

GAZ ATOMİZASYONU İLE METAL TOZU ÜRETİMİNDE,
NOZUL GEOMETRİSİNİN TOZ BOYUTUNA
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Emin Soner YILDIZ

Yüksek Lisans Tezi

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos – 2007

GAZ ATOMİZASYONU İLE METAL TOZU ÜRETİMİNDE,
NOZUL GEOMETRİSİNİN TOZ BOYUTUNA
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Emin Soner YILDIZ

Dumlupınar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makina Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Rahmi ÜNAL

Temmuz – 2007

KABUL ve ONAY SAYFASI

Emin Soner YILDIZ'ın "YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı GAZ ATOMİZASYONU İLE METAL TOZU ÜRETİMİNDE, NOZUL GEOMETRİSİNİN TOZ BOYUTUNA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

14/08/2007

Üye : Doç. Dr. Remzi GÖREN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Rahmi ÜNAL (Danışman)

Üye : Yrd. Doç. İsmet ÇELİK

Fen Bilimleri Enstitüsün Yönetim Kurulu'nun/...../..... gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Sabri ÖZYURT
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

GAZ ATOMİZASYONU İLE METAL TOZU ÜRETİMİNDE, NOZUL GEOMETRİSİNİN TOZ BOYUTUNA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Emin Soner YILDIZ

Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2007

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr.Rahmi ÜNAL

ÖZET

Bu çalışmada, gaz atomizasyonu ile metal tozu üretiminde nozul geometrisinin toz tane boyutu ve özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Toz üretim deneyleri Dumlupınar Gaz Atomizasyon Ünitesi'nde gerçekleştirilmiştir. Birbirine çok yakın atomizasyon gaz basıncında, farklı nozullar kullanılarak yapılan deneylerde, nozul geometrisi ve metal akış borusu çıkıntı mesafesi değişiminin toz tane büyüklüğü ve dağılımı ile morfolojilerine olan etkileri araştırılmıştır. Toz tane boyutu ve dağılımı, lazer ışın yöntemi ile, toz şekil ve morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Atomizasyon gazı olarak azot, malzeme olarak kalay kullanılarak yapılan deneylerde Gaz/Metal kütleli debi oranının artmasıyla toz boyutunun küçüldüğü tespit edilmiştir. Aynı gaz çıkış alanında metal akış borusu çıkıntı mesafesinin artmasıyla toz tane boyutunun küçüldüğü gözlemlenmiştir. En küçük tozlar 10 mm metal akış borusu çıkıntı mesafesinde 12,05 μm boyutunda elde edilmiştir. Aynı metal akış borusu çıkıntı mesafesinde nozul uç geometrisindeki değişikliğin toz boyutunu önemli ölçüde etkilemediği görülmüştür. 5 mm çıkıntı mesafesinde iki farklı nozul geometrisi ile elde edilen kalay tozlarının ortalama tane büyüklükleri 14,11 μm ve 14,26 μm olarak ölçülmüştür. Üretimi gerçekleştirilen tozların çoğunluğunun küresel şekilde ve pürüzsüz bir yüzeye sahip olduğu tespit edilmiştir. İnce tozların daha iri tozlar üzerinde az miktarda uydulaşma oluşturdıkları ve iri tozlarda hücreli yapılar gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gaz atomizasyon, metal tozu, nozul geometrisi.

INVESTIGATION OF NOZZLE GEOMETRY ON THE PARTICLE SIZE FOR POWDER PRODUCTION BY GAS ATOMISATION

Emin Soner YILDIZ

Mechanical Engineering, Master of Science Thesis, 2007

Thesis Supervisor: Assist.Prof.Dr. Rahmi ÜNAL

SUMMARY

In this study, the effect of the nozzle geometry for powder production by gas atomisation was investigated. Powder production was carried out at the Dumlupınar Gas Atomisation unit. Different nozzle tip geometry and protrusion lengths were used for the investigation of particle size and powder morphology. Powder particle size was measured by using laser particle sizer, powder morphology was determined by using SEM. Nitrogen was used as the atomisation gas for the tin powder production. As the Gas/Metal mass flow ratio was increased the powder particle size was reduced. The higher protrusion length of the nozzle decreased the powder size. The smallest powder size of 12.05 microns was obtained with 10 mm protrusion length. The tip geometry at the same protrusion length has no significant effect for the powder size. For the 5 mm protrusion length the two different tip geometry produced the powder size of 14,11 and 14,26 microns. Produced powders are mostly spherical and have smooth surfaces. A few satellite formation and cellular surface structure at the big powder surfaces were observed.

Keywords: Gas Atomisation, , metal powder, nozzle geometry.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması sırasında yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım sayın Yrd.Doç.Dr. Rahmi Ünal'a, çalışmalarımnda beni teşvik eden aileme ve çalışmayı maddi olarak destekleyen TÜBİTAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma, 106M184 nolu Tübitak Araştırma Projesi kapsamında yüksek lisans bursu ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	iv
SUMMARY.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. TOZ METALURJİSİ.....	3
2.1. Toz Metal Üretim Teknikleri.....	5
2.1.1. Öğütme.....	6
2.1.2. Elektroliz.....	7
2.1.3. Kimyasal indirgeme.....	7
2.1.4. Atomizasyon.....	8
2.1.4.1. Su atomizasyonu yöntemi.....	9
2.1.4.2. Gaz atomizasyonu yöntemi.....	10
2.1.4.3. Döner disk yöntemi.....	11
2.1.4.4. Döner elektrot (REP) yöntemi.....	12
2.1.4.5. Vakum atomizasyon yöntemi.....	13
2.2. Toz Metalurjisinin Avantajları ve Uygulama Alanları.....	14
3.GAZ ATOMİZASYONU.....	16
3.1. Gaz Atomizasyon Üniteleri.....	17
3.2. Atomizasyon Mekanizmaları.....	19
3.3. Atomizasyon Sistemleri.....	20
3.4. Nozul Çeşitleri.....	22
3.5. Nozulda Gaz Akış Değişkenleri.....	26
3.5.1. Gaz akış modelleri.....	26
3.5.2. Negatif basınç oluşumu.....	27
3.5.3. Geçiş bölgesinin gaz atomizasyonuna etkisi.....	28
3.5.4. Geri basınç oluşumu.....	29
3.6. Püskürtme Şekillendirme.....	30

İÇİNDEKİLER (Devam)

	<u>Sayfa</u>
4. DENEYSEL YÖNTEM.....	32
4.1. Dumlupınar Gaz Atomizasyon Ünitesi.....	32
4.1.1. Gaz sistemi.....	33
4.1.2. Isıtma ve ergitme.....	33
4.1.3. Nozul.....	34
4.1.4. Atomizasyon kulesi.....	37
4.1.5. Toz tutma ve sistem temizliği.....	37
4.2. Atomizasyon Gaz Debisinin Ölçümü.....	38
4.3. Metal Akış Debisinin Ölçümü.....	38
4.4. Metal akış Borusu Ucunda oluşan Basıncın Ölçülmesi.....	38
4.5. Atomizasyon Çalışmaları.....	39
4.6. Toz Boyut Analizi.....	40
4.7. Tozların Şekil ve Morfolojilerinin İncelenmesi.....	41
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	44
5.1. Metal Akış Borusu Uç Basınç Ölçüm Sonuçları.....	46
5.2. G/M Debi Oranının Ortalama Toz Boyutuna Etkisi.....	49
5.3. Atomizasyon Oluşumu.....	49
5.4. Metal Akış Borusu Çıkıntı Mesafesinin Ortalama Toz Boyutuna Etkisi.....	52
5.5. Toz Boyut ve Dağılımı.....	53
5.6. Tozların Şekilleri ve Yüzey Morfolojileri.....	54
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	60
6.1. Sonuçlar.....	60
6.2. Öneriler.....	61
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	62
EKLER	
Ek 1. 1 nolu deneyde NZL-1 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Toz Toplama Kabı)	
Ek 2. 1 nolu deneyde NZL-1 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Siklon)	
Ek 3. 3 nolu deneyde NZL-1 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Toz Toplama Kabı)	

İÇİNDEKİLER (Devam)

- Ek 4. 3 nolu deneyde NZL-1 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Siklon)
- Ek 5. 4 nolu deneyde NZL-2 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Toz Toplama Kabı)
- Ek 6. 4 nolu deneyde NZL-2 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Siklon)
- Ek 7. 5 nolu deneyde NZL-3 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Toz Toplama Kabı)
- Ek 8. 5 nolu deneyde NZL-3 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Siklon)
- Ek 9. 6 nolu deneyde NZL-4 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Toz Toplama Kabı)
- Ek 10. 6 nolu deneyde NZL-4 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Siklon)
- Ek 11. 7 nolu deneyde NZL-5 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Toz Toplama Kabı)

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Toz metal parçaların üretim aşamaları.....	4
2.2. Toz morfolojileri (şematik).....	5
2.3. Mekanik öğütme ile toz üretiminin şematik gösterimi.....	6
2.4. Elektroliz ile toz üretimi.....	7
2.5. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi.....	8
2.6. Su atomizasyon tekniği ile demir ve çelik tozu üretimi.....	9
2.7. Su atomizasyon işlemi.....	10
2.8. Düşey gaz atomizasyon ünitesi.....	11
2.9. Döner disk atomizasyon yöntemi.....	12
2.10. Döner elektrod yöntemiyle toz üretiminin şematik gösterimi.....	13
2.11. Vakum atomizasyon yöntemi ile metal tozu üretimi.....	14
2.12. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen malzemelerin kullanım alanları.....	15
3.1. Yatay gaz atomizasyon ünitesi.....	17
3.2. Düşey gaz atomizasyon ünitesi.....	18
3.3. Sıvı metal tabakasının bölünme mekanizması.....	20
3.4. Atomizasyon sürecinde birincil ve ikincil parçalanma bölgeleri.....	20
3.5. Atomizasyon Sistemleri (Şematik).....	21
3.6. Şematik nozul resimleri.....	22
3.7. Farklı nozul geometrileri.....	23
3.8. Daralan geometriye sahip nozulda yüksek hızlı gaz jetinin gelişimi.....	24
3.9. Daralan-genişleyen geometriye sahip nozulda yüksek hızlı gaz jetinin gelişimi.....	24
3.10. Ses hızının altındaki ve üstündeki akışlar için nozul tipleri.....	25
3.11. Nozul geometrisi tipleri.....	25
3.12. Metal akış borusu çıkışında basınç oluşumu.....	27
3.13. Akış eksenli boyunca dolaşım bölgesi ve durgunluk noktasının gösterimi.....	28
3.14. Süpersonik jet etkili nozulda dolaşım bölgesinin şematik gösterimi.....	29
3.15. Geri basınç oluşumunun şematik gösterimi.....	30
3.16. Püskürtme Şekillendirme prosesi.....	31
4.1. Dumlupınar gaz atomizasyon ünitesi.....	32
4.2. Metal ergitme fırını ve pnömatik sistem.....	33
4.3. Deneylede kullanılan süpersonik geometriye sahip nozul (şematik).....	34
4.4. NZL-1'in şematik gösterimi ve karakteristik değerleri.....	35

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.5. Farklı uç geometrisine sahip nozullar.....	36
4.6. Toz Tutma bölümleri.....	37
4.7. SIEMENS SITRANS F C MASSFLO MASS 2100 kütleselel debiölçer.....	38
4.8. Metal akış borusu ucunda oluşan basınç ölçümü.....	39
4.9. Gaz atomizasyon akış şeması.....	40
4.10. Malvern Mastersizer E partikül boyutu ölçme cihazı.....	40
4.11. Lazer ışını prensibinin şematik olarak gösterimi.....	41
4.12. ZEISS EVO 50 EP tipi SEM cihazı.....	42
4.13. SEM'in şematik yapısı.....	43
5.1. Deneylerde kullanılan nozul resmi.....	44
5.2. NZL-1 için ölçülen basınç değerleri.....	46
5.3. NZL-2 için ölçülen basınç değerleri.....	47
5.4. NZL-3 için ölçülen basınç değerleri.....	47
5.5. NZL-4 için ölçülen basınç değerleri.....	48
5.6. NZL-5 için ölçülen basınç değerleri.....	48
5.7. G/M kütleselel debi oranı ile ortalama toz boyutu değişimi.....	49
5.8. NZL-1 ile yapılan 2 no'lu deneyde başlangıçtan itibaren 1/25 sn aralıklarla çekilmiş atomizasyon görüntüleri.....	50
5.9. Gaz dolaşım bölgesi ve koni oluşumunun şematik olarak gösterimi.....	51
5.10. Farklı nozullarla yapılan atomizasyon çalışmalarından alınan görüntüler.....	51
5.11. Metal akış borusu çıkıntı mesafesi ile toz boyutu değişimi.....	52
5.12. NZL-2 ile gerçekleştirilen deneyde toz toplama kabında biriken tozların dağılımı..	54
5.13. NZL-2 ile üretilmiş kalay tozu üzerinde oluşan uydulaşmalar.....	55
5.14. Gözlemlenen sıvanma oluşumları.....	56
5.15. NZL-3 ile üretilmiş kalay tozlarının genel görünümü.....	57
5.16. NZL-4 ile üretilen çok küçük boyuttaki kalay tozu.....	57
5.17. İkinci bölünmeyi tamamlayamayan tozlar.....	58
5.18. Üretilen kalay tozlarına ait hücreselel yapılyüzeyler.....	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Tozun önemli özellikleri ve etki ettiği faktörler.....	6
4.1. Nozullara ait metal akış borusu çıkıntı mesafeleri.....	34
5.1. Atomizasyon değişkenleri ve elde edilen ortalama toz tane boyutları.....	45
5.2. Kullanılan nozullara ait çıkıntı mesafesi, G/M debi oranı ve ortalama toz boyut dağılımları	52

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Nozul Çıkış Alanı, mm ²
A*	Boğaz Alanı, mm ²
d ₅₀	Ortalama Toz Boyutu, µm.
M	Mach Sayısı
M ₂	Genleşmiş Gazın Mach Sayısı
P _a	Atomizasyon Basıncı
P ₂	Genleşme Basınç Değeri
γ	Özgül Isı Oranı
α	Nozul Gaz Çıkış Açısı, °
<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
G/M	Gaz debisinin Metal Debisine Kütleli Oranı
NZL-1	1 Numaralı Nozul
NZL-2	2 Numaralı Nozul
NZL-3	3 Numaralı Nozul
NZL-4	4 Numaralı Nozul
NZL-5	5 Numaralı Nozul
PŞ	Püskürtme Şekillendirme
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopu
T/M	Toz Metalurjisi

1. GİRİŞ

Metalik toz veya bu tozların şekillendirilip sinterlenmesi ile metalik parça üretimi olarak tanımlanan toz metalurjisi (T/M), çeşitli metal işleme teknolojileri arasında en farklı üretim tekniğidir. T/M, tozların imalatı, karakterize edilmesi ve kullanışlı parçalara dönüştürülmesi işlemlerini kapsar. T/M, imali zor parçaların (küçük, fonksiyonel, birbiri ile uyumsuz, kompozit yapılar vb.) ekonomik, yüksek mukavemet ve minimum toleransla ve diğer üretim yöntemlerine kıyasla daha avantajlı bir şekilde üretilmesi yöntemidir. T/M, farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal tozlarını, sağlam hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürür. İstenen mikroyapıda, fiziksel ve mekanik özelliklerde alaşım ve kompozit malzeme üretmek mümkündür.

T/M yönteminin hammaddesi olan tozun üretimi oldukça önemli bir aşamadır. Birçok toz üretim tekniği arasından ticari olarak; mekanik yöntemler, kimyasal yöntemler, elektroliz yöntemi ve atomizasyon yöntemi kullanılır. Atomizasyon ile üretilmiş tozlar, diğer üretim yöntemleri ile elde edilemeyecek özelliklere ve avantajlara sahiptir. Sıvı metal demetinin basınçlı akışkanlar ile veya mekanik olarak çok küçük damlacıklara ayrılması olarak tanımlanan atomizasyon işlemi için su atomizasyonu, gaz atomizasyonu, santrifüj atomizasyonu, vakum atomizasyonu ve ultrasonik gaz atomizasyonu yöntemleri kullanılmaktadır. Su ve gaz atomizasyonu, bu yöntemlerden en yaygın olarak kullanılanıdır. Bu yöntem, ergitilebilen tüm metal ve alaşım tozlarının üretiminde kullanılabilir. Gaz atomize tozlar küresel şekle sahiptir ve atomizasyon esnasında koruyucu atmosfer gazı kullanıldığı için yüzeylerindeki oksit miktarı daha düşüktür. 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 hava, N₂, Ar, CO₂ ve He gibi gazlar kullanılabilir. Gaz atomizasyon sistemleri genel olarak serbest düşmeli ve yakından eşlemeli olmak üzere ikiye ayrılır. Yakından eşlemeli atomizasyon sistemleri daha iyi kinetik enerji transferi sağladığı için serbest düşme yöntemine göre daha üstündür. Yakından eşlemeli sistemlerde daha ince boyutlarda ve daha dar dağılıma sahip tozlar üretmek mümkün olmaktadır.

Gaz atomizasyonu yöntemi, sıvı metal debisi, gaz debisi, gaz basıncı ve nozul geometrisi gibi çok sayıda değişkene sahiptir. Bu değişkenlerden en önemlisi nozul geometrisidir. Gaz atomizasyonunda nozul, simetri eksenini boyunca hareket eden akışkanın hızını artırırken basıncını düşüren geometrik yapıya verilen isimdir. Gaz atomizasyonunda kullanılan nozullar farklı geometrilere sahiptir. Genel olarak kullanılan nozullar, sonik

(daralan), veya süpersonik (daralan-geişleyen) geometridirler. Gaz akışı nozul geometrisine göre değişmektedir. Atomizasyon işleminde nozul, gazın kinetik enerjisini sıvı metale aktarır. Gazın hızı, basıncı, sıcaklığı ve yoğunluğu gibi özellikleri nozulun tasarımına ve verimliliğine bağlıdır. Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen bilgilere göre süpersonik geometrilili nozullar, sonik geometrilili nozullar göre daha iyi gaz genişleme karakteristiği gösterirler. Böylelikle süpersonik nozullarda daha küçük boyutta toz üretimi gerçekleştirilebilir. Yüksek verimli nozullar mümkün olduğu kadar düşük atomizasyon basınçlarında daha küçük çapta toz üretimine imkan sağlarlar. Yakından eşlemeli sistem ile toz üretimi fiziksel olarak oldukça karmaşık bir işlemdir. Parçalanma mekanizmasının karmaşıklığından dolayı bu işlem bugüne kadar tam olarak anlaşılabilmiş değildir. Bu nedenle, toz üretim kabiliyetinin geliştirilmiş nozul tasarımı ve geometrisi ile iyileştirme konusunda büyük bir potansiyel vardır ve günümüzde çalışmalar bu yönde devam etmektedir.

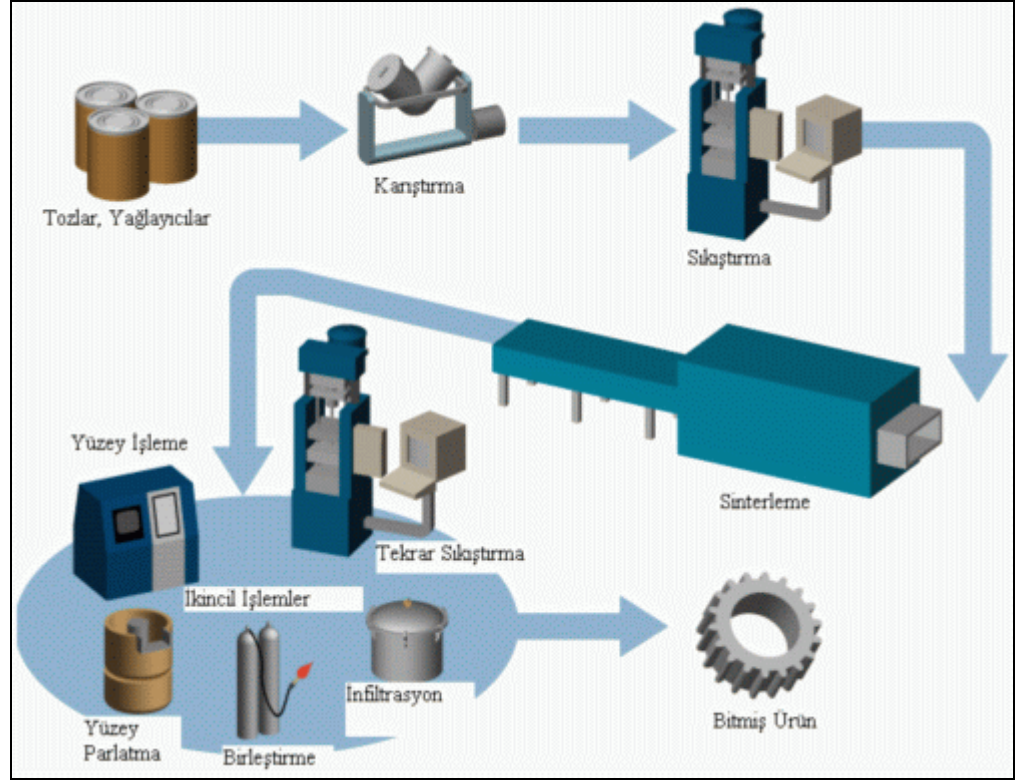
Bu araştırmanın amacı, yakından eşlemeli gaz atomizasyon sistemi ile metal tozu üretiminde, süpersonik nozul geometrisinin toz boyutuna ve özelliklerine etkisinin araştırılmasıdır. Farklı geometrilerdeki nozullar ile yapılan deneyler Dumlupınar Gaz Atomizasyon Ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda üretilen kalay tozlarının toz tane büyüklüğü, dağılımı ve morfolojileri incelenerek süpersonik nozul geometrisinin etkisi araştırılmıştır.

2. TOZ METALURJİSİ

Toz metalurjisi (T/M), metal işleme teknolojileri arasında çok büyük farklılık gösteren bir üretim tekniğidir. Çok eskilerden beri bilinen, uygulanan bir yöntem olmasına rağmen uygulama açısından yeni sayılabilecek bir üretim tekniğidir. Toz metalurjisini cazip kılan, ekonomik açıdan, çok yüksek hassasiyette karmaşık şekilli, yüksek kalitede parça üretiminin mümkün olmasıdır. Ergime sıcaklığı yüksek olan metaller, T/M ile kolaylıkla şekillendirilebilirler. Döküm, gibi alışlagelmiş üretim tekniklerinde yaşanan oksidasyon, segregasyon, gaz absorpsiyonu ve yüksek yoğunluk farkından dolayı alaşım oluşturmama gibi birçok problem T/M yöntemi ile kolaylıkla ortadan kaldırılabilir. Bir üretim yöntemi olmasının yanı sıra T/M aynı zamanda önemli bir malzeme ve yarı mamul üretim yöntemidir. T/M, kompozit malzeme üretiminde de kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yolla alışlagelmiş malzemelerden daha farklı ve üstün özelliklerde malzeme üretmek mümkündür [1].

T/M farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal tozlarını sağlam, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürür. Bu işlem; şekillendirme veya presleme ve daha sonra parçacıkların sinterleme yolu ile ısıl bağlanması basamaklarını içerir. T/M nispeten düşük enerji tüketimine, yüksek malzeme kullanımına ve düşük maliyete sahip otomatikleşmiş işlemleri verimli kullanır. Sahip olunan bu özellikler ile T/M verimlilik, enerji ve hammadde gibi günümüz kaygılarını ortadan kaldırır. Bunların sonucu olarak, T/M konusu sürekli gelişmekte ve geleneksel metal şekillendirme operasyonlarının yerini almaktadır. Kalite dağılımının homojen olması, içeriğinin kontrol edilebilir olması, düşük enerji tüketimi, yüksek malzeme kullanım oranı ve düşük birim maliyet gibi faktörler nedeni ile toz metalurjisi üretim yöntemi son yıllarda imalat sektöründe müstakil üretim seçeneği olarak kullanılmaktadır [2].

Toz Metalurjisi T/M üretim yöntemi metal tozlarının üretimi ve üretilen bu tozların imalatı istenilen parçaların şekline dönüştürülmesi işlemidir. Bu yöntem toz üretimi, üretilen tozların karıştırılması, tozların preslenmesi, sinterleme ve isteğe bağlı işlemler (infiltrasyon, yağ emdirme, çapak alma, vb.) olmak üzere belirli aşamalardan oluşur (Şekil 2.1) [3].



Şekil 2.1. Toz metal parçaların üretim aşamaları

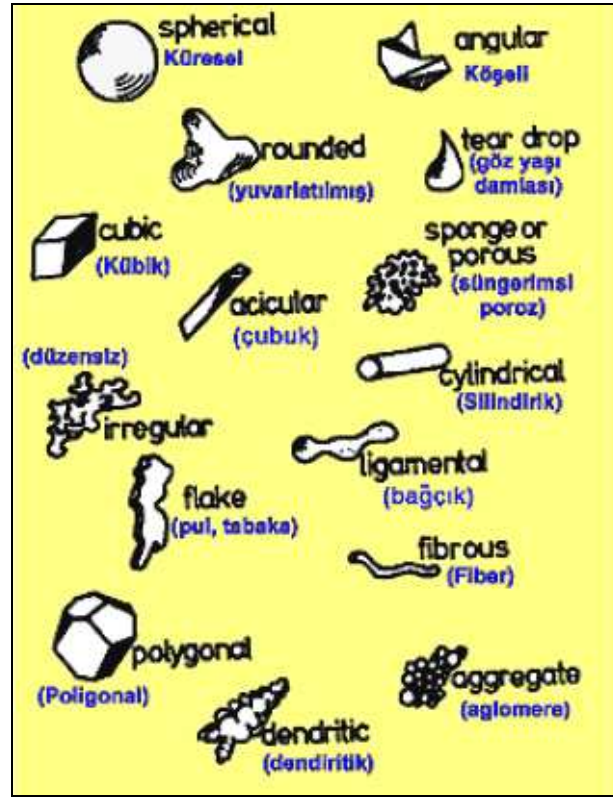
Makine parçalarının hızlı, parçadan beklenen fonksiyonları yerine getirecek mukavemet ve özelliklerin yanı sıra istenen boyut hassasiyetlerinde üretimi gittikçe önem kazanmaktadır. Toz metalurjisi ile üretilen parçalar bu gereklilikleri her geçen gün daha fazla yerine getirmektedir. Karışık şekilli parçaların üretiminin yanında diğer yöntemlerle üretilmesi zor parçalar, kısa sürede ve beklenen özelliklerde toz metalurjisi yöntemiyle üretilebilmektedir. Ayrıca istenilen kimyasal bileşimdeki metallerin tozları ile parça üretebilmenin yanı sıra farklı metallerin tozlarından oluşan karışımlar da kullanılabilir. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen makine parçaları ek bir talaşlı işlem gerektirmemektedir. Beklenen mekanik özelliklere ve toz bileşimine bağlı olarak belirlenen sinterleme işlemi sonunda makine parçası olarak doğrudan kullanılabilir [4].

