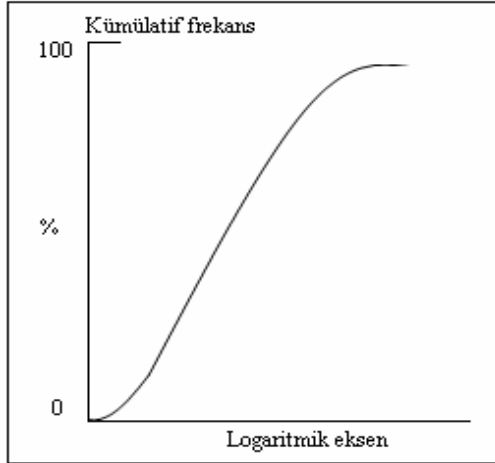
Sauter ortalama çapı, ince tozların bulunduğu aralıktaki değişmelere, hacim ortalama çapı ise kaba tozların bulunduğu aralıktaki değişmelere karşı duyarlıdır. Kütle ortanca çapı olan d_{50} ise, bundan sonra “ortalama boyut” olarak anılacaktır. Ortalama boyut, bir tozu tanımlamak için her zaman yeterli olmayabilir ve logaritmik normal dağılımın standart sapmasına ihtiyaç duyulur. Standart sapmayı veren ifade şu şekilde tanımlanmıştır :

$$\sigma_g = \left(\frac{d_{84,1}}{d_{15,9}} \right)^{1/2} = \left(\frac{d_{84,1}}{d_{50}} \right) = \left(\frac{d_{50}}{d_{15,9}} \right) \quad (3.1)$$

Bu ifadede; $d_{84,1}$ tozların ağırlıkça % 84,1’inin kendisinden küçük olduğu toz çapı, $d_{15,9}$ ise %15,9’unun kendisinden küçük olduğu toz çapıdır. Gaz atomize alüminyum tozları için σ_g değeri, toz boyutuna ve atomizasyon şartlarına bağlı olarak 1,8 ile 2,5 arasında değişir [44, 45].

Boyut dağılımı, özellikle bitmiş ürün yoğunluğuna etkisi sebebiyle en az ortalama boyut kadar önemlidir [37]. Gaz atomize tozlar genel olarak logaritmik dağılım göstererek tipik bir çan eğrisi oluşturur. Tipik ürün, geniş bir aralığa sahip çok boyutlu tozlardır. Tek boyutlu toz üretimi çok özel çabalar gerektirmektedir.

T/M’de kümülatif frekans eğrisinde (Şekil 3.6); %90, %50 ve %10 noktalarına karşılık gelen d_{90} , d_{50} ve d_{10} toz boyutu değerleri çok sık kullanılır [4].



Şekil 3.6. Kümülatif frekans dağılımı [4].

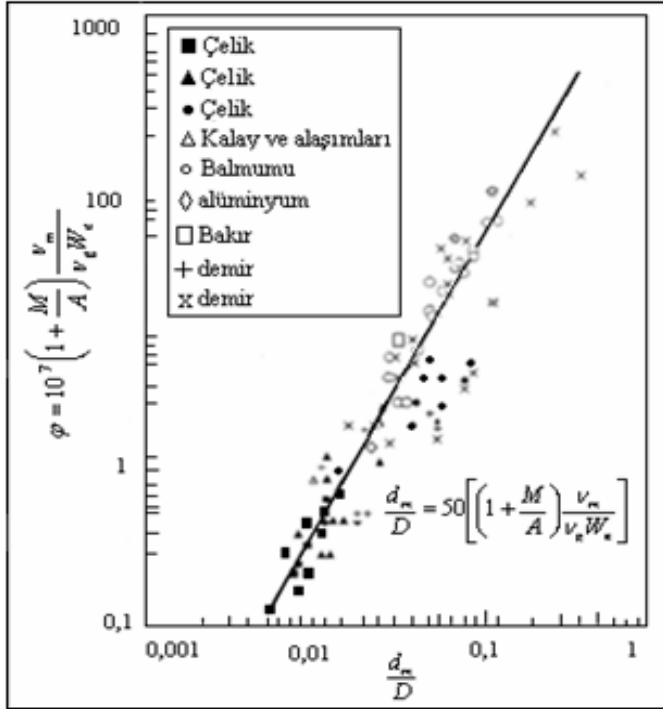
Literatürde üretim değişkenlerinin toz özelliklerine etkisini araştırmak amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Lubanska [46], hava atomize demir, çelik ve kalay üzerinde yaptığı çalışmalar sonucu, ortalama toz boyutu (d_m) için sistem ve malzeme değişkenlerine bağlı olarak boyutsuz deneysel bir bağıntı geliştirmiştir:

$$\frac{d_m}{D} = K \left[\left(\frac{v_m}{v_g(We)} \right) \left(1 + \frac{M}{A} \right) \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

Burada; D , sıvı metal demeti çapı (μm); v_g , gazın kinematik vizkozitesi (m^2/s); v_m , sıvı metalin kinematik vizkozitesi (m^2/s); M/A , metal gaz debisi oranı ; We , Weber sayısı ($We = \rho_m v_g^2 D / \sigma_m$); K , 40 ile 50 arası sabit bir katsayıdır.

Şekil 3.7’de Lubanska denkleminin, bazı hava atomize tozlarının deneysel verileriyle karşılaştırılması gösterilmiştir. Ancak Mehrotra [37], bakır, alüminyum ve balmumu üzerinde yapılmış daha sonraki çalışmalarla bu denklem arasında uyuma vurgu yaptıktan sonra, kendilerinin farklı açılara sahip nozullarla ve farklı metal debileriyle

ürettikleri kalay, kurşun ve kurşun- kalay tozlarının deneysel verileriyle Lubanska denkleminin uyuşmadığını bildirmiştir.



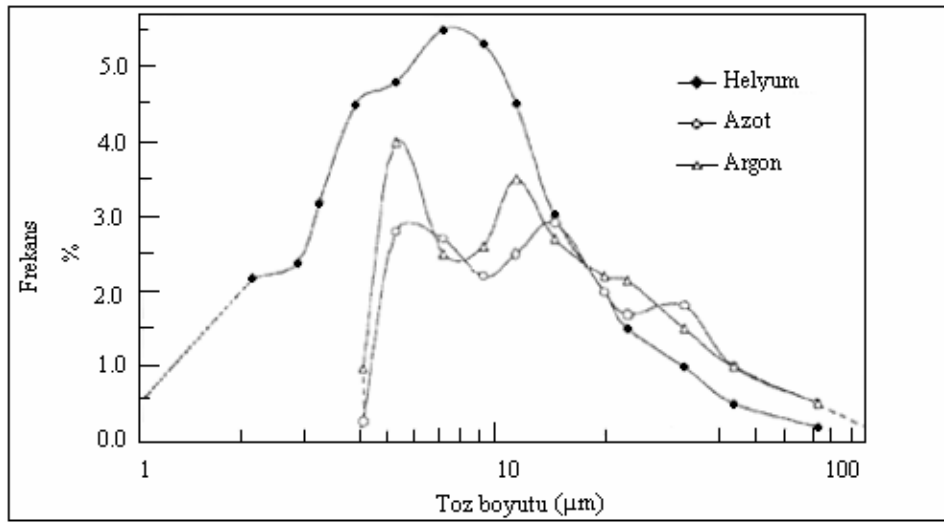
Şekil 3.7. Hava atomizasyonu için Lubanska bağıntısı [8].

Benzer şekilde Ünal [47], Lubanska bağıntısından hesapladığı ortalama boyut değerinin, deneysel yolla elde ettiği değerden magnezyum tozu için çok yüksek, çinko için ise çok düşük olduğunu tespit etmiştir.

Özbilen ve ark. [48] ise, bakır ve kalay ile yaptıkları atomizasyon neticesinde, bakır için 39 μm ve kalay için 13,25 μm olan ortalama boyutu Lubanska denkleminden sırasıyla 23,8 μm ve 10,9 μm olarak hesaplamışlardır. Buna sebep olarak, Lubanska denkleminin sıvı metalin fiziksel özelliklerinin toz boyutuna etkisini doğru bir şekilde temsil edemediği gösterilmiştir.

Ünal [26,41,44,45], tarafından üretim değişkenlerinin toz özelliklerine etkisini araştırmak amacıyla magnezyum, alüminyum ve alaşımları üzerinde bir çok çalışma yapılmıştır.

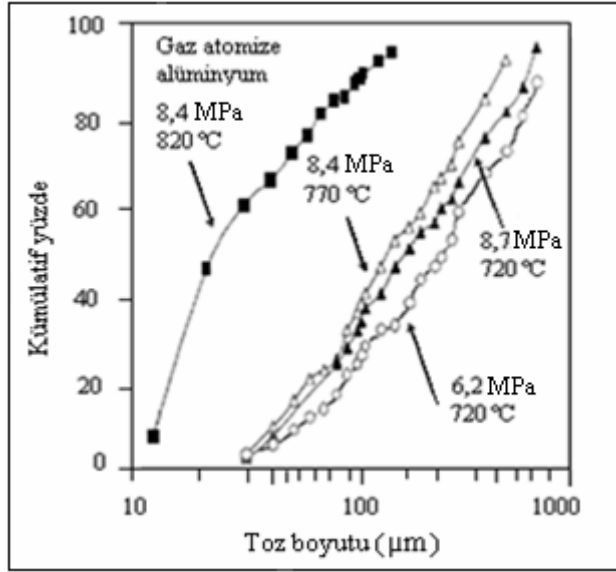
Şekil 3.8’de gaz cinsinin toz boyutuna etkisi gösterilmiştir. Burada helyumun, benzer şartlarda azot ve argondan daha ince tozlar ürettiği görülmektedir. Ortalama boyut helyum, azot, argon için sırasıyla 13,36 μm , 24,53 μm ve 25,32 μm olarak hesaplanmıştır [41]. Bu durum, helyumun diğer iki gaza göre daha yüksek olan ısı emme kapasitesinden kaynaklanmaktadır [26].



Şekil 3.8. He, Ar ve N_2 gazları kullanılarak üretilen alüminyum tozlarının frekans dağılımı [41].

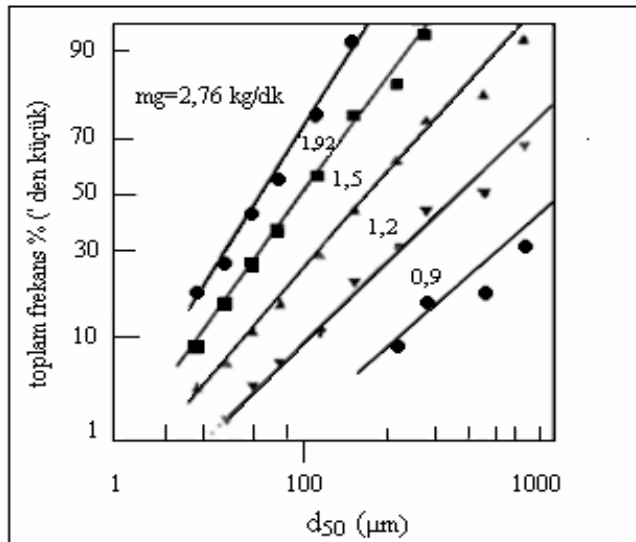
Hızlı katılaşmış tozlar için en iyi soğuma şartlarını helyum sağlamasına karşın, fiyatı diğer gazlara göre daha yüksektir [49]. Diğer atomizasyon gazlarının kendilerine özgü bir takım özellikleri bulunmaktadır; azot, helyum ve argona göre daha ekonomik bir gaz, argon ise koruyucu bir gazdır.

Atomizasyon gaz basıncı ve ergiyik sıcaklığının alüminyum tozlarının toplam toz boyutu dağılımı üzerine olan etkileri Şekil 3.9’da görülmektedir. Basınç artışının daha yüksek enerjiye ve aşırı ısıtılmış ergiyeğin daha düşük viskoziteye sahip olması nedeniyle, bu yöndeki değişimler dağılım eğrisini daha küçük toz boyutuna doğru hareket ettirmektedir [4]. Bu veriler, gaz basıncının artışının ortalama toz boyutunu küçültmekle birlikte tozların standart sapmasını da küçülttüğünü gösterir [8].



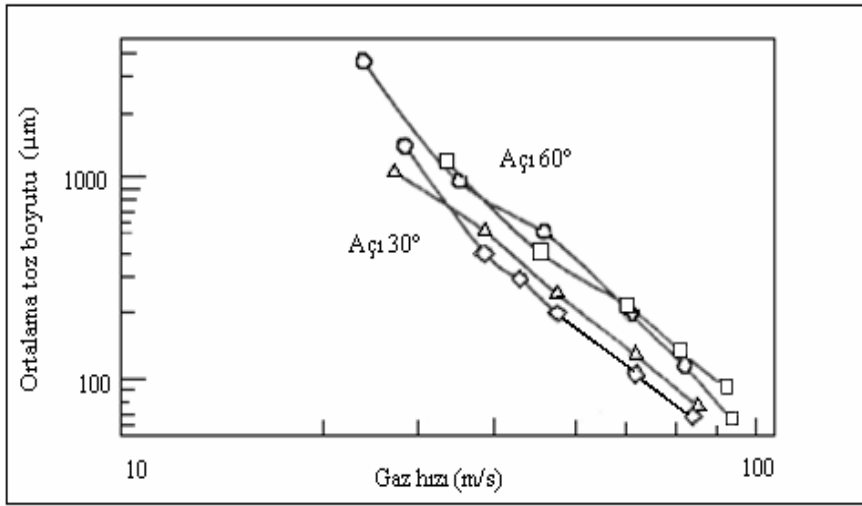
Şekil 3.9. Farklı basınç ve ergiyik sıcaklıklarında Al toz boyutunun değişimi [4].

Azot atomize kalay için, gaz debisinin ortalama toz boyutuna etkisi Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Burada sıvı metal debisi sabit (3 kg/dk) ve gaz debisi ise 0,9 - 2,76 kg/dk arasındadır. Bu verilere göre, gaz debisi ve gaz/metal oranı arttığında ortalama toz boyutu küçülmektedir [31].



Şekil 3.10. Azot atomize kalay tozlarının ortalama boyutuna gaz debisinin etkisi [31].

Çarpma açısı gaz jetlerinin toplam açısıdır ve nozul geometrisine ait bir değerdir. Şekil 3.11’de kalay ve kurşun için gaz hızının ve çarpma açısının ortalama toz boyutuna etkisi gösterilmiştir. Azot ile atomize edilmiş kalay ve kurşun tozlarında 30° çarpma açısı, 60° çarpma açısına göre daha küçük ortalama boyutlu toz üretimi yapılmasını sağlamıştır. Gaz hızındaki artış da toz boyutunu küçültmektedir. Toz boyutunun değişimi kalay ve kurşun için her bir metalin fiziksel özelliklerine bağlı değildir.



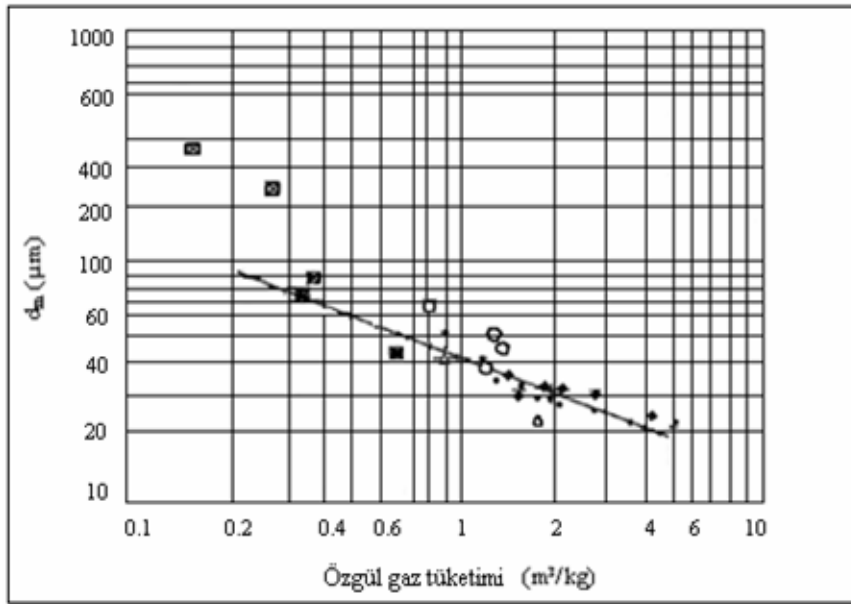
Şekil 3.11. Azot gazı hızının ve çarpma açısının toz boyutuna etkisi (○,◇: Pb; □,△: Sn) [31].

Sıvı metal debisi, doğrudan üretim hızını kontrol ettiği için ekonomik olarak en önemli değişkenlerdendir [45]. Bu değişken, metal film kalınlığını ve gaz ile sıvı metal arasındaki ısı transferini etkiler. Daha kalın metal filmi, birincil bölünme esnasında damlaların ortalama boyutunu daha büyük yapar [49].

Diğer önemli üretim değişkeni de özgül gaz tüketimidir [8]. Özgül gaz tüketimi, gaz/metal kütle oranı veya gazın hacminin metalin kütlesine oranı olarak ifade edilir [9]. Şekil 3.12’de farklı metal ve alaşımlardan alınan verilerin grafiği görülmektedir. Grafikte, gaz/metal kütle oranındaki artış, ortalama toz boyutunu küçültmektedir. Doğru denklemi;

$$d_m = K.F^{1/2} \quad (3.3)$$

Burada; K sabit ve F ise m³/kg cinsinden özgül gaz tüketimidir. K'nın değeri nozul tasarımı ve alaşım özelliklerine bağlı olarak değişir [8].

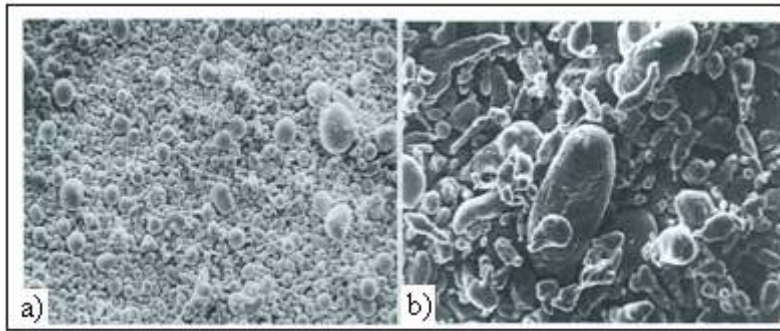


Şekil 3.12. Farklı metal ve alaşımlar için toz boyutunun özgül gaz tüketimine göre değişimi [8].

3.2.2. Toz şekli, yüzey morfolojisi ve mikroyapısı

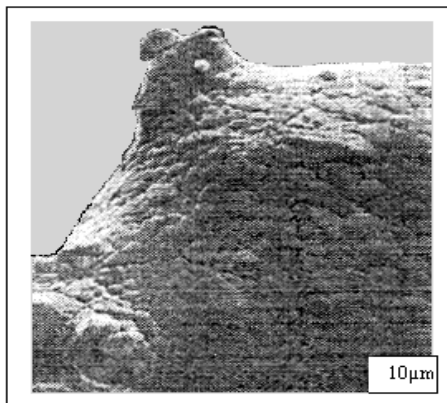
Toz şekli, tozların paketlenmesini, akıcılığını ve sıkıştırılabilirliğini etkiler. Bir tozun şekli üretim yöntemi ve boyut ile değişir [4]. Küreselden karmaşık şekillere doğru değişebilen tozun şeklini katılaşma süresi belirler [11]. Eğer bir sıvı damlacığının küreselleşme süresi ($t_{küre}$), katılaşma süresinden ($t_{katı}$) daha kısa ise parçacık şekli küresel olma eğilimi gösterir. Eğer küreselleşme süresi uzun ise, karmaşık şekle sahip tozlar oluşur. Atomizasyon sırasında karmaşık şekilli bir sıvı damlacığını küreselleşmeye yüzey gerilme kuvvetleri (σ_m) zorlar [24]. Ergitilen metale uygulanan yüksek miktardaki aşırı ısıtmalar ve küçük çarpma açısı, daha yuvarlak şekilli tozların üretilmesini sağlar.

Literatürde Ünal [41], yapmış olduğu çalışmada, helyum gazı kullanarak atomize ettiği alüminyum tozlarından, yaklaşık 30 μm boyutun altındaki bütün tozların küresel, daha iri tozların ise karmaşık şekle sahip olduğunu bildirmiştir. Şekil 3.13'te hava ve azot ile atomize edilmiş alüminyum tozlarına ait resimler gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Atomize alüminyum tozları [45].
a) Azot atomize b) Hava atomize

Alüminyum tozu üretim uygulamalarının çoğunda atomizasyon ortamı olarak, karmaşık şekilli toz üreten basınçlı hava kullanılır. Asal gazlar sadece özel toz şekline ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanılır. Gaz atomize tozlar genellikle düzgün yüzeylidir [20]. Ayrıntıda ise hücresel veya dallantılı bir morfoloji mevcuttur. Şekil 3.14'te asal gaz ile atomize edilmiş çelik tozunun hücresel morfolojisi gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Atomize çelik tozunun hücresel yapı yüzeyi [4].

Gaz atomize tozların hücresel veya dallantılı morfolojiye sahip olması damlacığın soğuma şeklini yansıtır [8].

Atomizasyon sırasında küçük tozların kendisinden daha büyük tozlarla çarpışması sonucu uydulaşmalar meydana gelir. Bu çarpışmalar [11]; toz boyutu, boyut dağılımı ve toz şekline etkisi sebebiyle önemlidir. Büyük ve küçük parçacıkların katılma süreleri arasındaki fark ve farklı boyutlu damlacıkların atomizasyon gazının etkisiyle değişik oranlarda ivmelenmesi uydulaşmaya sebep olmaktadır [50]. Şekil 3.15, iri tozun tamamen katılmış olan uydu tozla çarpışmadan önce yarı katı halde olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.15. Bir toz yüzeyindeki uydu tozlar [1].

Atomizasyon işlemi; yaklaşık $1\mu\text{g}$ miktarında çok küçük bir döküm işlemi olarak kabul edilebilir. Bu kütlenin soğuması, geleneksel döküme göre çok daha büyük bir hızda olur [51]. Geleneksel döküm tekniklerinde soğuma hızı $100\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 'den daha azdır. Buna karşılık atomize tozlar, birim hacim başına yüksek yüzey alanına ve genellikle $10^3\text{-}10^4\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ arasında soğuma hızına sahiptirler. Hızlı soğumayı gerçekleştirmek için iki şart sağlanmalıdır:

1. Katılan malzeme en az bir yönde küçük boyuta veya büyük bir yüzey/hacim oranına sahip olmalıdır.

2. Dış ortamla olan ısı dengesi, katılaştıran malzemeden ısıнын alınmasının çok kısa bir zamanda gerçekleşmesine imkan vermelidir.

Gaz atomizasyonu bu iki şartı da sağladığından, metal ve alaşımları için yaygın olarak kullanılır [51]. Gaz atomize tozlarda mikroyapı genellikle dallantılıdır [24].

3.2.3. Tozların kimyasal bileşimi

Bir T/M parçasının mekanik ve kimyasal özellikleri büyük ölçüde toz yüzeylerinin içeriğine bağlıdır. Gaz atomizasyonunda, soğuma süresince yüzey tepkimeleri oluşur ve bileşenler, tozların yüzeyine yerleşir. Dolayısıyla, T/M parçasının mekanik özelliklerini kontrol edebilmek için, yüzeydeki bu tepkime ürünlerinin içeriğini bilmek önemlidir [52].

Tozlardaki metal olmayan içerikler, özellikle metal oksitleri, sıkıştırılmış tozların başarımını sınırlar. Bu katışıklıklar ergime ve/veya gaz atomizasyon sırasında oluşurlar [53]. Tozlardaki bu katışıklıklar, gerilmenin yoğun olduğu yer olarak davranır ve yorulma çatlaklarının başlamasına yol açarlar. Uygun ergitme teknolojisi kullanılarak gaz atomize tozlarda metalin kimyasal bileşiminin hemen hemen aynısını elde etmek mümkündür. Bu sayede alüminyum, bakır, demir, nikel, kobalt ve titanyum esaslı özel alaşımlar gazla atomize edilerek aynı bileşimde tozlar elde edilir [9].

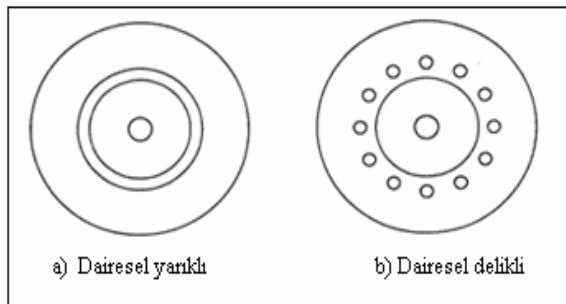
Atomizasyon şartlarında oksitlenmenin önlenmesi mümkün değildir. Asal gaz veya vakum atomizasyonlarında bile, oksitlenme daima oluşmakta ve tozlar tamamen bir oksit tabakasıyla kaplanmaktadır [54]. Literatürde bu konuda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Nylund ve Olejford [55], helyum atomize alüminyum tozları üzerinde yapmış oldukları yüzey analizlerinde, yüksek sıcaklıklarda toz yüzeyinde oksitin oluştuğunu bildirmişlerdir. Carney ve ark. [56], gaz atomize tozlarda oksit oluşumunu araştırmış ve bunu üç aşamada ele almıştır:

1. Atomizasyon süresince, parçacıkların kule içinde uçuşarak katılaşmaları esnasında meydana gelen oksitlenme,
2. Atomizasyondan sonra, toz toplama kabında oluşan oksitlenme,
3. Depolama ve taşıma sırasında tozun havayla teması sonucu oluşan oksitlenme.

Oksit tabakası hava gibi nemli gazlarla temas ettiğinde toz yüzeyinde fiziksel ve kimyasal bir sınır olarak su buharı oluşur. Oksit tabakasının birleştirme veya sıcak şekillendirme süresince tamamen kırılmaması veya düzenli bir biçimde dağılmaması mukavemet, süneklik, tokluk ve yorulma dayanımı gibi mekanik özellikleri olumsuz yönde etkiler. Yüzey oksitlerinin kırılması gazdan temizleme işleminin derecesine bağlıdır. Bu işlem tam olarak gerçekleştiğinde, yüzey oksit tabakası tozların birleştirilmesi esnasında tamamen kırılır [18]. Böylece tozlar arasındaki metal bir bağ oluşması imkanı doğar. Ancak, kırılan bu oksitler birleşmiş ürünlerde çoğu zaman bir dizi halinde görülür. Bu durumun çatlak oluşumu ve ilerlemesi gibi sebeplerle, tokluğu olumsuz yönde etkileyeceği düşünülmektedir [57].

3.3. Gaz Atomizasyonunda Kullanılan Nozul Tipleri

Bir atomizasyon ünitesinde nozul, atomizasyon ortamının akışını denetler ve onu istenen özelliklerdeki bir tozu üretmek için sıvı metalle temas ettirip, sıvı metalin parçacıklara ayrılmasını sağlar [43]. Nozul tipi, tozların boyutunu ve şeklini önemli derecede etkiler. Günümüzde kullanılan nozullar patentlidir. Nozullar, dairesel yarıklı veya dairesel delikli olarak üretilirler (Şekil 3.16).

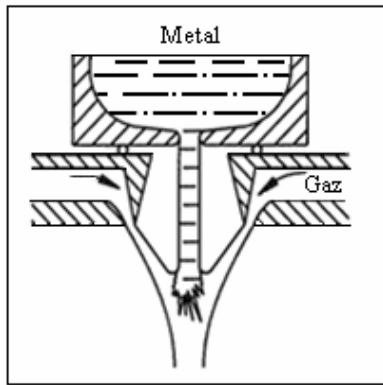


Şekil 3.16. Nozul gaz jeti tipleri [31].

Gaz atomizasyonunda kullanılan nozulları serbest düşmeli ve yakından eşlemeli nozul sistemleri olmak üzere iki grupta sınıflandırabiliriz [44, 58].

3.3.1. Serbest düşmeli nozul sistemi

Serbest düşmeli atomizasyon sistemlerinde sıvı metal, yerçekimi etkisi altında potanın yaklaşık ~50-200 mm aşağısına düştükten sonra dairesel delikli veya dairesel yarıkli gaz jetleri ile atomize edilir [44, 58]. Çarpışma olduğu anda sıvı metal çok küçük damlacıklara ayrılır ve bu damlacıklar uçarken katılaşır. Şekil 3.17’de serbest düşmeli nozul sistemi görülmektedir.



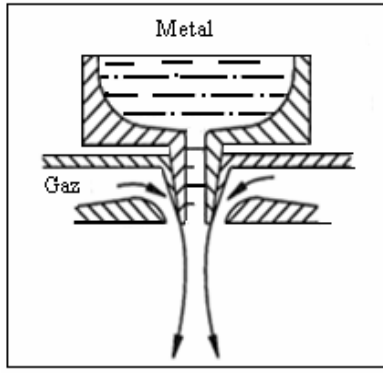
Şekil 3.17. Serbest düşmeli nozul sistemi [31].

Serbest düşmeli nozul ile 5-20 μm aralığında toz üretmek çok aşırı pahalı ve ekonomik olmayan bir yöntem olduğundan pek çok toz üreticisi bu yöntemi tercih etmemiştir. Çünkü, sıvı metali çok ince taneciklere ayırmak için gerekli momentumun, gazdan sıvı metale aktarılmasıyla ilgili problemler mevcuttur. Aşırı gaz hızları ve çok büyük çarpma açıları ise kararsızlıklara yol açar [9].

Yakından eşlemeli nozullarda gaz ile sıvı metalin, akış borusunun hemen uç kısmında kesişmeleri, aşırı gaz hızları ile büyük çarpma açılarının sebep olduğu kararsızlıkları ortadan kaldırmaktadır.

3.3.2. Yakından eşlemeli nozul sistemi

Yakından eşlemeli nozulların hemen hepsi dairesel yarıklı gaz jetleri ile kullanılır. Yakından eşlemeli nozullarda sıvı metal demeti, metal akış borusunun hemen ucunda ince bir tabaka halinde gaz jetleri ile karşılaşarak atomize olur [44, 59]. Ayrıca bu sistemde büyük çarpma açıları kullanılabilir. Şekil 3.18’de yakından eşlemeli nozul sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Yakından eşlemeli nozul sistemi [31].

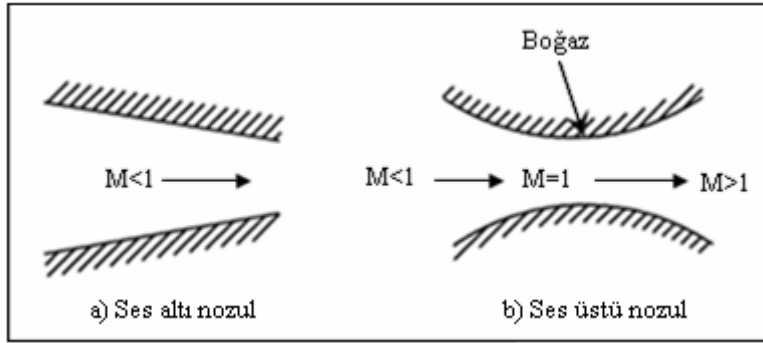
Yakından eşlemeli nozul sistemleri yüksek verimli ve çok ince tozların üretimi için uygundur. Çünkü [9]:

- a) Gaz jeti, akmakta olan sıvı metale çok yakındır. Bu durum maksimum kinetik enerjinin mümkün olan en küçük sıvı metal hacmine aktarılmasına imkan verir.
- b) Gaz jetinin daha büyük açılarında atomizasyon yapılabilmesine imkan verir. Bu durum da daha fazla enerjinin sıvı metale aktarılmasını sağlar.

Yakından eşlemeli nozulların bu avantajlarının yanında, sıvı metal akış borusu ucundaki metalin donması ve daha fazla atomizasyon yapılmasına engel olması dikkate alınması gereken bir husustur. Sıvı metal akış borusu ısıtılarak donmanın oluşumu engellenebilir, ancak bu durum karmaşık tasarım problemlerine yol açabilir.

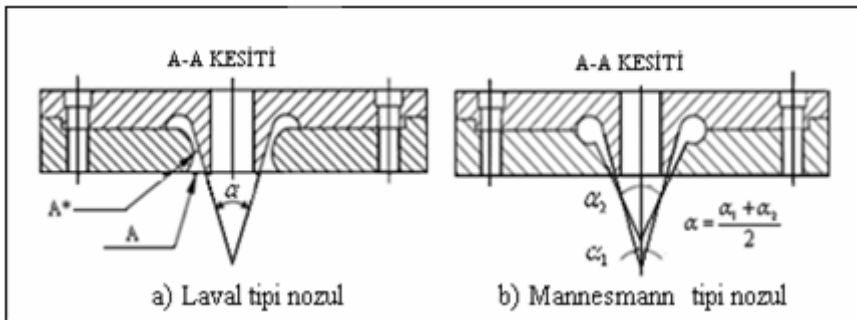
3.3.3. Gaz atomizasyonunda nozul geometrisi

Nozul geometrisi atomizasyon gazının akışını kontrol ettiğinden dolayı, herhangi bir atomizasyon işleminde son derece önemli bir parametredir [44]. Nozul geometrisi, gaz hızını ses hızının altındaki hızlarla sınırlayan daralan tasarım veya ses hızının üstündeki hızlara ulaşmasına imkan veren daralan/genişleyen tasarım şeklinde olabilir [24]. Şekil 3.19’da ses hızının altındaki ve üstündeki akışlar için nozul geometrisi görülmektedir.



Şekil 3.19. Ses hızının altındaki ve üstündeki akışlar için nozul geometrisi [32].

Daralan/genişleyen tasarım Laval nozulu olarak bilinir. Burada en küçük kesit alanı boğazdır ve bu bölgedeki özellikler sonik özellikler olarak adlandırılır. Daralan tasarım ise [24], Mannesmann nozulu olarak adlandırılır. Şekil 3.20’de bu nozul tipleri gösterilmiştir.



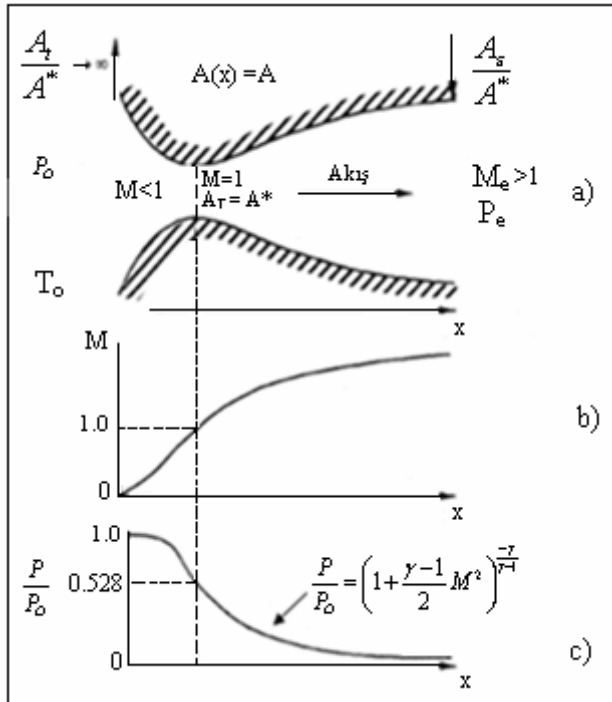
Şekil 3.20. Nozul geometrisi çeşitleri [32].

Akış özellikleri hızın ses altı ve ses üstü olmasına bağlı olarak değişiklikler göstermektedir. Genel olarak $M = 1$ noktası önemlidir. $M < 1$ ses altı akış, $M > 1$ ise ses üstü akış olarak nitelendirilir. Ses altı hızlar için akış yönünde kesit alanı azalmaktadır. $M = 1$ durumunda ise, yani sonik hızda minimum kesit alanı elde edilir. Ses üstü hızda azalan basınçla akış yönünde kesit alanı artmaktadır. Mach sayısı (M), akışkan hızının ses hızına oranıdır ve şu şekilde ifade edilir:

$$M = \frac{V}{c} \quad (3.4)$$

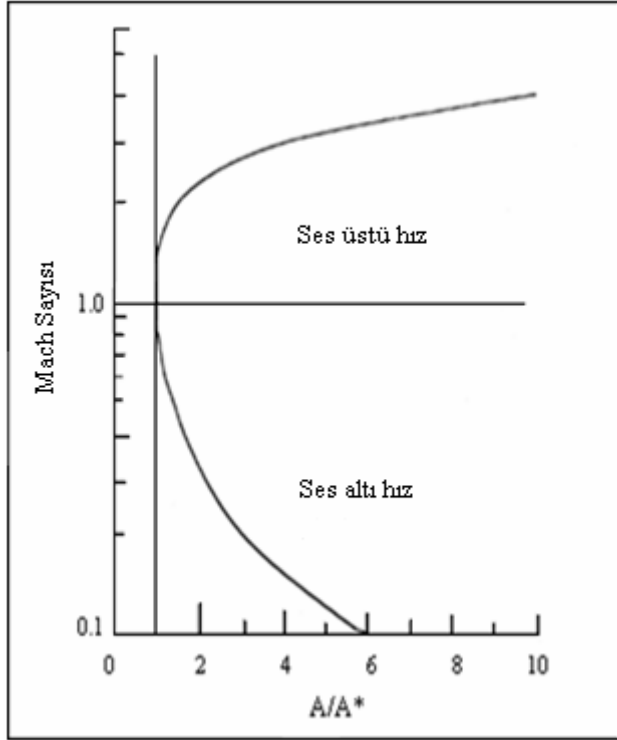
$V = c$ (durgun akış) durgun bölge şartlarını, $V < c$ (ses altı akış) ve $V > c$ (ses üstü akış) akışkanda oluşturulan noktasal etkinin yayılmasını ifade etmektedir.

Şekil 3.21’de Laval nozulunda Mach sayısının ve basıncın nozul boyunca değişimi gösterilmiştir. Buradan ses üstü hızlar için $M > 1$, dolayısıyla $P/P_0 < 0,528$ olması gerektiği görülmektedir.



Şekil 3.21. De Laval nozulunda akış [60].

Şekil 3.22’de verilen, kesit alan oranı ile Mach sayısı arasındaki ilişki, $A/A^* > 1$ için M’nin ses altı ve ses üstü olmak üzere iki değeri olduğunu göstermektedir. Bunlardan biri, nozulun daralan kısmındaki M değeri, diğeri ise aynı kesit alan oranına genişleyen kısımda karşılık gelen noktaya ait M değeridir.

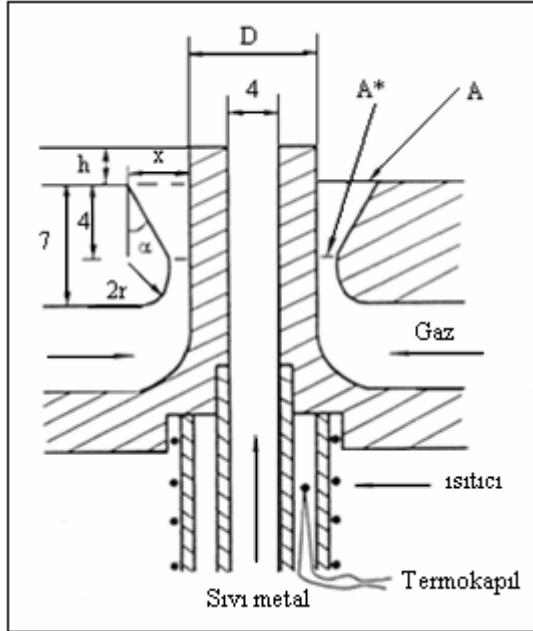


Şekil 3.22. Kesit alan oranı ile Mach sayısı arasındaki ilişki [60].

Literatürde, Ünal [61] tarafından nozul geometrisinin yakından eşlemeli nozullara etkisini araştırmak amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Anılan çalışmada kullanılan ses üstü nozulun şematik resmi Şekil 3.23’te verilmiştir.

Yapılan bu çalışmada metal akış borusu çapı 4 mm olarak sabit tutulmuş ve en kaba tozlar A/A^* oranının 1 olduğu daralan nozulda üretilmiştir. En iyi sonuçlar ise, metal akış borusu dış çapı D’nin 8 mm ve A/A^* oranının 3’e eşit olduğu daralan/genişleyen nozul tasarımında elde edilmiştir. A/A^* ’ın 1,53’ten büyük değerlerinin toz boyutu üzerinde küçük etkileri tespit edilmişken, D’nin daha büyük değerleri ($D=10$ mm ve $D=12$ mm) tozun kabalaşmasına sebep olmuştur. Metal akış

borusunun nozula olan mesafesi h 'nin ise, 3 ve 8 mm olan değerleri 5 mm'ye göre daha kaba tozlar üretmiştir [61].



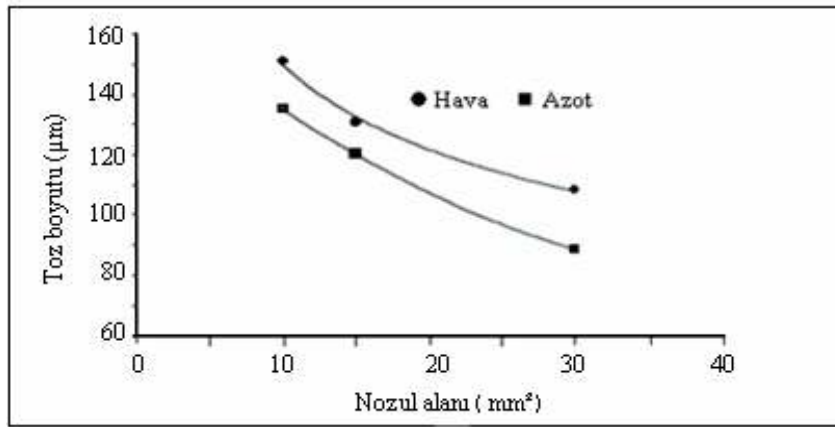
Şekil 3.23. Ünal'a ait yakından eşlemeli daralan/genişleyen nozul tasarımı [61].

Thompson [61], yapmış olduğu çalışmalarda daha geniş nozul dış çapları için ($D=20$ mm) daha geniş aralıklarda ve farklı çıkıntı değerleriyle çalışmış (25 mm'ye kadar) ve ergiyik metalin gaz çıkışında küçük çıkıntı değerleri için tıkanmaya sebep olduğunu; atomizasyon için çıkıntı değerinin minimum 3 mm olması gerektiğini belirtmiştir.

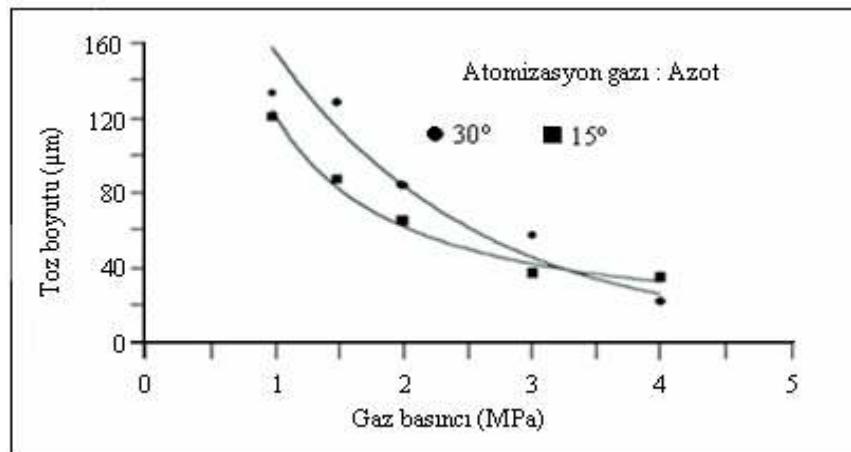
Klar ve Shafer [61], yaptıkları çalışmada $D=12,5$ mm nozul dış çapına ve $h=9,5$ mm sabit çıkıntı uzunluğuna sahip nozul kullanmışlardır. Ancak çıkıntı uzunluğunun etkisinden bahsetmemişlerdir.

Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü T/M Laboratuvarı'nda geliştirilen Gazi Atomizasyon Ünitesi'nde serbest düşmeli sisteme göre tasarlanıp imal edilen "Mannesmann" ve "De Laval" tipi nozullar kullanılarak yapılan çalışmalarda ise nozul parametrelerinin alüminyum tozu üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında, her bir deney için 500 gr alüminyum eritilmiş ve $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye aşırı

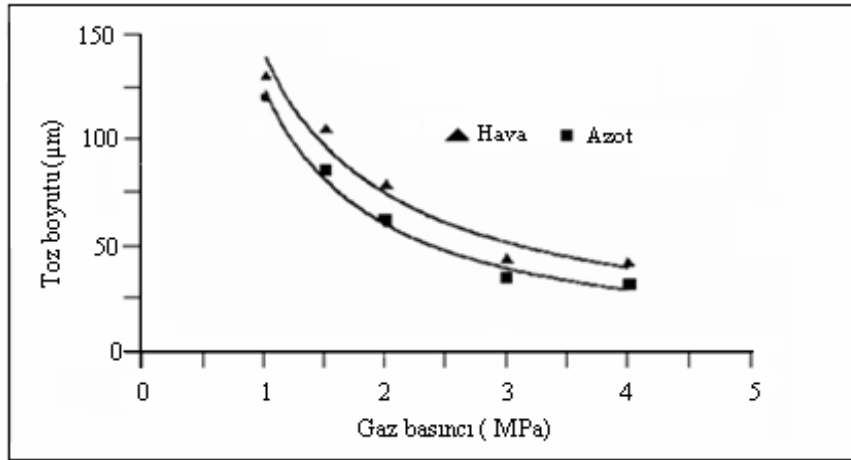
ısıtılmıştır. Atomizasyon gazı olarak, 1,0 - 4,0 MPa arası basınçlarda hava ve azot kullanılmıştır. Farklı sıvı metal debileri ($d = 3$ mm için 0,417 kg/dk) ve ($d = 4$ mm için 0,833 kg/dk), farklı nozul çıkış açıları (15° ve 30°) ve farklı nozul gaz çıkış alanları (10, 15 ve 30 mm^2) kullanılarak birçok deney yapılmıştır [62]. Elde edilen tozlar $290 \mu\text{m}$ 'lik (50 meş) elekten elenerek kaba tozlar ince tozlardan ayrılmış ve bu tozların toz boyutu analizleri yapılmıştır. Bu çalışmaya göre çeşitli parametrelerin toz boyutuna etkileri aşağıdaki grafiklerde gösterilmektedir [32, 62].



Şekil 3.24. Gaz çıkış alanının toz boyutuna etkisi (Gaz basıncı 1,0 MPa, $d = 3$ mm, nozul açısı 15°) [32].



Şekil 3.25. Nozul gaz çıkış açısının toz boyutuna etkisi ($d = 3$ mm, gaz çıkış alanı 15 mm^2) [32].



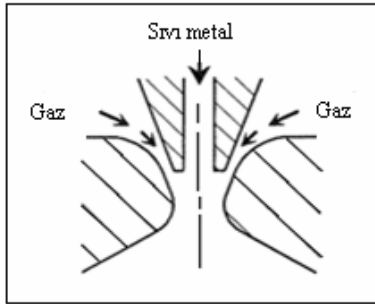
Şekil 3.26. Gaz cinsi ve basıncının toz boyutuna etkisi ($d = 3$ mm, gaz çıkış alanı 15 mm^2 , nozul açısı 15°) [32].