Toz metalurjisi (T/M) yöntemi ile imal edilen makine parçalarının özellikleri toz tanelerinin şekli, boyutu, bileşimi, yağlayıcı cinsi, sıkıştırma basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresi, bitirme işlemleri gibi çok sayıda parametreye bağlı olduğundan özellikler hakkında genel sonuçlara varmak zordur. T/M parçaların mekanik özellikleri genellikle yoğunluğa bağlı olarak değişmektedir. T/M parçalarda gözenek miktarı azaldıkça genel anlamda mekanik özellikler iyileşmektedir. Bu genelleme kabaca kabul görürken, iyileşme oranının hangi parça yoğunluğu

değerleri üzerinde önem kazandığı net değildir. Ancak düşük izafi yoğunluklarda toplam gözeneklilik miktarı ana faktör olarak gözlenirken, yüksek yoğunluklarda gözenek boyutu, şekli ve dağılımı ile birlikte matris malzeme mikro yapısı daha önemli faktörler olarak dikkat çekmektedirler [5].

2.1. Metal Tozu Üretim Teknikleri

Hemen hemen bütün malzemeler toz haline getirilebilir, fakat tozları üretmek için seçilen metodlar malzeme özelliklerine bağlıdır. Öğütme, elektroliz, kimyasal indirgeme ve atomizasyon dört ana toz üretim metodudur. Bu üretim metodlarına ilave olarak, bazı seçilmiş malzemeler için özel toz üretim teknikleri de kullanılır. Endüstride kullanılan tozların % 60'dan fazlası atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir [2]. Tozun geometrik şekli üretim yöntemine bağlı olarak küreselden, dendritik formlara kadar çok farklı olabilmektedir (Şekil 2.2). Aynı şekilde tozun yüzey durumu da yani düzgün veya gözenekli olması da yine üretim yöntemine göre değişiklik göstermektedir [1]. Tozun önemli özellikleri ve etki ettiği faktörler, Çizelge 2,1'de verilmiştir.



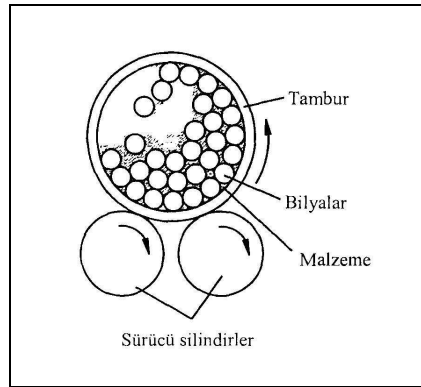
Şekil 2.2. Toz morfolojileri (şematik) [6]

Çizelge 2.1 Tozun önemli özellikleri ve etki ettiği faktörler [7].

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

2.1.1. Öğütme

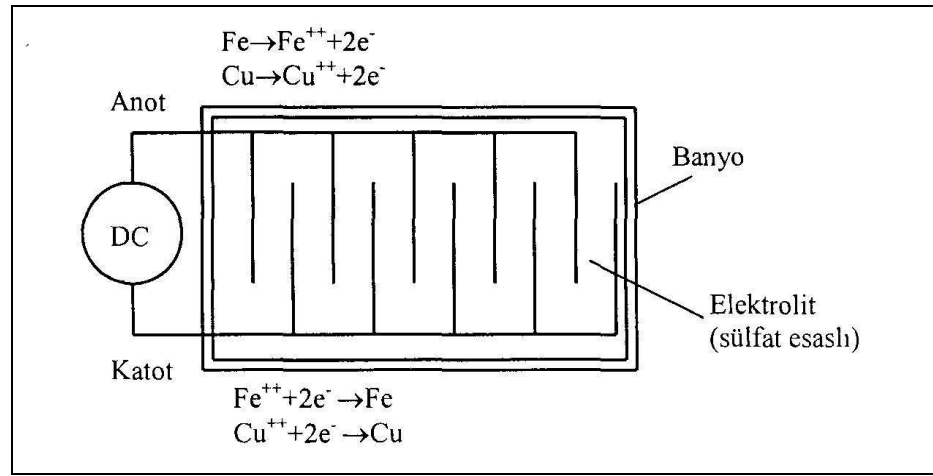
Metallerarası bileşikler, demir alaşımları, demir-krom, demir-silisyum v.b. gibi kırılğan malzemeler mekanik olarak bilyalı değirmenlerde öğütülürler. Fakat öğütme işlemi bir çok sünek metal için uygun değildir; çünkü bu metaller kolayca kırılmazlar. Sünek tanecikler kırılma yerine birbirleri ile soğuk olarak kaynaklanır ve daha büyük tanecik oluştururlar. Gevrek olmayan malzemelerin kırılması zor olduğu için öğütme işlemi genellikle bu tür malzemelere uygulanmaz, bunun yerine bazı sünek malzemeler sıvı azot ile soğutularak gevrek hale gelmesi ve öğütme işlemine elverişli hale gelmesi sağlanır. Sünek malzemelerin öğütülmesi özellikle alüminyumun öğütülmesinde yapışmayı engelleyici yağlayıcılar kullanılır. Bu yöntemde diğer bir uygulama da hidrürler oluşturmak ve sonra bu hidrürlerin vakum ortamında giderilmesi ile metal veya tozlarının eldesi sağlanır, bu yöntem daha çok titanyum için kullanılan bir yöntemdir. Burada elde edilen toz, kütleler halindedir ve yüksek oranda hidrojen ve oksijen içerir [1].



Şekil 2.3. Mekanik öğütme ile toz üretiminin şematik gösterimi

2.1.2. Elektroliz

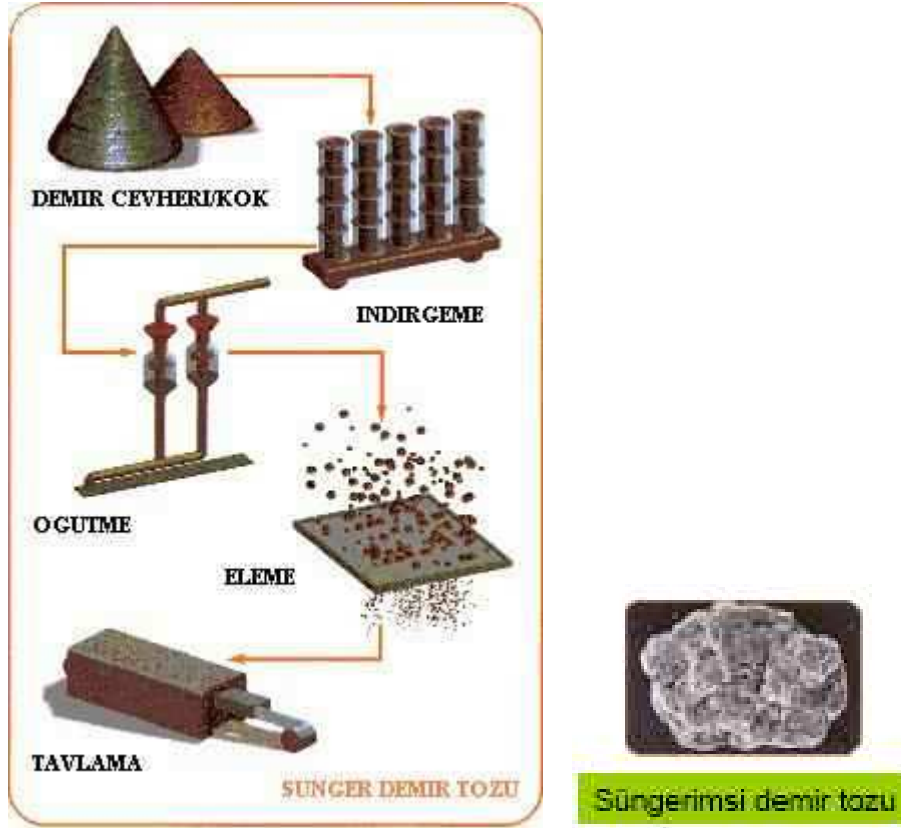
Elektrolitin kimyasal bileşimi ve mukavemeti, sıcaklık, akım yoğunluğu gibi şartları uygunca seçerek, bir çok metal sünger veya toz durumunda katot üzerinde biriktirilebilir. Daha sonraki işlemler olarak, yıkama, kurutma, indirgeme, tavlama ve öğütme gerekli olabilir. Bu yöntemle üretilen metallerin başında bakır gelir, aynı zamanda krom ve magnezyum da bu yöntemle üretilir. Elektrolitik tozlar çok saftırlar [2].



Şekil 2.4. Elektroliz ile toz üretimi [1]

2.1.3. Kimyasal indirgeme

Toz üretiminde ana kimyasal işlemleri metal oksit, karbonatlar, nitratlar veya halojenli (VII Grup element, F, Cl, Br, I) bileşiklerin bir gaz (genellikle H_2) veya katı (karbon veya yüksek oranda reaktif metal) yardımıyla indirgemesi oluşturur. Çoğu kez indirgenecek bileşik katı haldedir [8]. Demir tozlarının üretiminde bu metod çok kullanılmaktadır. Bu yöntemde seçilen cevher öğütülür, kokla karıştırılır, karışım indirgemenin olduğu sürekli fırından geçirilir ve kek şeklinde sünger demir elde edilir (Şekil 2.5). Sünger demir daha sonra öğütülür, metalik olmayan malzemelerden ayrılır ve elenir. Tozların saflığı ham malzemelere bağlıdır. Düzensiz süngerimsi tanecikler yumuşaktır ve kolayca preslenebilir ve böylece ham mukavemeti iyi olan ürünler oluşur [2]. Genel olarak tozların kimyasal saflıkları, elektrolitik ve atomizasyon yöntemlerinde daha yüksek olmasına rağmen kimyasal çöktürme yöntemi ile istenilen toz boyutları ve şekli kolaylıkla üretilmektedir [9].



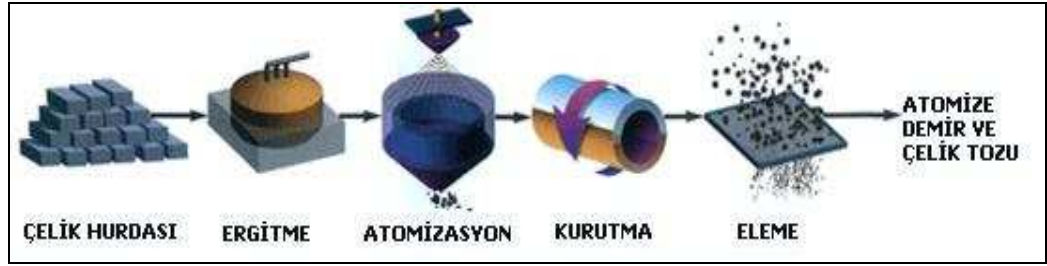
Şekil 2.5. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi

2.1.4. Atomizasyon

Atomizasyon, sıvı metali mekanik olarak ya da belirli bir hıza sahip sıvı veya gaz akımı ile parçalamaktır [10]. Diğer toz üretim teknikleri arasında atomizasyon yöntemleri, metal ve alaşım tozlarının üretiminde en çok tercih edilen yöntemdir. Atomize tozlar diğer üretim yöntemleri ile elde edilemeyecek özelliklere ve avantajlara sahiptir [11].

Bu işlemden eriyik formdaki metal birbirleri ile veya katı yüzeylerle temas etmeden çok küçük damlacıklara parçalanır ve soğutulurlar. Temel prensip, eriyik haldeki metal çok ince şerit halinde akıtılır ve bu esnada bir su veya gaz jeti ile çok küçük parçacıklara ayrılarak soğutulur. Hava, azot ve argon sıklıkla kullanılan gazlardır ve su (veya gazyağı-parafin) ise çok sık tercih edilen sıvıdır. Atomizasyon, metal tozu üretiminde kullanılan en yaygın toz üretim yöntemidir. Bu üretim tekniği üç ana bölüme ayrılır [8]:

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



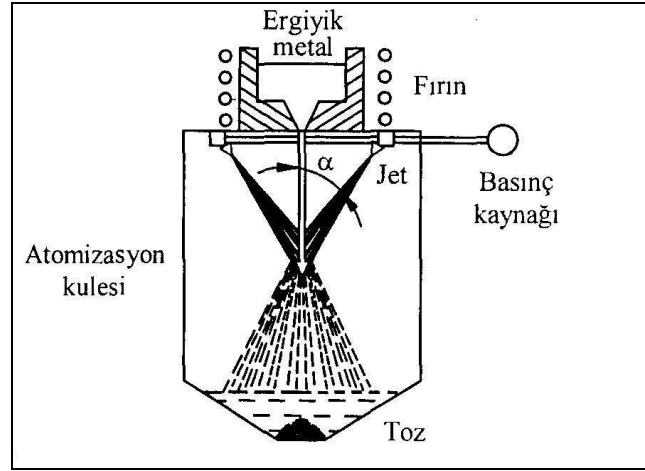
Şekil 2.6. Su atomizasyon tekniği ile demir ve çelik tozu üretimi

Atomizasyon tekniğinde kullanılan yöntemler:

- Su atomizasyonu yöntemi
- Gaz atomizasyonu yöntemi
- Döner disk yöntemi
- Döner elektrod (REP) yöntemi
- Vakum atomizasyon yöntemi

2.1.4.1. Su atomizasyonu yöntemi

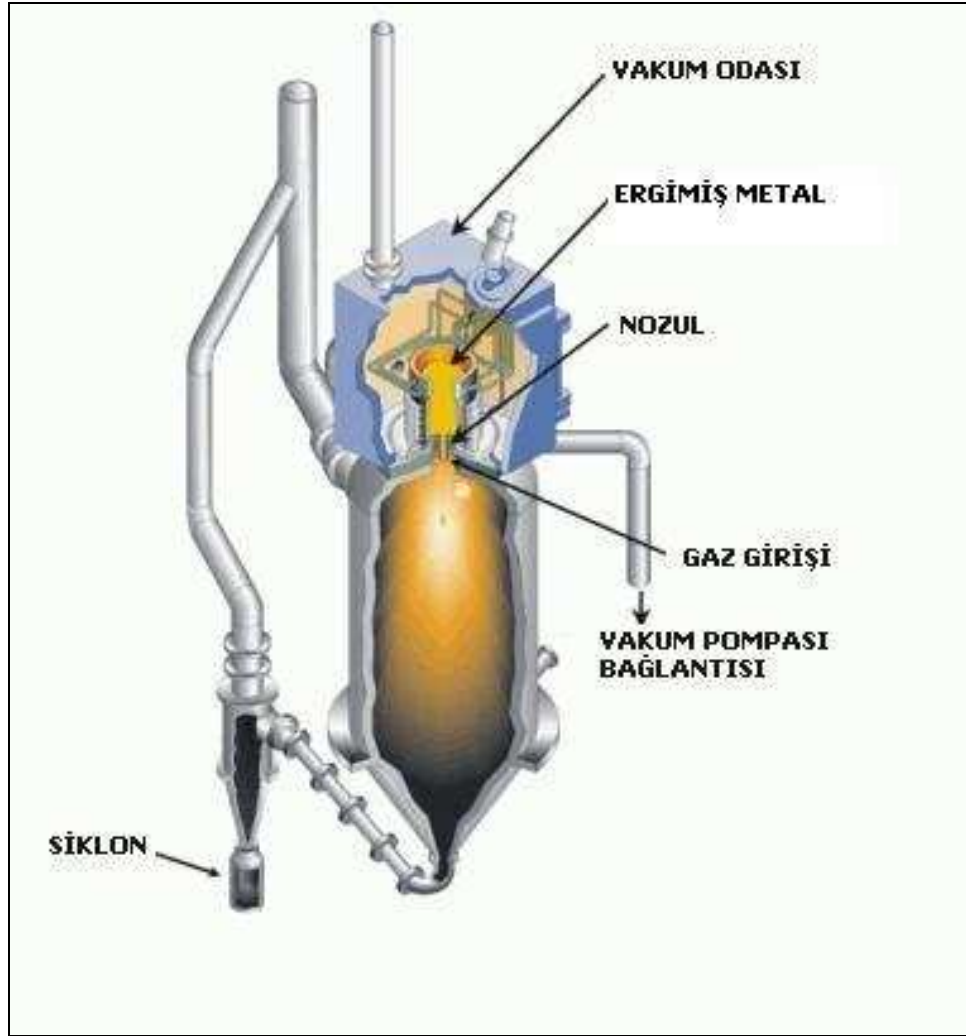
Endüstriyel manada düşük kurulum ve işletme giderleri nedeniyle atomizasyonla toz üretim yönteminde su jeti sıvı atomizasyonu üretim miktarı açısından kullanılan en yaygın toz üretim yöntemidir. Pota çıkış ağzından eriyik metal düşey yönde akıtılırken yüksek basınçlı ve özel tasarımlı su jetleri ile parçalanır (Şekil 2.7). Uygulamalı çalışmalar sonucu elde edilen ampirik ilişkiler bu yöntemle elde edilen toz malzemelerin ortalama tane boyutu ve dağılımına, suyun basıncı ve hızı, metal eriyik akış açısı, eriyik viskozitesi, eriyik yoğunluğu, eriyik yüzey gerilimi, sıvı metal akış hızının soğutma suyu akış hızına oranı gibi parametreler etki etmektedir. Su atomizasyon yöntemi ile elde edilen tozların genelde ortalama tane boyutu 30-1000 μm arasında olmaktadır. Proses parametrelerinin değiştirilmesi suretiyle toz şekli farklılık gösterebilir. Tipik toz şekli düzensiz olup bu tozların sıkıştırma sonrası ham dayanımları yüksektir ve yapısal parçaların imalinde kullanılır. Atomize edilen metal ve kullanılan suyun reaksiyonu ise sistemin dezavantajlarından [8].



Şekil 2.7. Su atomizasyonu işlemi

2.1.4.2. Gaz atomizasyonu yöntemi

Basınçlı gaz ile atomizasyon da prensip olarak su atomizasyonu yöntemine benzer, ancak burada akışkan olarak su yerine gaz kullanılır. Sistemin birbirine nozul ile irtibatlı düşey olarak üst üste bulunan iki odası vardır (Şekil 2.8). Üstteki odada sıvı metal potası bulunmakta, alttaki odada ise atomizasyon işlemi yapılmaktadır. Her iki oda da vakum pompasına bağlantılı olup oksidasyonu engellemek için işlem vakum altında yapılmaktadır. Basınçlı gaz tüpünden boru ile nozula ulaşan gaz potadaki sıvı metali beraberinde sürükleyerek atomizasyon odasına pulverize ederek dağıtır. Soğuyan metal tozu bu odanın tabanındaki bir hazne içinde toplanır. Pulverize edilen metal tozlarının birbirine yapışmaması, şekillerinin bozulmaması için atomizasyon odasının boyutları dikkatli seçilmelidir [1,2].

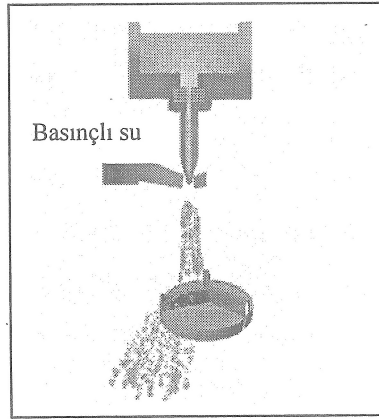


Şekil 2.8. Düşey gaz atomizasyonu ünitesi [12]

2.1.4.3. Döner disk yöntemi

Atomizasyon için değişik yöntemler kullanılabilir, bunların içinde önemli bir yer tutan yöntem olarak merkezkaç kuvvetinin etkisiyle toz metal üretimini sağlayan döner disk yöntemi gösterilebilir. Bu yöntem içinde de iki ayrı üretim tekniği vardır, bunlardan biri belli bir miktarda sıvı metal toz oluşturacak kadar merkezkaç kuvvete tabi tutulur, diğer yöntemde ise ergimiş metal sürekli olarak dönen bir disk veya koni üzerine akıtılır, buradan saçılan metalin toz haline gelmesi sağlanır (Şekil 2.9). Ergitme odasından akıtma potasına aktarılan sıvı metal, akıtma potası altındaki memeden dönen bir disk üzerine akıtılır. Disk üzerindeki set ve yarıklara çarpan sıvı metal parçalanarak şekildeki gibi saçılır. Saçılan metal parçacıklar nozuldaki çıkışta bazen su ile soğutulmuş birbirine yapışmadan katılaşmaları sağlanır. Sıvı metali mekanik olarak parçalamakta uygulanan basit bir yol da katılaşma sırasında

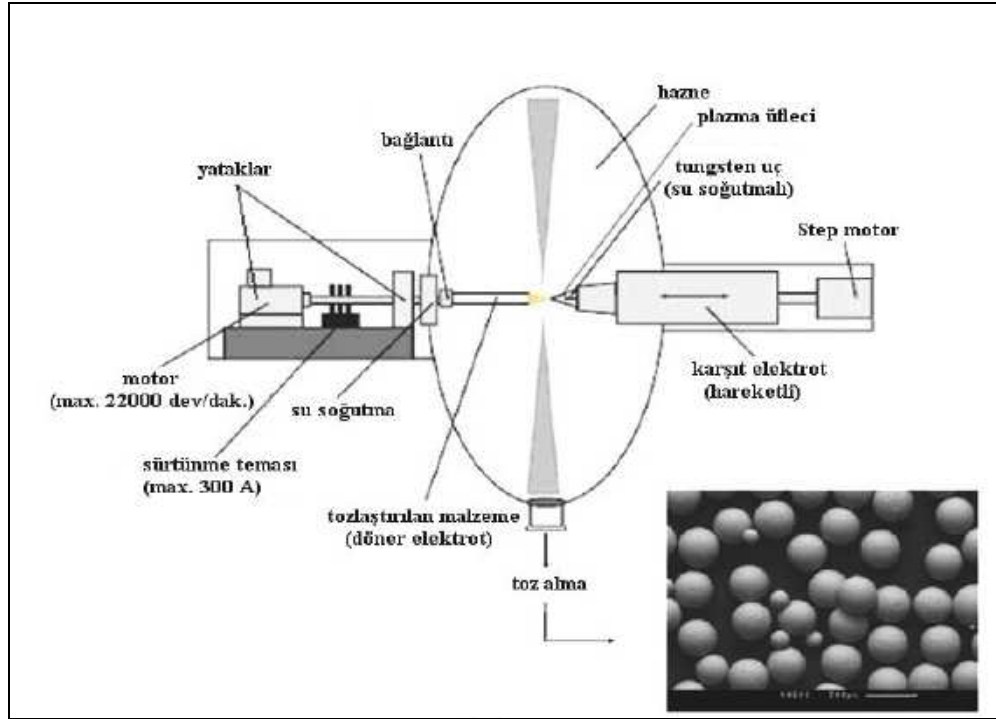
karıştırma. Örneğin alüminyum katılaştırırken karıştırılırsa toz haline gelir. Eğer bir alaşım söz konusu ise karıştırma katılma aralığında yapılır. Alüminyum, çinko, kalay gibi metallerin bu yolla çok şekilli tozları elde edilebilir [1,2].



Şekil 2.9. Döner disk atomizasyon yöntemi

2.1.4.4. Döner elektrod (REP) yöntemi

Bu yöntemde tozu elde edilecek metalden yapılmış bir elektrod ile ergimeyen tungsten elektrod arasında ark oluşturulur (Şekil 2.10). Ergiyen elektrodun döndürülmesiyle, elektrik arkı altında bunun ucunda oluşan metal damlacıkları savrulur ve tankta toplanır. Oksidasyonu önlemek için toz toplama tankı genellikle helyum, argon gibi bir asal gazla doldurulur. Bu yöntemle küresel ve oldukça eşit tane iriliğinde metal tozu üretmek mümkün olmaktadır.

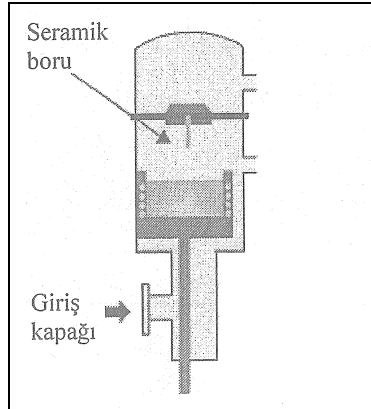


Şekil 2.10. Döner elektrod yöntemiyle toz üretiminin şematik gösterimi [13]

2.1.4.5. Vakum atomizasyon yöntemi

Bu yöntemde Şekil 2.11’de görüldüğü gibi silindirik bir tankın alt kısmında sıvı metal potası, üst kısmında da vakum atomizasyon odası bulunmaktadır. Her iki bölüm sıvının geçeceği memeyi taşıyan bir plaka tarafından bölünmüştür. Memenin alt kısmında ona bağlı bir seramik boru bulunmaktadır.

Vakum altındaki sıvı metal önce belirli bir sıcaklığa kadar indüksiyon akımı ile ısıtılır, bundan sonra bu bölüme hidrojen gazı doldurulur. Potadaki sıvı metalde bu hidrojen gazı çözüldükten sonra potayı yukarı taşıyan mil potayı yukarı iterek seramik boruyu potaya daldırır. Üst kısımda vakum olduğu için ergimiş sıvı metal memeden geçerek parçalanarak pulverize olur ve soğur. Böylece metal ve alaşımlarından ince küresel tozlar üretilebilmektedir.



Şekil 2.11. Vakum atomizasyon yöntemi ile metal tozu üretimi

2.2. Toz Metalurjisinin Avantajları ve Uygulama Alanları

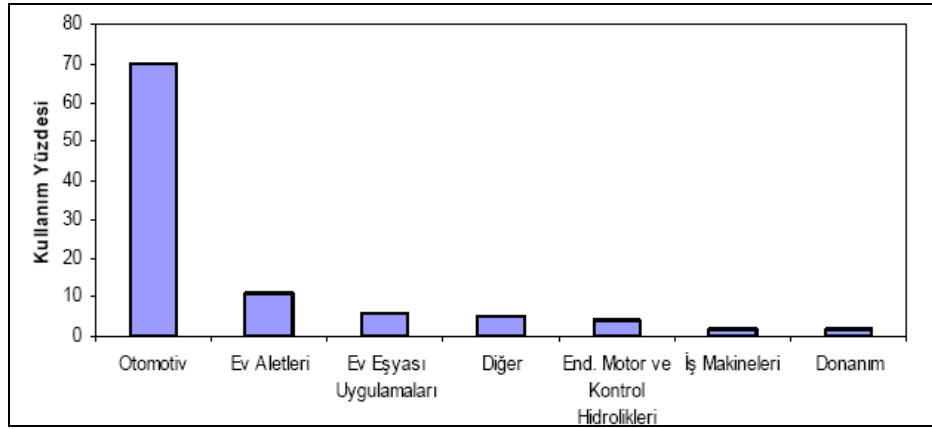
Ergime sıcaklığı yüksek olan metaller, T/M ile kolaylıkla şekillendirilebilirler. Döküm, gibi alışlagelmiş üretim tekniklerinde yaşanan oksidasyon, segregasyon, gaz absorpsiyonu ve yüksek yoğunluk farkından dolayı alaşım oluşturmama gibi bir çok problem T/M yöntemi ile kolaylıkla ortadan kaldırılabilir. T/M, kompozit malzeme üretiminde de kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yolla alışlagelmiş malzemelerden daha farklı ve üstün özelliklerde malzeme üretmek mümkündür. T/M parçaların avantajlı taraflarından biri de diğer üretim tekniklerinden daha kısa imalat çevrim süresi vardır, çünkü bazı işlem kademeleri uygulanmaksızın nihai ölçülerde, doğrudan yerine takılarak kullanmaya müsait parça üretimi gerçekleştirilebilir.