Yapılan bu çalışmanın sonuçlarına göre; gaz basıncı temel bir parametre olmamakla beraber, gazın debisi ve hızını etkilediğinden dolayı tozların inceliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Basınç artışı, sıvı metal üzerine daha yüksek enerji aktarılmasına neden olduğundan daha küçük ortalama toz boyutuna sahip alüminyum tozları üretilmiştir. Şekil 3.24'te görüldüğü gibi gaz çıkış alanının artışı, gaz debisini arttırmış ve daha ince tozların üretilmesini sağlamıştır. Şekil 3.25'te ise nozul gaz çıkış açısının 15° olduğu Mannesmann nozuluyula, 30° açıya sahip nozula göre daha küçük ortalama toz boyutuna sahip tozlar elde edilebileceği görülmektedir [32].

Aydın [10], tarafından nozul boğaz alanı, gaz çıkış alanı ve açısı ve nozul geometrisi gibi temel parametreleri birbirinden farklı daralan/genişleyen geometriye sahip iki farklı Laval tipi nozulun tasarımı ve imalatı yapılmış ve Dumlupınar Atomizasyon Ünitesi'nde yapılan atomizasyon çalışmalarında bu yeni nozul sistemi kullanılarak azot atomize kalay tozu üretilmiştir.

Bu sistemde ilk nozul deneysel çalışmaların yapılabilmesi için imal edilmiştir. İlk nozul tasarlanırken metal akış borusunun konumuna göre gaz çıkış alanının ayarlanabilirliği, yeni nozul tasarımında ise; bunun yanı sıra nozul elemanlarının eş merkezli olması ve nozul geometrisinin değiştirilebilirliği hususları dikkate

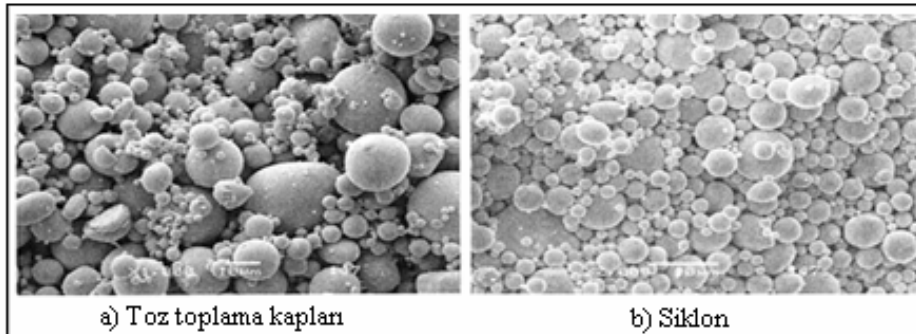
alınmıştır. Atomizasyon çalışmalarının devamında yeni nozul tasarımına ait nozul geometrisinde değişiklik yapılmış ve ikinci bir geometri elde edilmiştir. Şekil 3.27’de bu tasarımlara ait metal akış borusu ve nozul geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 3.27. Tasarımlara ait metal akış borusu ve nozul geometrisi [10].

Yapılan bu çalışma sonucunda üretim parametrelerinin toz boyutuna etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Elde edilen bazı sonuçlara göre:

- a) Metal akış borusunun konumuna göre gaz çıkış alanının küçülmesiyle geri basınç oluşumu önlenmektedir.
- b) Atomizasyon gaz basıncındaki artışlar, ortalama toz boyutunu küçültmüştür. En küçük tozlar 1,47 MPa gaz basıncında üretilmiş ve ortalama toz boyutu (d_{50}) 12,63 μm olarak ölçülmüştür (Şekil 3.28).



Şekil 3.28. 1,47 MPa gaz basıncında üretilmiş azot atomize tozların genel görüntüsü [10].

c) Gaz/metal debisi oranının artmasıyla tozlar küçülmüş ve en küçük tozlar 2,01 kütleli debi oranıyla elde edilmiştir.

d) Azot ile yapılan atomizasyon çalışmaları küresel şekilli kalay tozları üretilmiştir. Detayda ise küçük boyutlu tozlarda ($d < 10 \mu\text{m}$) düzgün ve pürüzsüz toz yüzeyleri, iri tozlarda ise ($d \approx 20 \mu\text{m}$) hücreli yüzey yapısı gözlenmiştir.

3.3.4. Nozul tasarımında temel parametreler

Nozul tasarımında temel basamaklardan birisi $M = 1$ olacak şekilde boğaz kısmını boyutlandırmaktır. Mach sayısının “1” olduğu kesit boğaz olarak adlandırılan en dar kısımdır. Boğaz alanı, verilen bir debi için durgunluk şartları (P_o , T_o , q_o) ve akışkan özelliklerine göre belirlenir. Bir ideal gazın izentropik akışında Mach sayısına ve durgunluk koşullarına bağlı olarak aşağıdaki denklemler yazılır:

$$\frac{T}{T_o} = \frac{1}{1 + [(k-1)/2]M^2} \quad (3.5)$$

$$\frac{P}{P_o} = \frac{1}{[1 + [(k-1)/2]M^2]^{k/(k-1)}} \quad (3.6)$$

$$\frac{q}{q_o} = \frac{1}{[1 + [(k-1)/2]M^2]^{k/(k-1)}} \quad (3.7)$$

Bu denklemler gerektiğinde izentropik olmayan akışlarda Mach sayısına göre gerçek durgunluk değerlerinin belirlenmesinde kullanılır [63]. Boğaz boyutlandırıldıktan sonra nozul tasarımında önemli bir nokta da kesit alan oranlarının belirlenmesidir. A^* , boğaz alanını temsil etmek üzere kesit alan oranları için:

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left[\frac{2}{k+1} \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{(k+1)}{2(k-1)}} \quad (3.8)$$

bağıntısı yazılır. Bu bağıntı kullanılarak çıkış basıncı ve Mach sayısı tayin edilir. Tasarım esnasında çıkış basıncı yaklaşık olarak atmosfer basıncına eşit alınır. Durgunluk şartları, çıkış basıncı ve debisi için farklı akış geometrisine sahip, çok sayıda tasarım yapılabilir.

3.3.5. Nozul gaz akışı

Nozulda akış ve boğaz koşullarını sınırlayan parametreler durgun bölge özellikleridir. Bir başka ifadeyle, akış özellikleri Mach sayısına ve durgunluk koşullarına bağlı olarak değişiklikler göstermektedir.

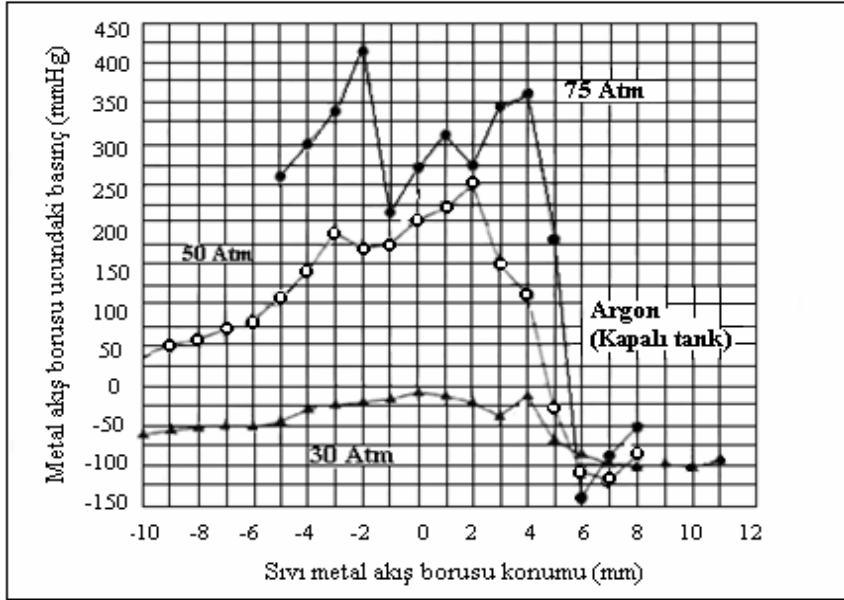
Metal akış borusu ucundaki basıncın etkileri

Bazı basınçlarda metal akış borusu ucunda geri basınç oluşur ve sıvı metal akışını yavaşlatır. Bazı durumlarda ise metal akışı tamamen durur [32]. Birçok araştırmacı sıvı metal akış borusu ucundaki basınç oluşumunun, metal akış borusunun geometrisine ve nozul konumuna bağlı olduğunu bildirmiştir [59].

Literatürde bu konuda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Baram [64], yapmış olduğu çalışmada metal akış borusu ucundaki basınç değişimlerini incelemiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan geri basınç ölçümleri, gaz akışının büyük ölçüde nozul tasarımına, metal akış borusunun geometrisine ve gaz basıncına bağlı olduğunu göstermiş ve geri basınç oluşumundan kaçınılabilmesi için metal akış borusunun gaz çıkışına göre konumunun çok önemli bir parametre olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 3.29).

Buna göre 30 atmosferin altındaki basınçlarda, metal akış borusunun hiçbir konumunda geri basınç oluşumu meydana gelmemekte, bu değer üstündeki basınçlarda ise, metal akış borusunun gaz çıkışına göre inme mesafesinin 6 mm'den daha az olması durumunda geri basınç kaçınılmaz olmaktadır [64]. Dolayısıyla

metal akış borusu ucunda oluşan negatif basınç (emme basıncı) yararlı bir özellik olup [65], daha ince tozların üretimine katkı sağlar [9].



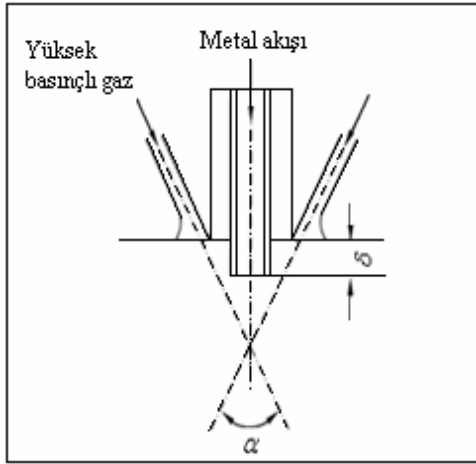
Şekil 3.29. Gaz basıncının bir fonksiyonu olarak metal akış borusu ucundaki basıncın, borunun konumuyla değişimi [64].

Cui ve ark [66], daralan/genişleyen (Laval) geometriye sahip atomizasyon sisteminde metal akış borusu ucundaki basınç değişimlerini incelemişlerdir. Şekil 3.30'da görülen laval nozulunda gaz jeti basıncı (P_b) ve geri basınca (P_E) bağlı olarak, farklı akışlar gözlemlenmiştir.

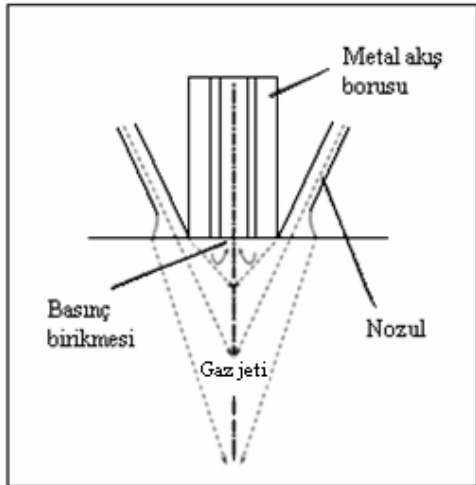
Cui ve ark. [66], Laval tipi nozul sisteminde yaptıkları çalışma ile şu sonuçları elde etmişlerdir:

1. $P_E \leq P_b$ olması durumunda gaz jeti genişler ve nozuldan akar. Gaz parçacıkları radyal olarak ivmelenir.
2. Atomizasyon gaz basıncı $P = 0,19$ MPa'dan yüksek olduğunda nozul çıkışındaki gaz jeti basıncı, geri basınç (1 atm) değerine ulaşır.

3. Metal akış borusunun nozul ile aynı düzlemde olması durumunda, nozul çıkışında gaz genişmesi meydana gelir. Gaz basıncı ne kadar büyükse, jet genişmesi de o kadar yoğundur. Bu durum, metal akış borusu ucunda Şekil 3.31’de görüldüğü gibi basınç birikmesine sebep olur. Eğer boru belli bir uzunlukta çıkıntı yaparsa, gaz jeti akış borusunun üstüne çarptıktan sonra sapacak ve metal akış borusu üstündeki bölgede jet genişlemesinin etkisi azalacaktır.

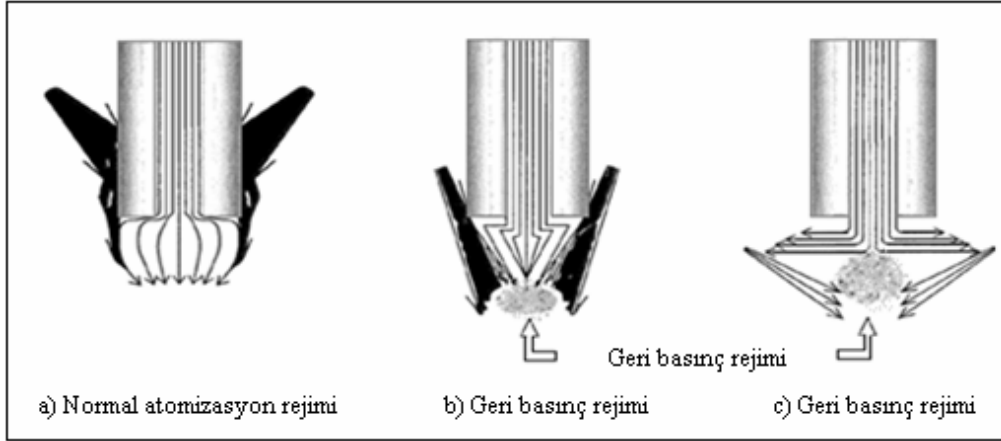


Şekil 3.30. Laval tipi nozulda gaz akışı [66].



Şekil 3.31. Nozul çıkışında basınç birikmesi oluşumu [66].

Chen ve ark. [67], atomizasyon gaz jetlerinin metal akış borusu çeperlerine temas edip, akış borusu boyunca akmasıyla akış borusu ucunda, serbest düşmeli atomizasyon modelindeki hızından daha yüksek atomizasyon hızlarını oluşturan sıvı metal akışının meydana geldiğini tespit etmişlerdir (Şekil 3.32).



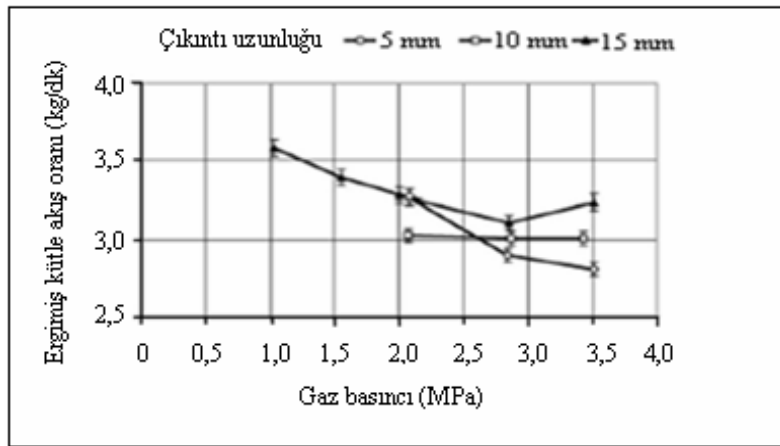
Şekil 3.32. Metal akış borusu ile gaz jetleri arasındaki atomizasyon rejimleri [67].

Ünal [68], Dumlupınar gaz atomizasyon ünitesinde yapmış olduğu çalışmada tasarlamış olduğu yakından eşlemeli ses üstü nozul sistemini kullanarak kalay tozu üretimini gerçekleştirmiş ve değişik çıkıntı uzunlukları için (5, 10, 15 mm) sıvı metal akış borusu ucunda meydana gelen basınç değişimlerini araştırmıştır. Bu çalışmada atomizasyon gazı olarak azot kullanılmış ve 1-3,5 MPa arası basınçlarda, 3 mm iç çapa sahip sıvı metal akış borusu kullanarak çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Şekil 3.33 ve Şekil 3.34'te bu çalışma sonucunda elde edilen grafikler görülmektedir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre :

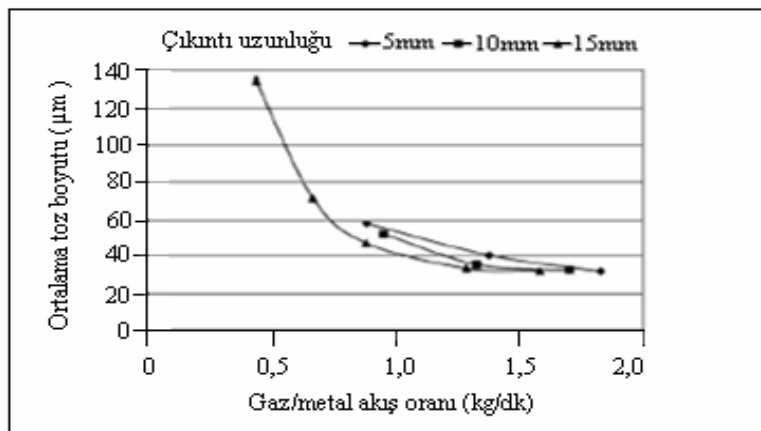
a) 5 ve 15 mm çıkıntı uzunluğunda ve 1-3,5 MPa gaz basıncında sıvı metal akış borusu ucunda daima negatif bir basınç olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, 10 mm çıkıntı uzunluğunda ve 1-2 MPa arası basınçlarda sıvı metal akış borusu uç basıncının negatif ve pozitif değerler arasında sürekli değişim gösterdiği sonucuna varılmıştır.

b) Atomizasyon işlemi 15 mm çıkıntı uzunluğu için, 5 mm ve 10 mm çıkıntı uzunluklarına göre daha durgundur. Bunun nedeni, 15 mm çıkıntı uzunluğunda sıvı metal akış borusu ucunda daima negatif basıncın oluşmasıdır.

c) Atomizasyon gazı basıncı arttıkça, ergimiş kütle akış oranı azalmaktadır. Bundan dolayı gaz/metal debisi oranı aynı çıkıntı uzunluklarında artmaktadır ve bu orandaki artış daha ince tozların üretilmesini sağlamaktadır [68]. Ayrıca gaz jetleri ses üstü hızlara ulaşmıştır.



Şekil 3.33. Gaz basıncının bir fonksiyonu olarak farklı çıkıntı uzunlukları için ergimiş kütle akış oranı [68].



Şekil 3.34. Gaz /metal akış oranının toz boyutuna etkisi [68].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, gaz atomizasyonu yöntemi ile hava atomize kalay tozu üretimi gerçekleştirilerek üretim parametrelerinin toz özelliklerine etkileri, lazerli toz boyutu ölçme ve taramalı elektron mikroskop (SEM) çalışmaları ile araştırılmıştır.

Atomize kalay tozu üretimi, Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Toz Metalurjisi Laboratuvarı'nda geliştirilen Gazi Gaz Atomizasyon Ünitesi'nde gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda öncelikle Gazi Gaz Atomizasyon Ünitesi'nin, nozul ve ergitme bölümlerine ait eksiklikler giderilmiştir. Yapılan çalışmalar süresince yakından eşlemeli Mannesmann tipi nozul kullanılmış; ergitme potası ile ara bağlantı elemanlarının tasarımı ve imalatı yeniden yapılmış ve bütün gaz bağlantıları tamamlanarak atomizasyon sistemi çalışır hale getirilmiştir.

4.1. Gaz Atomizasyon Ünitesi

Resim 4.1'de gösterilen ve EK-1'de şematik resmi verilen Gazi Gaz Atomizasyon Ünitesi beş ana bölümden meydana gelmektedir:

1. Gaz sistemi
2. Isıtma ve ergitme
3. Atomizasyon kulesi
4. Toz tutma bölümü
5. Nozul



Resim 4.1. Gazi Gaz Atomizasyon Ünitesi

4.1.1. Gaz sistemi

Gaz sisteminin amacı; atomizasyon için gerekli olan basınçlı gazı üniteye verebilmektir. Bu amaçla, paralel bağlanmış 150 bar işletme basıncına sahip 6 adet yüksek basınçlı tüp kullanılmış; tüplerin birbirleriyle ve atomizasyon kulesiyle olan bütün gaz bağlantıları tamamlanmıştır (Resim 4.2a). Ayrıca basınç ayar vanası ile kontrol edilen atomizasyon gazı basıncı, vananın giriş ve çıkış tarafına yerleştirilmiş olan manometrelerden okunabilmektedir (Resim 4.2b).



Resim 4.2. Gaz sisteminde kullanılan ekipmanlar
a) Yüksek basınçlı tüpler b) Basınç ayar vanası

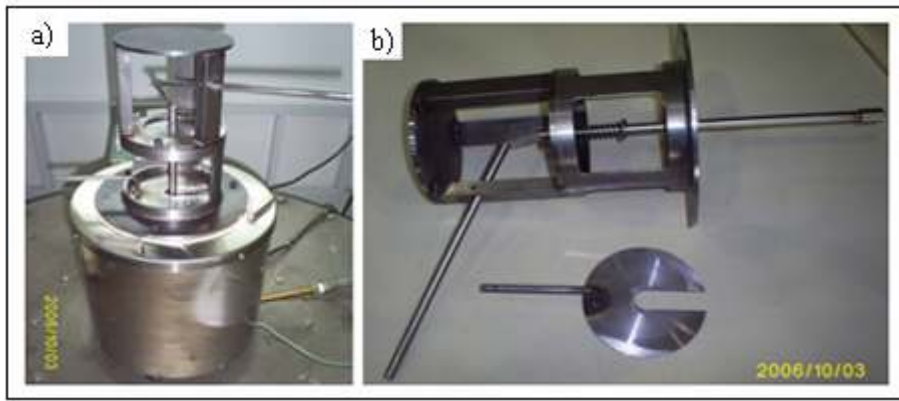
Yapılan deneylerde atomizasyon gazı olarak hava kullanılmıştır. Tüplerin havayla doldurulabilmesi için, 100 lt/dk'lık bir debiyle 225 bar basınca kadar tüplere hava sıkıştırabilme kapasitesine sahip Bauer marka kompresör kullanılmıştır (Resim 4.3).



Resim 4.3. Bauer kompresör

4.1.2. Isıtma ve ergitme

Ergitme işlemi, atomizasyon kulesi üzerindeki fırın içerisine yerleştirilmiş olan paslanmaz çelik potada (EK-3) gerçekleştirilmiştir. Ergitilmiş metalin, pota içerisine daldırılan termokapıl vasıtasıyla ölçülen sıcaklığının denetimi sayısal bir sıcaklık ölçme ve kontrol cihazı ile yapılmıştır. Metal akışını kontrol edebilmek için potanın içerisine el ile kontrol edilen açma-kapama çubuğu yerleştirilmiştir (EK-5 ve EK-6). Bu çubuk, bir yay ile kuvvet uygulayarak sızdırmazlık sağlamaktadır (Resim 4.4b).



Resim 4.4. Isıtma ve ergitme sistemi

a) Ergitme fırını b) Açma-kapama çubuğu

4.1.3. Atomizasyon kulesi

Atomizasyon kulesi, sıvı metalin basınçlı gaz ile kesişip atomize edildiği ve sonra da katılaşıp toz haline geldiği kapalı ortama denilmektedir.