T/M yönteminin avantajlarını aşağıdaki gibi özetleyebiliriz [1,2 ve 3];

- Eşsiz özelliklerde, neredeyse sınırsız sayıda alaşım ve kompozit malzeme üretmek mümkündür,
- Boyut, şekil ve parça içindeki porozitenin kontrolü kolaydır,
- İstenen mikroyapıda, fiziksel ve mekanik özelliklerde malzeme üretimine imkan verir,
- Üretim adetleri orta miktardan yüksek miktarlara kadar çıkabilir,
- Neredeyse sınırsız şekilde parça üretimi yapılabilir,
- Başlangıçtan, yani malzeme seçiminden, nihai ürüne kadar aradaki kademelerde üretim optimizasyona elverişlidir,
- Son ölçülerde parça üretimi mümkün olduğu için talaş, çapak vs. gibi artıklar yoktur,
- Düzgün yüzey ve yakın tolerans değerleri elde edilebilir,

- Karmaşık şekilli parçaların imalatına imkan verir,
- Yüksek üretim hızlarına ve düşük maliyete sahiptir,
- Yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin imalatı mümkündür,
- Döküm, dövme ve talaşlı imalat gibi yöntemlere nazaran metal işleme / şekillendirme maliyet oranı açısından daha avantajlı yöntemdir.

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen malzemeler, büyük çoğunluğu otomotiv endüstrisi olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.12’de toz metalurjisi yöntemiyle üretilen malzemelerin kullanım alanları verilmiştir.



Şekil 2.12. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen malzemelerin kullanım alanları [14]

3. GAZ ATOMİZASYONU

Toz metalurjisinde gaz atomizasyonu işlemi sıvı metal demetinin, yüksek hızlı gaz akışı etkisiyle parçalanması olarak tanımlanır. Sıvı metal damlacıkları parçalanma sonrasında küreselleşir, soğur ve katılarak, tipik tane boyutu dağılımları 1 mikrondan 1mm'ye kadar değişen metal tozları meydana gelir. Gaz atomizasyonu ile üretilen küresel alaşım tozları, işlem esnasında gösterdiği hızlı katılma karakteristiğinden dolayı üstün özelliklere sahiptir ve bu da gaz atomizasyon yöntemini cazip kılmaktadır [15].

Gaz atomizasyon yönteminde amaç yüksek hızda genleşen gazın kinetik enerjisini sıvı metale aktararak metali küçük damlacıklara ayırmaktır [16]. Düzenli bir gaz atomizasyon işlemi için aşağıdaki koşullar sağlanmalıdır [17].

1. Yüksek gaz kinetik enerjisi
2. Metal akış borusu ucunda negatif basınç oluşumu
3. Metal akış borusu ucunda radyal basınç farkı. (Bu fark sıvı metali merkez akış çizgisinden dolaşım bölgesine doğru iter. Dolaşım bölgesinde gazın enerjisi daha yüksektir.)

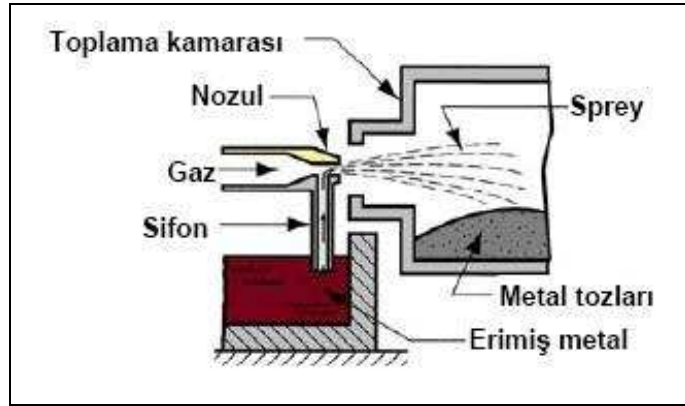
Atomizasyonda gaz jeti üç fonksiyonu yerine getirir. Başlangıçta sıvı metal demetini kesip parçalamak için gerekli kinetik enerjiyi damlacıklara aktarır. Daha sonra damlacıkları gaz akışı içinde ivmelendirir ve son olarak uçuşma esnasında onların soğumasına neden olur [18]. Gaz atomize tozların üstün özellikleri şunlardır [19]:

1. Küresel toz şekli
2. Temizlik
3. Özellikle küçük çaplı tozlarda hızlı katılmış yapılar
4. Yüksek üretim hızı

Ergimiş alaşımın gaz atomizasyonu ile püskürtülmesi ve damlacıkların yüksek yoğunluklu bir ürün oluşturmak için içerisinde toplandıkları bir altlığa yönlendirilmesi aşamalarından oluşan tekniğe püskürtme şekillendirme adı verilir. Ürün püskürtüldüğü haliyle veya geleneksel işleme operasyonlarından sonra kullanılabilir. Bu yöntemle, geleneksel olarak yapılamayan alaşımların ve parçaların üretimi mümkündür. Üretilen malzemeler çok küçük tane boyutlu, tam yoğunluğa yakın, üstün mekanik özellikli ve hemen hemen sıfır segregasyonludur [20].

3.1. Gaz Atomizasyon Üniteleri

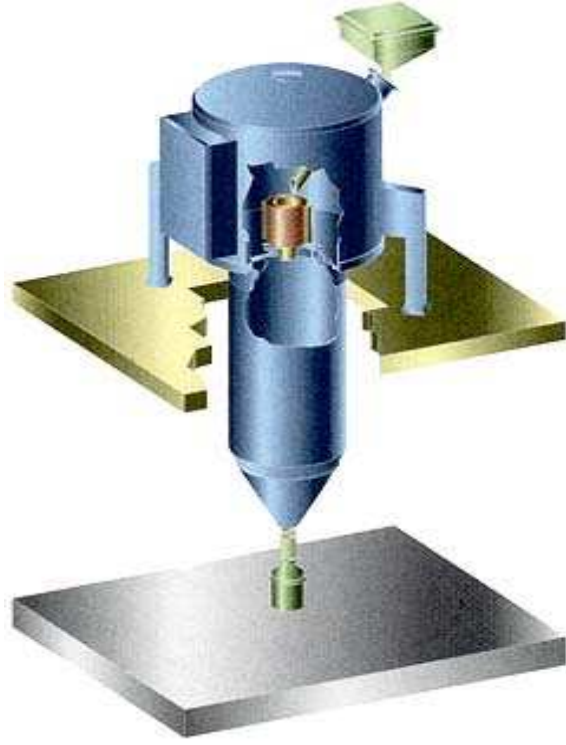
Gaz atomizasyon üniteleri metal besleme mekanizmaları, ergitme ve toz toplama bölümlerinin yapısı bakımından farklılık gösterirler. Fakat hepsinde sıvı metal demetine enerji aktarmak suretiyle toz üretilmektedir. Düşük ergime sıcaklığına sahip metaller için gaz atomizasyon üniteleri yatay olarak tasarlanır [21]. Şekil 3.1’de görülen ünite, nozuldan geçen yüksek hızdaki gaz sifon etkisi yapar ve eriyik metal gaz genişleme bölgesine çekilir. Burada metal demetinin püskürtülüp parçalanmasıyla elde edilen damlacıklar, toz toplama odasındaki uçuşma esnasında ısı kaybına uğrar ve katılaşırlar.



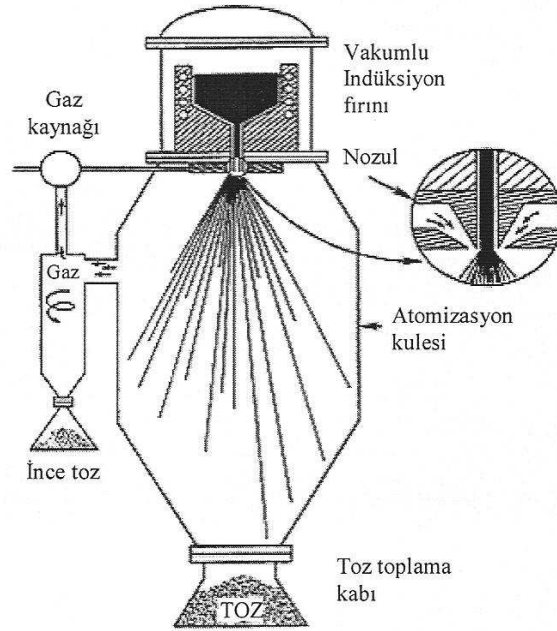
Şekil 3.1. Yatay gaz atomizasyon ünitesi

Yatay ünite, atomize edilmiş tozlar, dikey olarak atomize edilmiş tozlara göre daha iridir ve daha geniş aralıkta bir toz dağılımına sahiptir [22].

Yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin atomizasyonunda, içi asal gaz ile doldurulan kapalı bir kuleye sahip, dikey gaz atomizasyon üniteleri kullanılır ve böylece oksidasyon önlenir. Bu tip ünitelerde metal, indüksiyon fırını ile ergime sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve eriyik metal nozul içersine akıtılır. Atomizasyon kulesi damlacıkların kule çeperine çarpmadan katılmasına imkan verecek şekilde 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 [21].



a)



b)

Şekil 3.2. Düşey gaz atomizasyon ünitesi: a) Üç boyutlu görünüm, b) Şematik görünüm

Gaz atomizasyonunda sıvı metal demetini parçalamak için kullanılan gaz jeti N_2 , Ar, CO_2 ve He gibi gazlar veya hava olabilir. Asal gazlar, süperalaşım ve titanyum gibi reaktif metaller atomize edildiğinde veya oksijen miktarının düşük seviyelerde olması istendiğinde kullanılır ve küresel tozlar elde edilir. Hava atomize tozlar ise karmaşık şekillidir. Küresel toz şekli, ticari T/M uygulamalarında gruplandırma ve karıştırma kolaylığı açısından tercih edilen bir özelliktir [23].

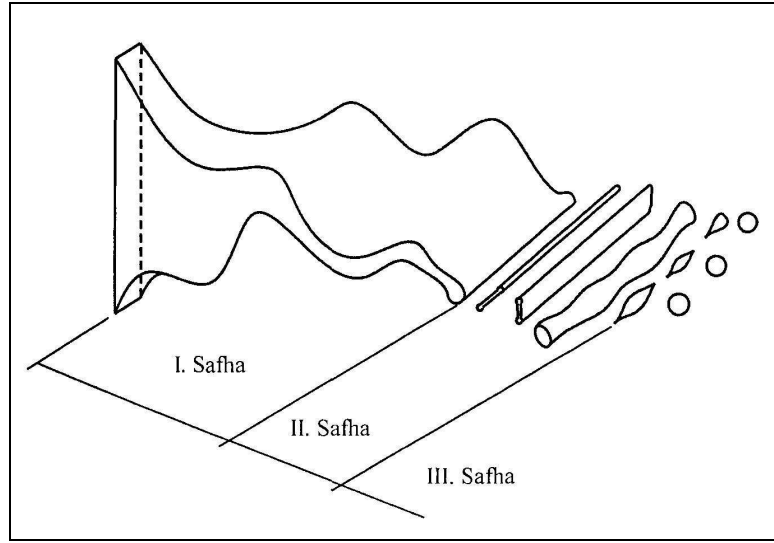
Gaz atomizasyonunda toz karakteristiklerini belirleyen çok sayıda üretim değişkeni mevcuttur. Bunları, sıvı metal ile ilgili olanlar ve gaz sistemi ile ilgili olanlar diye iki ana gruba ayırabiliriz. Sıvı metal ile ilgili olanlar: ergiyik metalin sıcaklığı, viskozitesi, yüzey gerilmesi ve akış debisidir. Gaz sistemi ile ilgili olanlar: gazın cinsi, basıncı, debisi, hızı ve nozul geometrisidir [21].

3.2. Atomizasyon Mekanizmaları

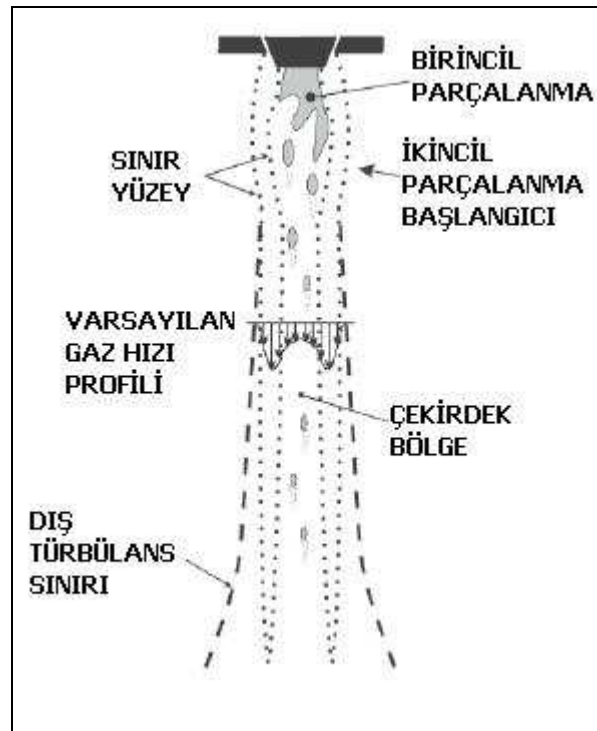
Bir nozuldan atmosfere aniden çıkan sıvı metal demeti, sıvı metalin, onu çevreleyen gazın fiziksel özelliklerine, atomizasyon ortamının hız ve basıncına ve nozul tasarımına bağlı olarak, silindirik kolon, yassı tabaka veya konik bir yüzey şeklini alabilir. Atomizasyon mekanizmaları literatürde geniş bir şekilde açıklanmaktadır. Bunların hepsinde ortak nokta, atomizasyon işleminin birkaç safhada meydana geldiğidir.

1. Birinci safha: Sıvı metalden tabakaların oluşması aşaması
2. İkinci safha: Tabakalardan çubuk oluşması aşaması
3. Üçüncü safha: Çubuklardan tanecik oluşumu ve katılma aşaması (Şekil 3.3)

Tozların soğuması ve katılması atomizasyon kulesi içinde havada uçarken meydana gelir. Sıvı metal damlacıklarının katılma hızı önemlidir çünkü bu hız tozların şeklini belirler [24,25].



Şekil 3.3. Sıvı metal tabakasının bölünme mekanizması



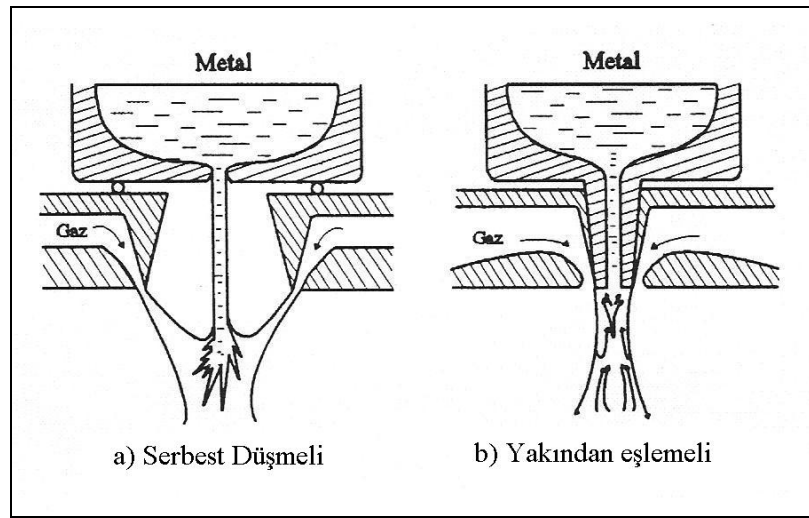
Şekil 3.4. Atomizasyon sürecinde birincil ve ikincil parçalanma bölgeleri [26]

3.3. Atomizasyon Sistemleri

Atomizasyon sistemleri, serbest düşmeli ve yakından eşlemeli olmak üzere iki çeşittir (Şekil 3.5). Serbest düşmeli sistemlerde sıvı metal, gaz jeti ile temas edinceye kadar serbest olarak akar. Sıvı metal yerçekiminin etkisinde belli bir süre aktıktan sonra gaz jeti ile temas

eder. Yakından eşlemeli sistemlerde, sıvı metal nozul gaz çıkış bölgesine seramik bir akış borusu ile gönderilir. Yakından eşlemeli sistemlerde daha iyi enerji aktarımı gerçekleştiği için atomizasyon verimleri yüksektir.

Çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmak üzere üretilen ince metal tozları ($<100\mu\text{m}$) imal etmek için metal atomizasyonunda yakından eşlemeli sistemler ispatlanmış bir tekniktir. Ancak yaygın kullanımına rağmen, gaz dinamiği, nozul geometrisi, işlem parametreleri ve toz tane boyutu arasındaki ilişkiler tanımsız kalmaktadır. Sonuç olarak çabalar, toz boyut kontrolünü geliştirerek ve enerji verimliliğini artırarak, toz maliyetini azaltmak yönündedir [26].



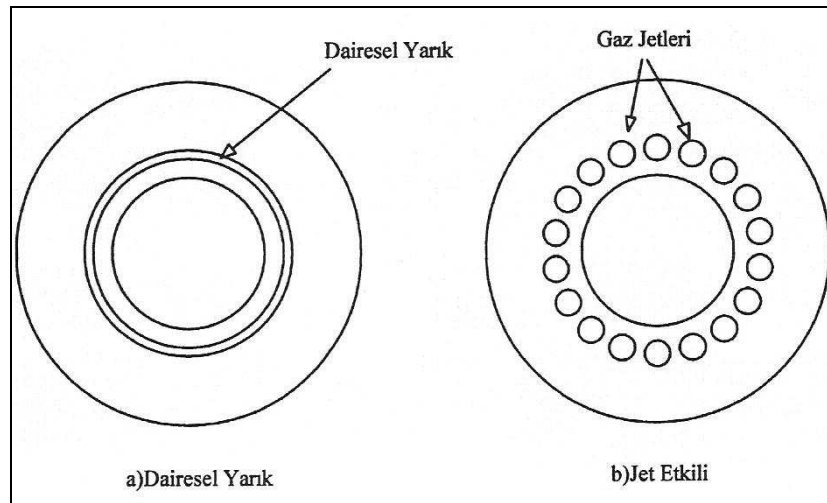
Şekil 3.5. Atomizasyon Sistemleri (Şematik): a) Serbest düşmeli b) Yakından eşlemeli

Yakından eşlemeli sistemler yüksek verimde çalışmalarına rağmen bazı zorluklara sahiptir. Bunlardan en önemlisi metal akış borusu ucunda oluşan basınçtır. Bu basınç negatif ya da pozitif olabilir. Yüksek atomizasyon basınçlarında, sıvı metal akışının kararlılığı, nozul ve metal akış borusunun boru ucunda negatif basınç oluşturacak geometride tasarlanmasıyla kontrol edilebilir. Yakından eşlemeli sistemlerde karşılaşılan sorunlardan bir diğeri ise yüksek atomizasyon basınçlarında sıvı metalin, metal akış borusu içinde katılaşması sorunudur. Sıvı metalin katılaşması sonucu atomizasyon işlemi sona erer. Bu yüzden metal ergime sıcaklığının $100-150^{\circ}\text{C}$ üzerine ısıtılır. Aşırı ısıtılmış metal atomizasyon bölgesine girmeden önce seramik akış borusunun içinden geçer. Sıvı metalin seramik akış borusu içersinde katılaşmasını önlemek amacıyla seramik boru direnç telleri ile ısıtılır. Bu sistemlerde serbest düşme sistemlerine göre daha kolay bölünme gerçekleşir ve daha ince boyutlarda, sıkıştırılma kapasitesi ve akıcılığı

yüksek küresel tozlar üretilir. Yakından eşlemeli sistemlerde gaz dolaşım bölgesi ve bu bölgenin atomizasyona olan etkisinin araştırılması, araştırma konusu olmuştur. Metal tozlarının boyutlarının düşmesi ile birlikte mekanik özelliklerinin artıyor olması gerçeği, yapılan araştırmaları yakından eşlemeli sistemlerin gaz akış modellerinin incelenmesi yönüne kaydırmıştır. Gaz akış dinamiği konularında yapılan araştırmalar sonucu daha dar toz boyut dağılımına sahip tozlar üretilmiş ve atomizasyon işleminin verimliliği artırılmıştır [15,27,28 ve 29].

3.4. Nozul Çeşitleri

Atomizasyon ünitesinde nozul, gaz jetlerini sıvı metal ile temas ettirip, sıvı metalin parçacıklara ayrılmasını sağlar. Başka bir deyişle nozul, gaz jetlerinin akışını kontrol ederek istenen özelliklerde tozun üretilmesini sağlayan geometrik yapıdır. Nozul tipi, tozların boyutunu ve şeklini önemli derecede etkiler. Nozullar sahip oldukları gaz çıkış geometrilerine göre jet etkili ve dairesel yarıklı olmak üzere ikiye ayrılırlar (Şekil 3.6).

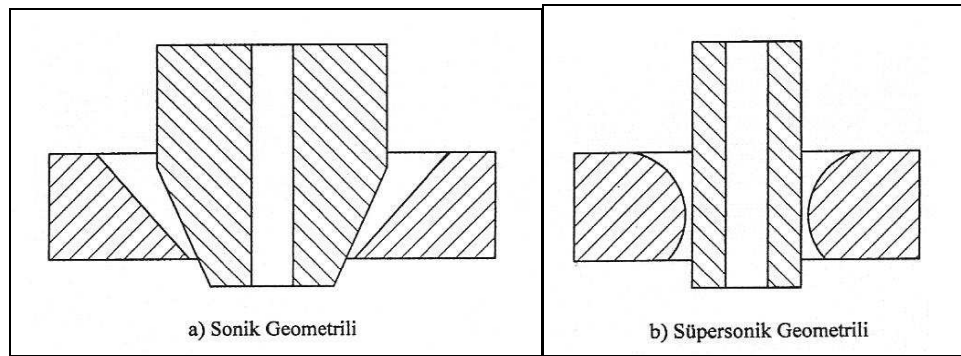


Şekil 3.6. Şematik nozul resimleri: a) Dairesel yarıklı, b) Jet etkili

Nozul parçası, gaz iletim sisteminde, yüksek hızlı gaz jeti ve sıvı metal arasındaki etkileşimi sağlayan önemli bir parçadır [30]. Atomizasyon işleminde nozul geometrisi oldukça önemli bir yere sahiptir. Nozul toz üretim ünitesine monte edildikten sonra geometrisinde herhangi bir değişiklik oluşmadığı için atomizasyon ünitesinin sabit parçalarından bir tanesidir. Bu yüzden atomizasyon işlemi gaz basıncı, gaz tipi, sıvı metal akış oranı, akış borusunun çıkıntı mesafesi ve sıvı metalin aşırı ısınması gibi işlem parametrelerinin optimizasyonu ile gerçekleştirilir. Buna rağmen bazı parametrelerdeki değişim oldukça sınırlıdır. Örneğin helyum gazının kullanımı ortalama toz boyutunu düşürür ancak azot gazının kullanımı ekonomiktir.

Nozul tipleri ile ilgili bilgilerin bilimsel bir sır olarak saklanması dolayısıyla nozul tipleri genel olarak sınıflandırılmamaktadır. Az sayıda yayınlanmış bilgilere göre nozullar geometrilerine göre ikiye ayrılırlar (Şekil 3.7).

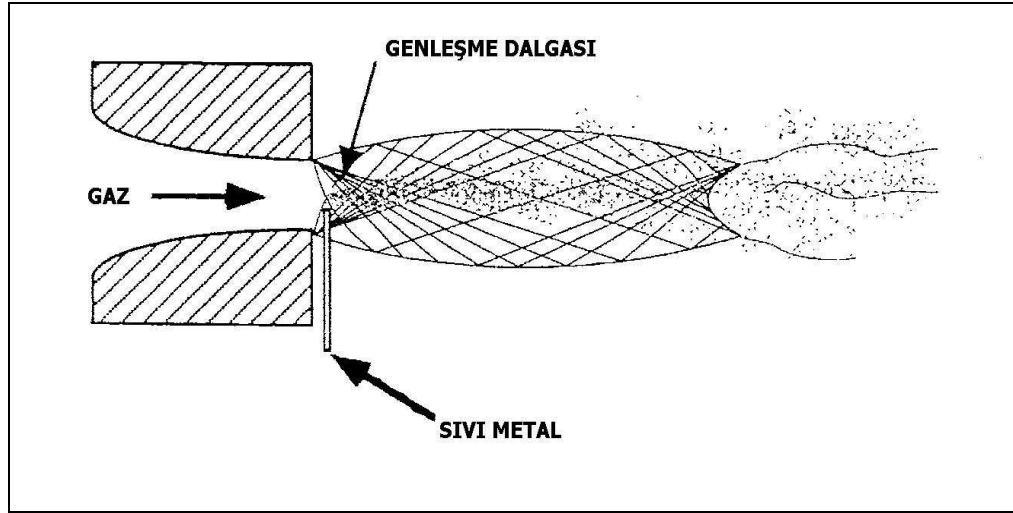
1. Sonik Nozullar (Daralan geometri)
2. Süpersonik nozullar (Daralan-ge genişleyen geometri)



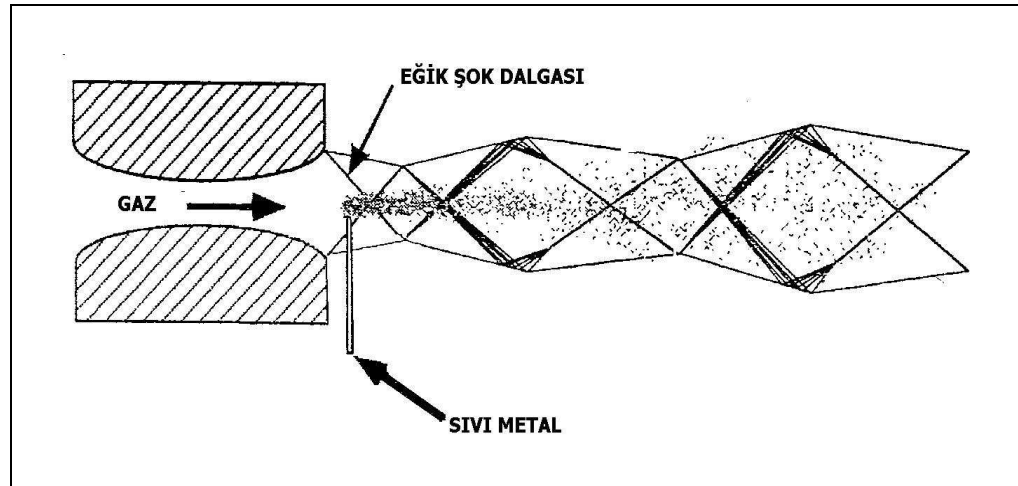
Şekil 3.7. Farklı nozul geometrileri: a) Sonik geometri, b) Süpersonik geometri

Sıvı metaller yüksek yüzey gerilmesine sahip olduğu için atomizasyonlarında genellikle süpersonik geometriye sahip nozullar kullanılır. Sonik geometriye sahip nozullar ile oldukça yüksek basınç değerlerinde ses üstü hızlara ulaşılırken, süpersonik geometriye sahip nozullarda ise daha düşük atomizasyon basınçlarında ses üstü hızlara ulaşmak mümkündür.

Yüksek verimli atomizasyon işlemi için yapılması gereken en önemli aşama uygun şartlarda çalışabilecek bir nozul tasarımının yapılmasıdır. Bunun için nozul performansının araştırılması gerekir. Nozul performansının incelenmesi için nozula sadece gazın gönderilmesi sonucu oluşan gaz akış bölgeleri incelenir [27].

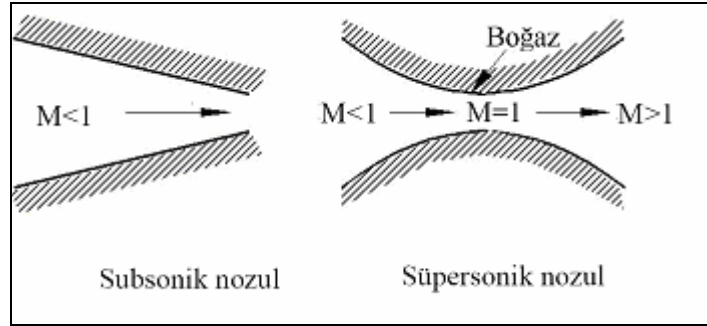


Şekil 3.8. Daralan geometriye sahip nozulda yüksek hızlı gaz jetinin gelişimi



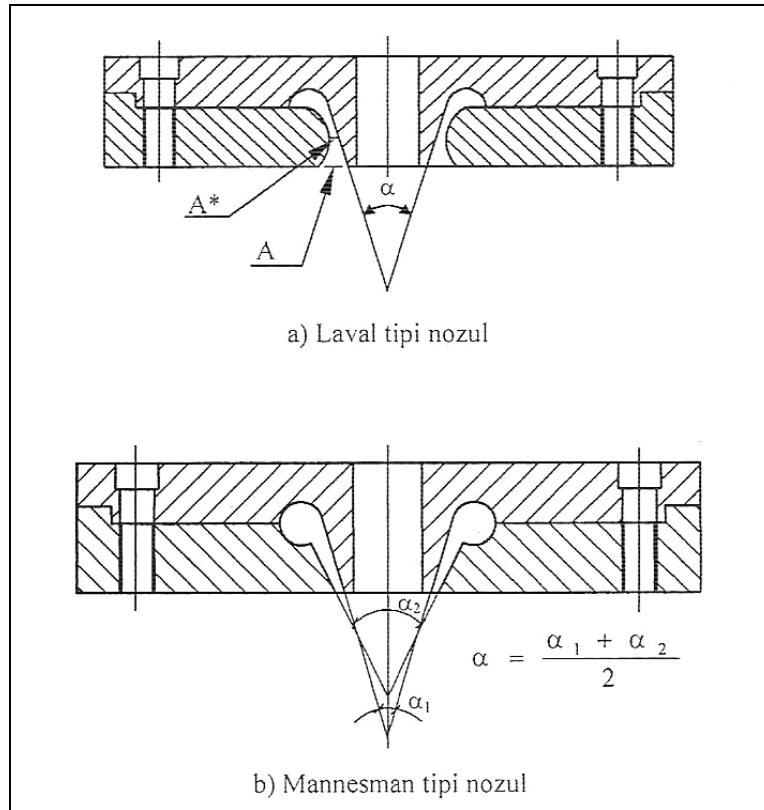
Şekil 3.9. Daralan-genişleyen geometriye sahip nozulda yüksek hızlı gaz jetinin gelişimi

Atomizasyon gazının nozuldan çıkışı, gaz hızını ses hızının altındaki hızlarla ($M < 1$) sınırlayan daralan tasarım veya ses hızının üstündeki hızlara ($M > 1$) ulaşmasına imkan veren daralan-genişleyen tasarım şeklinde olabilir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Ses hızının altındaki ve üstündeki akışlar için nozul tipleri

Daralan-genişleyen tasarım Laval nozulu olarak bilinir (Şekil 3.11.a). Gaz çıkışı, eş merkezli halka biçiminde olan daralan tasarıma sahip nozullar ise Mannesmann nozulu olarak adlandırılır (Şekil 3.11.b) [24].



Şekil 3.11. Nozul geometrisi tipleri: a) Laval tipi nozul, b) Mannesmann tipi nozul [23]

3.5. Nozulda Gaz Akış Değişkenleri

Akış özellikleri hızın ses altı ve ses üstü olmasına bağlı olarak değişiklikler göstermektedir. Mach (M) sayısı ile ilgili sınıflandırmalar şu şekildedir:

- $M < 0.3$: Sıkıştırılmaz Akış, yoğunluğun etkisi ihmal edilebilir seviyede
- $0.3 < M < 0.8$: Ses Altı Hızla Akış, yoğunluk etkisi önemli ancak şok dalgaları oluşmaz.
- $0.8 < M < 1.2$: Geçiş Bölgesi, akışı, ses altı ve ses üstü bölgelerine ayıran şok dalgalarının ilk defa görülmeye başladığı bölge. Bu kısımda akışın karışık karakteri nedeniyle güvenli, kararlı ve kuvvetli sonuçlar elde edilemez.
- $1.2 < M < 3.0$: Ses Üstü (süpersonik) Hızla Akış, şok dalgalarının hala görülür ancak ses altı akış bölgelerinin yoktur.
- $3.0 < M$: Hipersonik Akış, şok dalgaları ve diğer akış değişikliklerinin özellikle önemli olduğu bölge.

Buradaki sayısal değerler kabaca bir fikir vermek üzere verilmiş olup kesin değerleri ifade etmezler. Bununla birlikte genel olarak $M = 1$ noktası önemlidir. Zira $M < 1$ ise akış ses altı, $M > 1$ ise akış ses üstü olarak nitelendirilir [31].

3.5.1. Gaz akış modelleri

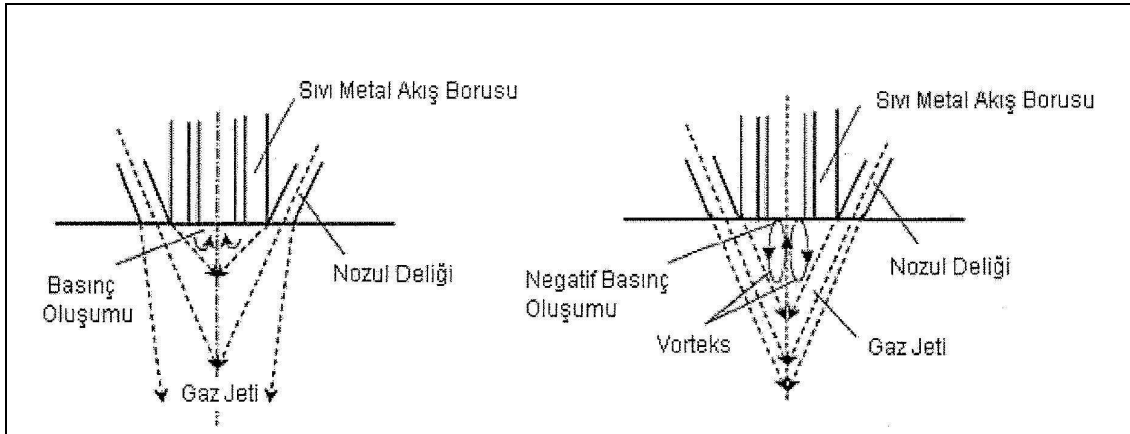
Atomizasyon işlemi sırasında sıvı metal akış borusu ucundaki basınç ölçümü oldukça zordur. Genellikle iki akışkanlı (Sıvı metal+gaz) sistemin incelenmesi karmaşık olduğu için yapılan araştırmalarda sadece gazın olduğu akış bölgeleri incelenmektedir. Atomizasyon nozullarında gaz, hızın maksimum olduğu bölgede tamamen genişerek sıvı metal ile temas eder [32]. Atomizasyon işleminde genişleme her zaman nozul çıkışında gerçekleşir. Genleşmenin etkisiyle gaz hızı ses üstü hıza ulaşır. Genleşme sonucu olarak gaz jeti basıncı ortam basınç değerine düşer. Bu türde bir genişleme denklemi için aşağıdaki denklem yazılabilir;

$$\frac{P_2}{P_a} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_2^2 \right)^{-\gamma/(\gamma - 1)}$$

Burada P_2 genişleme basınç değerini, P_a atomizasyon basıncını, M_2 genişmiş gazın mach sayısını ve γ gazın özgül ısı oranını belirtmektedir [33].

3.5.2. Negatif basınç oluşumu

Sıvı metal akış borusu ucunda oluşan gaz akışı ve negatif basınç oluşumu gaz dinamiğine bağlıdır. Gaz atomizasyonu işlemi esnasında sıvı metal akış borusunun ucundaki gaz basıncı atomizasyon değişkenlerinin durumuna göre pozitif veya negatif olabilir. Negatif basınç oluşumu sonucunda sıvı metal potadan metal akış borusuna doğru çekilir. Pozitif basınç oluşumu sonucunda sıvı metal akışı gerçekleşmediği gibi pota içinde püskürme oluşabilir. Bu yüzden negatif basınç oluşumu istenen bir durumdur. Metal akış borusu ucunda oluşan negatif basınç sıvı metale etki eden dolaşım bölgesindeki gaz akış kuvvetlerinin toplamıdır [29]. Atomizasyon işleminde gaz akışı nozul geometrisine bağlıdır. Yapılan araştırmalarda, süpersonik geometrili nozulların, sonik geometrili nozullara göre daha kuvvetli negatif basınç oluşumu gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir [33].



Şekil 3.12. Metal akış borusu çıkışında basınç oluşumu

Negatif basınç oluşumuna etki eden en önemli faktörlerden biri metal akış borusunun nozul gaz çıkışına göre konumudur [34]. Genel olarak metal akış borusu çıkıntı mesafesinin artması sonucu daha etkili negatif basınç oluşumu gerçekleşir fakat borunun uzaması sıvı metalin donması problemini beraberinde getirir. Le ve Henein [28] yaptığı araştırmalarda, metal akış borusunun nozul çıkışının 10 mm altında olduğu konumda maksimum negatif basıncın oluştuğunu tespit etmişlerdir.

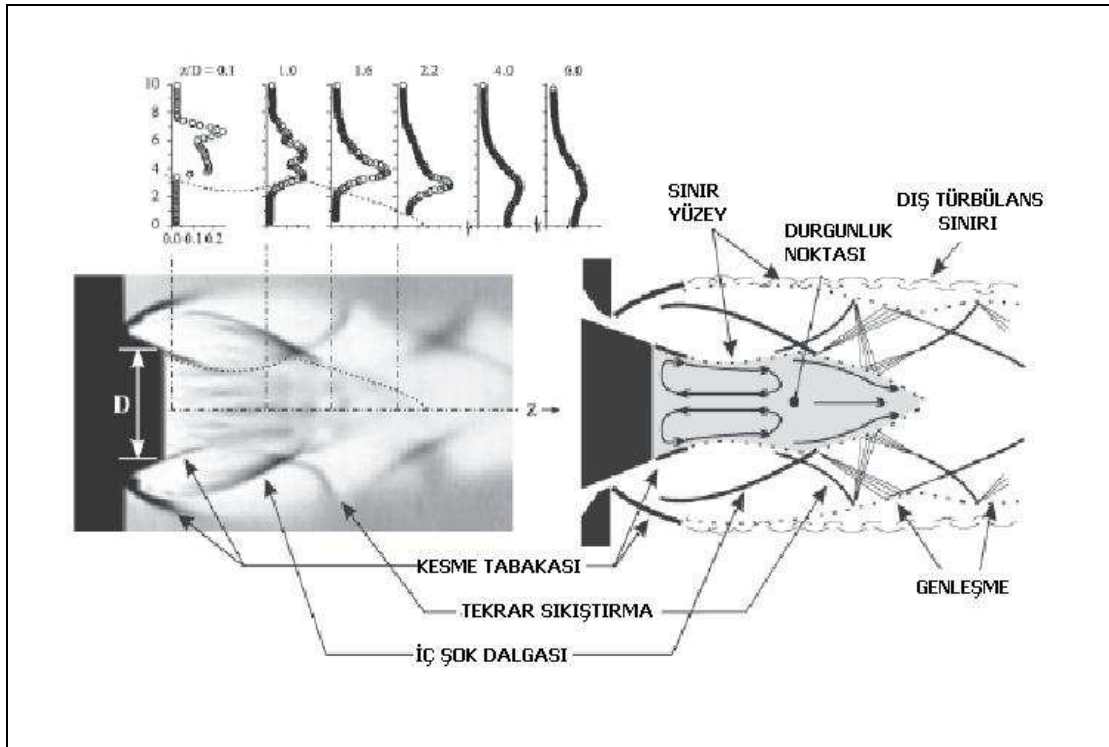
Negatif basınç ölçümleri, atomizasyon işleminin verimliliğinin araştırılması açısından oldukça önemlidir. Yüksek basınçlı gaz atomizasyonunda negatif basınç bölgesi, metal akış borusu ucundaki sıvı metal beslemesini kontrol edebilir. Negatif basınç oluşumu daha dengeli

bir sıvı metal beslemesini sağlar ve böylelikle toz boyut dağılımı daha kolay kontrol edilir. [29,35]

3.5.3. Geçiş bölgesinin gaz atomizasyonuna etkisi

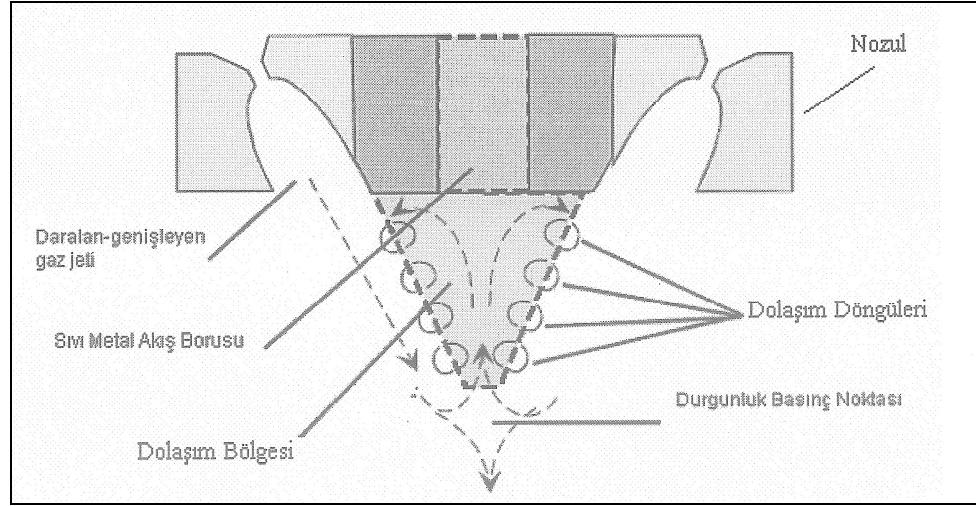
Yüksek basınçlı gaz atomizasyonu nozulları belirli bir basınç değerinde kapalı geçiş bölgesi denilen ve atomizasyon işlemini etkileyen geniş bir gaz genişleme bölgesi oluşturur [29]. Geçiş bölgesinin kapandığı basınç değerlerinin bulunması oldukça önemlidir. Bu basınç değerinin üzerinde gerçekleşen atomizasyon işlemlerinde, bu değer altında gerçekleşen atomizasyon işlemlerine göre daha küçük toz boyutu ortalaması ve daha dar bir toz boyut dağılımı elde edilmiştir. Metal akış borusu çıkıntı mesafesinin daha kısa olduğu durumlarda geçiş bölgesinin daha düşük basınçlarda kapandığı gözlemlenmiştir.

Geçiş bölgesinin kapanması olayı ve sıvı metal atomizasyonunda fark edilir damlacık incelmesinin ifade edilebilmesi için gaz dolaşım bölgesinin ve etrafını çevreleyen gaz akışının modellenmesi gerekir. Kontrol hacmi yaklaşımına göre gaz, geçiş bölgesine durgunluk noktasından girer ve metal akış borusunun dairesel çevresinden çıkar. Durgunluk noktasındaki atomizasyon gazının radyal hız bileşeni nozul açısına bağlıdır ve durgunluk basıncını kuvvetli bir şekilde etkiler. Yüksek radyal hız bileşeni daha yüksek durgunluk basıncına sebep olur [15].



Şekil 3.13. Akış eksenine boyunca dolaşım bölgesi ve durgunluk noktasının gösterimi [26]

Gaz dolaşım bölgesi, atomizasyon gazı tarafından metal akış borusu ucunda oluşur. Dolaşım bölgesinde gaz, durgunluk noktasından metal akış borusuna doğru, merkez akış çizgisine paralel olarak akar ve metal akış borusuna ulaştığında radyal olarak ivmelenerek borunun dış yüzeyine doğru hareket eder [15].



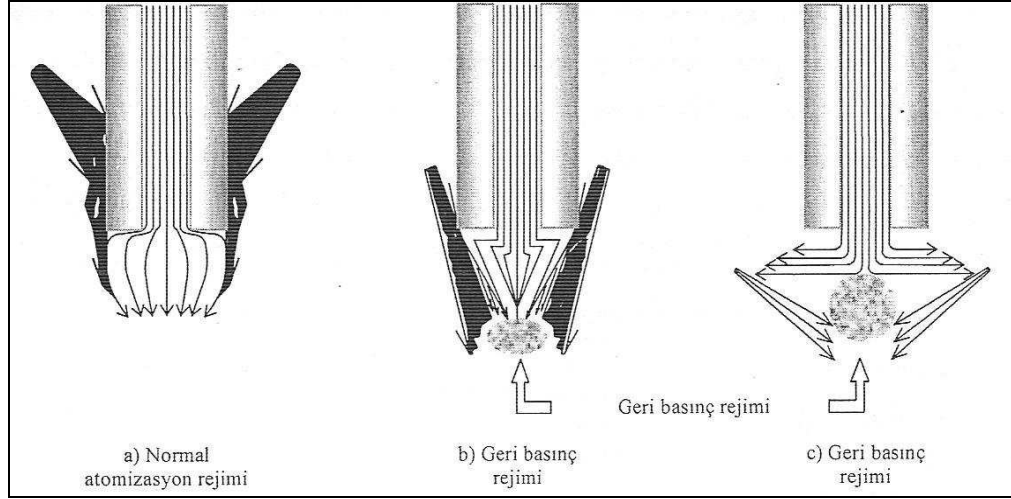
Şekil 3.14. Süpersonik jet etkili nozulda dolaşım bölgesinin şematik gösterimi

3.5.4. Geri basınç oluşumu

Atomizasyon işlemi esnasında akış borusunun ucunda oluşan basınç değerinin pozitif olması durumunda sıvı metal akışı yavaşlar hatta bazı durumlarda durur ya da ters yönde akış özelliği gösterir. Bu basınç değerinin atmosfer basıncında büyük olması durumunda gaz, akış borusu içersine girer ve bu durum genellikle metalin katılaşmasına neden olur. Bu duruma ters akış durumu denir.

Chen ve diğerleri [36] yaptığı araştırmalarda metal akış borusu çıkıntı mesafesinin değişmesi ile birlikte atomizasyon işleminde 3 farklı aşamanın gerçekleşebileceğini gözlemlemişlerdir (Şekil 3.15). Metal akış borusu, nozul gaz çıkışının alt bölgelerinde yerleştirilmesi sonucu gaz boru çeperlerine çarpar ve bu çeperler boyunca hareket ederek sıvı metalle buluşur. Bu aşamaya normal aşama denir. Metal akış borusu çıkıntı mesafesi azaldıkça atomizasyon hızı azalır ve sıfır olur. Bu aşama geri basınç oluşumu aşamasıdır. Bu aşamada gaz jetleri metal akış borusunun uç çevresinde buluşurlar ve sıvı metalin akmasına izin vermezler. Geri basınç oluşumu atomizasyon gaz basıncına, nozul geometrisine ve metal akış borusu çıkıntı mesafesine bağlıdır. Metal akış borusu çıkıntı mesafesinin daha da azalmasıyla birlikte gaz jetlerinin buluşma noktası bir miktar aşağı yönde kayar. Bu aşamada da geri basınç

bölgesi mevcuttur fakat metal akış borusunun hemen ucunda değil, belli bir miktar alt bölgededir [36].



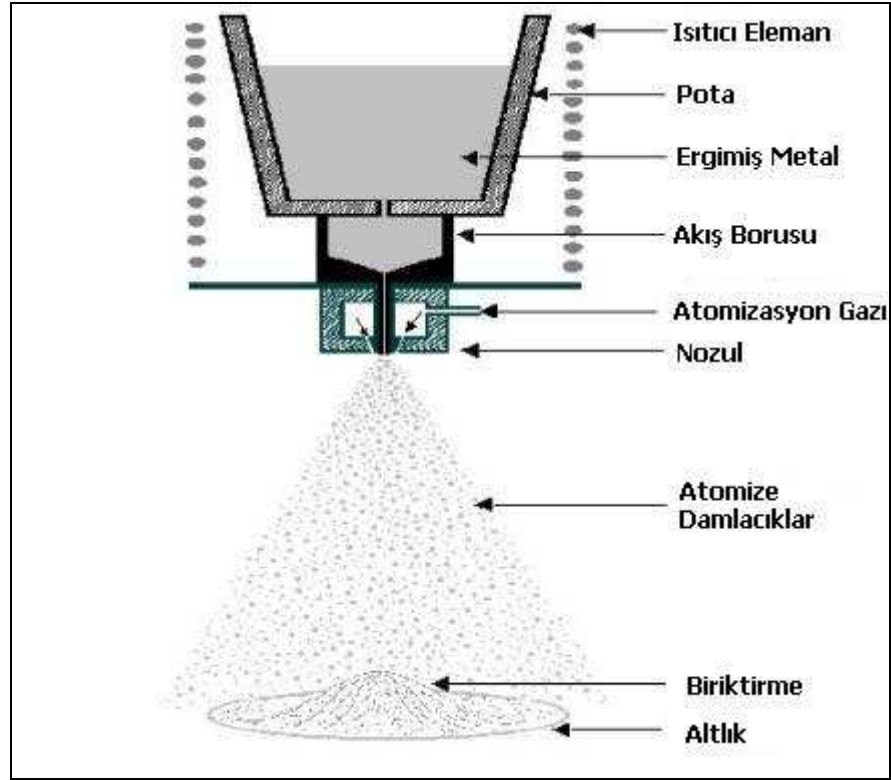
Şekil 3.15. Geri basınç oluşumunun şematik gösterimi

3.6. Püskürtme Şekillendirme

Püskürtme Şekillendirme (PŞ), Dünya ve Avrupa sanayilerinin halen kullandığı, ileri teknoloji ile malzeme üretme metodu olup, Osprey Ltd. Şirketi tarafından 1960'lı yıllarda geliştirilmiştir [20]. Bu yöntemde ergimiş metalin atomizasyonu ile üretilen damlacıkların püskürtülerek bir kolektör (toplayıcı) üzerinde toplanması sağlanır (Şekil 3.16).

Altık üzerinde katılaştırılarak üretilen bu biriktirilmiş kütleye daha sonra ekstrüzyon, dövme veya haddelme ile şekil verilebilir. Püskürtme şekillendirme yönteminin iki önemli avantajı vardır. Bunlardan birincisi eriyikten direk olarak tek bir operasyonla net şekillendirilmiş ürün elde etme imkanıdır. Net şekillendirilmiş ürün elde etmenin faydaları şu şekilde sıralanabilir:

- Üretim zamanının kısalması
- Enerji tüketiminin azalması
- Parça performansının iyileştirilmesi
- Hurda maliyetinin azalması



Şekil 3.16. Püskürtme Şekillendirme prosesi

PŞ yönteminin ikinci avantajı metalurjik ve mekanik özelliklerde önemli ölçüde iyileşmenin sağlanmasıdır. PŞ yöntemiyle üretilmiş ürünler ince taneli, alaşım elementleri makroskopik segregasyonundan arındırılmış ve düşük oksit içeriklidir.

PŞ yönteminin bir diğer avantajı kompozit malzeme üretimidir. PŞ ile elde edilmiş kompozit malzemeler atomize edilen ergimiş metal püskürtülürken aynı zamanda takviye elemanı sprey içine enjekte edilerek altık üzerinde toplanma yoluyla üretilirler. Bu tekniğin birçok alternatif kompozit üretim yöntemine göre avantajları net şekillendirilmiş ürün elde edilmesi, önemli ölçüde fiyat kazancı, azaltılmış oksidasyon, mikroyapısal özelliklerin inceltmesi, azaltılmış makrosegregasyondur [37].

Püskürtme döküm prosesinde dört ana ünite mevcuttur:

1. Ergitme ünitesi
2. Gaz atomizasyon cihazı
3. Atomize edici gaz kaynağı
4. PŞ biriktirme ünitesi

4. DENEYSEL YÖNTEM

Bu çalışmada, gaz atomizasyon yöntemiyle metal tozu üretiminde nozul geometrisinin toz tane boyut ve dağılımına etkisi araştırılmıştır.

Birbirinden farklı beş ayrı nozul uç geometrisiyle yapılan atomizasyon çalışmalarından elde edilen kalay tozlarının şekil ve morfolojileri taramalı elektron mikroskobu ile, toz boyutu ise lazer ışın toz boyutu ölçme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

4.1. Dumlupınar Gaz Atomizasyon Ünitesi

Atomizasyon çalışmaları beş ana bölümden oluşan Dumlupınar Gaz Atomizasyon Ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Bu bölümler;

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

Ünitenin genel görünümü Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1. Dumlupınar gaz atomizasyon ünitesi

4.1.1. Gaz sistemi

Yapılan deneylerde atomizasyon gazı kaynağı olarak 200 bar işletme basıncına sahip paralel olarak bağlı 12 adet basınçlı tüp kullanılmıştır. Atomizasyon basıncının ayarlanması, tüplerin çıkışına yerleştirilen bir regülatör yardımı ile yapılmıştır. Regülatör çıkışına bir küresel vana, vanadan sonra atomizasyon basıncını ölçmek amacıyla bir basınç algılayıcısı yerleştirilmiştir. En son noktada okunan dijital basınç değeri atomizasyon gaz basıncı olarak kabul edilmiştir. Atomizasyon gazı olarak azot (N_2) kullanılmıştır. Atomizasyon işlemi sırasında üretilen tozların, görüntü almak için yerleştirilen kameranın önündeki gözetleme penceresinin iç yüzeyine birikmesini önlemek amacıyla düşük basınçta azot gazı gözetleme odasına gönderilerek daha net bir atomizasyon görüntüsü elde edilmiştir.