Atomizasyon kulesinin boyutlarını katılaşma süresi belirler. Dolayısıyla atomizasyon ünitelerinin tasarımında, sıvı damlacığının katılaşmadan önce kule içinde hangi mesafeye ulaşacağını bilmek gerekir. Eğer kule boyutları gereğinden küçük ise, damlacıklar kule çeperlerine yapışacak, boyutların gereğinden büyük olması durumunda ise, maliyeti aşırı bir şekilde artacaktır [32]. Atomizasyon kulesinin paslanmaz çelikten olması, sistemin temizliği açısından önemlidir. Aksi durumda,

sistemden uzaklaştırılamayan gazla oluşabilecek kirlilikler sıvı metal damlacıkları ile tepkimeye girebilir [32].

Gazi Gaz Atomizasyon Ünitesi'ne ait atomizasyon kulesi; paslanmaz çelikten imal edilmiş ve iç yüzeyleri sistem temizliği açısından parlatılmıştır. Kule çapı ve yüksekliği damlacıkların katılaşmalarına imkan sağlayacak ölçülerdedir. Kulenin tabanı altı kapalı koni şeklindedir ve iri tozlar bu kısımda toplanmaktadır. Atomizasyonda kullanılan gazın kule dışına tahliye edilmesi ve ince tozların tutulması için siklon kullanılmıştır. Ayrıca gaz atomizasyon çalışmalarını izlemek için kulenin çevresine gözetleme pencereleri yerleştirilmiştir.

4.1.4. Siklon

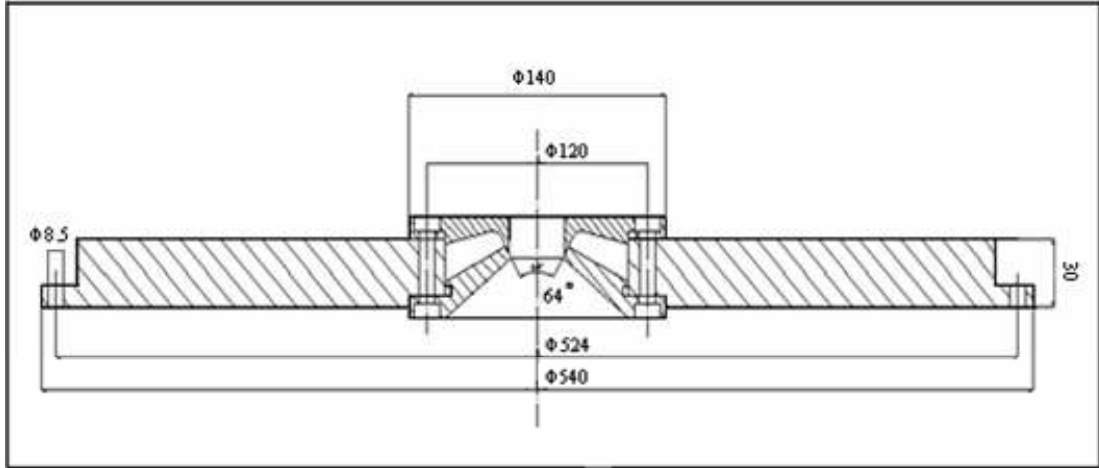
Gaz atomizasyonunda üretilen tozların temizliği ve bu tozların tutulması önemlidir. Atomizasyon işleminden sonra taşıyıcı gazdan metal tozlarını ayırmak için siklon kullanılır (Resim 4.5). Standart siklon tasarımlarında toz tutma veriminin veya gaz geçiş debisinin yüksek olması istenir. Siklon tasarımı, atomizasyon gazı içinden 5 μm 'dan daha küçük çapa sahip tozları yüksek bir verimle ayırmak üzere optimize edilebilir [69].



Resim 4.5. Siklon

4.1.5. Nozul

Çalışmalarımızda yakından eşlemeli “Mannesmann” tipi nozul kullanılmıştır (Şekil 4.1). Kullanılan bu nozula ait büyüklükler ise Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Mannesmann tipi nozul

Çizelge 4.1. Mannesmann tipi nozula ait büyüklükler

Nozul tipi	Nozul gaz çıkış açısı α (°)	Nozul gaz çıkış alanı (mm ²)
Mannesmann	64	28,9

Kullanılan nozul ile birlikte ergimiş metal akışını sağlamak amacıyla pota-akış memesi-çıkıntı aparatları tasarımları imal edilmiş ve nozul ile olan bağlantıları sağlanmıştır (Resim 4.6). Akış memesi içine delik çapları sırasıyla 3 mm ve 4 mm olan iki ayrı seramik akış borusu yerleştirilmiştir. Her bir çıkıntı aparatı için (Resim 4.7 ve EK-2) farklı basınçlarda ve farklı metal akış borusu çaplarında ayrı ayrı deneyler yapılmıştır.



Resim 4.6. Akış memesi-çıkıntı aparatı - nozul bağlantısı



Resim 4.7. Deneylerde kullanılan çıkıntı aparatları
($h=2$ mm ve $h=6$ mm)

4.2. Atomizasyon Çalışmaları

Gazi Gaz Atomizasyon Ünitesi'nde yaptığımız çalışmalar boyunca yakından eşlemeli Mannesmann tipi nozul sistemi kullanılarak hava atomize kalay tozu üretimi gerçekleştirilmiştir.

Atomizasyon çalışmaları sırasında sıvı kalay, ergime sıcaklığının üzerine ($400\text{ }^{\circ}\text{C}$) aşırı ısıtılmıştır. Ancak, yakından eşlemeli sistemlerde sıvı metal akış borusunun da ısıtılması büyük önem taşımaktadır. Metal akış borusunun iyi ısıtılamaması halinde ergimiş metalin, metal akış borusu ucunda sıcaklığı düşecek ve bu durum sıvı metal debisinin düşmesine neden olacaktır. Bazı durumlarda ise, yüksek basınçlarda oluşan geri basıncın etkisiyle ergimiş metalin, akış borusu ucunda donması ve akış borusunu

tıkaması kolaylaşacaktır. Bu amaçla; yaptığımız çalışmalar sırasında akış memesi (EK-4) içine yerleştirilmiş olan seramik akış borusunun etrefina direnç teli sarılmış ve üzeri şamot (tuğla çamuru) ile sıvanarak yalıtım sağlanmıştır. Daha sonra akış memesinin bir tarafına açılmış olan kanal yardımı ile direnç telinin uçları, direnç tellerinde meydana gelen kopmaların engellenmesi ve sürekli bir ısıtma sağlanabilmesi için voltaj değiştiriciye (varyak) bağlanmıştır (Resim 4.8).



Resim 4.8. Varyak (voltaj değiştirici)

Ergimiş metalin sıcaklığı 300 °C'ye ulaştığında seramik boru üzerine sarılmış direnç telinden geçen voltaj 10 Volt'a kadar arttırılmış ve ergimiş metal bu şartlar altında atomize edilmiştir.

Atomizasyon çalışmaları sırasında gerçekleştirdiğimiz işlemler aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

1. Öncelikle akış memesi ve çıkıntı aparatı bağlantısı gerçekleştirilmiş daha sonra bu aparatların nozul ile olan bağlantısı sağlanmıştır.
2. Pota fırın içerisine yerleştirilmiştir.
3. Pota - akış memesi bağlantısının sağlanabilmesi için fırının alt kısmından bir delik açılmıştır. İçerisinde pota bulunan fırın, akış memesi üzerine oturtularak gerekli bağlantı gerçekleştirilmiştir (EK-7).

4. Açma - kapama çubuğu sızdırmazlık sağlayacak şekilde ayarlanarak fırın içindeki potanın merkezine monte edilmiştir.

5. Ergitme fırını içindeki potaya, her bir deney için yaklaşık 400 gr kalay konularak fırın çalıştırılmış ve kalay 400 °C'ye aşırı ısıtılmıştır. Ergimiş kalayın sıcaklığı pota içerisine daldırılan termokapıl vasıtasıyla ölçülmüştür.

6. Kalayın ergimeye başlamasıyla birlikte sıvı metal akış borusu da direnç telleri vasıtasıyla ısıtmaya başlanmıştır.

7. Atomizasyon gaz basıncı, basınç ayar vanası ile istenilen basınç değerlerine ayarlanmış ve nozula gaz gönderilmiştir.

8. Açma-kapama çubuğunun yukarı doğru kaldırılmasıyla ergimiş kalayın akması ve gaz jeti ile parçalanması sağlanmıştır. Metal akışının sona ermesiyle gaz akışı durdurulmuş ve atomizasyon işlemi tamamlanmıştır.

9. Atomizasyon kulesi bağlantı noktalarından sökülerek, toz toplama kabında ve siklonda biriken tozlar alınmıştır. Tozlar 250 µm'lik (60 meş) elekten elenerek, elek altı tozlar ayrılmış ve kilitli poşetler içinde muhafaza edilmiştir.

10. Toz toplama kabı, siklon ve kule iç yüzeyine yapışan tozlar bezle silinerek bir sonraki deney için ünite temizlenmiştir. Ünitenin montajı tekrar yapılarak yeni bir deney için yukarıda sıralanan işlemler tekrar edilmiştir.

Çalışmalarımızda farklı basınçlar ve farklı çıkıntı uzunlukları kullanılarak deneyler yapılmıştır. Atomizasyon gazı olarak hava kullanılmış ve sıvı metal 400 °C'ye aşırı ısıtılmıştır. Yakından eşlemeli Mannesmann tipi nozul ile yapılan her bir deneydeki atomizasyon değişkenlerine ait bilgiler Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Mannesmann tipi nozul için atomizasyon değişkenleri

Deney no	Gaz basıncı (bar)	Sıvı metal akış borusu çapı d (mm)	Çıkıntı uzunluğu h (mm)
1	5	3	8
2	10	3	8
3	5	3	6
4	5	4	6
5	10	4	6
6	20	4	6
7	30	4	6
8	5	4	4
9	10	4	4
10	20	4	4
11	5	4	2
12	10	4	2
13	20	4	2

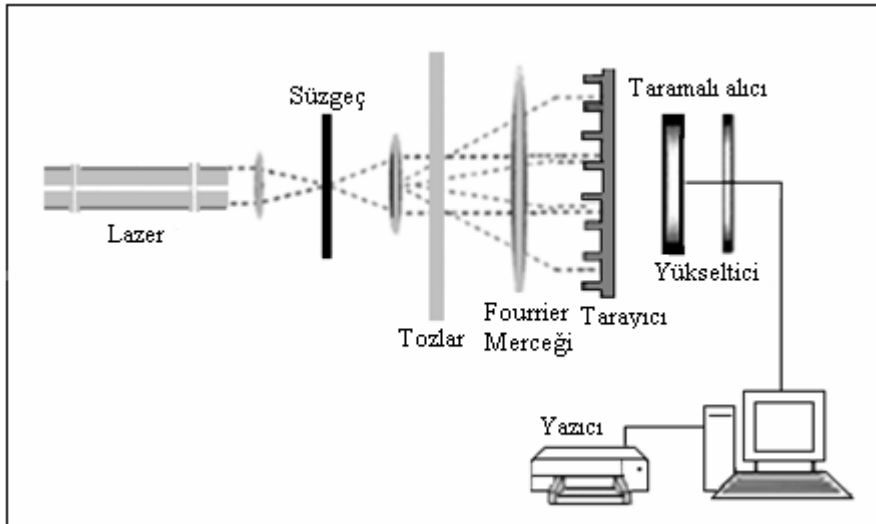
4.3. Toz Boyutu Analizi

Atomize edilip 250 μm 'lik (60 meş) eleklerle elendikten sonra elde edilen elek altı kalay tozlarının boyut analizi, Resim 4.9'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.



Resim 4.9. Malvern Mastersizer E parçacık boyutu ölçme cihazı

Malvern Mastersizer E lazerle boyut ölçme cihazı 0,1-600 μm arasındaki toz boyutlarını ölçebilmektedir ve 45 μm 'den küçük boyutlarda elek analizine güvenilmemesi nedeniyle yaptığımız çalışmalarda büyük kolaylık sağlamıştır. Boyut ölçümü, genellikle 300 mm odaklama uzunluğuna sahip merceklerle yapılmıştır. Bu teknikte toz şekli küresel kabul edilir. Tozların topaklanmasının algılanması zordur ancak, uygun bir taşıyıcı ortam kullanılarak veya ultrasonik titreştirici yardımıyla topaklanma en aza indirilebilir.



Şekil 4.2. Lazer ışını teorisinin şematik resmi [10].

4.4. Tozların Şekil ve Yüzey Morfolojilerinin Tespiti

Üretilen hava atomize kalay tozlarının şekilleri ve yüzey morfolojileri ile ilgili çalışmalar, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak yapılmıştır.

SEM’de yapılan morfolojik çalışmalar için tozlar, iki tarafı yapışkanlı bant yapıştırılmış olan tutucuya dökülmüş ve altın ile kaplanmıştır. Daha sonra SEM ile incelemeleri yapılarak tozların fotoğrafları çekilmiştir.

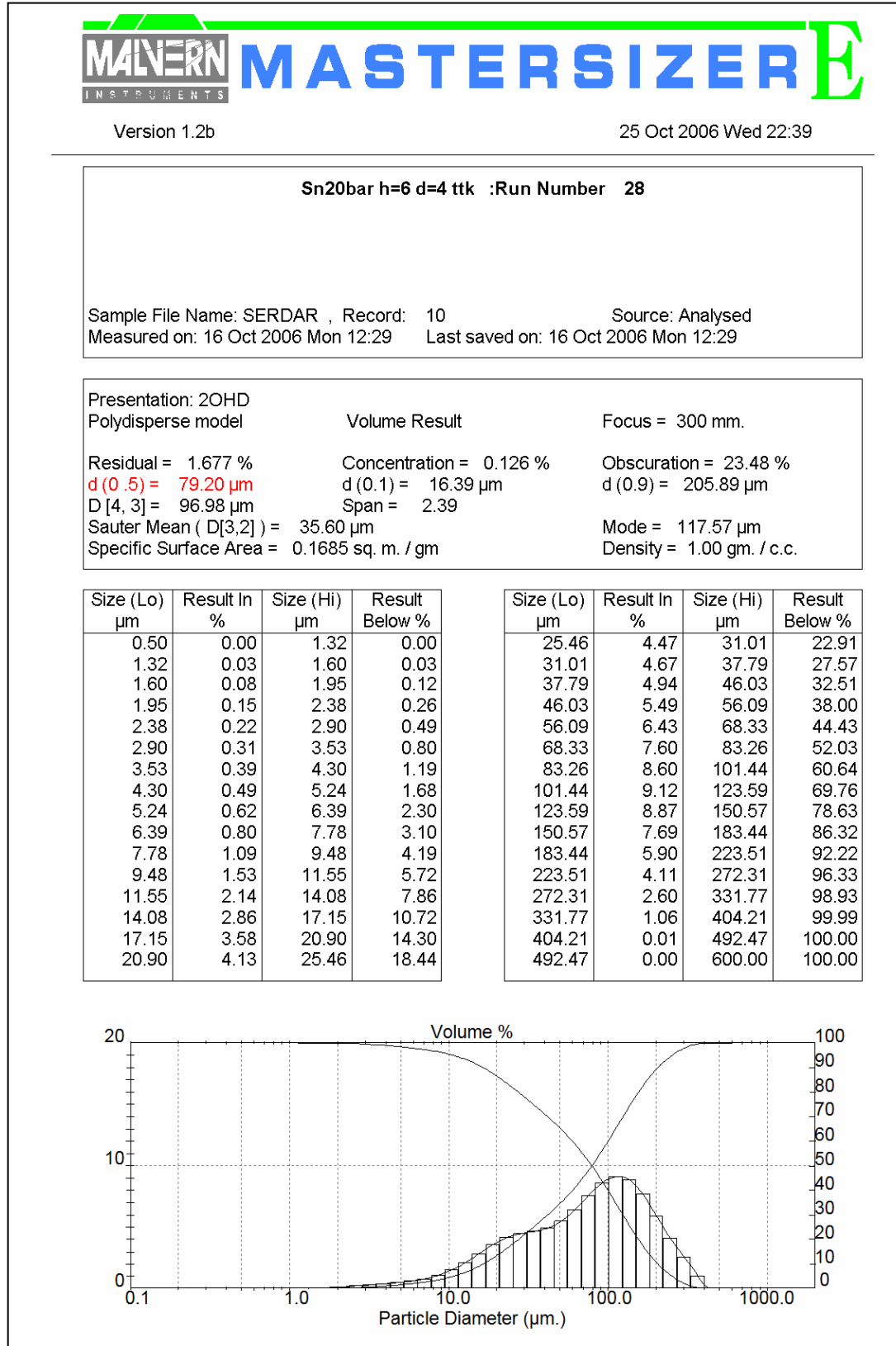
5. DENEYSEL NETİCELER

Bu bölümde, atomizasyon değişkenlerinden gaz basıncı ve çıkıntı uzunluğunun tozların boyut ve dağılımına, şekil ve yüzey morfolojisine olan etkileri ele alınmıştır.

5.1. Toz boyutu ve Dağılımı

Malvern Mastersizer E lazerli boyut analizi cihazından elde edilen analiz raporlarına ait örnekler, Deney-6 için Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Analiz raporunda, d_{50} şeklinde ifade edilen ortalama boyut $d(0,5)$, tozların %10’unun kendisinden küçük olduğu toz boyutu $d(0,1)$, tozların %90’ının kendisinden küçük olduğu toz boyutu $d(0,9)$, Sauter ortalama çapı $D[3,2]$ ve hacim ortalama çapı $D[4,3]$ olarak görülmektedir. Raporda istatistiki bilgilerin verildiği tabloda 2. sütun, 1. ve 3. sütunlarda verilen toz boyutları aralığındaki toz yüzdesi, 4. sütun ise 3. sütundaki toz boyutları için toplam yüzdedir.

Tabloda verilen bu bilgiler, yine raporda yer alan grafik üzerinde toplam yüzde eğrileri, frekans eğrisi ve histogram ile gösterilmiştir. Grafikte yatay eksen toz boyutunu, sağ düşey eksen toplam toz yüzdesini, sol düşey eksen ise histogram da görülen toz boyutu aralıklarındaki toz yüzdesini ifade etmektedir. Bütün bu değerleri Şekil 5.1’deki analiz raporundan örnekleyecek olursak; $7,78\ \mu\text{m}$ ile $9,48\ \mu\text{m}$ arasında var olan toz yüzdesinin % 1.09 olduğu ve tozların % 4,19’unun $9,48\ \mu\text{m}$ ’ dan küçük olduğu görülmektedir.



Şekil 5.1. Malvern Mastersizer E toz boyutu analiz raporu (Deney 6 - toz top. kabı)

MALVERN MASTERSIZER E

Version 1.2b

14 Nov 2006 Tue 17:13

Sn20bar h=6 d=4 sklu :Run Number 68

Sample File Name: SERDAR , Record: 26 Source: Analysed
 Measured on: 16 Oct 2006 Mon 13:22 Last saved on: 16 Oct 2006 Mon 13:22

Presentation: 2OHD
 Polydisperse model

Volume Result

Focus = 300 mm.

Residual = 0.211 %

Concentration = 0.071 %

Obscuration = 39.56 %

d (0.5) = 14.73 µm

d (0.1) = 5.72 µm

d (0.9) = 33.65 µm

D [4, 3] = 19.68 µm

Span = 1.90

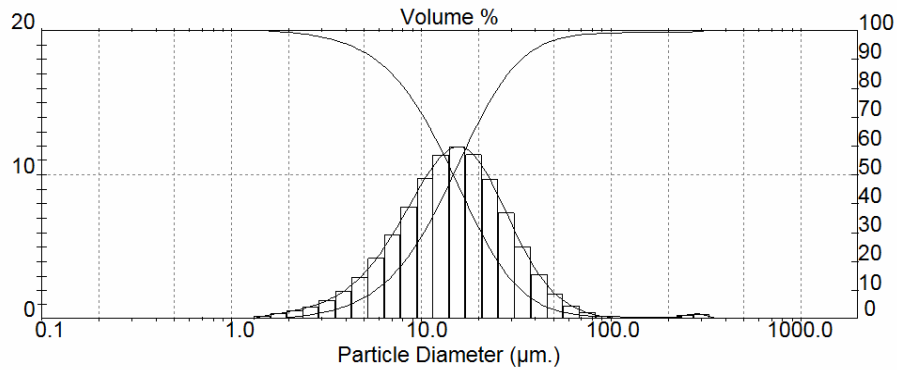
Sauter Mean (D[3,2]) = 10.92 µm

Mode = 15.67 µm

Specific Surface Area = 0.5496 sq. m. / gm

Density = 1.00 gm. / c.c.

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %	Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	0.01	1.32	0.01	25.46	7.36	31.01	87.65
1.32	0.21	1.60	0.22	31.01	5.02	37.79	92.67
1.60	0.40	1.95	0.62	37.79	3.09	46.03	95.76
1.95	0.62	2.38	1.24	46.03	1.76	56.09	97.52
2.38	0.90	2.90	2.14	56.09	0.93	68.33	98.45
2.90	1.32	3.53	3.45	68.33	0.46	83.26	98.91
3.53	1.96	4.30	5.41	83.26	0.19	101.44	99.10
4.30	2.90	5.24	8.31	101.44	0.08	123.59	99.18
5.24	4.20	6.39	12.52	123.59	0.03	150.57	99.20
6.39	5.88	7.78	18.39	150.57	0.04	183.44	99.25
7.78	7.80	9.48	26.19	183.44	0.08	223.51	99.32
9.48	9.76	11.55	35.95	223.51	0.27	272.31	99.60
11.55	11.34	14.08	47.29	272.31	0.35	331.77	99.95
14.08	11.96	17.15	59.24	331.77	0.05	404.21	100.00
17.15	11.38	20.90	70.63	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	9.66	25.46	80.29	492.47	0.00	600.00	100.00



Şekil 5.2. Malvern Mastersizer E toz boyutu analiz raporu (Deney 6 – Siklon)

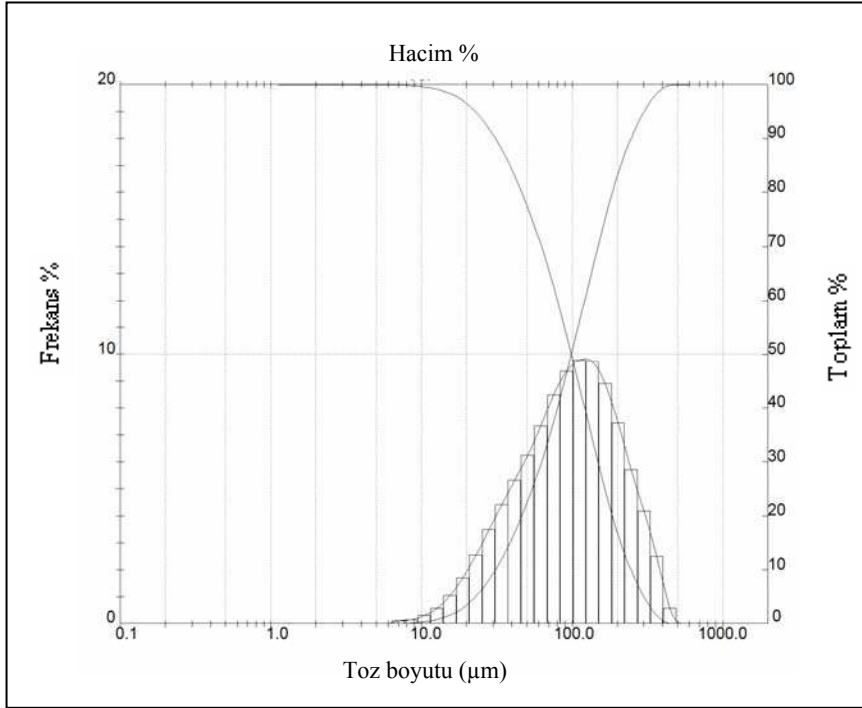
Farklı atomizasyon değişkenleriyle üretilen tozların, boyut analizleri sonucunda elde edilen toz boyutları ile ilgili değerler Çizelge 5.1’de görülmektedir. Ayrıca üretilen tozlara ait toz boyutu dağılımı ve toplam % eğrilerine ait örnekler ise Şekil 5.3 - 5.11’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Yapılan deneylerde elde edilen toz boyutlarıyla ilgili değerler

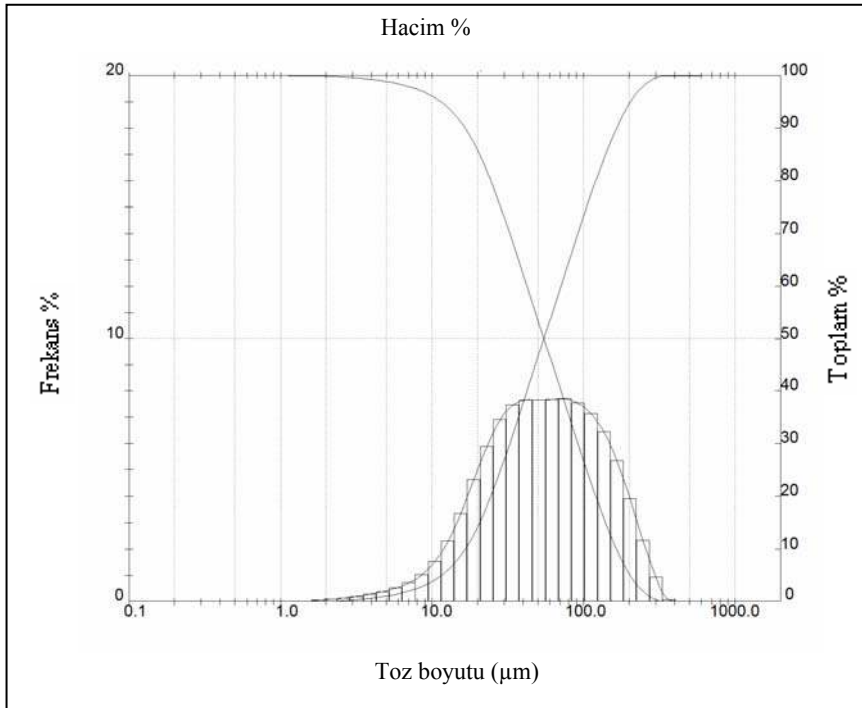
Deney no	d_{50} (μm)	d_{vs} (μm)	d_{vm} (μm)	d_{10} (μm)	d_{90} (μm)
1	132,03	91,19	184,54	42,94	466,11
2	68,50	48,08	129,29	22,06	458,75
3	113,79	68,98	198,20	30,77	537,87
4	99,03	66,10	121,13	30,98	246
5	96,71	50,57	189,21	22,19	544,60
6	79,20	35,60	96,98	16,39	205,89
7	----	----	----	----	----
8	105,65	74,06	130,08	35,25	264,15
9	95,75	51,19	162,31	23,41	505,75
10	----	----	----	----	----
11	134,57	79,33	185,40	35,86	463,80
12	108,70	53,10	164,63	23,63	466,75
13	----	----	----	----	----

Çizelge 5.1’de verilen d_{vs} , Sauter ortalama çapını; d_{vm} ise hacim ortalama çapını göstermektedir.

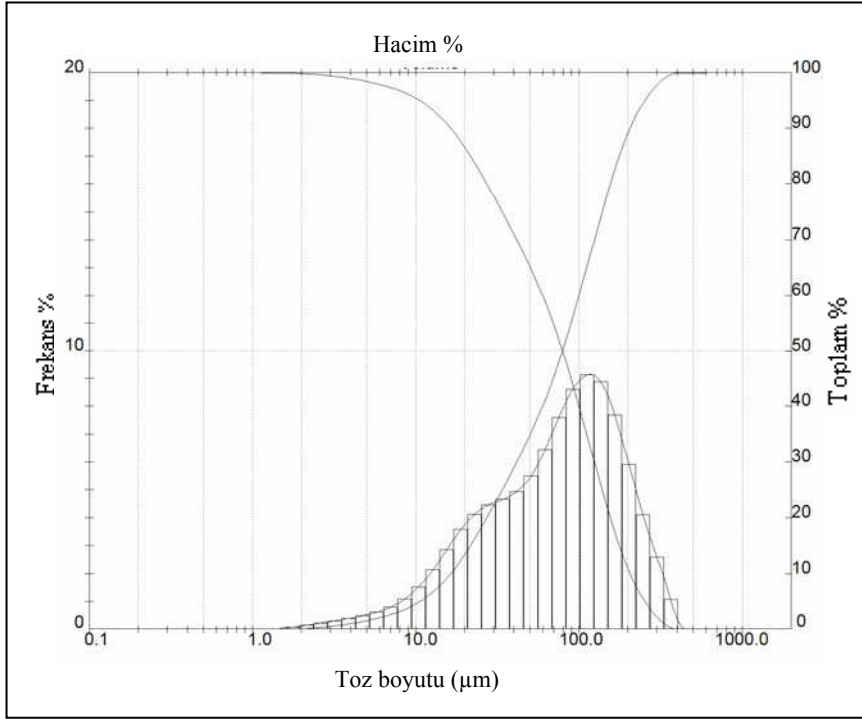
Deney 7, 10 ve 13’te meydana gelen geri basınç oluşumu nedeniyle sıvı metal akış borusu ve nozul çıkıntı aparatı ucunda katılaşma olmuş ve toz boyutu ölçümü için yeterli miktarda toz elde edilememiştir.



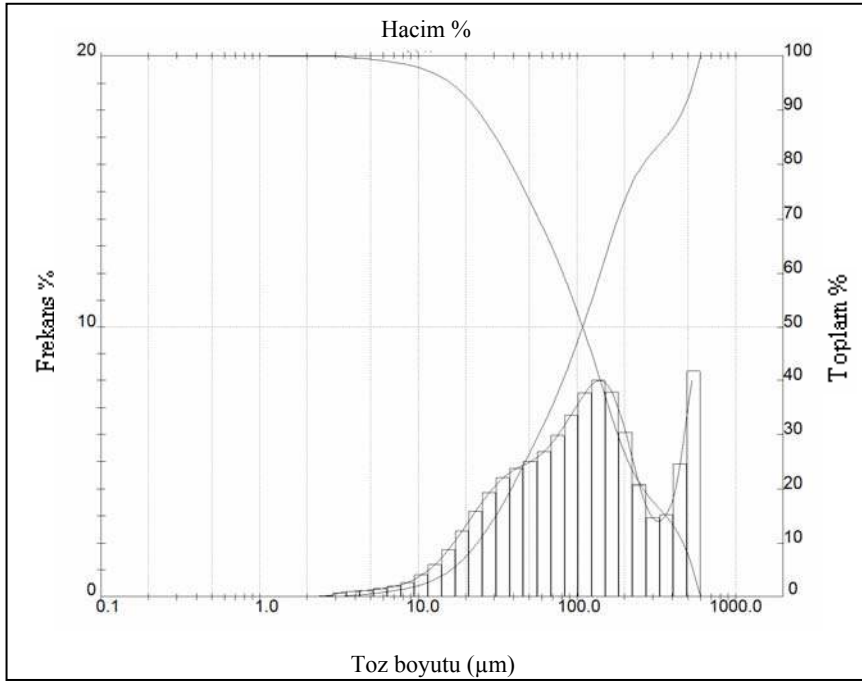
Şekil 5.3. 5 bar basınçla üretilen hava atomize kalay tozu için tek modlu toz dağılım eğrisi (Deney - 4)



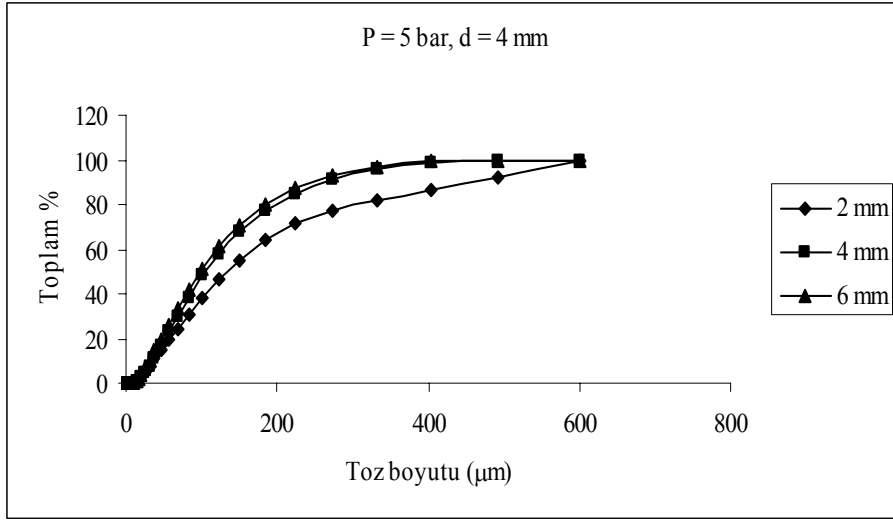
Şekil 5.4. 10 bar basınçla üretilen hava atomize kalay tozu için tek modlu toz dağılım eğrisi (Deney - 5)



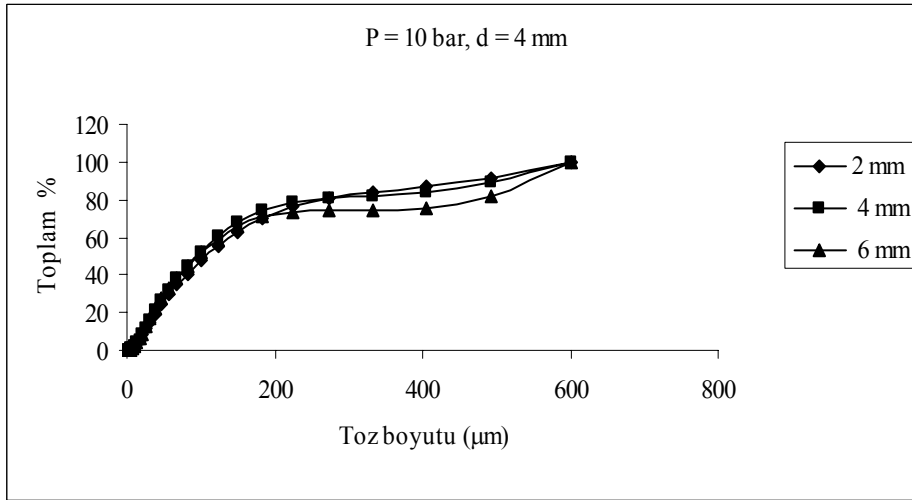
Şekil 5.5. 20 bar basınçla üretilen hava atomize kalay tozu için iki modlu toz dağılım eğrisi (Deney - 6)



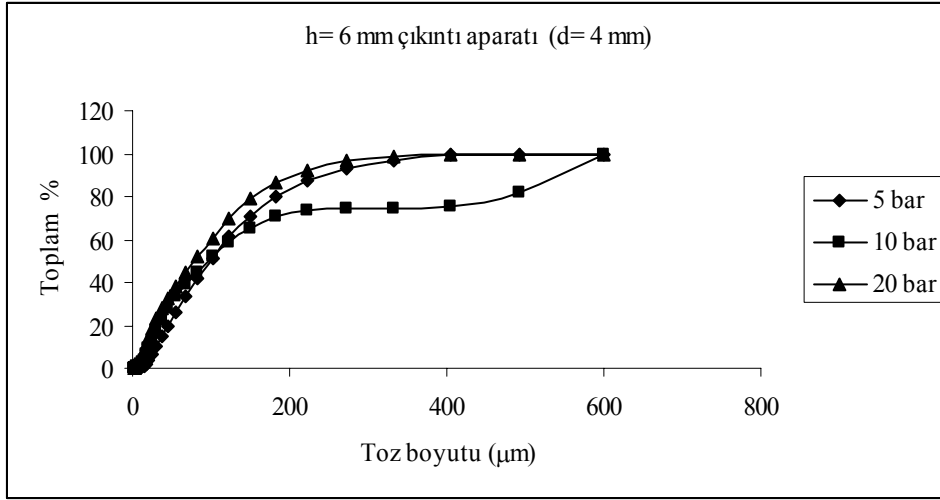
Şekil 5.6. 10 bar basınçla üretilen hava atomize kalay tozu için üç modlu toz dağılım eğrisi (Deney -12)



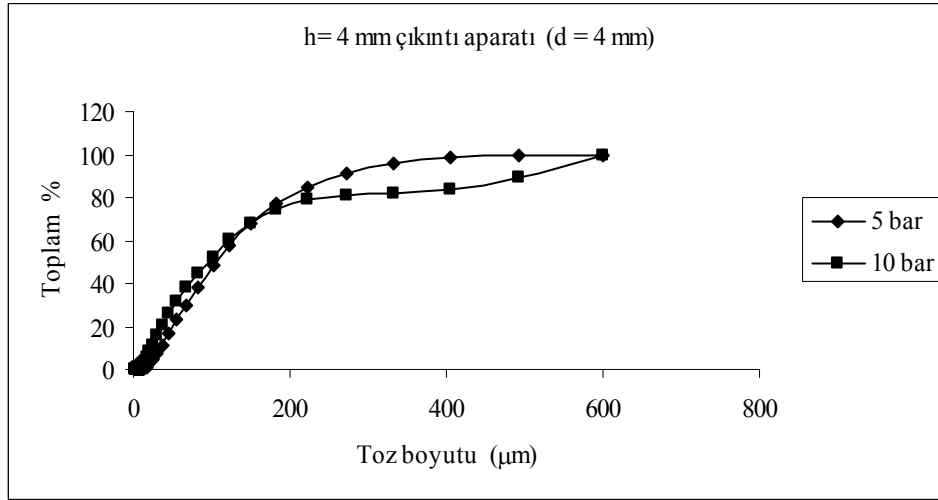
Şekil 5.7. 5 bar basınçla üretilen hava atomize kalay tozlarının farklı çıkıntı uzunluklarındaki toz boyutu değişimi



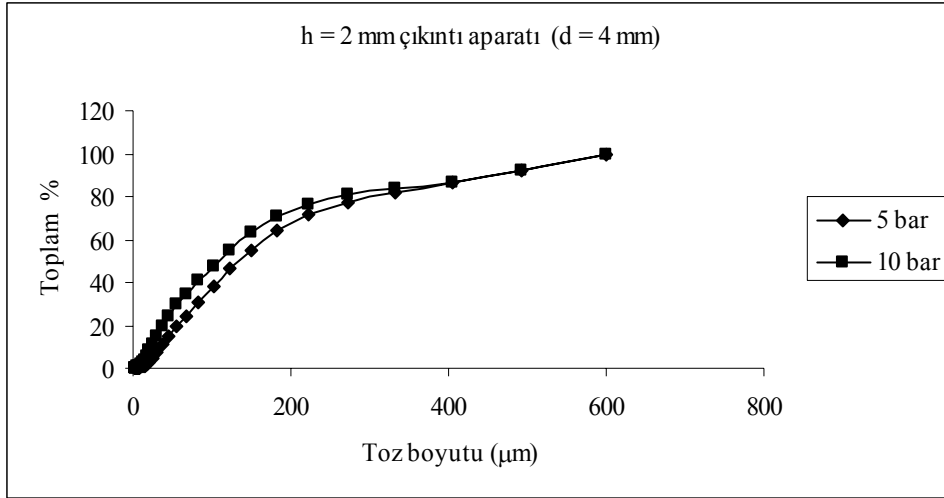
Şekil 5.8. 10 bar basınçla üretilen hava atomize kalay tozlarının farklı çıkıntı uzunluklarındaki toz boyutu değişimi



Şekil 5.9. 6 mm çıkıntı aparatıyla üretilen hava atomize kalay tozlarının farklı basınçlardaki toz boyutu değişimi

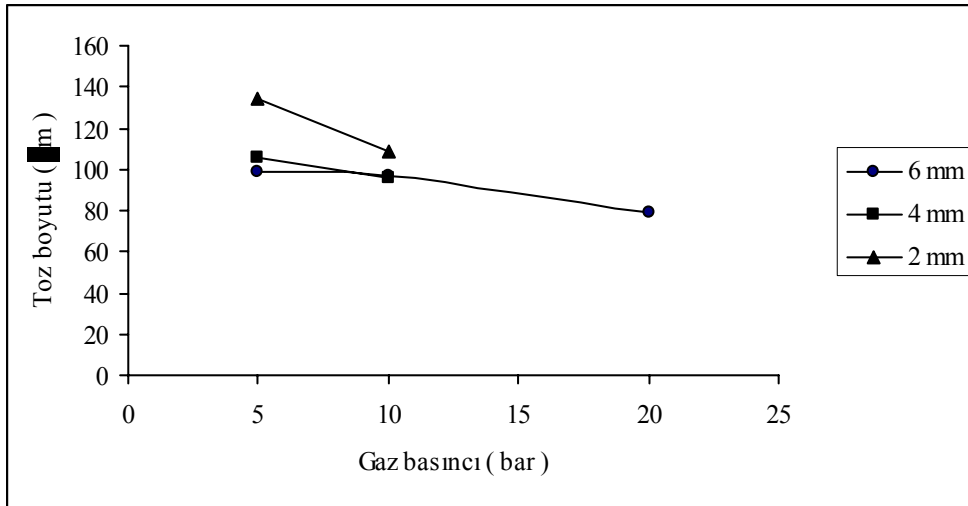


Şekil 5.10. 4 mm çıkıntı aparatıyla üretilen hava atomize kalay tozlarının farklı basınçlardaki toz boyutu değişimi

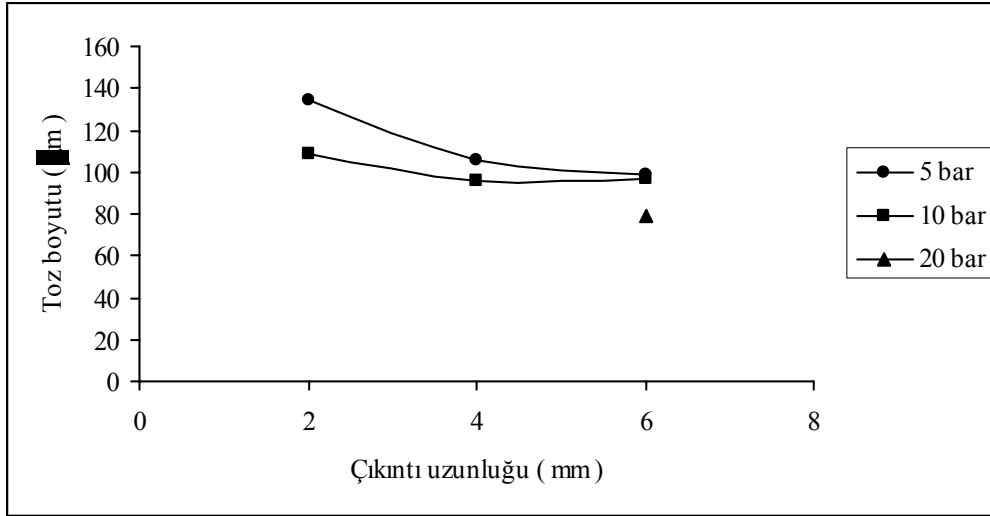


Şekil 5.11. 2 mm çıkıntı aparatıyla üretilen hava atomize kalay tozlarının farklı basınçlardaki toz boyutun değişimi

Çizelge 4.2 ve Çizelge 5.1'den yararlanılarak, gaz basıncı ve çıkıntı uzunluğunun toz boyutuna etkileri Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'de gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Toz boyutunun gaz basıncı ile değişimi (Nozul açısı 64° , gaz çıkış alanı $28,9 \text{ mm}^2$, sıvı metal akış borusu çapı 4 mm)



Şekil 5.13. Toz boyutunun çıkıntı uzunluğu ile değişimi (Nozul açısı 64°, gaz çıkış alanı 28,9 mm², sıvı metal akış borusu çapı 4 mm)

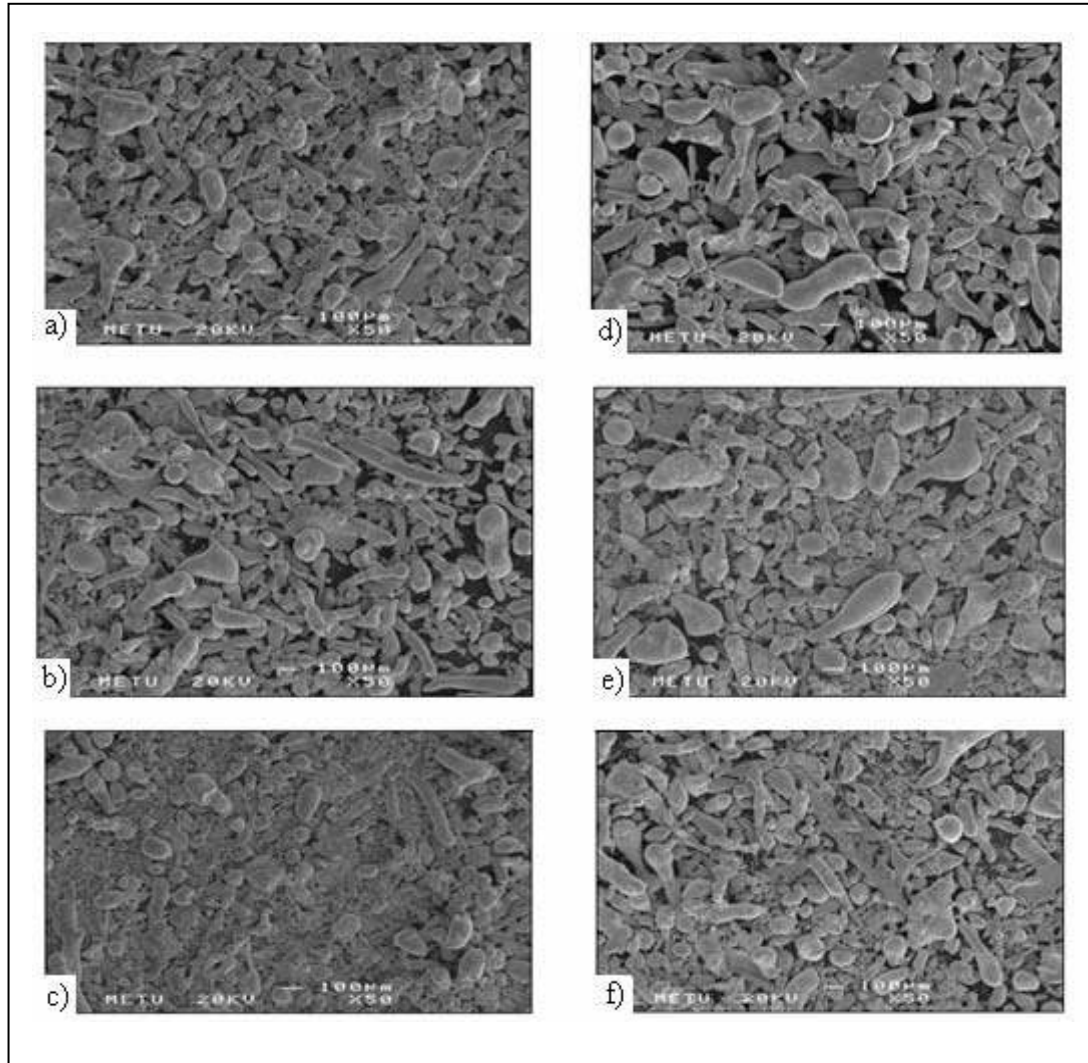
Şekil 5.12 incelenirse, gaz basıncındaki artışın toz boyutunu küçülttüğü görülmüştür. Basınç artışı, sıvı metale daha yüksek enerjinin aktarılmasını sağlayarak, daha küçük ortalama toz boyutuna sahip metal tozu üretimine imkan vermektedir. Ancak yaptığımız çalışmalarda, yüksek basınç değerlerinde ($h = 2$ ve 4 mm için 20 bar, $h = 6$ mm için 30 bar) sıvı metal debisinde düşmeye sebep olan geri basınç oluşumu nedeniyle nozul çıkıntısı ucunda metal yığılmaları meydana gelmiştir (Resim 5.1). Şekil 5.13'deki grafik incelendiğinde ise çıkıntı uzunluğu arttıkça toz boyutunun küçüldüğü görülmektedir.