4.1.2. Isıtma ve ergitme

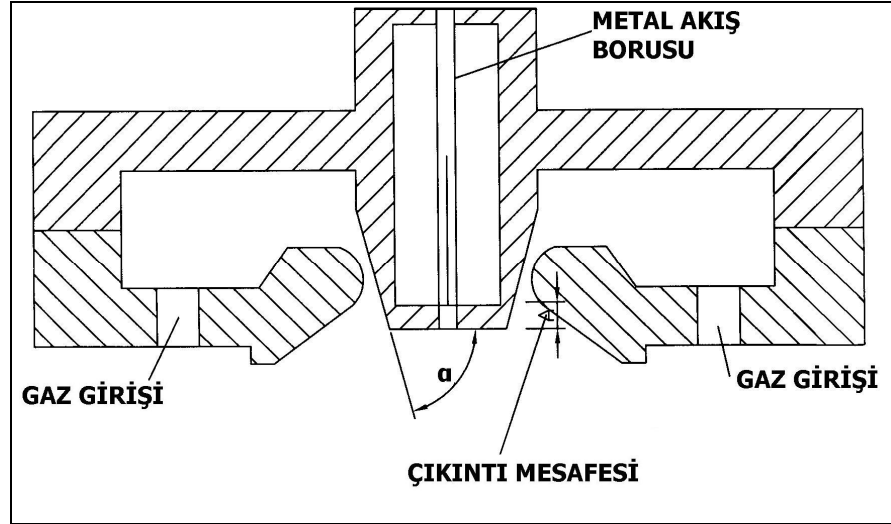
Ergitme işlemi, atomizasyon kulesi üzerindeki fırın içersine yerleştirilmiş paslanmaz çelik potada gerçekleştirilmiştir. Fırının üst kapağı sıvı metalin sıcaklığını ölçmek için kullanılacak ısı çiftinin geçebileceği şekilde delinmiştir. Aynı zamanda metal akışını kontrol edebilmek için açma – kapama çubuğu olarak kullanılan bu eleman yardımı ile metal sıcaklığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.2). Isıtma işlemi 400-410°C aralığında gerçekleştirilmiştir. Eleman, pnömatik olarak kontrol edilen bir mekanizma yardımıyla hareket ettirilerek metal akışı sağlanmıştır.



Şekil 4.2. Metal ergitme fırını ve pnömatik sistem

4.1.3. Nozul

Atomizasyon deneylerinde süpersonik geometriye sahip beş farklı uç geometrisindeki nozullar kullanılmıştır. Nozulun şematik gösterimi Şekil 4.3'de görülmektedir. Metal akış borusu olarak, 3 mm iç çapa sahip seramik boru kullanılmıştır.



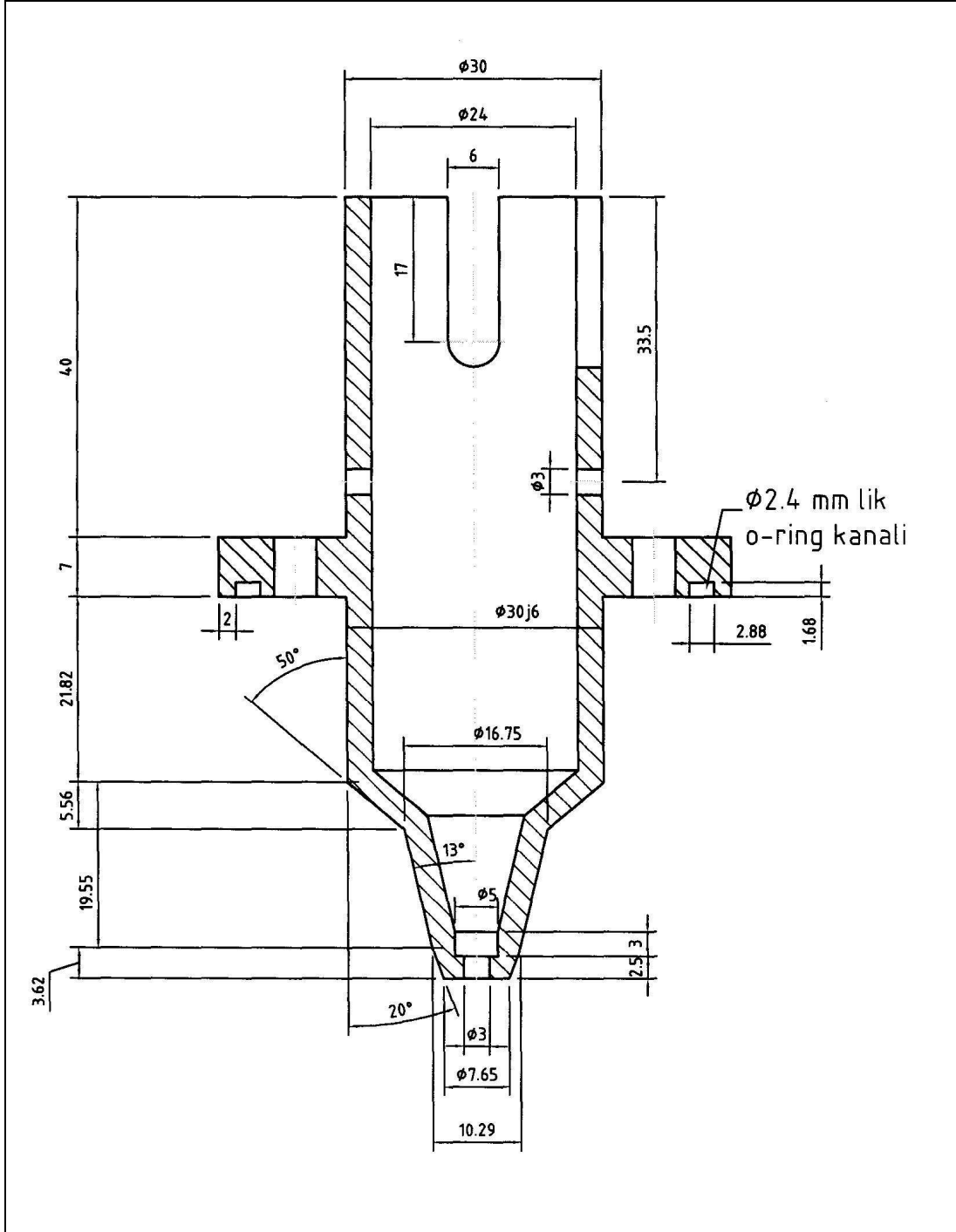
Şekil 4.3. Deneylerde kullanılan süpersonik geometriye sahip nozul (şematik)

Kullanılan nozullara ait metal akış borusu çıkıntı mesafeleri Çizelge 4.1'de gösterilmektedir. Nozullar $12,70 \text{ mm}^2$ gaz çıkış alanına sahiptir.

Çizelge 4.1 Nozullara ait metal akış borusu çıkıntı mesafeleri

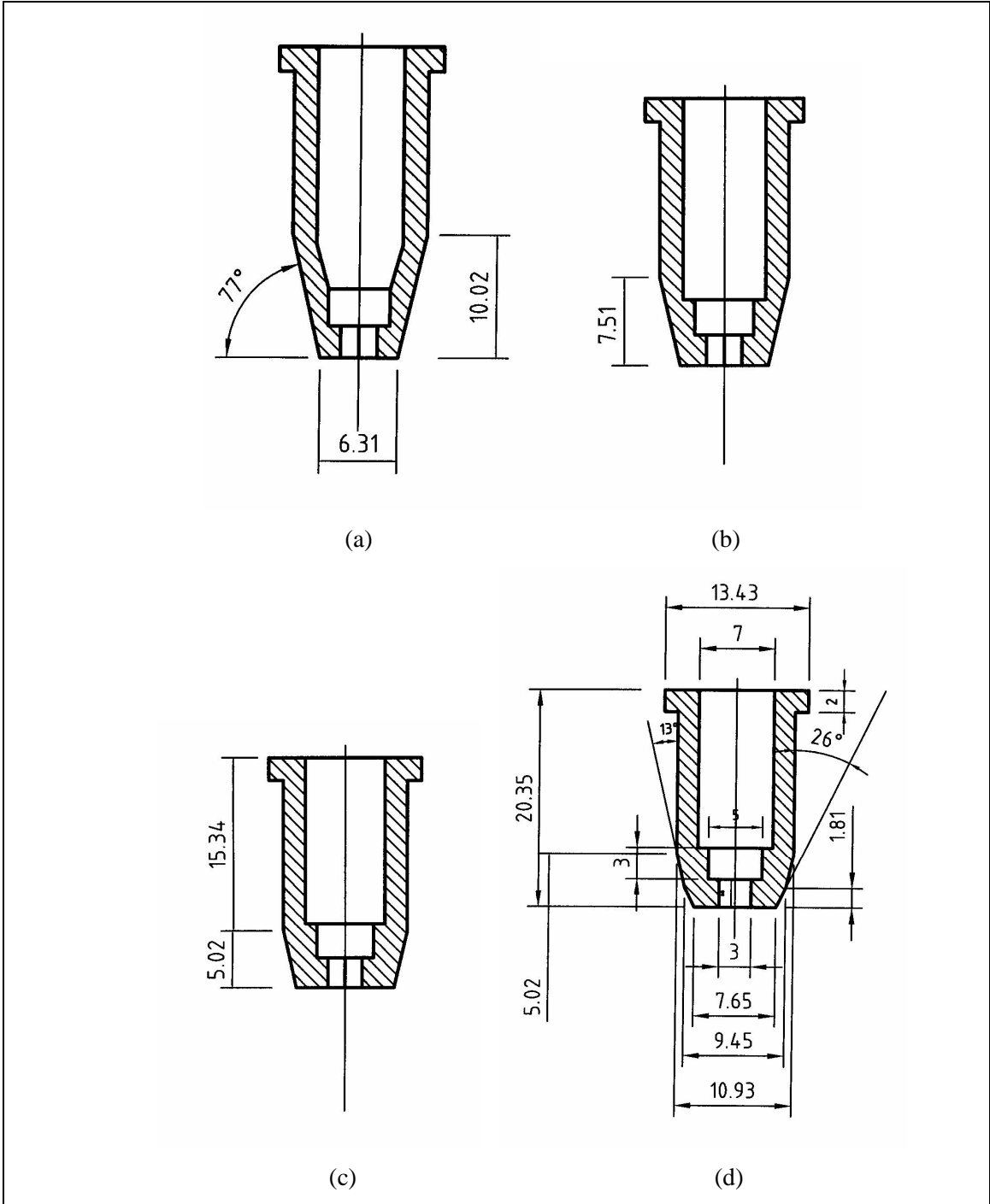
Nozul Kodu	NZL-1	NZL-2	NZL-3	NZL-4	NZL-5
Metal akış borusu çıkıntı mesafesi	5 mm	10 mm	7,5 mm	5 mm	5 mm

Gerçekleştirilen ilk üç deneyde kullanılan NZL-1'in karakteristik değerleri, Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. NZL-1'in şematik gösterimi ve karakteristik değerleri

Atomizasyon deneylerinde kullanılan farklı uç geometrisi ve metal akış borusu çıkıntı mesafesine sahip diğer dört nozula ait değerler Şekil 4.5'te şematik olarak verilmektedir.



Şekil 4.5. Farklı uç geometrisine sahip nozullar: (a) NZL-2, (b) NZL-3, (c) NZL-4, (d) NZL-5

4.1.4. Atomizasyon kulesi

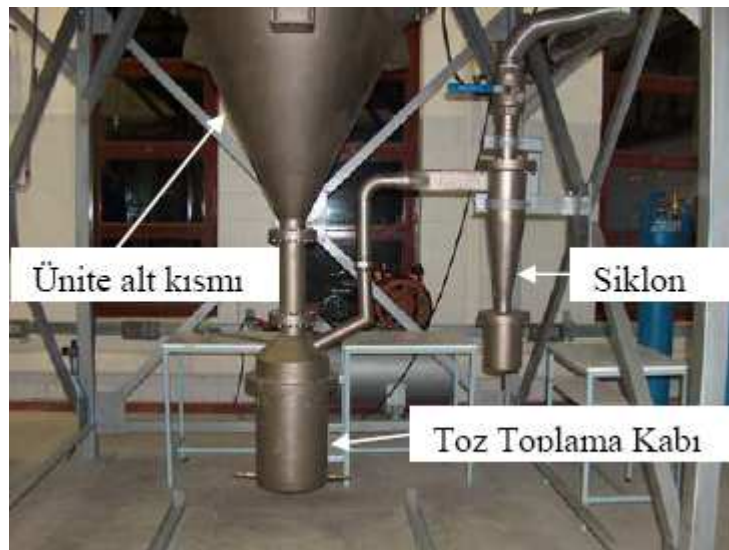
Atomizasyon kulesi, sıvı metalin gaz ile buluşup atomize edildiği ve sonra da katılaşıp toz haline geldiği atmosfere kapalı hacimdir. Atomizasyon kuleleri genel olarak paslanmaz çelikten imal edilerek iç yüzeyleri parlatılmaktadır. Atomizasyon kulesinin boyutlarını katılma süresi belirler [21].

Dumlupınar Gaz Atomizasyon Ünitesi'ne ait atomizasyon kulesi çevresinde üç adet gözetleme noktası mevcuttur. Kule iç yüzeyleri sistem temizliği açısından parlatılmıştır. Kule yüksekliği, sıvı metal damlacıklarının kule tabanına inmeden katılaşabilmelerine imkan verecek yükseklikte ve kule çapı, damlacıkların kule çeperine çarpmayacak boyuttadır. Atomizasyonda kullanılan gazın kule dışına tahliyesi ve ince tozların tutulması amacıyla siklon kullanılmıştır.

4.1.5. Toz tutma ve sistem temizliği

Ünitede iki ayrı toz toplama kabı mevcuttur. Bunlar toz toplama kabı ve siklondur (Şekil 4.6). Toz toplama kabı ünitenin en alt kısmında yer almaktadır ve atomize edilmiş tozların çoğunluğunun toplandığı yerdir. Paslanmaz çelikten imal edilmiştir ve iç kısmı yüzeye temas eden tozların soğumasını hızlandırmak amacıyla ısı transfer katsayısı yüksek olan bakır ile kaplanmıştır.

Gaz atomizasyon ünitelerinde siklonlar sık kullanıma sahiptirler. Toz tutma bölümünün en önemli kısmı siklondur. Siklonda gaz içerisindeki çok küçük boyuttaki toz tanecikleri ayrılır. Amaç mümkün olduğu kadar tozu gazdan ayırmaktır.



Şekil 4.6. Toz Tutma bölümleri

Yapılan her deney sonrasında atomizasyon ünitesi bağlantı noktalarından sökülerek ünite iç yüzeyleri vakum süpürgesi ile temizlenip bez ile silinmiştir. Üretilen tozlar plastik kaplarda muhafaza edilmiştir.

4.2. Atomizasyon Gaz Debisinin Ölçümü

Gaz atomizasyonunda, metal tozu üretimi için kullanılan gaz miktarı, enerji kullanımı açısından önemli bir parametredir. Bunun için, bir fiziksel parametre olan gaz debisinin metal akış debisine oranı (G/M), işlem ekonomikliğini anahtar göstergesidir [26]. Yapılan deneylerde farklı gaz debisi değerleri, ünite üzerinde yer alan SIEMENS SITRANS F C MASSFLO MASS 2100 tipi kütleli debi ölçüm cihazı (Şekil 4.7) üzerinden gözlemlenmiştir.



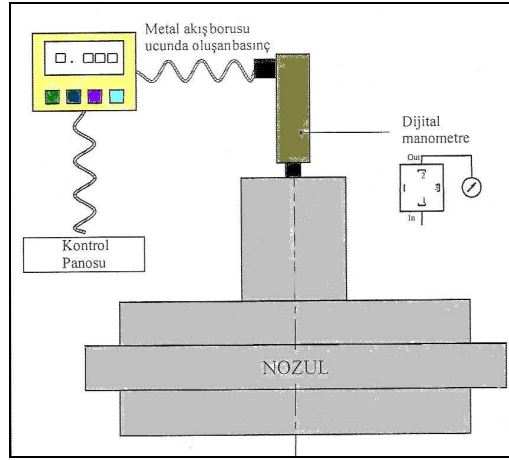
Şekil 4.7. SIEMENS SITRANS F C MASSFLO MASS 2100 kütleli debiölçer

4.3. Metal Akış Debisinin Ölçümü

Yapılan atomizasyon deneylerinde işlem bir video - kamera yardımıyla görüntülenerek kaydedilmiştir. Metal akış debisi süre ile ilgili olduğu için sıvı metalin ilk akışı ile bitişi arasındaki zaman ve pota içersine yerleştirilen metal miktarı göz önüne alınarak metal akış debisi hesaplanmıştır.

4.4. Metal akış Borusu Ucunda oluşan Basıncın Ölçülmesi

Gaz atomizasyon işleminde negatif basınç oluşumu, ergiyik metalin atomizasyon bölgesine doğru çekilmesini sağladığı için istenen bir durumdur.

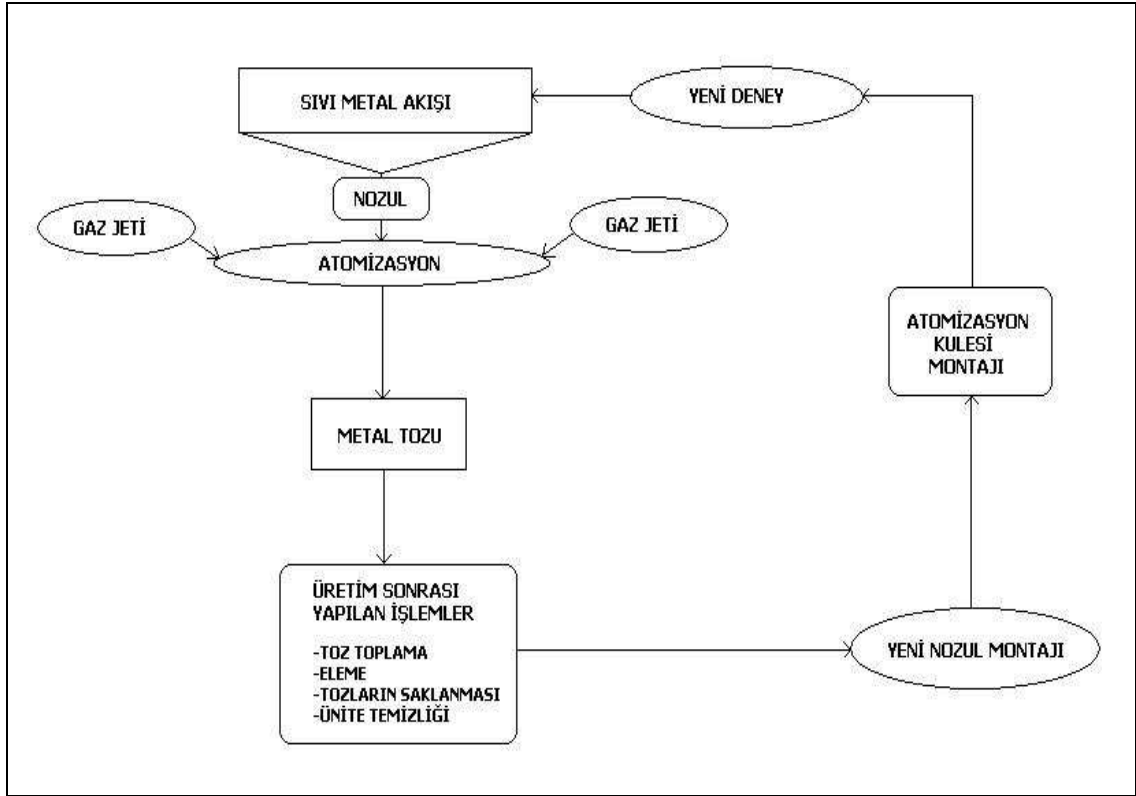


Şekil 4.8. Metal akış borusu ucunda oluşan basınç ölçümü

Negatif basınç oluşumuna etki eden en önemli parametrelerden biri metal akış borusunun nozul gaz çıkışına göre konumudur. Deneylerde kullanılan farklı nozullardaki metal akış borusu ucunda oluşan basınç değerleri borunun üst kısmına bağlanan bir dijital manometre yardımı ile ölçülmüştür (Şekil 4.8). Bu ölçümler sırasında nozula sadece gaz gönderilmiştir.

4.5. Atomizasyon Çalışmaları

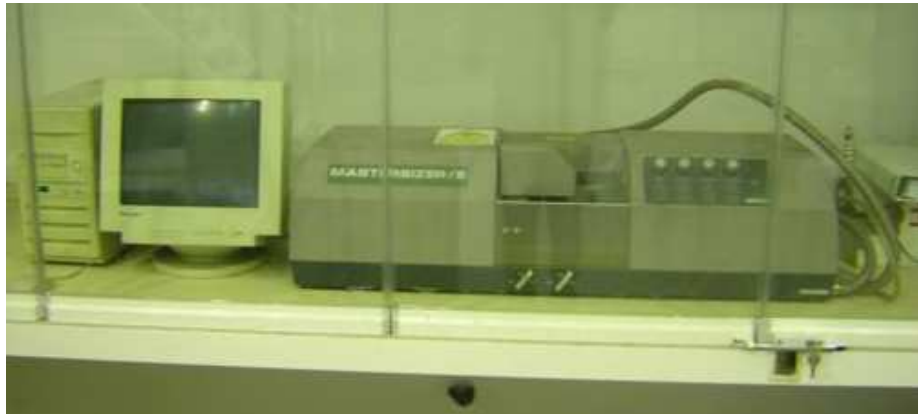
Dumlupınar Gaz Atomizasyon Ünitesi'nde yapılan deneylerde beş farklı geometriye sahip nozulda azot gazı kullanılarak kalay tozu üretimi gerçekleştirilmiştir. Kalay atomizasyon kulesi üzerindeki fırın içersinde bulunan potada 400-410°C arasında aşırı ısıtılarak atomize edilmiştir. Her deney için yapılan işlemler Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Gaz atomizasyon akış şeması

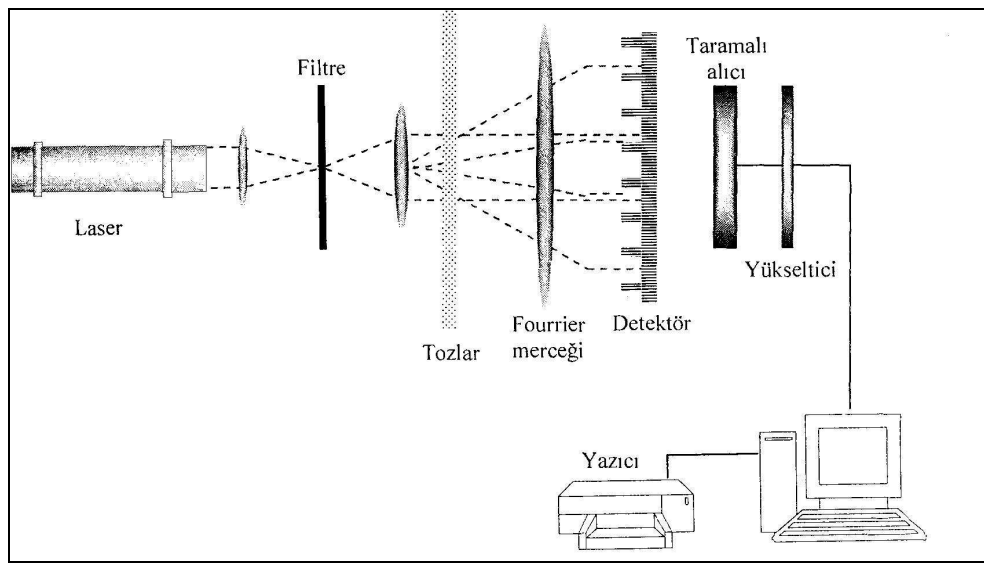
4.6. Toz Boyut Analizi

Toz boyut ölçümleri, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Laboratuvarı'nda bulunan ve lazer ışığının kırınımı prensibine göre çalışan Malvern Mastersizer E partikül boyutu ölçme cihazında yapılmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Malvern Mastersizer E partikül boyutu ölçme cihazı

Ölçümler esnasında taşıyıcı ortam olarak su kullanılmıştır. İnce tozların topaklanmasını önlemek ve homojen bir dağılım elde etmek amacıyla tozlar üç dakika süreyle mekanik ve ultrasonik olarak karıştırılmıştır. Lazer ışını prensibinde tozlar bir sıvı haznesi içinde süspansiyon haline getirilir. Sıvı banyosuna lazer ışın demeti gönderilir. Tozlara çarpan lazer ışını tozun çapı ile ters orantılı olarak kırılır. Hazneden ve fourrier merceği üzerinden geçip detektör üzerine düşen kırılmış ışının açısı ve şiddeti ölçülerek toz boyut dağılımı belirlenir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Lazer ışını prensibinin şematik olarak gösterimi

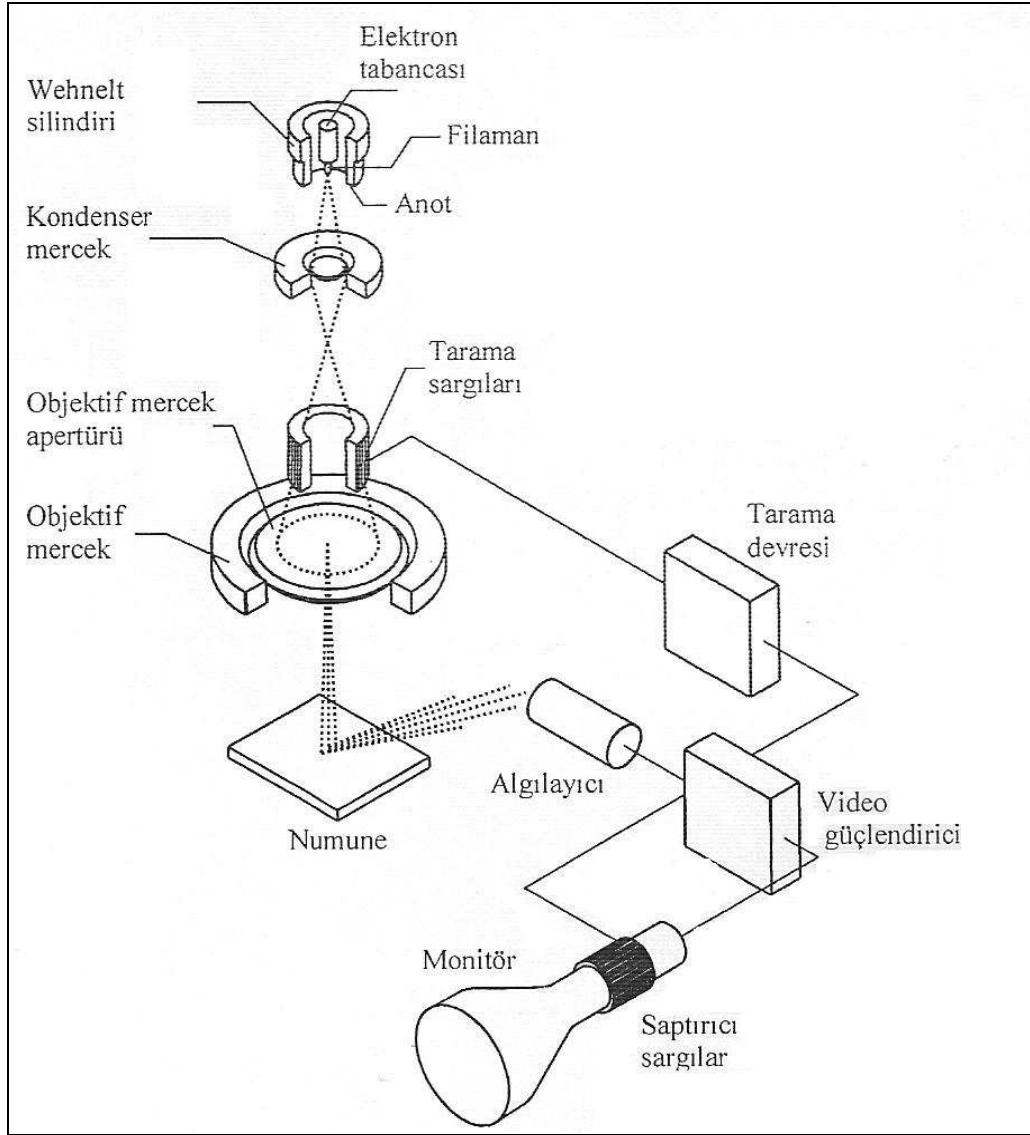
4.7. Tozların Şekil ve Morfolojilerinin İncelenmesi

Tozların şekil ve morfolojileri Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'nde bulunan ZEISS EVO 50 EP tipi taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımı ile incelenmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. ZEISS EVO 50 EP tipi SEM cihazı

Taramalı elektron mikroskobunda görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması ve bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında oluşan etkilerin bir katot ışınları tüpünün ekranına yansıtılmasıyla elde edilir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. SEM'in şematik yapısı

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde aynı nozulla yapılan deneylerdeki Gaz/Metal (G/M) debi oranının toz boyutuna olan etkisi, ayrıca farklı nozullar kullanılarak, birbirine çok yakın atomizasyon basınçlarında yapılan deneylerde süpersonik nozul geometrisindeki değişikliklerin toz boyutu ve dağılımını nasıl etkilediği ele alınmıştır.

Çalışmada öncelikle farklı nozullardaki, metal akış borusu ucunda oluşan basınçların ölçülmesi ve değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu çalışmalarda sisteme yalnızca gaz gönderilmiş ve değişik atomizasyon basınçlarında, metal akış borusu ucunda meydana gelen basınç dijital manometreden okunmuştur. Daha sonra kalay (Sn) ile atomizasyon işlemlerine geçilmiştir.



Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan nozul resmi

Deneylerde atomizasyon işlemine başlamadan önce pota içersine yerleştirilen açma-kapama çubuğu, pota altındaki delikten sıvı metalin akmamasını sağlayacak bir kuvvetle deliğe yerleştirilmiştir. Daha sonra değişik miktarlardaki kalay, pota içine konularak ergitme odası kapatılmış ve ergitme işlemi başlatılmıştır. Ergitme işlemi ile birlikte sıvı metalin donma sorununu ortadan kaldırmak amacıyla metal akış borusu da ısıtılmaya başlanmıştır. Fırın

kalayın ergime sıcaklığının yaklaşık 170-180°C üzerine ayarlanarak aşırı ısıtma yapılmıştır. Gaz akış hattındaki regülatör yardımıyla atomizasyon gaz basıncı ayarlanmıştır. Fırın içersindeki potada bulunan ergiyik sıcaklığı 400°C'ye yaklaştığında metal akış borusu etrafındaki direnç tellerinden geçen akım şiddeti 2,5 amperden, 5-6 ampere kadar yükseltilmiştir. Deneylerde sisteme öncelikle gaz vanası açılarak azot gazı gönderilmiş, hemen ardından açma-kapama çubuğu pnömatik sistem yardımıyla açılarak atomizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Deney sonrasında ünite plastik bir çekiç ile dövülerek gözetleme noktalarına biriken ve ünite iç yüzeyine yapışan tozların toz toplama kabına düşmesi sağlanmıştır. Toz toplama kabı ve siklonda biriken tozlar alınarak plastik kaplarda saklanmıştır. Deney sonuçlarının birbirini etkilememesi amacıyla her deney sonrasında ünite bağlantı noktalarından sökülerek gözetleme pencereleri ve kule iç yüzeyi temizlenmiş ve tekrar kapatılmıştır. Üretilen tozların, toz boyut analizleri yapılmış ve SEM görüntüleri alınmıştır.

Çizelge 5.1'de kullanılan farklı nozullar için uygulanan atomizasyon basıncı, metal debisi, G/M kütleli debi oranı ve elde edilen ortalama toz tane boyutu verilmiştir.

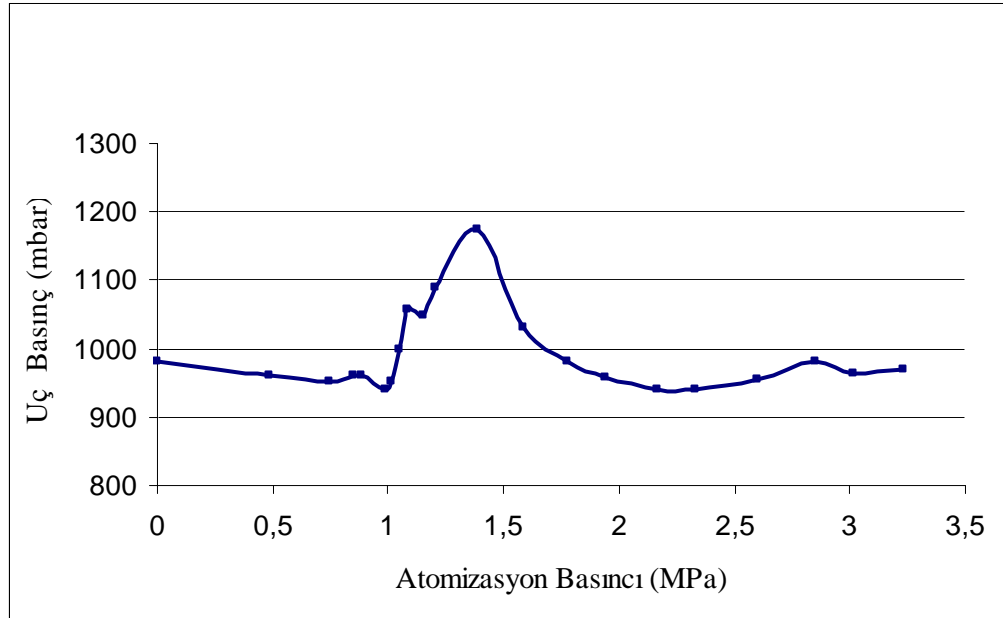
Çizelge 5.1. Atomizasyon değişkenleri ve elde edilen ortalama toz tane boyutları

Deney no	Nozul kodu	Atomizasyon Basıncı (MPa)	Metal Debisi (kg/dak)	G/M Debi Oranı	Ortalama Toz Tane Boyutu (µm)
1	NZL-1	2,27	2,121	1,73	12,30
2	NZL-1	2,27	3,35	1,13	12,95
3	NZL-1	2,25	4,227	0,875	15,26
4	NZL-2	2,25	2,44	1,44	12,05
5	NZL-3	2,25	2,15	1,58	12,14
6	NZL-4	2,21	2,72	1,25	14,11
7	NZL-5	2,17	2,95	1,17	14,26

5.1. Metal Akış Borusu Uç Basınç Ölçüm Sonuçları

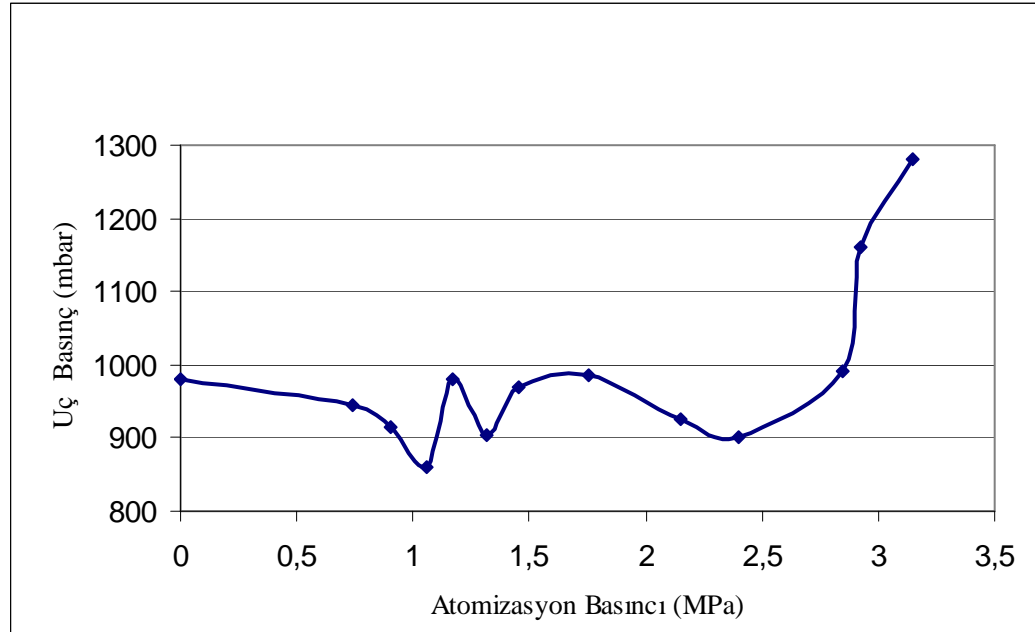
Nozul metal akış borusu uç noktasında meydana gelen basınç oldukça önemlidir. Çünkü metal akış borusu uç basıncı, atmosfer basıncına göre negatif olursa sıvı metal aşağıya doğru çekilecektir. Bu şartlarda yapılan üretimler daha dengeli ve kararlıdır. Eğer uç basınç pozitif olursa sıvı metalin akışında zorluk meydana gelir hatta sıvı metal ters yönde hareket edebilir.

Her bir nozul için yapılan basınç ölçümleri grafikler halinde verilmiştir. NZL-1 için 1,8 Mpa ile 2,7 Mpa atomizasyon basınçları arasında akış borusu ucunda kararlı bir negatif basınç meydana gelmektedir (Şekil 5.2).



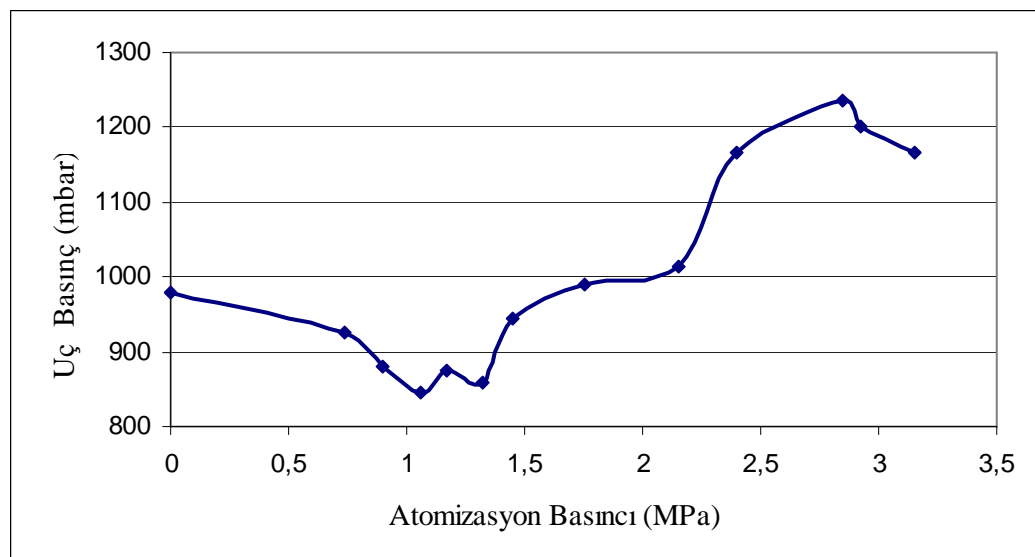
Şekil 5.2. NZL-1 için ölçülen basınç değerleri

NZL-2 ile yapılan uç basınç ölçümünde 1,75-2,70 MPa atomizasyon basınçları arasında negatif basınç oluşumu gözlenmiş (Şekil 5.3) ve bu nozul kullanılarak yapılan 4 nolu deneyde 2,25 MPa atomizasyon basıncında negatif basınç oluşumuna ek olarak 50 mbar ergitme odası üst basıncı uygulanmıştır.



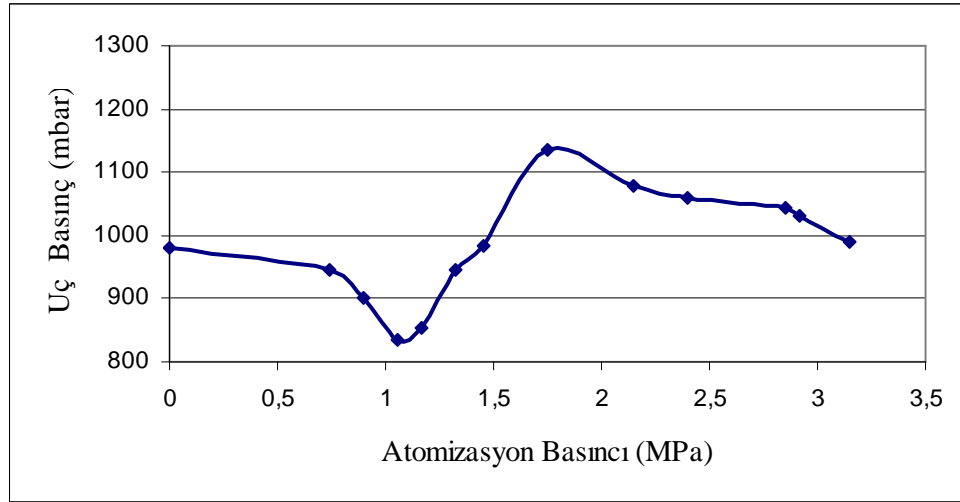
Şekil 5.3. NZL-2 için ölçülen basınç değerleri

NZL-3 ile yapılan uç basınç ölçümlerinde 1,70 MPa'nın üzerinde uygulanan atomizasyon basınçlarında pozitif basınç oluşumu gözlemlenmiştir (Şekil 5.4). NZL-3 kullanılarak yapılan 5 nolu deneyde 2,25 MPa atomizasyon basıncında sıvı metali akıtılabilmek için 100 mbar ergitme odası üst basıncı uygulanmıştır.



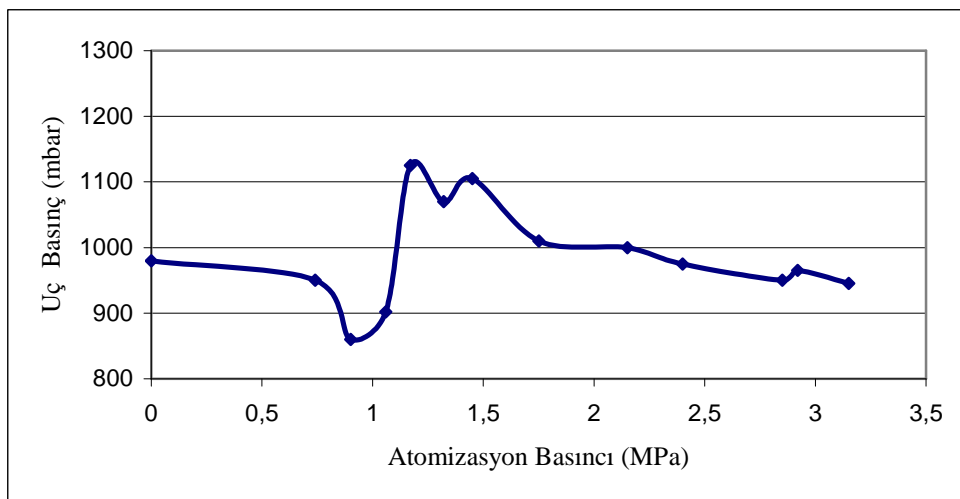
Şekil 5.4. NZL-3 için ölçülen basınç değerleri

NZL-4 ile gerçekleştirilen basınç ölçümlerinde 1,5 MPa ve üzerindeki atomizasyon basınçlarında, nozul ucunda pozitif basıncın oluştuğu tespit edilmiş (Şekil 5.5) ve bu nozul kullanılarak yapılan 6 nolu deneyde 100 mbar ergitme odası üst basıncı uygulanmıştır.



Şekil 5.5. NZL-4 için ölçülen basınç değerleri

NZL-5 ile yapılan basınç ölçümlerinde 1,15-2,40 MPa atomizasyon basınçları arasında pozitif basınç oluşumu gözlemlenmiştir (Şekil 5.6). NZL-5 kullanılarak gerçekleştirilen 7 nolu deneyde 60 mbar'lık ergitme odası üst basıncı uygulanması yeterli görülmüş ve deney bu şartlarda gerçekleştirilmiştir.



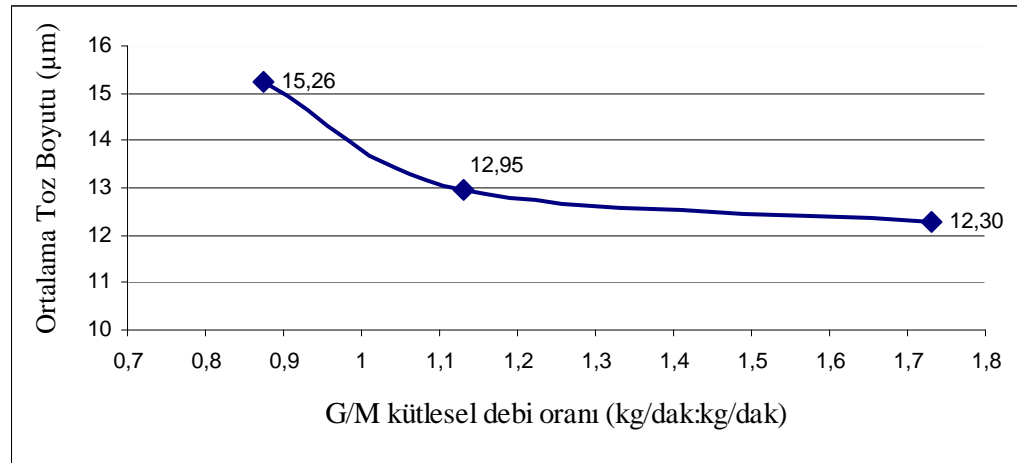
Şekil 5.6. NZL-5 için ölçülen basınç değerleri

5.2. G/M Debi Oranının Ortalama Toz Boyutuna Etkisi

Verimli toz üretiminde en önemli ölçülerden birisi birim metal için kullandığımız gaz miktarıdır. Bu, G/M kütleli debi oranı ile ifade edilmektedir. NZL-1 ile gerçekleştirilen ilk üç deneyde G/M debi oranının toz boyutuna etkisi araştırılmıştır.

1 nolu deneyde ergitme odası üst basıncı uygulanmamış ve 1,73 G/M kütleli debi oranında 12,30 μm boyutunda toz elde edilmiştir. 2 ve 3 nolu deneylerde sırasıyla 60 mbar ve 150 mbar ergitme odası üst basıncı uygulanarak metal debisinin artışı sağlanmış ve G/M kütleli debi oranı azaltılarak sırasıyla 1,13 ve 0,875 olarak hesaplanmıştır.

G/M kütleli debi oranına göre ortalama toz boyutu değişimi Şekil 5.7’de verilmiştir.



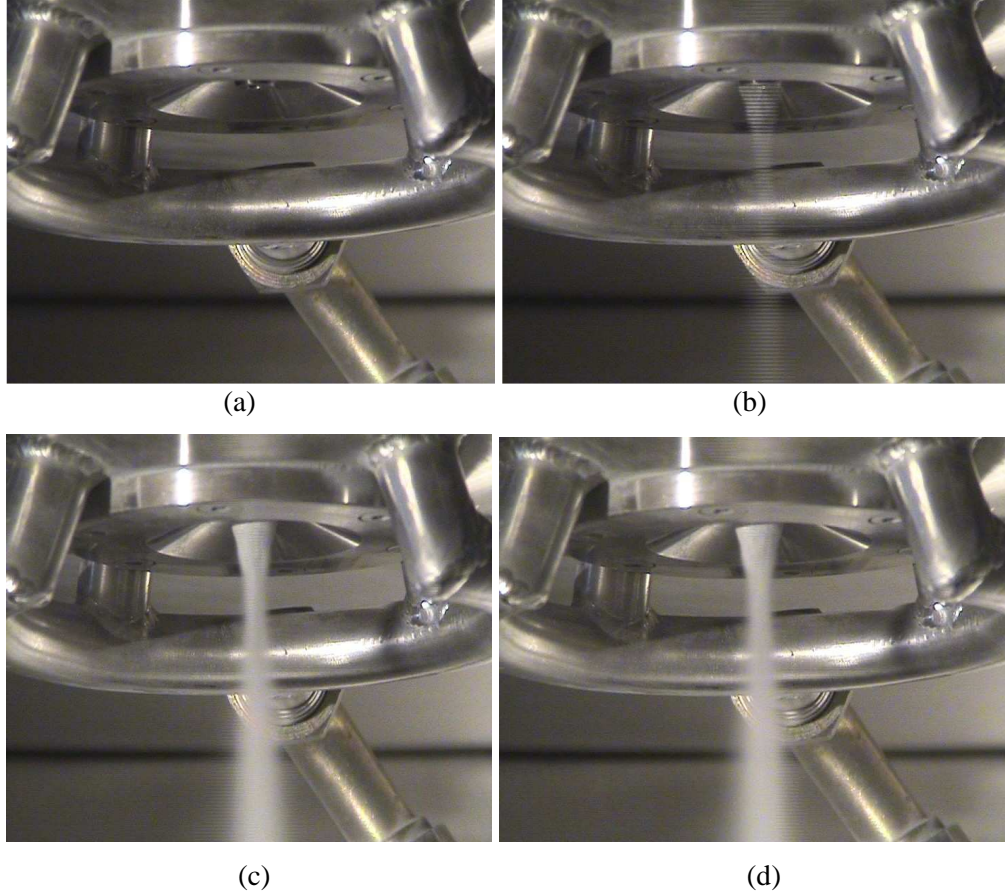
Şekil 5.7. G/M kütleli debi oranı ile ortalama toz boyutu değişimi

Şekilde görüldüğü üzere G/M kütleli debi oranının artmasıyla ortalama toz boyutu küçülmektedir. Ancak bu değişim belli bir değerden sonra toz boyutu üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olmamakta ve ortalama toz boyutu daha fazla küçülmemektedir. Bu da göstermektedir ki, belirli bir tasarım ile elde edilebilecek en küçük ortalama toz boyutu belirli bir G/M debi oranından sonra değişim göstermemektedir.

5.3. Atomizasyon Oluşumu

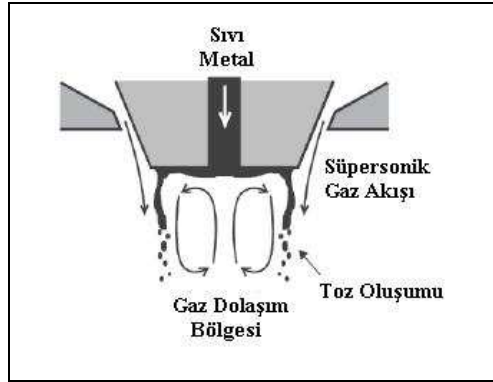
Atomizasyon deneylerinde öncelikle atomizasyon gazı açılmış ve sonrasında sıvı metal akışı sağlanmıştır. Atomizasyon esnasında sıvı metal akışı, atomizasyon gazının etkisiyle metal akış borusu ucunda koni şeklini almıştır. Deneyler esnasında video-kamera yardımıyla elde edilen atomizasyon görüntülerinde koni oluşum mekanizması Şekil 5.8’de görülmektedir. Şekil 5.8 a, b, c, d görüntüleri arasında 1/25 saniye vardır. Bu karelerde öncelikle gazın

akıtıldığı ve sıvı metalin henüz akmaya başlamadığı an (a), sıvı metalin yavaşça akmaya başladığı an (b), ve devamında tam olarak akmaya başlaması ile sıvı metalin oluşturduğu koni (c ve d) görülmektedir.