Resim 5.1. Nozul çıkıntı ucunda meydana gelen metal yığılmaları

5.2. SEM Çalışmaları

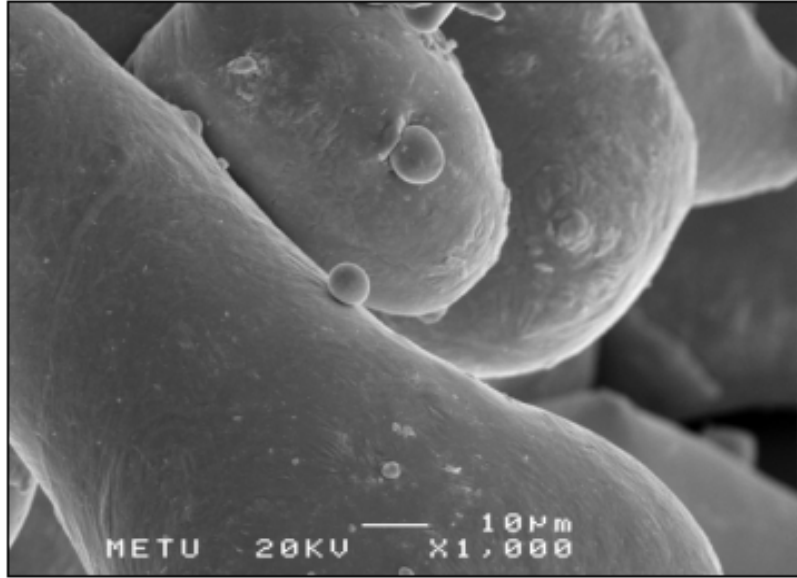
Üretimi gerçekleştirilen hava atomize kalay tozlarının SEM çalışmaları sonucu elde edilen genel görüntüleri incelendiğinde, tozların genellikle karmaşık şekilli olduğu görülmektedir (Resim 5.2).



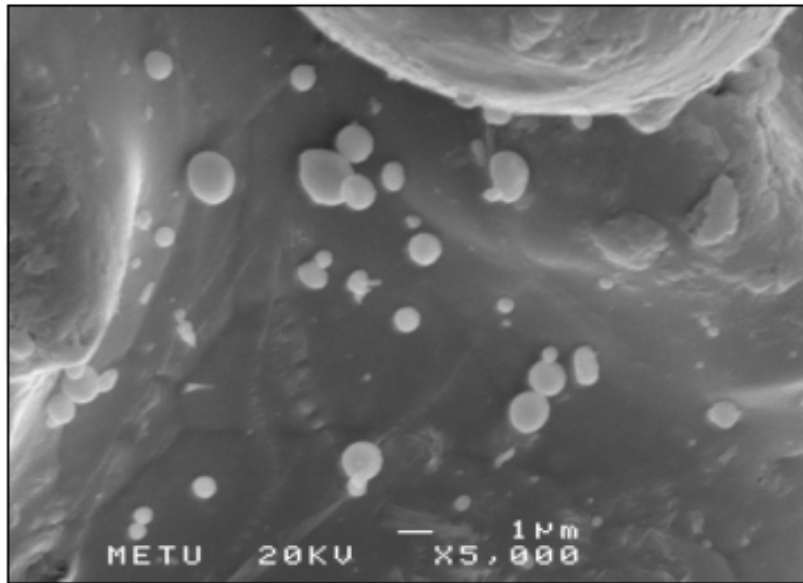
Resim 5.2. Hava atomize kalay tozlarının genel görüntüleri

- | | | |
|-------------------|-------------------|--------------------|
| a) Deney 1 (x 50) | b) Deney 3 (x 50) | c) Deney 6 (x 50) |
| d) Deney 8 (x 50) | e) Deney 9 (x 50) | f) Deney 12 (x 50) |

Yapılan atomizasyon çalışmalarında genellikle küçük boyutlu kalay tozlarının daha büyük tozlar üzerinde uydulaştıkları gözlenmiştir (Resim 5.3).



a)



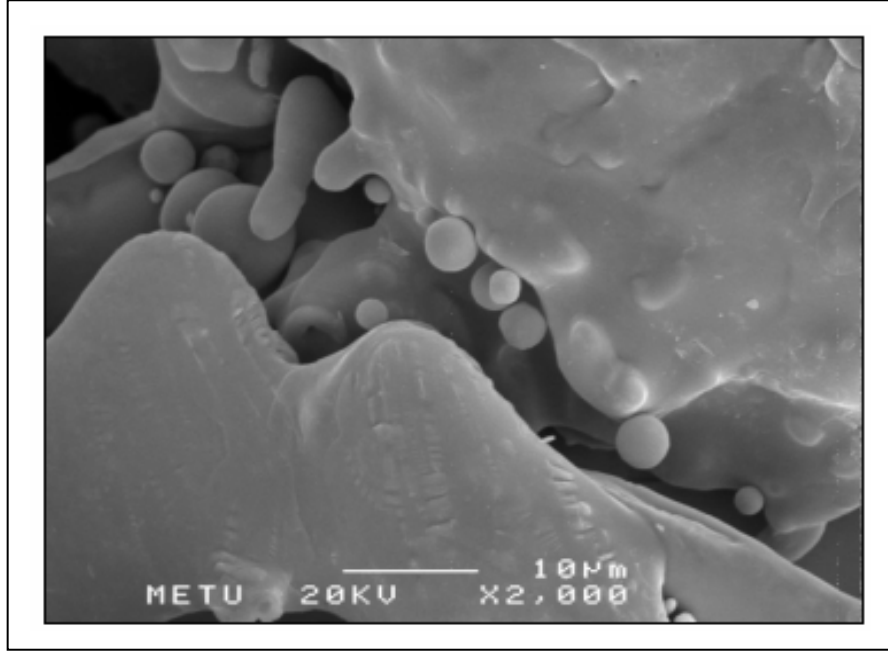
b)

Resim 5.3. Tozların birbirleriyle çarpışmaları sonucu meydana gelen uydulaşmalar

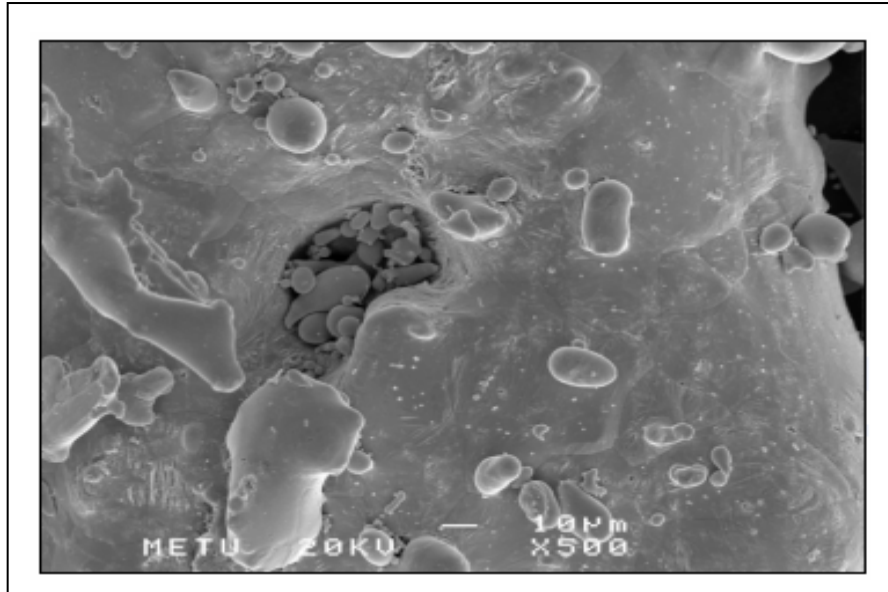
a) Deney 1 (x 1000) ($P = 5$ bar, $d = 3$ mm, $h = 8$ mm)

b) Deney 6 (x 5000) ($P = 20$ bar, $d = 4$ mm, $h = 6$ mm)

Resim 5.4'te damlacıkların tozlarla çarpışması sonucu oluşan sıvanmalar, Resim 5.5'te ise ince tozların biraraya gelerek oluşturdukları topaklanmalar görülmektedir.

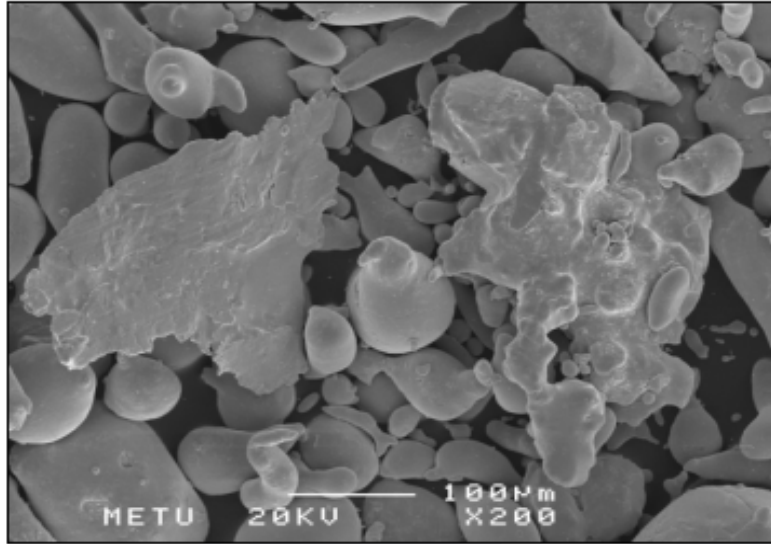


Resim 5.4. Damlacık-toz çarpışması sonucu oluşan sıvanmalar
Deney 3 (x 2000) (P = 5 bar, d = 3 mm, h = 6 mm)

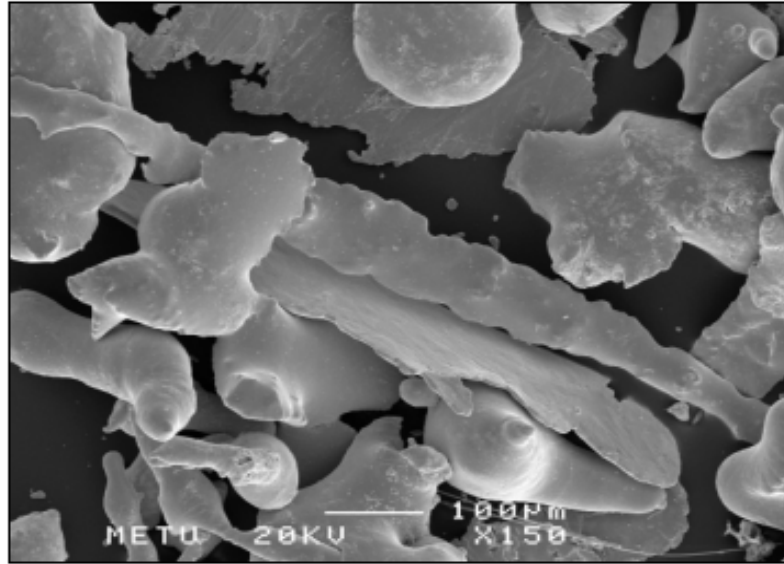


Resim 5.5. Hava atomize ince tozlarda görülen topaklanmalar
Deney 12 (x 500) (P = 10 bar, d = 4 mm, h = 2 mm)

Resim 5.6'da, üretimi gerçekleştirilen hava atomize kalay tozlarında nozul gaz çıkış açısının büyük olması nedeniyle meydana gelen pullaşmalar görülmektedir.



a)



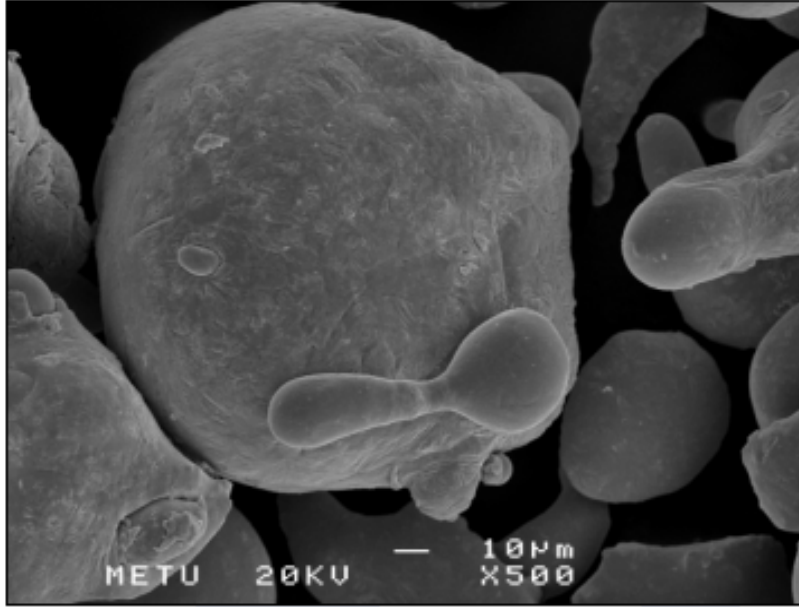
b)

Resim 5.6. Hava atomize kalay tozlarında meydana gelen pullaşmalar

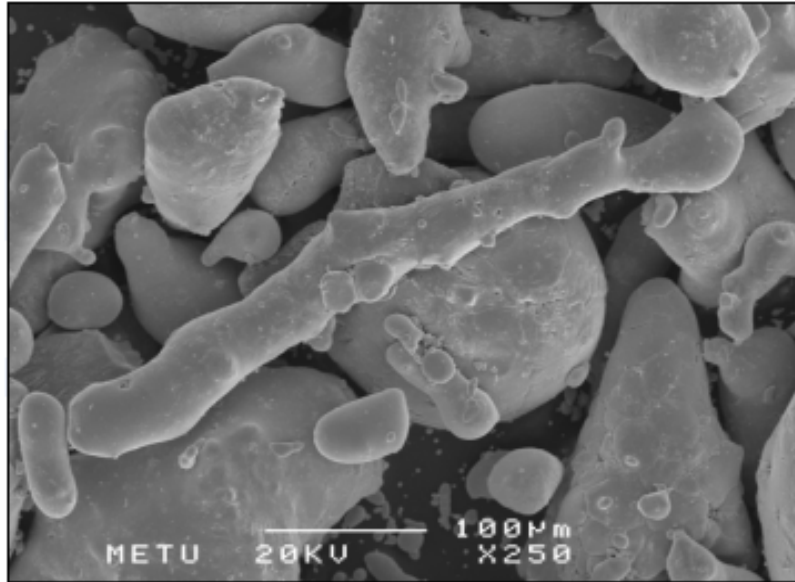
a) Deney 3 (x 200) ($P = 5$ bar, $d = 3$ mm, $h = 6$ mm)

b) Deney 8 (x 150) ($P = 5$ bar, $d = 4$ mm, $h = 4$ mm)

Yapılan çalışmalarda, sıvı metallerin gaz atomizasyon aşamalarını temsil eden bazı örneklerle rastlanmıştır (Resim 5.7).



a)



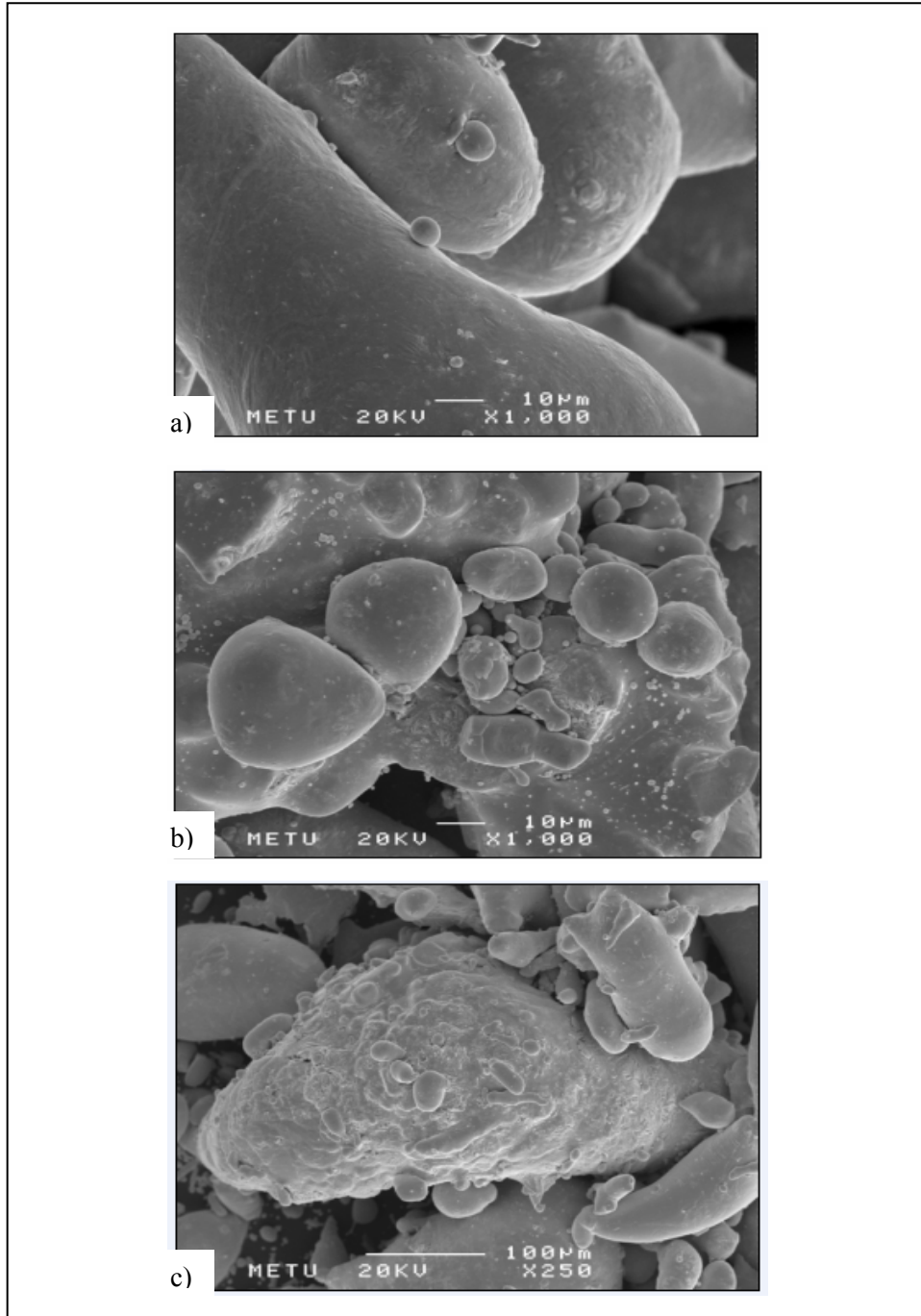
b)

Resim 5.7. Hava atomize kalay tozlarının oluşum aşamasına ait bazı örnekler

a) Deney 1 (x 500) ($P = 5$ bar, $d = 3$ mm, $h = 8$ mm)

b) Deney 9 (x 250) ($P = 10$ bar, $d = 4$ mm, $h = 4$ mm)

Resim 5.8'de ise düzgün şekilli küçük tozlar ve çubuksu bir yapıya sahip iri tozlar görülmektedir.



Resim 5.8. İri ve küçük tozlara ait yüzey yapıları

- a) Deney 1 (x 1000) (P = 5 bar, d = 3 mm, h = 8 mm)
- b) Deney 6 (x 1000) (P = 20 bar, d = 4 mm, h = 6 mm)
- c) Deney 9 (x 250) (P = 10 bar, d = 4 mm, h = 4 mm)

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, yakından eşlemeli Mannesmann tipi nozul kullanılarak, metal tozlarının üretiminde yaygın olarak kullanılan gaz atomizasyonu yöntemiyle hava atomize kalay tozlarının üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen kalay tozlarının boyutuna ve dağılımına, şekline ve yüzey morfolojisine bazı üretim parametrelerinin etkisi araştırılmıştır.

Şekil 5.1'deki Deney 6'ya ait boyut analizine benzer raporlardan elde edilen ve Çizelge 5.1'de verilen toz boyutlarıyla ilgili değerler incelendiğinde, ortalama toz boyutunun 68,50 μm ile 134,57 μm (toz toplama kapları için) boyut aralığında değiştiği görülmüştür. Daha öncede bahsedildiği gibi; gaz basıncı temel bir parametre olmamakla beraber aynı nozul geometrisinde, gazın debisi ve hızını etkilediğinden dolayı tozların inceliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Basınç artışı, sıvı metale daha yüksek enerjinin aktarılmasını sağlayarak, daha küçük ortalama toz boyutuna sahip metal tozu üretimini sağlamıştır. 3 mm iç çapa sahip sıvı metal akış borusu kullanılarak 8 mm'lik çıkıntı ile 5 ve 10 bar gaz basınçlarında yapılan deneylerde, ortalama toz boyutları sırasıyla 132,03 μm ve 68,50 μm olarak ölçülmüştür. 4 mm iç çapa sahip sıvı metal akış borusu kullanılarak yapılan deneylerde ise, 6 mm'lik çıkıntı için 5, 10 ve 20 bar gaz basınçlarında elde edilen ortalama toz boyutları sırasıyla 99,03 μm , 96,71 μm ve 79,20 μm ; 4 mm'lik çıkıntı için 5 ve 10 bar gaz basınçlarında elde edilen ortalama toz boyutları 105,65 μm ve 95,75 μm ; 2 mm'lik çıkıntı için ise 5 ve 10 bar gaz basınçlarında elde edilen ortalama toz boyutları 134,57 μm ve 108,70 μm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlardan da görüleceği gibi literatürdeki çalışmalara paralel olarak, gaz basınçlarındaki artışın ortalama toz boyutunu küçülttüğü görülmüştür. Ancak 2 mm'lik ve 4 mm'lik çıkıntılar için 20 bar gaz basıncında, 6 mm'lik çıkıntı için ise 30 bar gaz basıncında meydana gelen geri basınç oluşumu nedeniyle sıvı metal akış borusu ve nozul çıkıntı ucunda katılaşma olmuş ve toz boyutlarıyla ilgili herhangi bir ölçüm yapılamamıştır.

Toz boyutu analiz raporlarından elde edilen dağılım eğrilerinden, yakından eşlemeli Mannesmann tipi nozul sistemi ile üretilmiş hava atomize kalay tozlarının bazı deneyler için logaritmik normal dağılım göstererek bir çan eğrisi oluşturdukları (Şekil 5.3 ve Şekil 5.4), bazı deneyler için ise iki modlu (Şekil 5.5) ve üç modlu (Şekil 5.6) dağılıma sahip oldukları gözlenmiştir. Gaz atomize metal tozlarının iki veya daha fazla modlu değişim göstermelerine sebep olarak ileri sürülen çeşitli görüşler mevcuttur. Ünal [47], ikincil bölünme sonucu elde edilen ince tozlarla, bu aşamayı tamamlayamamış iri tozların iki ayrı grup oluştururarak boyut dağılımını iki modlu yaptığını belirtmiştir. Stone ve Tsakirpoulos [70] ise, atomizasyon bölgesinde meydana gelen emişin, sıvı metal debisini etkilediğini ve damlacık dağılımını büyük boyutlara doğru kaydırabildiğini, böylece atomizasyonda çok yaygın olan benzer olayların iki veya daha fazla modlu boyut dağılımlarına sebep olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Sıvı metal akış borusu çapındaki değişim sıvı metal film kalınlığını, dolayısıyla da gaz ile sıvı metal arasındaki ısı transferini etkiler. Daha büyük çaptaki sıvı metal demeti, birincil bölünme esnasında oluşan damlaların boyutunu daha büyük yapar ve böylece daha iri tozlar elde edilir. Ancak çalışmalarımızda 3 mm iç çapa sahip sıvı metal akış borusu kullanılarak 6 mm'lik çıkıntı ile 5 bar gaz basıncında yapılan deneyde, ortalama toz boyutu 113,79 μm iken; 4 mm iç çapa sahip sıvı metal akış borusu kullanılarak 6 mm'lik çıkıntı ile 5 bar gaz basıncında yapılan deneyde, ortalama toz boyutu 99,03 μm olarak ölçülmüş (Çizelge 5.1) ve elde edilen değerlerin yukarıda bahsedilen durumla uyuşmadığı tespit edilmiştir. Bu durumun, 3 mm iç çapa sahip akış borusu ile 5 bar gaz basıncında yapılan deneyde çıkıntı ucunda meydana gelen metal yığılması nedeniyle elde edilen toz miktarının az olması ve dolayısıyla tam olarak temsil edici bir boyut ölçümü yapılamamasından kaynaklandığını söyleyebiliriz.