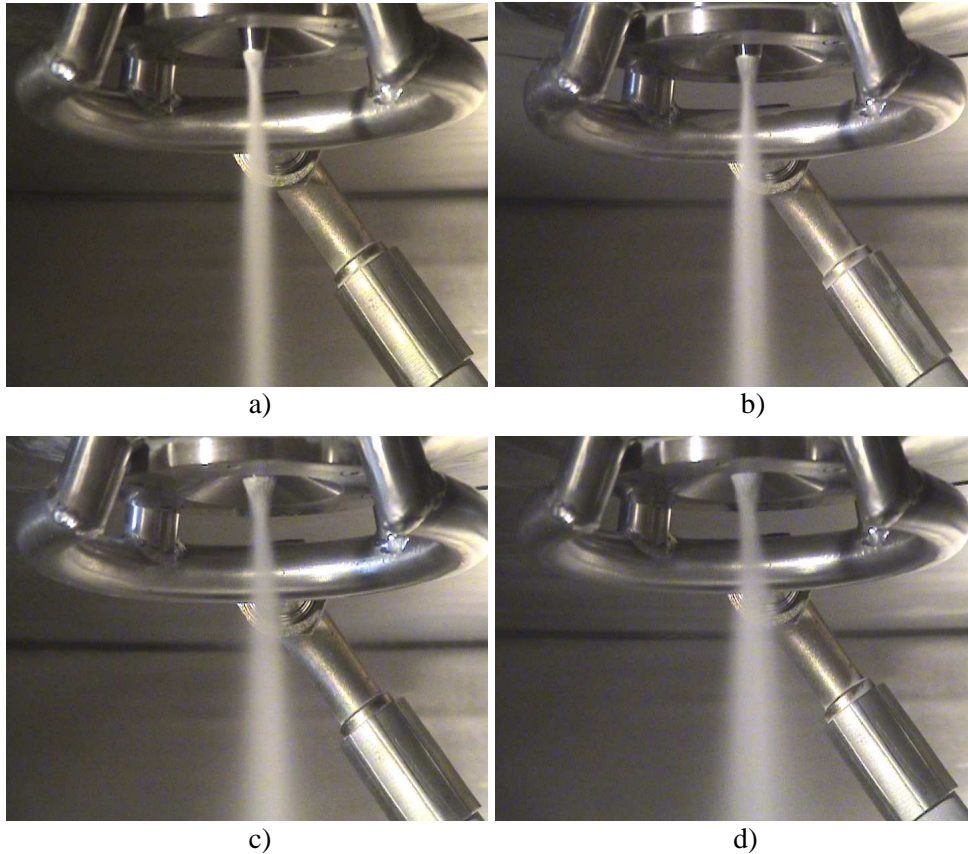
Şekil 5.8. NZL-1 ile yapılan 2 no'lu deneyde başlangıçtan itibaren 1/25 sn aralıklarla çekilmiş atomizasyon görüntüleri

Elde edilen görüntülere göre, gaz jetlerinin kesişmesi sonucu gaz, sıvı metali metal akış borusu ucuna doğru iter. Akış borusuna temas eden sıvı metal dış parça yüzeyinden çevresine doğru radyal olarak ivmelenir. Bu anda tekrar gaz jetleri ile buluşan sıvı metal parçalanarak toz haline gelir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9. Gaz dolaşım bölgesi ve koni oluşumunun şematik olarak gösterimi

Şekil 5.10'da dört farklı nozulla gerçekleştirilen atomizasyon çalışmalarından video-kamera yardımıyla alınan resimler görülmektedir. Resimlerde nozullara ait metal akış borusu çıkıntı mesafesinin değişimi de belirgin şekilde görülmektedir.



Şekil 5.10. Farklı nozullarla yapılan atomizasyon çalışmalarından alınan görüntüler:
a) NZL-2, b) NZL-3, c) NZL-4, d) NZL-5

5.4. Metal Akış Borusu Çıkıntı Mesafesinin Ortalama Toz Boyutuna Etkisi

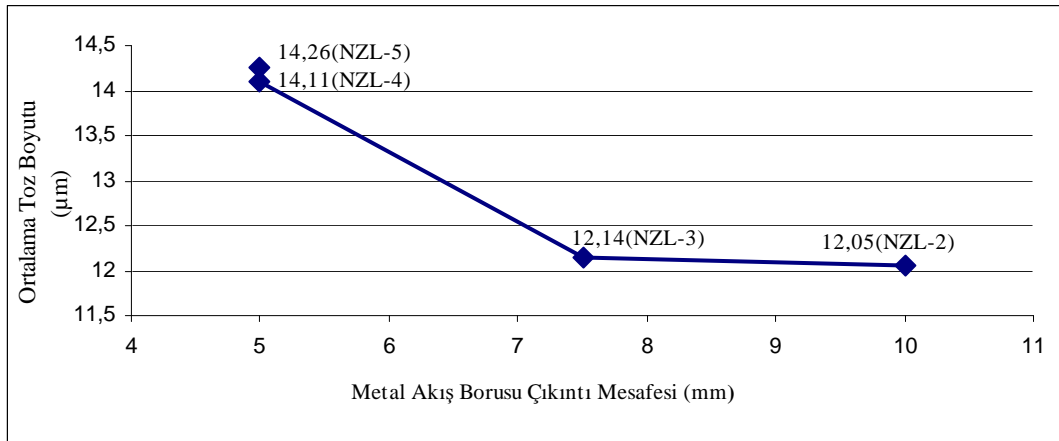
Nozul geometrisi, atomizasyon gaz akışını kontrol ettiği için gaz debisi ve hızı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Nozul geometrisinin yanı sıra metal akış borusu geometrisi de gaz akışına etkisi sebebiyle nozul tasarımında göz önüne alınması gereken en önemli hususlardan biridir.

Bölüm 4'te geometrileri verilen nozullarla (Bkz. Şekil 4.5) ayrı ayrı yapılan atomizasyon çalışmalarına ait metal akış borusu çıkıntı mesafesi, G/M debi oranı ve ortalama toz boyut dağılımları Çizelge 5.2'de görülmektedir.

Çizelge 5.2. Kullanılan nozullara ait çıkıntı mesafesi, G/M debi oranı ve ortalama toz boyut dağılımları

Nozul Kodu	G/M Kütleli Debi Oranı	Metal Akış Borusu Çıkıntı Mesafesi (mm)	Ortalama Toz Boyut Dağılımı (d_{50})
NZL-2	1,44	10	12,05
NZL-3	1,58	7,5	12,14
NZL-4	1,25	5	14,11
NZL-5	1,17	5	14,26

Burada açıkça görülüyor ki, metal akış borusu çıkıntı mesafesi arttıkça toz boyutu küçülmektedir. (Şekil 5.11)



Şekil 5.11. Metal akış borusu çıkıntı mesafesi ile toz boyutu değişimi

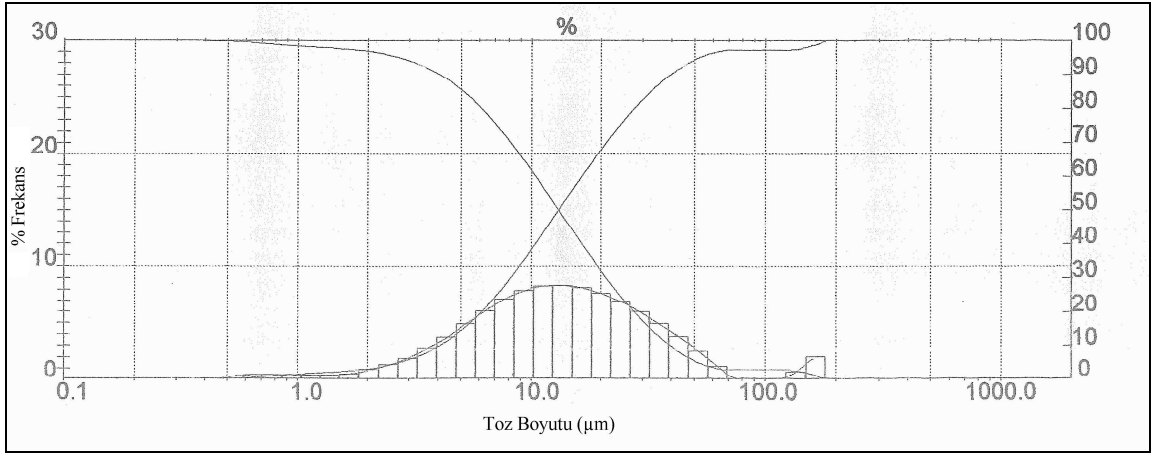
Burada dikkati çeken başka bir nokta ise, aynı çıkıntı mesafesinde nozul uç geometrisindeki değişikliğin toz boyutu üzerinde önemli bir etkisinin olmadığıdır. Aynı çıkıntı mesafesine sahip NZL-4 ve NZL-5 ile yapılan atomizasyon çalışmalarında ortalama toz boyutları 14,11 ve 14,26 μm olarak ölçülmüştür.

5.5. Toz Boyut ve Dağılımı

Atomizasyon ünitesinden tozlar, toz toplama kabı ve siklon olmak üzere iki kısımdan alınmıştır. Toz toplama kabında biriken tozlar, siklonda biriken tozlardan kütleli olarak fazladır. Her deneyde, pota içersine yerleştirilen malzeme miktarına bağlı olmaksızın ortalama 50 gram üretim kaybına rastlanmıştır. Bu kayba gözetleme pencerelerinde biriken ve kule çeperlerine yapışan tozlar neden olmaktadır.

Malvern Mastersizer E lazer boyut analiz cihazından elde edilen analiz raporunda, üretilen tozlara ait ortalama toz çapı (d_{50}), Sauter ortalama çapı (d_{vs}), hacim ortalama çapı (d_{vm}), d_{10} ve d_{90} kümülatif yüzde değerleri, belli aralıklardaki toz yüzdesi ve belli bir boyutun altındaki kümülatif yüzde istatistiksel olarak yer almaktadır. Ayrıca raporda, toz boyutu dağılımı (frekans) ve kümülatif yüzde eğrileri de bulunmaktadır. Yapılan deneylerde üretilen azot atomize kalay tozlarına ait analiz raporları ekler bölümünde verilmiştir. Analiz raporunda, $d(0.5)$ ortalama toz çapını (d_{50}), $D[3,2]$ Sauter ortalama çapını (d_{vs}), $D[4,3]$ hacim ortalama çapını (d_{vm}), $d(0.1)$ ve $d(0.9)$ ise d_{10} ve d_{90} kümülatif yüzde değerlerini ifade etmektedir. İstatistiki bilgilerin verildiği tabloda ise 1. ve 3. sütun toz boyutu aralığı, 2. sütun 1. ve 3. sütunlarda verilen toz boyutları aralığındaki toz yüzdesi, 4. sütun ise kümülatif %'dir. Tabloda verilen bu bilgiler, raporda yer alan grafik üzerinde kümülatif % eğrileri, toz boyutu dağılımı eğrisi ve histogram ile gösterilmiştir.

Toz boyutu analiz raporlarından elde edilen dağılım eğrilerinden, farklı geometrilerdeki nozullarla üretilmiş azot atomize kalay tozlarının logaritmik normal dağılım göstererek bir çan eğrisi oluşturdukları görülmüştür (Şekil 5.12).



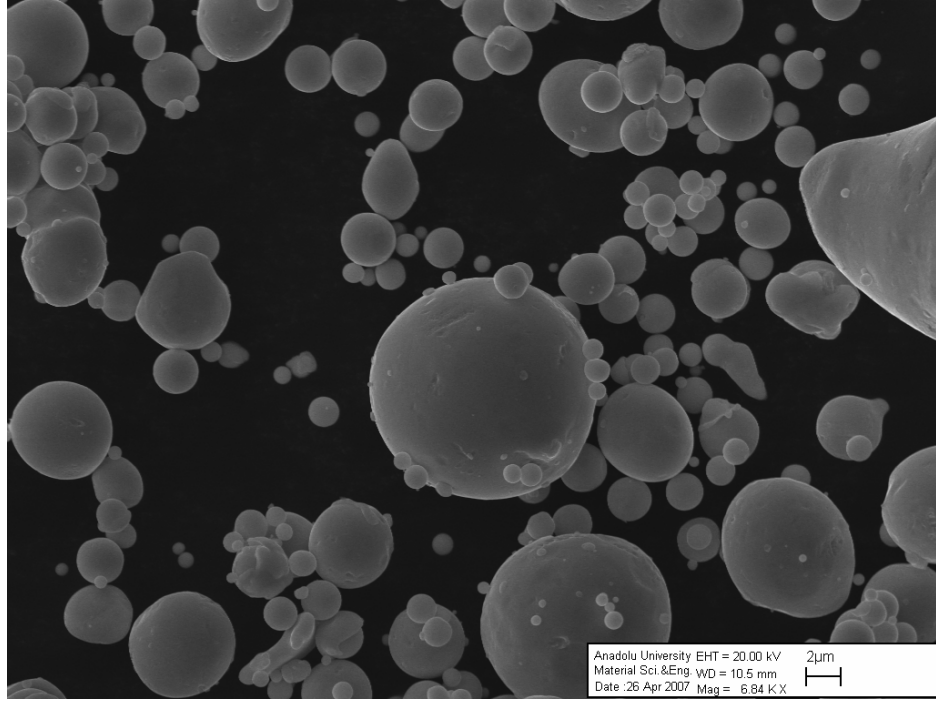
Şekil 5.12. NZL-2 ile gerçekleştirilen 4 nolu deneyde toz toplama kabında biriken tozların dağılımı

Yapılan deneylerde elde edilen en küçük tozlar 12,05 µm boyutunda olup, 1,44 G/M debi oranında, 10 mm çıkıntı mesafesine sahip NZL-2 ile elde edilmiştir.

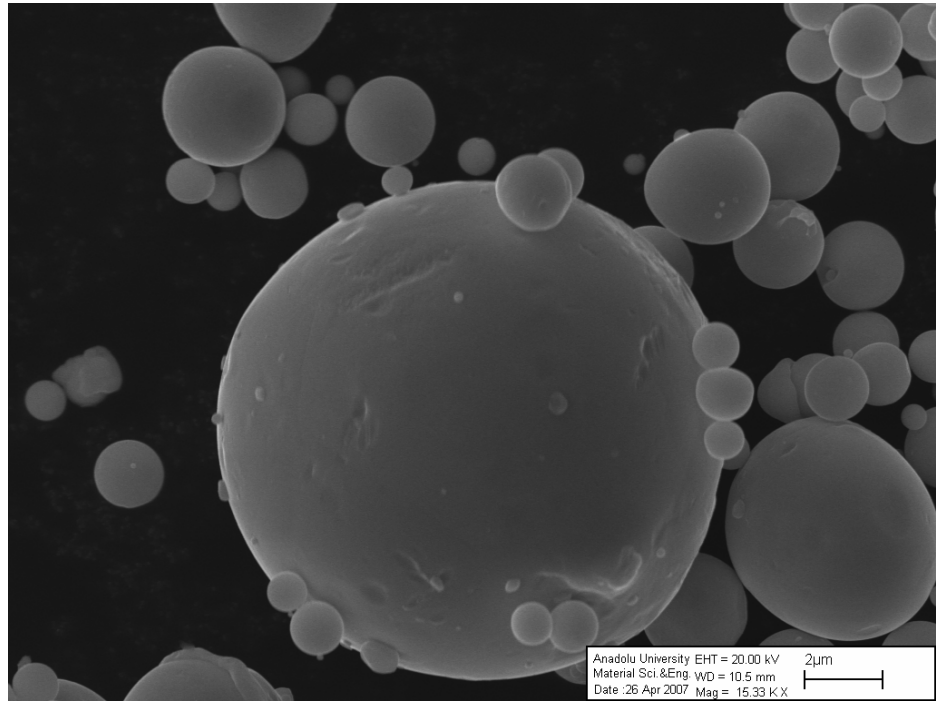
5.6. Tozların Şekilleri ve Yüzey Morfolojileri

Üretimini gerçekleştirdiğimiz kalay tozlarının SEM ile elde edilen görünümüne bakıldığında, tozların küresel ve küresele yakın şekilli olduğu görülmektedir (Şekil 5.15 ve 5.16). Küçük boyutlu tozlarda ($d_{50} \approx 10 \mu\text{m}$ ve altı) düzgün ve pürüzsüz toz yüzeyleri, daha iri tozlarda ise hücresel yüzey yapısı gözlemlenmiştir (Şekil 5.18). Hücresel yapı oluşumunun nedeni atomizasyon anında gerçekleşen ani soğuma olayıdır.

Yapılan atomizasyon çalışmalarında, küçük boyutlu tozların daha iri tozlar üzerinde uydulaşma oluşturduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.13). Uydulaşmalar küçük boyutlu tozların, henüz tamamen katılaşmasını tamamlayamamış daha büyük tozlara çarpması sonucu meydana gelir. Uydulaşma esnasında temas eden iki tozun sıcaklıklarının birbirinden farklı olması durumunda yüksek sıcaklığa sahip tozun, düşük sıcaklıktaki toz üzerine sıvandığı görülmektedir (Şekil 5.14). Ayrıca birinci bölünme aşamasını tamamladıktan hemen sonra ikinci bölünmeyi tamamlayamadan katılaştıran çubuk halinde kalmış tozlar da bulunmaktadır (Şekil 5.17).

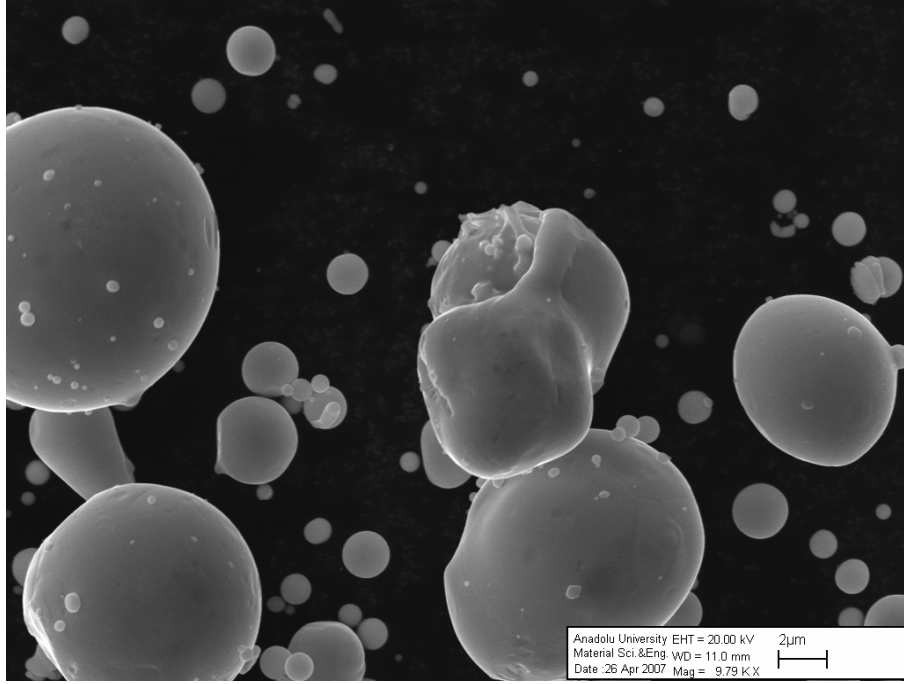


a)

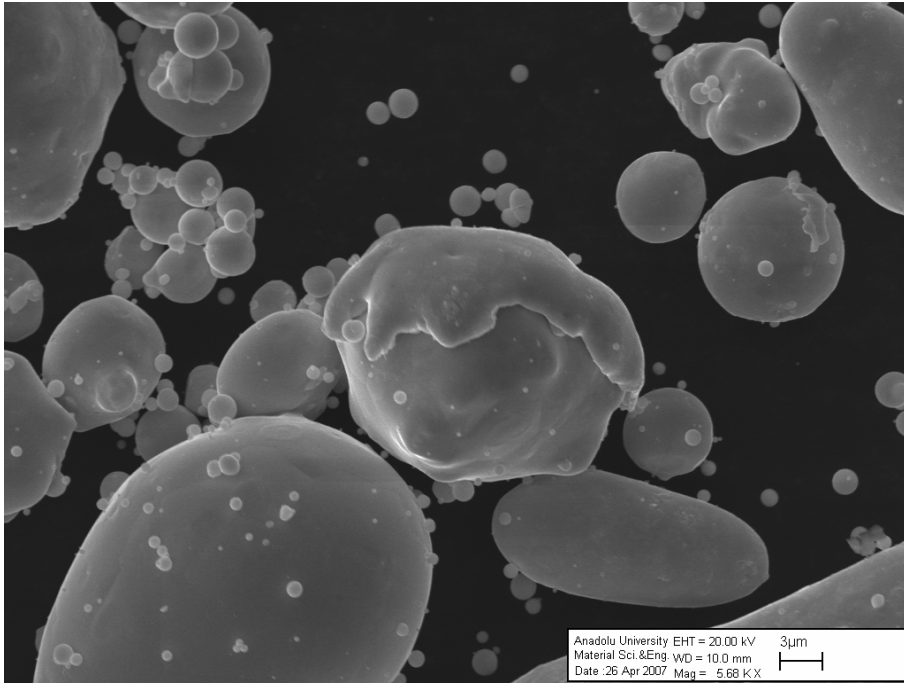


b)

Şekil 5.13. NZL-2 ile üretilmiş kalay tozu üzerinde oluşan uydulaşmalar
a) (x6800), b) (x15000)



a)

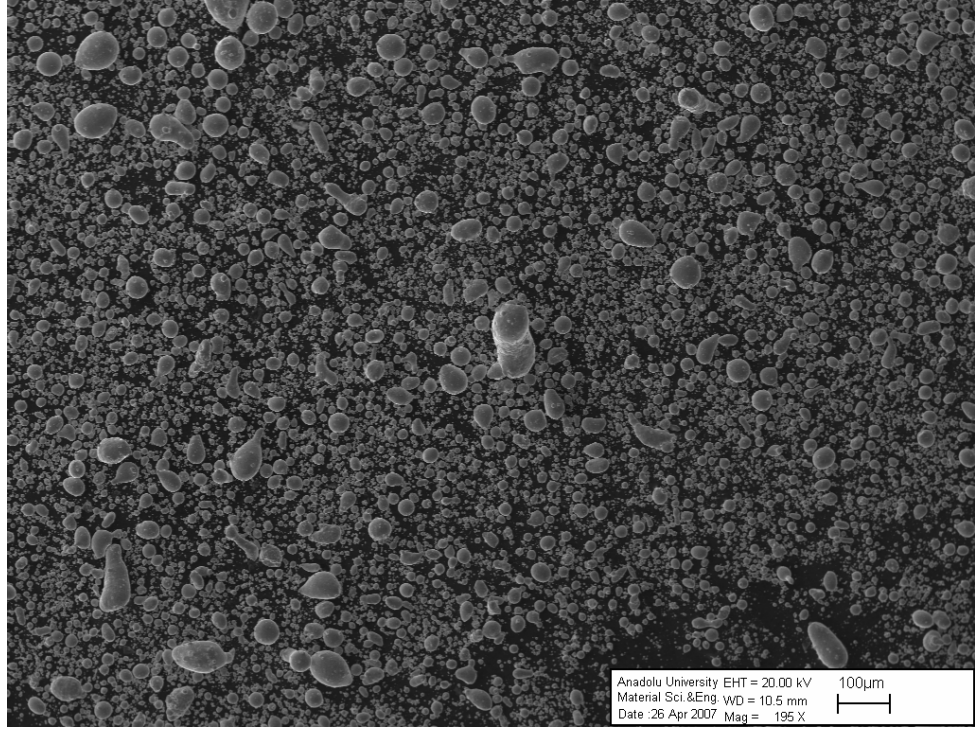


b)

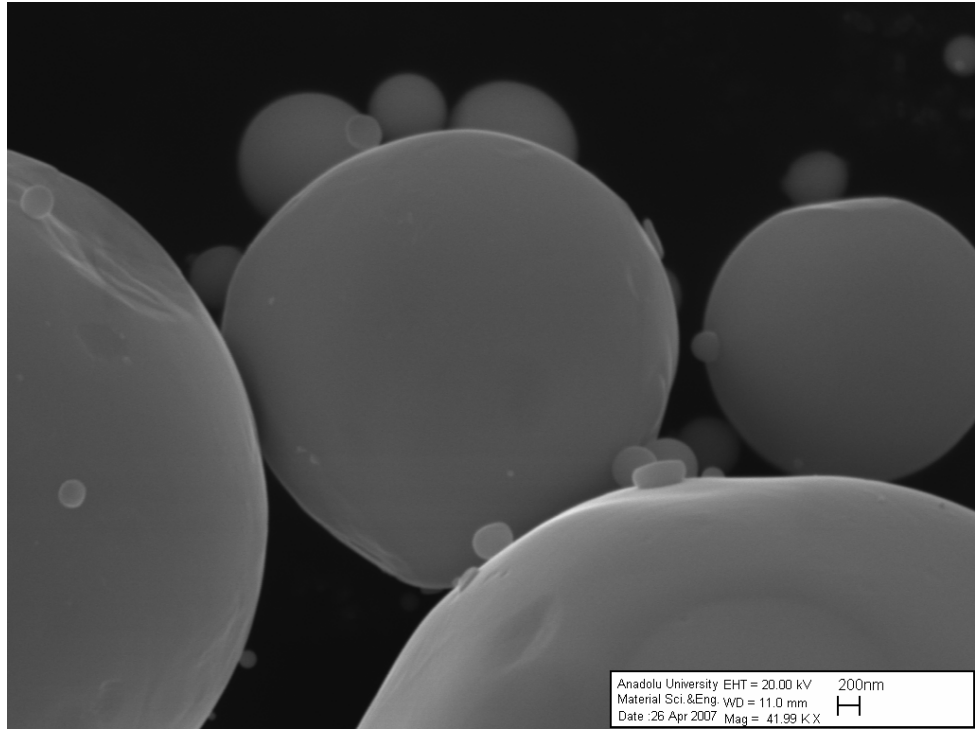
Şekil 5.14. Gözlemlenen sıvanma oluşumları

a) NZZ-5 ile üretilmiş sıvanma oluşumuna örnek kalay tozu (x9800)

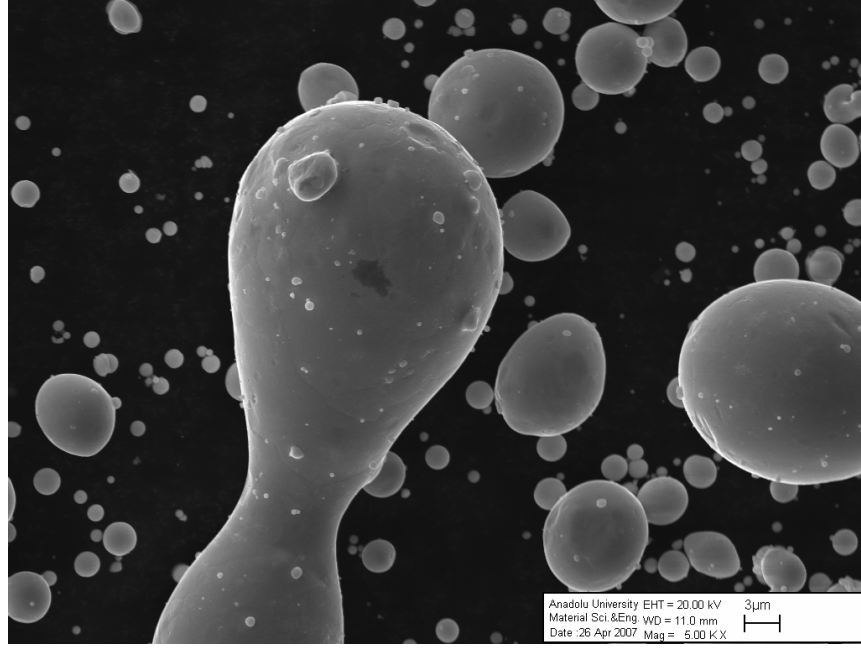
b) NZZ-2 ile üretilmiş kalay tozu üzerinde sıvanma olayı (x5600)