Yakından eşlemeli Mannesmann tipi nozulda, çıkıntı uzunluğunun etkisini incelediğimizde; çıkıntı uzunluğu arttıkça toz boyutunun küçüldüğü görülmektedir (Şekil 5.13). 4 mm iç çapa sahip sıvı metal akış borusu kullanılarak 2, 4 ve 6 mm'lik

çıkıntılar ile yapılan deneylerde en küçük ortalama toz boyutu, 6 mm'lik çıkıntı ile 20 bar gaz basıncında 79,20 μm olarak elde edilmiştir. 5 bar gaz basıncıyla yapılmış deneylerde, 6 mm çıkıntı uzunluğu için 99,03 μm ortalama boyutlu tozlar üretilmişken, bu boyut 4 ve 2 mm çıkıntı uzunlukları için sırasıyla 105,65 μm ve 134,57 μm olarak ölçülmüştür. 3 mm iç çapa sahip sıvı metal akış borusu kullanılarak, 6 ve 8 mm'lik çıkıntılar ile 5 bar gaz basıncında yapılan deneylerde ise ortalama toz boyutları sırasıyla 113,79 μm ve 132,03 μm olarak ölçülmüş ve elde edilen bu değerlerin de yukarıda bahsedilen durumla uyuşmadığı tespit edilmiştir. Yine bu duruma sebep olarak, 3 mm iç çapa sahip sıvı metal akış borusu kullanılarak 6 mm'lik çıkıntı ile 5 bar gaz basıncında yapılan deneyde, çıkıntı aparatı ucunda meydana gelen metal yığılması nedeniyle elde edilen toz miktarının az olması ve tam olarak temsil edici bir boyut ölçümü yapılamamasını gösterebiliriz.

Dunkley'in [71] yakından eşlemeli nozullarla ilgili önemli bir sorun olarak bildirdiği nozulda metal yığılması, özellikle 20 bar ve üzeri basınçlarda bizim de karşılaştığımız bir sorun olmuştur (Resim 5.1). Metal yığılması bazen sıvı metal çapının küçülmesine ve akışın iyice yavaşlamasına, bazen de sadece birkaç saniye akıştan sonra atomizasyonun tamamen durmasına sebep olmuştur. Bu durum atomizasyon bölgesinde oluşan geri basınç sebebiyle meydana gelmiştir. Sıvı metal akış borusu içinde katılaşmanın önlenmesi amacıyla akış borusu etrafına direnç teli sarılmış ve üzeri şamot (tuğla çamuru) ile izole edilerek akış borusunun ısıtılması sağlanmıştır.

Daha öncede belirtildiği gibi Baram [64], yapmış olduğu çalışmada metal akış borusu ucundaki basınç değişimlerini incelemiştir (Şekil 3.29). Bu duruma göre, 30 atmosferin altındaki basınçlarda, metal akış borusunun hiçbir konumunda geri basınç oluşumunun meydana gelmediğinden ve bu değer üstündeki basınçlarda ise, metal akış borusunun gaz çıkışına göre inme mesafesinin 6 mm'den daha az olması durumunda geri basıncın kaçınılmaz olduğundan söz etmiştir.

Yaptığımız çalışmalarda ise, 3 mm iç çapa sahip sıvı metal akış borusu kullanılarak 6 mm'lik çıkıntı ile 5 bar basınç altında yapılan deneyde akış gerçekleşmiştir. Ancak,

nozul çıkıntı ucunda meydana gelen metal katılaşması akışın yavaşlamasına ve daha az miktarda toz elde edilmesine sebep olmuştur. 4 mm iç çapa sahip sıvı metal akış borusu kullanıldığında ise, 6 mm'lik çıkıntı için 30 bar basınçta; 4 ve 2 mm'lik çıkıntılar için ise 20 bar basınç değerlerinde oluşan geri basıncın etkisiyle, sıvı metal akış borusu içinde ve nozul çıkıntı ucunda katılaşma meydana gelmiş ve akış tamamen durmuştur.

Ayrıca yapılan bütün deneysel çalışmalarda, atomizasyon kulesinin iç yüzeyine fazla miktarda kalay tozunun yapışarak katılaştığı görülmüştür. Bu durumun, 64° olan nozul gaz çıkış açısının büyük olmasından kaynaklandığını söyleyebiliriz. Literatürde de belirtildiği gibi nozul gaz çıkış açısının küçülmesi hem daha ince tozların üretilmesini, hem de daha az miktarda tozun atomizasyon kulesi iç yüzeyine yapışmasını sağlayacaktır.

Üretimi gerçekleştirilen hava atomize kalay tozlarının genel görünümlerine baktığımızda, tozların genellikle karmaşık şekilli olduğu görülmektedir (Resim 5.2). 10 μm ve daha küçük boyutlu tozlarda oldukça düzgün şekiller ve pürüzsüz toz yüzeyi görülürken; 100 μm ve daha büyük boyutlardaki tozlarda çubuksu bir yapı görülmüş ve hücreli yüzey yapısı belirginleşmeye başlamıştır (Resim 5.8). Bu sonuçlar literatürdeki çalışmalar ile uyum göstermektedir. Bir sıvı damlacığını küreselleşmeye yüzey gerilmesi zorlar. Küçük tozlarda görülen yüzey düzgünlüğüne, soğuma hızındaki artışın tane boyutunu küçültmesi ve böylece mikroyapının görünmez hale gelmesi sebep olmaktadır.

Yapılan atomizasyon çalışmalarında genellikle küçük boyutlu kalay tozlarının daha büyük tozlar üzerinde uydulaştıkları gözlenmiştir (Resim 5.3). Uydulaşmalar, atomizasyon sırasında küçük tozların tamamen katılaşmamış büyük tozlarla çarpışması sonucu meydana gelir. Bu nedenle, büyük ve küçük parçacıkların katılaşma süreleri arasındaki fark ve farklı boyutlardaki damlacıkların atomizasyon gazının etkisiyle değişik oranlarda ivmelenmeleri uydulaşmada önemli bir etkidir. Ayrıca damlacık-toz çarpışmasıyla oluşan sıvanmalar da görülmüştür (Resim 5.4).

Bu tip uydulaşmalar, katı bir tozun damlacık tarafından kısmen sıvanmasıyla veya birden fazla çok kk tozun damlacık tarafından tamamen kaplanmasıyla oluşmaktadır.

SEM alışmaları sırasında karşılaşılan diğerk durumlar ise hava atomize kalay tozlarında meydana gelen pullaşmalar (Resim 5.6) ve ince tozların biraraya gelerek oluşturdukları topaklanmalardır (Resim 5.5). Pul tozlar, atomizasyon ürünü tozlar olmayıp genellikle öğütme ile elde edilirler. Ancak pul tozlarla, yaptığımız atomizasyon çalışmalarında da karşılaşılmıştır. Bu durum, 64° olan nozul açısı nedeniyle bazı damlacıkların atomizasyon kulesi çeperlerine çarparak katılaşması sonucu meydana gelmiştir.

Resim 5.7’de görüldüğü gibi sıvı metallerin gaz atomizasyon aşamalarını temsil eden bazı örneklerle de rastlanmıştır. Resim 5.7a’da verilen yaklaşık 60 m boyutundaki toz ikincil bölünme aşamasını tamamlamış ancak üçüncü bölünme aşaması için yeterli süre olmadığından katılaşmıştır. Resim 5.7’de ise birincil bölünme aşamasını tamamladıktan hemen sonra katılaştığı için çubuk (ligament) halinde kalmış yaklaşık 500 m boyutundaki hava atomize kalay tozu görülmektedir. nal [41], alüminyum tozlarının oluşum mekanizmasını yakından eşlemeli nozullar kullanarak incelemiştir ve birincil bölünmede yaklaşık olarak 500 m çapındaki damlacıkların oluştuğunu, daha ince tozların ise ikincil bölünmenin ürünü olduğunu belirtmiştir. Elde ettiğimiz sonuçlar, bu durum ile uyum göstermektedir.

6.1. neriler

1. Atomizasyon kulesi yüzeyine yapışan tozların önlenmesi ve daha küçük ortalama boyuta sahip tozlar elde edilmesi amacıyla nozul gaz çıkış açısının küçültülmesi gerekmektedir.
2. Siklon çıkışına, atomizasyon gazıyla aynı debide emiş yapabilen radyal bir fan yerleştirilerek geri basınç oluşumu önlenmelidir.

3. Yakından eşlemeli Mannesmann tipi nozulla yapılan deneyler farklı çıkıntı uzunlukları ve basınç değerleri uygulanarak tekrarlanmalıdır.
4. Yakından eşlemeli sistemlerde yaygın olan, daralan/genişleyen yeni bir nozul tasarımı ve imalatı yapılarak, yeni deneysel çalışmalar gerçekleştirilmelidir.

KAYNAKLAR

1. Ekici, A.A., “Ekstrüzyonla tam yoğunlaştırılmış püskürtme şekillendirme alüminyumun mekanik özelliklerinin deneysel olarak araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1 (2005).
2. Baksan, B., Gürler, R., “Toz metalurjisinin savunma sanayiinde uygulanması”, **Osmangazi Üniversitesi Metalurji Enstitüsü**, Eskişehir, 1-15 (2003).
3. Gu, S., Zeoli, N., “Numerical modelling of droplet break-up for gas atomisation”, **Computational Materials Science**, In Press, Corrected Proof, Available online (2006).
4. German, R.M., “Powder Metallurgy Science 2nd edition”, **Metal Powder Industries Federation**, USA, 16-20, 76-90 (1984).
5. Sarıtaş, S., Toz Metalurjisi, "Makina Müh. El Kitabı", **MMO**, 2.Baskı, 1.Cilt, 2/64-2/82 (1994).
6. Sarıtaş, S., Turan, H., “Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi”, **VI. Uluslararası Makina Tasarımı ve İmalat Kongresi**, ODTÜ, Ankara, 61-73 (1994).
7. Sarıtaş, S., Uslan, İ., “Gaz atomizasyonunda nozul geometrisi, gaz cinsi ve basıncının alüminyum tozu boyutuna etkisinin araştırılması”, **I.Ulusal Toz Metalurji Konferansı Bildiri Kitabı**, Gazi Üniversitesi, Ankara, 217-226 (1996).
8. Lawley, A., “Atomization: The production of metal powders” **Metal Powder Industries Federation**, Princeton, New Jersey, USA, 21-33, 100-106 (1992).
9. Ünal, R., “Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretim parametrelerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 3-6, 24-25, 57-58 (1995).
10. Aydın, M., “Gaz atomizasyon yönteminde yeni bir nozul tasarımı ve toz üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, **Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kütahya, 1-48 (2005).
11. Alier, A.J., Losada, A., “Characteristics of atomized powders”, **Powder Metallurgy Int.**, 21(5): 15-19 (1985).
12. Sarıtaş, S., “Bir titreşimli öğütücü imalatı ve metal tozlarının öğütmeye bağlı özelliklerinin araştırılması”, **I.Ulusal Toz Metalurji Konferansı Bildiri Kitabı**, Gazi Üniversitesi, Ankara, 387-396 (1996).
13. Çiftçi, İ., “Alüminyum Esaslı kompozitlerde takviye oranı ve boyutunun mekanik özellikler ve işlenebilirlik üzerine etkisinin araştırılması”, Doktora Tezi,

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-50 (2003).

14. Fogagnolo, J.B., Froyen, L., Ruiz-Navas, E.M., Ruiz-Prieto, J.M., Velasco, F., “One step production of aluminium matrix composite powders by mechanical alloying”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(11): 2114-2120 (2006).
15. Morsi, K., Olevsky, E.A., Shinde, S., “Effect of nickel particle size on the compaction behavior of rotator mixed and mechanically alloyed nickel and aluminum powders”, *Materials Science and Engineering*, 426(1-2): 283-288 (2006).
16. Doğan, C., Sarıtaş, S., “Metal powder production by centrifugal atomization”, *Int. J. Powder Metallurgy*, 30: 419-427 (1994).
17. Pandey, O.P., Ojha, S.N., “Production and characterization of rapidly solidified powders of Al-Si alloys”, *Powder Metallurgy Int.*, 23(5): 291-295 (1991).
18. Kim, Y.W., Griffith, W.M., Froes, F.H., “Surface oxides in P/M aluminium alloys”, *J. Metals*, 37: 27-33 (1985).
19. Achelis, L., Lagutkin, S., Sheikhaliev, S., Srivastava, V., Uhlenwinkel, V., “Atomization process for metal powder”, *Materials Science and Engineering A*, 383(1):1-6 (2004).
20. Connor, J., Ridder, S., Ting, J., “High-speed cinematography of gas-metal atomization”, *Materials Science and Engineering A*, 390(1-2): 452-460 (2005).
21. Champange, B., Angers, R., Fiset, M., “Characteristics of powders produced by rotating electrode process”, *Metal Powder Report*, 39: 267-270 (1984).
22. Rai, G., Lavernia, E., Grant, N.J., “Powder size distribution in ultrasonic gas atomization”, *J. Metals*, 37(8): 22-26 (1985).
23. Avvaru, B., Gogate, P.R., Pandit, A.B., Patil, M.N., “Ultrasonic atomization: Effect of liquid phase properties”, *Ultrasonics*, 44(2): 146-158 (2006).
24. Klar, E., Fesko, J.W., “Production of metal powders”, *Metals Handbook 9th ed., Powder Metallurgy*, Ohio, 7: 25-51 (1984).
25. Anık, S., Dikicioğlu, A., Vural, M., “İmal usulleri”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul 280-282 (1999).
26. Ünal, A., “Influence of atomizing conditions on structure of aluminium powders”, *Proc. Of Aluminium Technology Con., The Institute of Metals*, London, 673-678 (1986).

27. Singh, S.N., Ojha, S.N., “Microstructural investigation on rapidly solidified cast iron powders”, *Int.J. Rapid Solidification*, 7(33): 201-217(1992).
28. Gerking, L., “Powder from metal and ceramic melts by laminar gas streams at supersonic speeds”, *Powder Metallurgy Int.*, 25(2): 59-65 (1993).
29. Miller, S.A., “Close-coupled gas atomization of metals and alloys”, *Metal Powder Report*, 42(10): 702-715 (1987).
30. Howells, R.I.L., Dunstan, G.R., Moore, C., “Production of gas atomized metal powders and their major industrial uses”, *Powder Metallurgy*, 31(4): 259-265 (1988).
31. Yule, A.J., and Dunkley, J.J., “Atomization of Melts”, *Oxford Univ. Press*, New York, USA, 165-189 (1994).
32. Uslan, İ., “Gaz atomize alüminyum tozlarının özelliklerine üretim değişkenlerinin etkisinin araştırılması”, Doktora tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 4, 58-65, 69-71, 82-100 (1999).
33. Hohmann, M., Jonsson, S., “New concepts for inter gas atomization plants”, *Metal Powder Report*, 45: 47-50 (1990).
34. Mehrotra, S.P., “Review 15: Mathematical Modelling of Gas Atomization Process for Metal Powder Production”, Part 1, *Powder Metallurgy Int.*, 13(2): 80-84 (1981).
35. Dombrowski, N., Johns, W.R., “The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets”, *Chemical Engineering Science*, 18: 203-214 (1963).
36. See, J.B., Johnston, G.H., “Interactions between nitrogen jets and liquid lead and tin streams”, *Powder Metallurgy*, 21: 119-133 (1978).
37. Mehrotra, S.P., “Review 15: Mathematical Modelling of Gas Atomization Process for Metal Powder Production”, Part 2, *Powder Metallurgy Int.*, 13(3): 132-135 (1981).
38. Burger, M., Berg, E.V., Cho, S.H., Schatz, A., “Fragmentation processes in gas and water atomization plants for process optimization purposes: I. Discussion of the main fragmentation processes”, *Powder Metallurgy Int.*, 21(6): 10-15 (1989).
39. Burger, M., Berg, E.V., Cho, S.H., Schatz, A., “Fragmentation processes in gas and water atomization plants for process optimization purposes: II. Modelling of growth and stripping of capillary waves in parallel shear flows-the basic fragmentation mechanism”, *Powder Metallurgy Int.*, 24(1): 32-38 (1992).

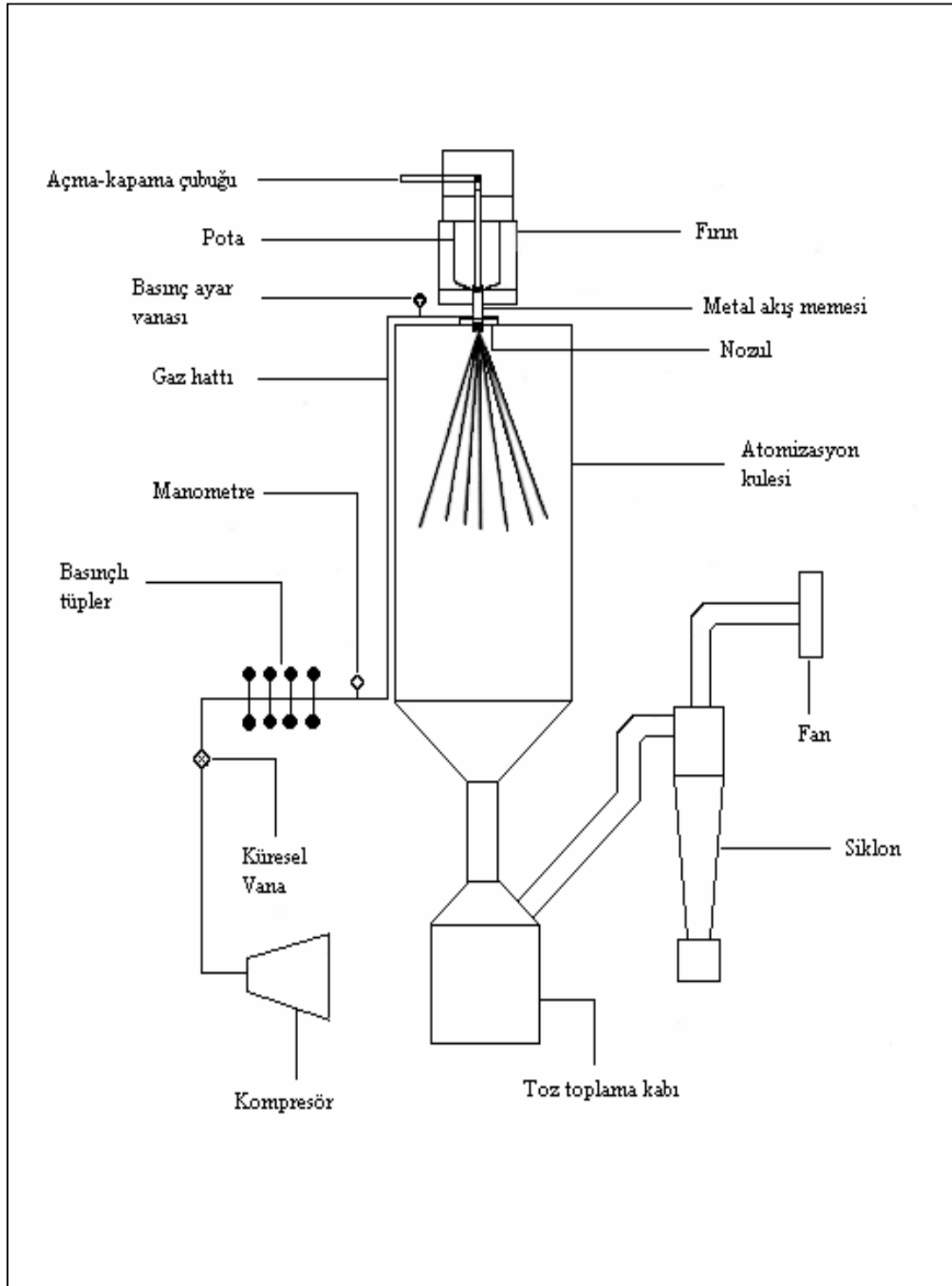
40. Putimtsev, B.N., "Effect of blast parameters on the mechanism of disintegration of a molten metal jet and on the properties of atomized powders", ***Soviet Powder Metallurgy and Ceramics***, 11: 85-88 (1972).
41. Ünal, A., "Liquid break-up in gas atomization of fine aluminium powders", ***Metallurgical Transactions B***, 20(11): 61-69 (1989).
42. Antipas, G.S.E., "Modelling of the break up mechanism in gas atomization of liquid metals.Part I: The surface wave formation model", ***Computational Materials Science***, 35(4): 416-422 (2006).
43. Ünal A., Robertson, D.G.C., " Pilot plant gas atomizer for rapidly solidified metal powders", ***Int. J. Rapid Solidification***, 2: 219-229 (1986).
44. Ünal, A., "Production of rapidly solidified aluminium alloy powders by gas atomisation and their applications", ***Powder Metallurgy***, 33(1): 53-64 (1990).
45. Ünal, A., "Production of metal powders by gas atomization", ***I. Ulusal Toz Metalurji Konferansı Bildiri Kitabı***, Gazi Üniversitesi, Ankara, 111-157 (1996).
46. Lubanska, H., "Correlation of spray ring data for gas atomization of liquid metals", ***J. Metals***, 38: 45-49 (1970).
47. Ünal, A., "Production of rapidly solidified magnesium powders by gas atomization", ***Materials Science and Technology***, 5(1010): 1027-1033 (1989).
48. Özbilen, S., Ünal A., Sheppard, T., "Influence of liquid metal properties on particle size of inert gas atomized powders", ***Powder Metallurgy***, 39(1): 44-52 (1996).
49. Ünal, A., "Effect of processing variables on particle size in gas atomization of rapidly solidified aluminium powders", ***Materials Science and Technology***, 3:1029-1039 (1987).
50. Clyne, T.W., Ricks, R.A., Goodhew, P.J., "The production of rapidly solidified aluminium powder by ultrasonic gas atomization. Part I: Heat and fluid flow", ***Int. J. Rapid solidification***, 1: 59 - 80 (1984).
51. Zhang, J.Y., Al, B., Liu, C., Zhu, R., Zhang, D., Ma, C., "Microstructure of explosively consolidated rapidly solidified aluminium and Al-Li alloy powders", ***J. Material Science***, 27 : 2298-2308 (1992).
52. Olefjord, I., Nyborg, L., "Surface analysis of gas atomized ferritic steel powder", ***Powder Metallurgy***, 28(4): 237-243 (1985).

53. Lavernia, E.J., Ayers, J.D., Srivatsan, T.S., "Rapid solidification processing with specific application to aluminium alloys", *Int. Materials Reviews*, 37(1):1-44 (1992).
54. Kowalski, L., Korevaar, B.M., Duszczek, J., "Some new aspects of the theory of oxidation and degassing of aluminium - based alloy powders", *J. Materials Science*, 27: 2770-2780 (1992).
55. Nylund, A., Olefjord, I., "Surface analysis of ultrasonically gas atomized aluminium and aluminium alloy powders", *Int. J. Rapid Solidification*, 4: 271-286 (1989)
53. Carney, T.J., Tsakiroopoulos, P.T., Watts, J.F., Castle, J.E., "Oxidation and surface segregation in rapidly solidified aluminium alloy powders.", *Int. J. of Rapid Solidification*, 5: 189-217 (1990).
57. Ünal, A., "Interpretation of ESCA thickness measured on non-uniform oxide layers", *Powder Metallurgy*, 34(2): 135-138 (1991).
58. Dube, R.K., Korla, S.C., Singh, D., "Study of free fall gas atomisation of liquid metals to produce powder", *Powder metallurgy*, 44(2): 177-184 (2001).
59. Henein H., Le T., "Effect of nozzle geometry and position on gas atomization", *The International Journal of Powder Metallurgy*, 32(4): 353-364 (1996).
60. Anderson, J. D., "Modern Compressible Flow with Historical Perspective", *Mc Graw-Hill Book Company*, USA, 127-131 (1982).
61. Ünal, A., "Influence of nozzle geometry in gas atomization of rapidly solidified aluminium alloys", *Materials Science and Technology*, 4: 909-915 (1988).
62. Davies, T.J., Sarıtaş, S., Uslan, İ., "Effects of variables on size and characteristics of gas atomized aluminium powders", *Powder Metallurgy*, Manchester, U.K, 42(2): 156-163 (1999).
63. Anderson, I. E., Terpstra, L., "Progress Toward Gas Atomization with Increased Uniformity and Control", *Materials Science and Engineering A*, 326(1):101-109 (2002).
64. Baram, J., "Pressure Characteristics at the Pour-Tube Orifice in Ultrasonic Gas Atomization", *Materials Science and Engineering*, 98: 65-69 (1988).
65. Özbilen, S., "Gaz atomizasyonunda birincil bölünme mekanizması üzerinde optik kamera incelemesi", *I. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı Bildiri Kitabı*, Gazi Üniversitesi, Ankara, 207-215 (1996).

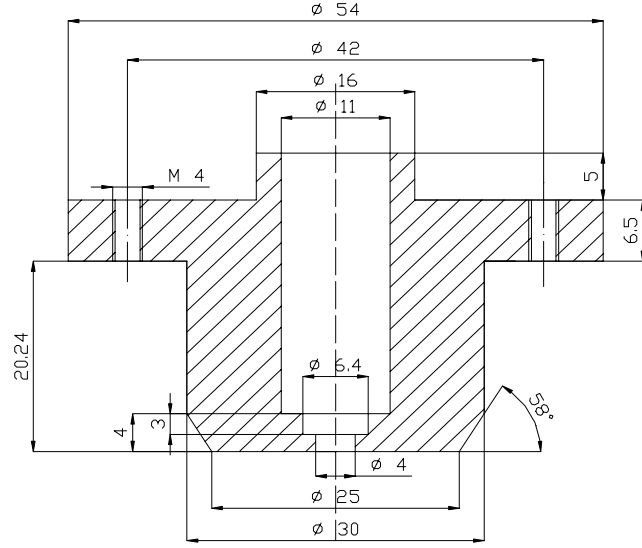
66. Cui, C., Cao, F., Li, Q., “Formation mechanism of the pressure zone at the tip of the melt delivery tube during the spray forming process”, *Journal of Materials Processing Technology*, 137(1): 5-9 (2003).
67. Chen, Y.M., Su, Y.H., Un, R.W., Tsao, C.Y.A., “Modeling of atomization rate during gas atomization”, *Acta Materialia*, 46(3): 1011 – 1023 (1998).
68. Ünal, R., “The influence of the pressure formation at the tip of the melt delivery tube on tin powder size and gas/melt ratio in gas atomization method”, *Journal of Materials Processing Technology*, 180(1-3): 291-295 (2006).
69. Hopkins W.G., “High Performance RPS Gas Atomization - Critical Areas of Equipment Design”, *Metal Powder Report*, 42(10): 706-710 (1987).
70. Stone, I.C., Tsakiroopoulos, P., “Cooling rates in gas atomised Al-4wt% Cu alloy powders”, *Int. J. Rapid Solidification*, 7: 177-190 (1992).
71. Dunkley, J., “Water bench testing boosts gas atomizing”, *Metal Powder Report*, 54(3): 26-29 (1999).

EKLER

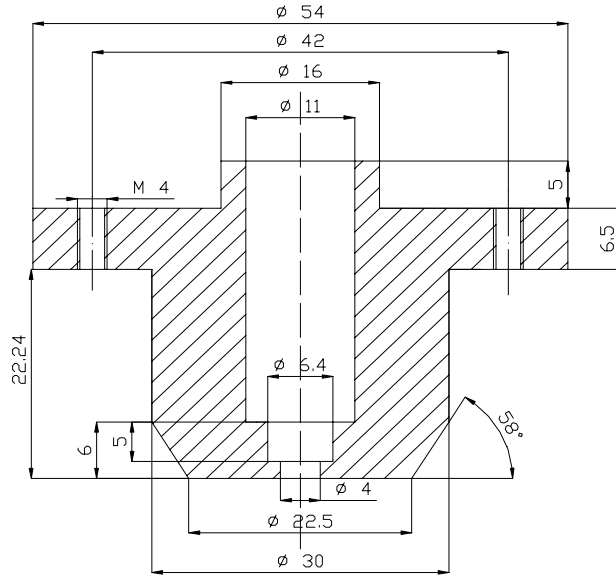
EK-1. Gazi Gaz Atomizasyon Ünitesi'nin şematik resmi



EK-2. Çıkıntı aparatlarının teknik resmi



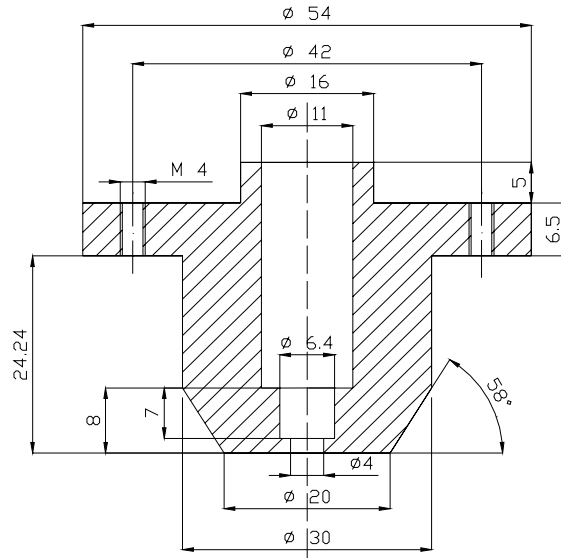
h= 2 mm



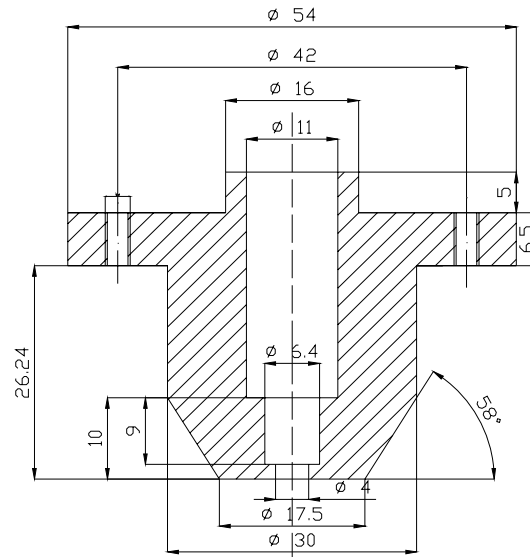
h= 4 mm

Çizen S.KÜÇÜKARSLAN	Kontrol	Dosya adı	Tarih 14.06.2006	Malzeme	Ölçek
GAZİ ÜNİVERSİTESİ MÜH.-MİM. FAK. MAKİNE MÜH. A.B.D.			ÇIKINTI APARATI		
			Resim No 1	Orj. Res. No 1	Op. No

EK-2. (Devam) Çıkıntı aparatlarının teknik resmi



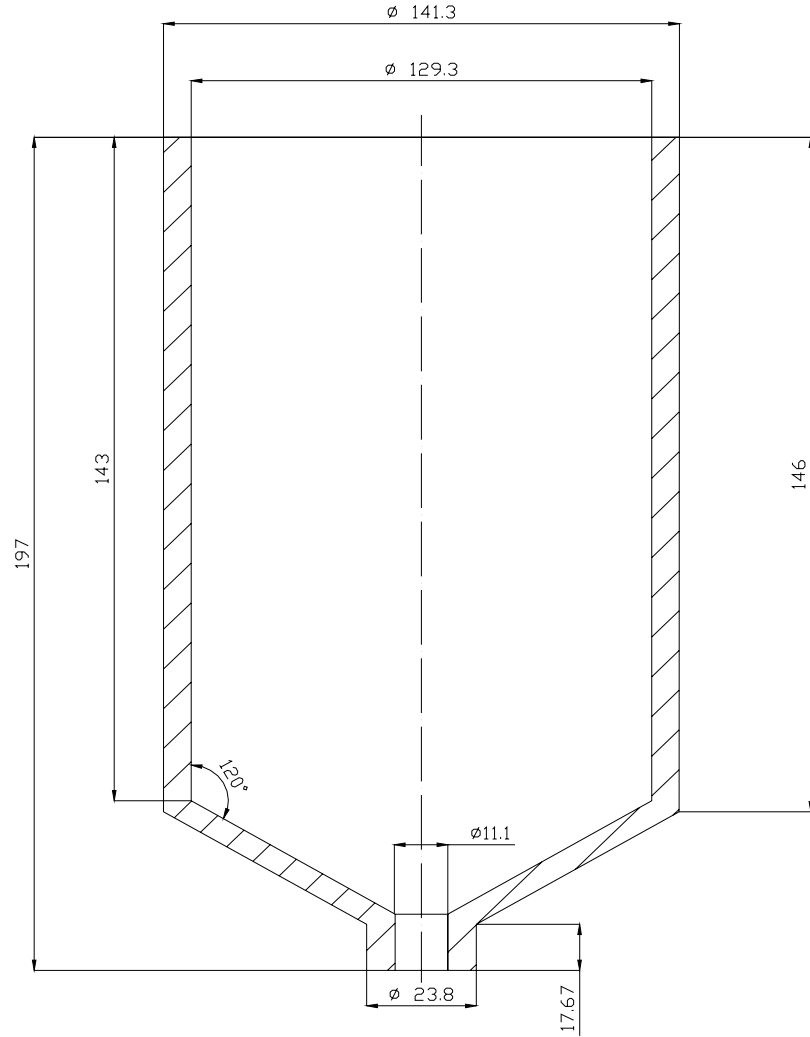
h= 6 mm



h= 8 mm

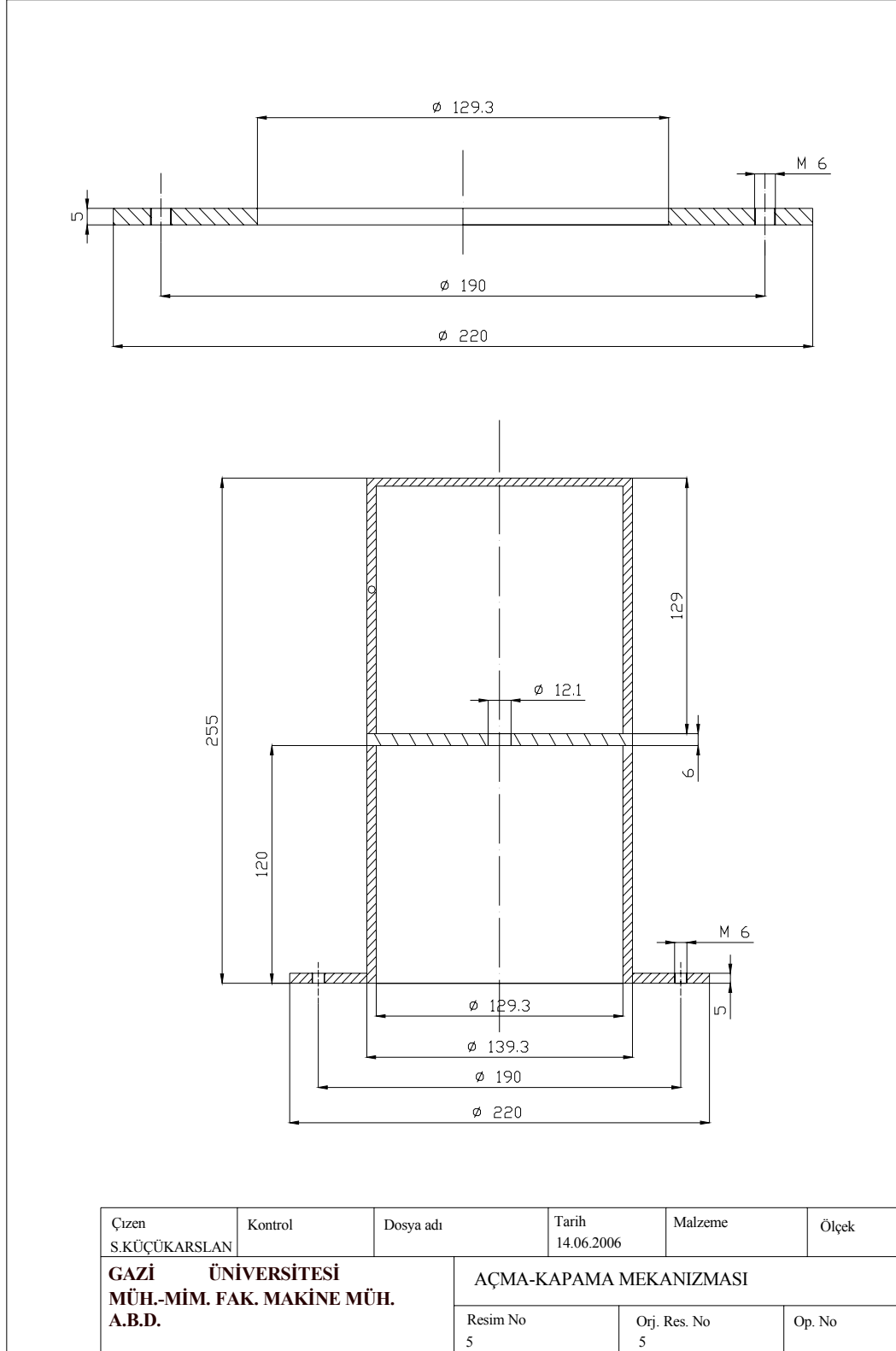
Çizen S.KÜÇÜKARSLAN	Kontrol	Dosya adı	Tarih 14.06.2006	Malzeme	Ölçek
GAZİ ÜNİVERSİTESİ MÜH.-MİM. FAK. MAKİNE MÜH. A.B.D.			ÇIKINTI APARATI		
			Resim No 2	Orj. Res. No 2	Op. No

EK-3. Ergitme potasının teknik resmi

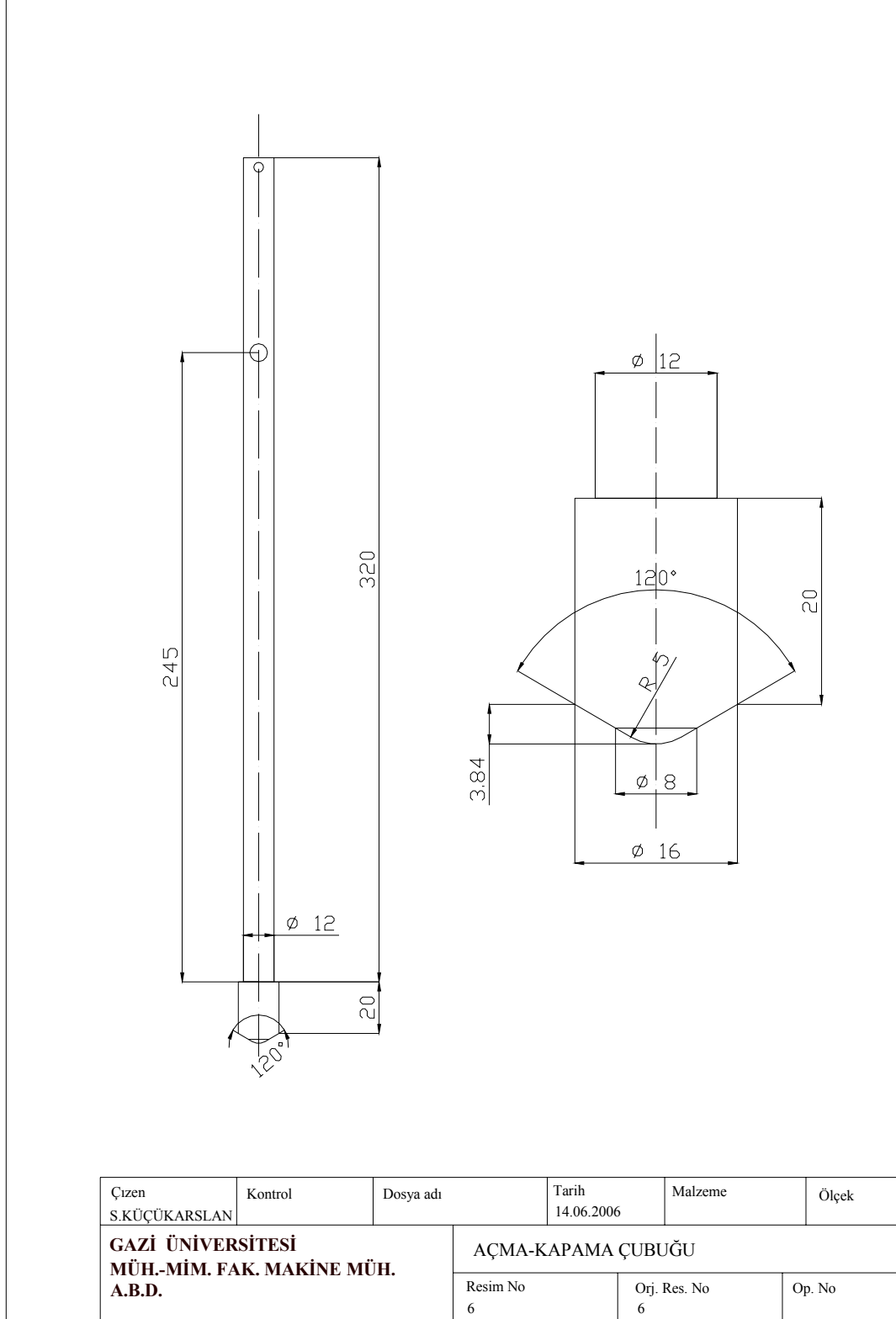


Çizen S.KÜÇÜKARSLAN	Kontrol	Dosya adı	Tarih 14.06.2006	Malzeme	Ölçek
GAZİ ÜNİVERSİTESİ MÜH.-MİM. FAK. MAKİNE MÜH. A.B.D.			ERGİTME POTASI		
			Resim No 3	Orj. Res. No 3	Op. No

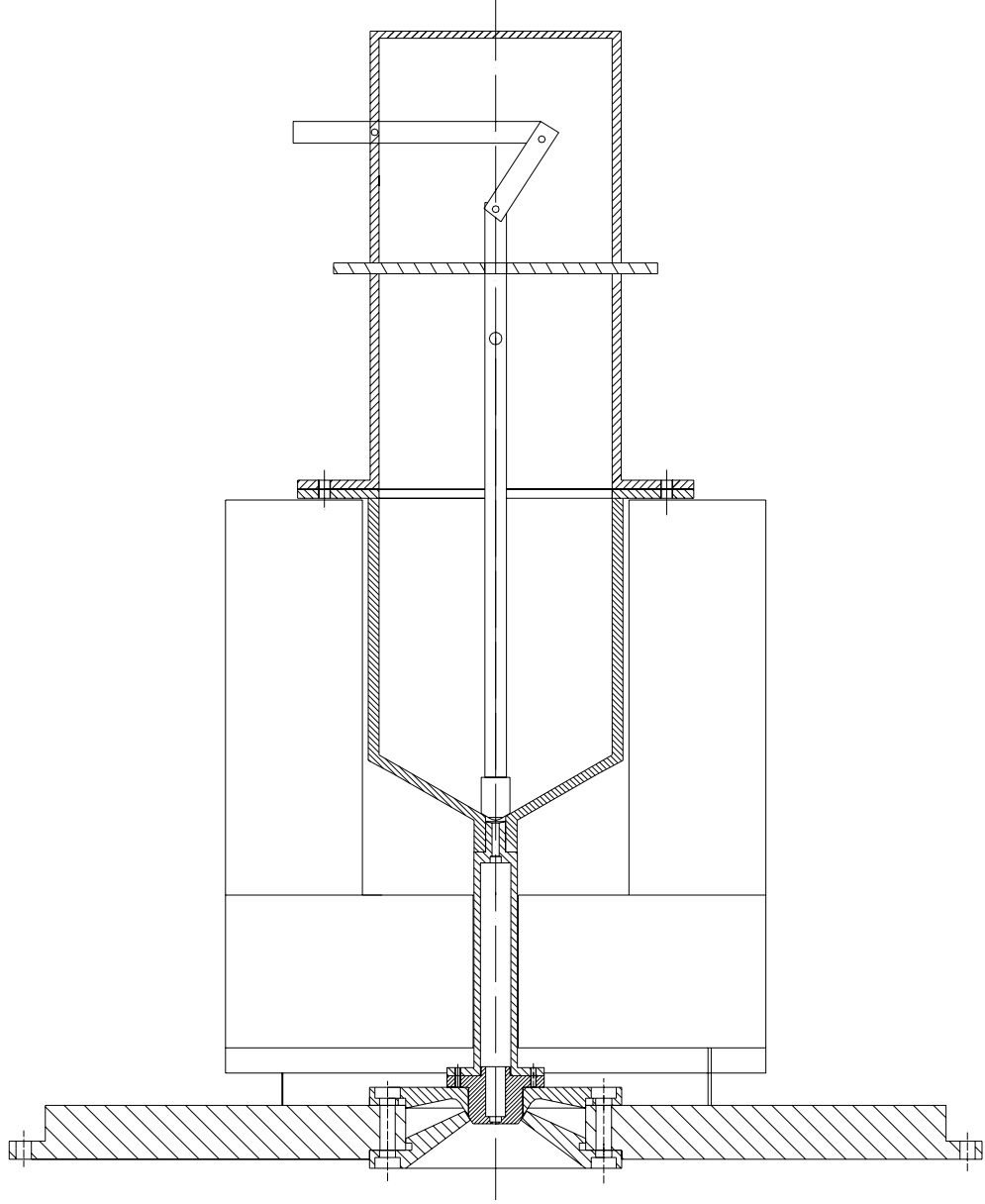
EK-5. Açma-kapama mekanizmasının teknik resmi



EK-6. Açma-kapama çubuğunun teknik resmi



EK-7. Montaj resmi



Çizen S.KÜÇÜKARSLAN	Kontrol	Dosya adı	Tarih 14.06.2006	Malzeme	Ölçek
GAZİ ÜNİVERSİTESİ MÜH.-MİM. FAK. MAKİNE MÜH. A.B.D.			MONTAJ RESMİ		
			Resim No 7	Orj. Res. No 7	Op. No

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler:

Soyadı, adı : KÜÇÜKARSLAN, Serdar
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 21.05.1980 Çorlu
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (312) 495 82 25
Faks :
e-mail : serdarkuc@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Erciyes Üniversitesi/ Makine Mühendisliği Bölümü	2003
Lise	İstanbul Kabataş Erkek Lisesi	1998

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2004-2006	Entek Isı Sistemleri San. Tic. Ltd. Şti.	Makine Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Müzik, Basketbol, Futbol, Yüzme, Gezi, Kitap, Bilgisayar