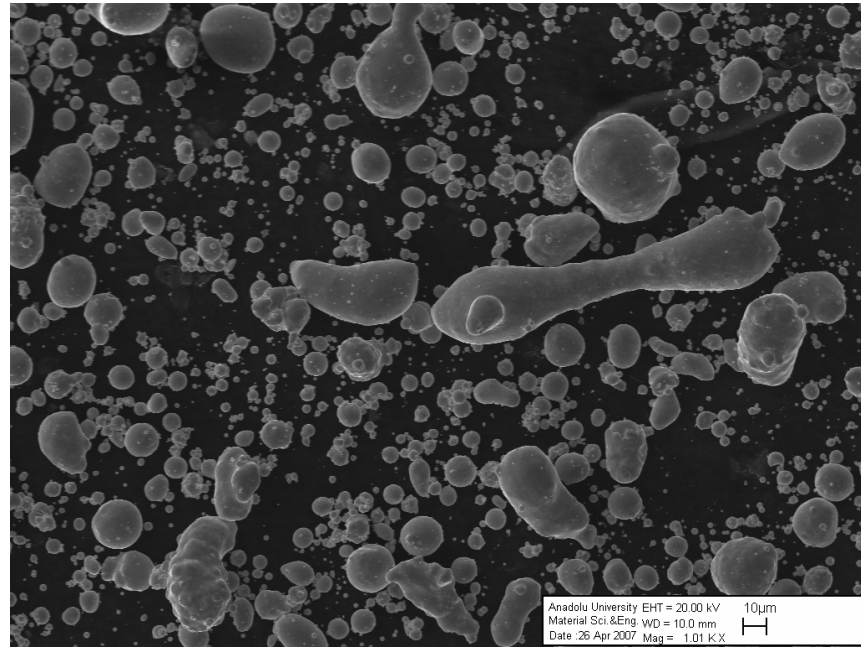
Şekil 5.15. NZL-3 ile üretilmiş kalay tozlarının genel görünümü (x200)



Şekil.5.16 NZL-4 ile üretilen çok küçük boyuttaki kalay tozu (x42000)

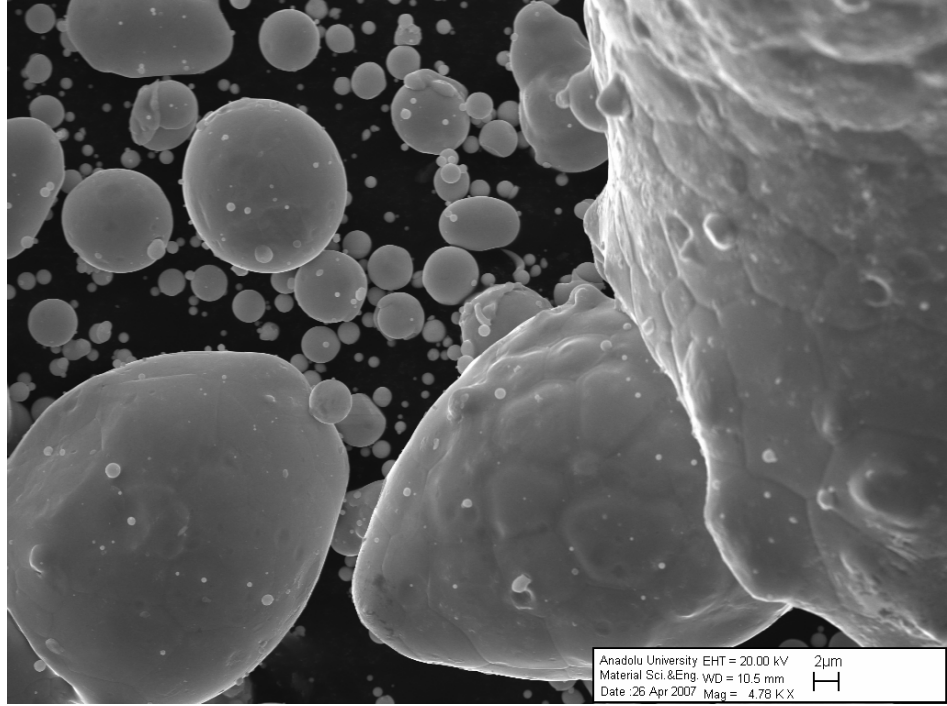


a)

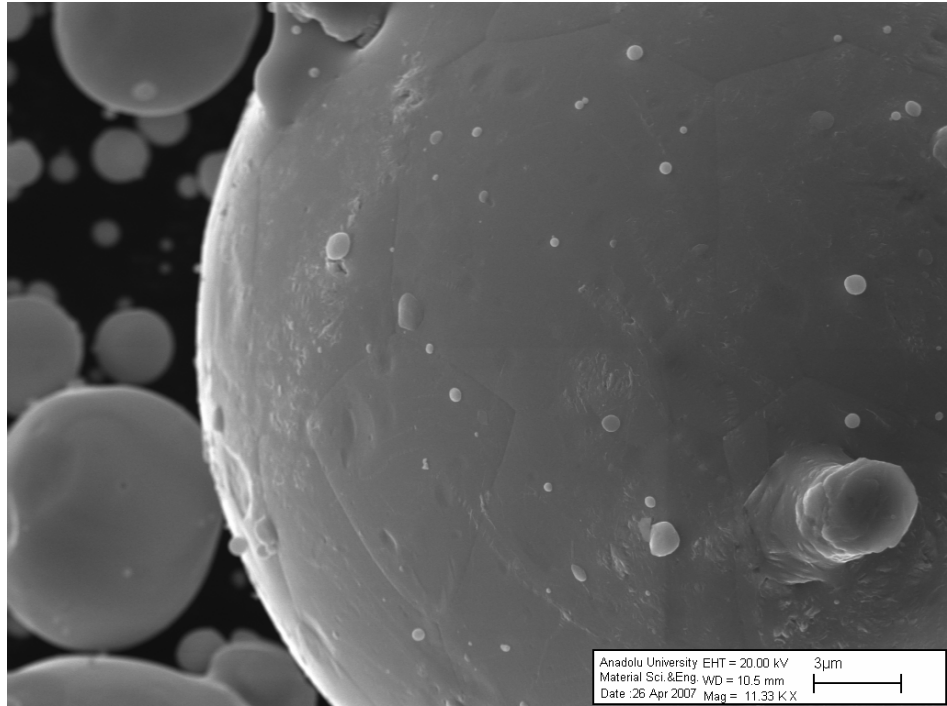


b)

Şekil 5.17 İkinci bölünmeyi tamamlayamayan tozlar: a) NZL-5 ile üretilen kalay tozlarından, ikinci bölünmeyi tamamlayamadan katılmış bir toz (x5000) b) NZL-2 üretilen tozlardan ikinci bölünmeyi tamamlayamamış çubuksu toz (x1000)



a)



b)

Şekil 5.18. Üretilen kalay tozlarına ait hücresel yapılyüzeyler:
a) NZL-3 ile üretilmiş, b) NZL-4 ile üretilmiş kalay tozları

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

1. Nozul içersindeki metal akış borusu uç noktasında yapılan basınç ölçümlerinde atmosfer basıncına göre pozitif ve negatif değerler olmak üzere bir değişim gözlenmiştir. 2,2 MPa basınç civarında nozulların ucunda ölçülen basınç değerleri NZL-1, NZL-2, NZL-3, NZL-4, NZL-5 için atmosfer basıncına göre sırasıyla -40mbar, -60 mbar, 80 mbar, 45 mbar ve 10 mbar'dır. Çıkıntı mesafesinin artması sonucu artan negatif basınç oluşumu tespit edilmiştir.
2. Atomizasyon deneylerinde öncelikle atomizasyon gazı açılmış, hemen sonrasında sıvı metal akışı sağlanmıştır. Çok hızlı akan gazın hızı ve meydana gelen gaz dolaşım bölgesi sayesinde oluşan radyal basınç farkı nedeniyle sıvı metal, metal akış borusu ucunda koni şeklini almıştır.
3. Atomizasyon deneylerinde kullanılan farklı geometriye sahip nozullarda metal yığılması problemi meydana gelmemiştir. Metal akış borusu ısıtılarak sıvı metalin donması önlenmiştir.
4. Aynı nozulla gerçekleştirilen deneylerde, aynı atomizasyon basıncında G/M debi oranının artması ile ortalama toz boyutu küçülmektedir. 0,875 G/M debi oranında 15,26 μm , 1,13 G/M debi oranında 12,95 μm ve 1,73 G/M debi oranında 12,30 μm boyutlarında toz üretilmiştir.
5. Metal akış borusu çıkıntı mesafesinin artması ile ortalama toz boyutu küçülmektedir. En küçük tozlar 10 mm çıkıntı mesafesinde üretilmiş ve ortalama tane boyutu 12,05 μm olarak ölçülmüştür.
6. Aynı metal akış borusu çıkıntı mesafesinde, farklı nozul uç geometrisinin toz boyutu üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. 5 mm çıkıntı mesafesine sahip iki farklı geometrideki uçla yapılan deneylerde ortalama toz boyutu NZL-4'de 14,11 μm ve NZL-5'de 14,26 μm olarak ölçülmüştür.
7. Üretimi yapılan tozların logaritmik normal dağılım gösterdiği görülmüştür.
8. Tozların morfolojik incelemesinde üretilen azot atomize kalay tozlarının büyük çoğunluğunun küresel şekle sahip, iri tozların ise küresele yakın şekilde olduğu

gözlemlenmiştir. Küçük boyutlu tozlarda düzgün ve pürüzsüz toz yüzeyleri, iri tozlarda ise hücresel yüzey yapısı görülmektedir.

9. Tozlar incelendiğinde küçük boyutlu tozların, iri tozlar üzerinde uydulaşma oluşturdıkları, bazı durumlarda da sıvanma olayının gerçekleştiği tespit edilmiştir.

6.2. Öneriler

1. Atomizasyon bölgesine gaz akışkanının gönderilmesi sonucu oluşan gaz akışı ve dolaşım bölgelerinin görüntülenmesi sağlanmalıdır.
2. Farklı çaplarda nozul ucu ile deney yapılarak aynı geometride çapın etkisi araştırılmalıdır.
3. Nozul çıkış alanının metal akış borusu ucundaki basınç oluşumuna etkisi araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1]. Baksan, B., Gürler, R. 2003, Toz Metalurjisinin Savunma Sanayinde Uygulanması, Osmangazi Üniversitesi, Metalurji Enstitüsü, Eskişehir.
- [2]. <http://www.turktoz.gazi.edu.tr/makale.htm>
- [3]. <http://www.makinamuhendisi.com/idx/8/142/Makina-Magazin-Makale/article/Toz-Metalurjisi.html>
- [4]. Atik, E., 2005, Demir esaslı toz metal parçaların borlamayla yüzey performansının artırılması, 4. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, 1032-1039.
- [5]. Yılmaz, S. S., Varol, R., Kurgan, N., 2005, Yüzey sertleştirme işlemlerinin demir esaslı T/M numunelerin mekanik özelliklerine etkisi, 4. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, 832-847.
- [6]. Üstel, F., Yılmaz, F., 2005, Termal sprey kaplama teknolojisinde kullanılan kaplama tozları ve karakterizasyonu, 4. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, 1203-1220.
- [7]. web.sakarya.edu.tr/~aokurt/dersler/lab_basinc.doc
- [8]. <http://web.sakarya.edu.tr/~aokurt/dersler/tozuretım.htm>.
- [9]. Özbek, Y.,Y., Yıldız, K., Alp, A., 2005, Röntgen atık sularından gümüş tozu kazanımı, 4. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, 1221-1227.
- [10]. Avcı, U., 1993, Toz Metalurjisi Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [11]. Le, T., and Henein, H., 1996, Effect of nozzle geometry and position on gas atomisation, The international Journal of Powder metallurgy, Volume 32, No 4, 353-363.
- [12]. <http://www.crucibleresearch.com/images/tga.gif>
- [13]. Karagöz, S., Ymanoğlu, R., 2005, Prep atomizasyonu ile alaşım tozu üretimi ve karakterizasyonu, 4. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, 508-519.
- [14]. Çetinkaya, Ş., Oktay, E., 2005, Ön alaşımlı demir tozlarına karbon katkısının sinterleme sonrası mekanik özelliklere etkisi, 4. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, 1130-1140.
- [15]. Ting, J., Peretti, M.W. and Eisen, W.B., 2002, The effect of the wake-closure phenomenon on gas atomisation performance, Materials Science and Engineering A, Volume 326, Issue 1, 110-121.
- [16]. <http://www2.mech.kth.se/~stefanw/AppliedCFD/Nozzle.pdf>
- [17]. <http://www.nada.kth.se/~jmoller/GA/GA/GA.html>

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- [18]. Singh, S.N., and ojha S.N., 1992, Microstructural investigation on rapidly solidified cast iron powders, *İnt.j Rapit Solidification*, 7, 201-217.
- [19]. Ünal,R., Kainer, K.U., Production of high strenght Al-Mg-Sc alloys by PM, *Powder Metallurgy*, Vol 41, No.2, p119-122.
- [20]. <http://www.bap.gazi.edu.tr/projeler/mmfp/ibrahim.htm>
- [21]. German, R.M., 1994, *Powder metallurgy science*, 2nd edition, Metal Powder Industries Federation, USA.
- [22]. Hohmann, M., and Johnson, S., 1990, New consepts for inter gas atomisation plants, *Metal Powder Report*, 47-50.
- [23]. Uslan, İ., 1999, Gaz atomize alüminyum tozlarının özelliklerine üretim değişkenlerinin etkisinin araştırılması, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [24]. Bianchello, F.S., et al, 1990, Particle size measurement of inert gas atomized powder, *Materials Science and Engineering A*, 124, 9-14.
- [25]. Dombrowski, N., and Johns, W.R., 1963, The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets, *Chemical Engineering Science*, 18, 203-214.
- [26]. Mates, S.P., Settles, G.S., 2005, A study of liquid metal atomisation using close-coupled nozzles Part1: Gas dynamic behavior, *Atomisation and Sprays*, Vol.15.
- [27]. Mates, S.P., and Settles, G.S., ‘A flow visualization study of the gas dynamics of liquid metal atomization nozzles’, *Proceedings of the 1995 International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials*, Seattle, May 14-17, 1995.
- [28]. Le, T., and Henein, H., 1996, Effect of nozzle geometry and position on gas atomisation, *The International Journal of Powder Metallurgy*, Volume 32, No.4, 353-363.
- [29]. Ting, J.T., and Anderson, I.E., 2004, A computational fluid dynamics (CFD) investigation of the wake closure phenomenon, *Materials Science and Engineering A*, Vol 379, Issues 1-2, 110-121.
- [30]. http://www.cstl.nist.gov/div836/836.01/PDFs/1998/EPMA_US.pdf
- [31]. Ünal, R., Tuzlu, H., 2005, Süpersonik nozul tasarımının teorik olarak incelenmesi, 4. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, 969-987.
- [32]. Strauss, J.T., 1999, Hotter gas atomization increases atomization efficiency, *Metal Powder report*, Volume 54, Issue 11, 24-28.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- [33]. Cui, C., Cao, F., and Li, Q., 2002, Formation mechanism of the pressure zone at the tip of the melt delivery tube during spray forming process, *Journal of Materials Processing Technology*, 1377, 5-9.
- [34]. Aksoy, A., 2005, Gaz atomizasyon yöntemiyle metal tozu üretiminde süpersonik nozul değişkenlerinin toz özelliklerine etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.
- [35]. Ünal, R., 2007, Improvements to close-coupled gas atomisation nozzle for fine powder production, *Powder Metallurgy*, 50, No.1, 66-71.
- [36]. Chen, Y.M., Su, Y.H. Lin, R.W. and Tsao, C.Y.A, 1998, Modelling of atomisation rate during gas atomisation, *Acta Mater*, Vol 46, 1011-1023.
- [37]. Salamcı, E., 2004, Spray casting (derleme), *G.U. Fen Bilimleri Dergisi*. 155-173.
- [38]. Mates, S.P., Settles, G.S., 2005, A study of liquid metal atomisation using close-coupled nozzles Part2: Atomization behavior, *Atomisation and Sprays*, Vol.15.
- [39]. Ünal, R., Aksoy, A., 2005, Gaz atomizasyon yönteminde süpersonik nozul kullanılarak kalay tozu üretimi. 4. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, 520-530.
- [40]. Aydın, M., 2005, Gaz atomizasyon yönteminde yeni bir nozul tasarımı ve toz üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.

Ek 1. 1 nolu deneyde NZL-1 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Toz Toplama Kabı)

MALVERN MASTERSIZER E

Version 1.2b

Thu, Feb 01, 2007 11:47

22.1.07 Toz kabı :Run Number 7

Sample File Name: RUNAL , Record: 95 Source: Analysed
 Measured on: Thu, Feb 01, 2007 11:46 Last saved on: Thu, Feb 01, 2007 11:46

Presentation: 20HD
 Polydisperse model

Volume Result

Focus = 100 mm.

Residual = 0.805 %
 d (0.5) = 13.61 μm
 D [4, 3] = 20.13 μm

Concentration = 0.034 %
 d (0.1) = 4.21 μm
 Span = 2.52

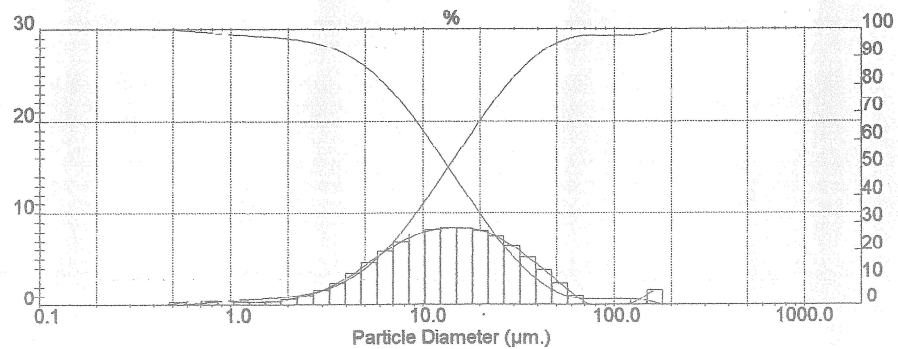
Obscuration = 27.05 %
 d (0.9) = 38.57 μm

Sauter Mean (D[3,2]) = 7.64 μm Mode = 15.29 μm

Specific Surface Area = 0.7853 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 %
0.20	0.09	0.48	0.09	8.48	7.76	10.27	37.75
0.48	0.31	0.59	0.40	10.27	8.24	12.43	45.99
0.59	0.47	0.71	0.86	12.43	8.45	15.05	54.44
0.71	0.51	0.86	1.38	15.05	8.42	18.21	62.86
0.86	0.47	1.04	1.84	18.21	8.15	22.04	71.01
1.04	0.38	1.26	2.23	22.04	7.55	26.68	78.56
1.26	0.35	1.52	2.57	26.68	6.52	32.29	85.09
1.52	0.43	1.84	3.01	32.29	5.23	39.08	90.32
1.84	0.69	2.23	3.70	39.08	3.87	47.30	94.19
2.23	1.12	2.70	4.82	47.30	2.45	57.25	96.64
2.70	1.68	3.27	6.49	57.25	1.07	69.30	97.71
3.27	2.47	3.95	8.96	69.30	0.03	83.87	97.74
3.95	3.51	4.79	12.46	83.87	0.00	101.52	97.74
4.79	4.68	5.79	17.14	101.52	0.01	122.87	97.74
5.79	5.90	7.01	23.04	122.87	0.59	148.72	98.33
7.01	6.95	8.48	29.99	148.72	1.67	180.00	100.00

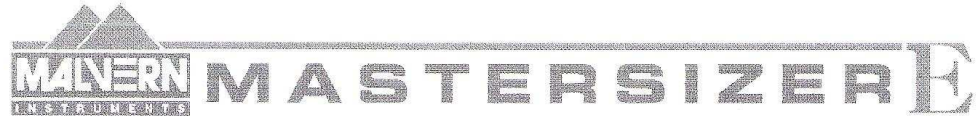


Malvern Instruments Ltd.
 Malvern, U.K.

MasterSizer E Ver. 1.2b
 Serial No. 7387

01 Feb 07 11:47

Ek 2. 1 nolu deneyde NZL-1 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Siklon)



Version 1.2b

Thu, Feb 01, 2007 11:57

22.1.07 siklon :Run Number 12

Sample File Name: RUNAL , Record: 99 Source: Analysed
 Measured on: Thu, Feb 01, 2007 11:57 Last saved on: Thu, Feb 01, 2007 11:57

Presentation: 2OHD
 Polydisperse model

Volume Result

Focus = 100 mm.

Residual = 0.356 %

Concentration = 0.025 %

Obscuration = 31.14 %

d (0.5) = 7.37 µm

d (0.1) = 2.85 µm

d (0.9) = 18.07 µm

D [4, 3] = 9.33 µm

Span = 2.07

Sauter Mean (D[3,2]) = 4.99 µm

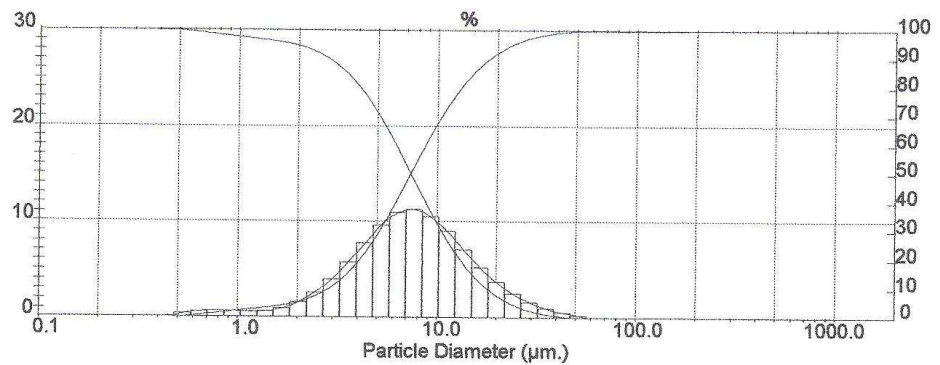
Mode = 7.48 µm

Specific Surface Area = 1.2030 sq. m. / gm

Density = 1.00 gm. / c.c.

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.20	0.11	0.48	0.11
0.48	0.41	0.59	0.53
0.59	0.62	0.71	1.15
0.71	0.70	0.86	1.85
0.86	0.67	1.04	2.52
1.04	0.61	1.26	3.13
1.26	0.66	1.52	3.79
1.52	0.96	1.84	4.75
1.84	1.62	2.23	6.37
2.23	2.67	2.70	9.04
2.70	3.99	3.27	13.03
3.27	5.73	3.95	18.76
3.95	7.75	4.79	26.50
4.79	9.61	5.79	36.11
5.79	10.94	7.01	47.05
7.01	11.25	8.48	58.30

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
8.48	10.53	10.27	68.83
10.27	8.98	12.43	77.81
12.43	7.10	15.05	84.91
15.05	5.26	18.21	90.17
18.21	3.75	22.04	93.92
22.04	2.57	26.68	96.49
26.68	1.65	32.29	98.14
32.29	1.01	39.08	99.15
39.08	0.59	47.30	99.74
47.30	0.26	57.25	100.00
57.25	0.00	69.30	100.00
69.30	0.00	83.87	100.00
83.87	0.00	101.52	100.00
101.52	0.00	122.87	100.00
122.87	0.00	148.72	100.00
148.72	0.00	180.00	100.00

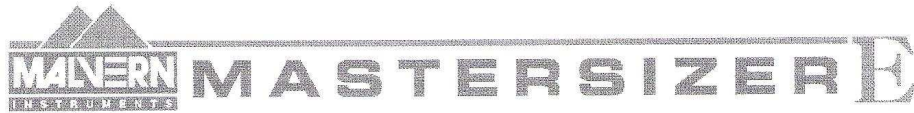


Malvern Instruments Ltd.
 Malvern, U.K.

MasterSizer E Ver. 1.2b
 Serial No. 7387

01 Feb 07 11:57

Ek 3. 3 nolu deneyde NZL-1 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Toz Toplama Kabı)



Version 1.2b

Thu, Feb 01, 2007 12:16

25.1.07 toz kabı :Run Number 17

Sample File Name: RUNAL . Record: 104
 Measured on: Thu, Feb 01, 2007 12:12 Last saved on: Thu, Feb 01, 2007 12:13

Source: Analysed

Presentation: 2OHD
 Polydisperse model

Volume Result

Focus = 100 mm.

Residual = 1.057 %

Concentration = 0.030 %

Obscuration = 18.72 %

d (0.5) = 18.53 µm

d (0.1) = 5.53 µm

d (0.9) = 60.11 µm

D [4, 3] = 29.31 µm

Span = 2.95

Mode = 19.93 µm

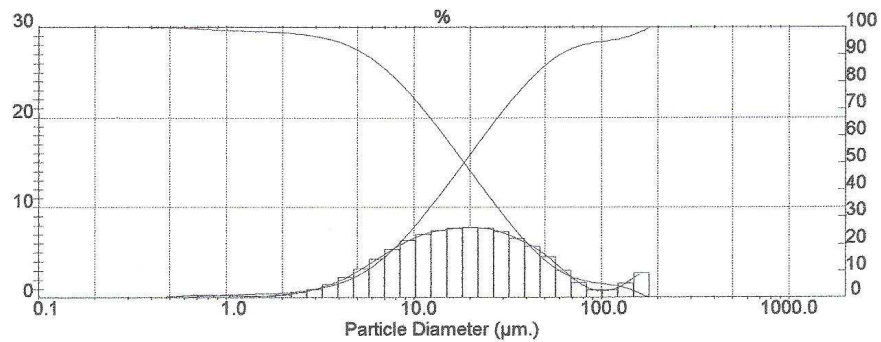
Sauter Mean (D[3,2]) = 10.27 µm

Specific Surface Area = 0.5844 sq. m. / gm

Density = 1.00 gm. / c.c.

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.20	0.06	0.48	0.06
0.48	0.20	0.59	0.25
0.59	0.29	0.71	0.55
0.71	0.32	0.86	0.86
0.86	0.28	1.04	1.15
1.04	0.23	1.26	1.38
1.26	0.20	1.52	1.58
1.52	0.25	1.84	1.83
1.84	0.39	2.23	2.22
2.23	0.64	2.70	2.86
2.70	0.99	3.27	3.85
3.27	1.52	3.95	5.37
3.95	2.28	4.79	7.64
4.79	3.23	5.79	10.87
5.79	4.33	7.01	15.20
7.01	5.41	8.48	20.61

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
8.48	6.37	10.27	26.98
10.27	7.07	12.43	34.05
12.43	7.51	15.05	41.56
15.05	7.74	18.21	49.29
18.21	7.83	22.04	57.12
22.04	7.73	26.68	64.85
26.68	7.32	32.29	72.17
32.29	6.62	39.08	78.79
39.08	5.74	47.30	84.53
47.30	4.54	57.25	89.07
57.25	3.06	69.30	92.13
69.30	1.69	83.87	93.82
83.87	0.90	101.52	94.72
101.52	0.90	122.87	95.62
122.87	1.63	148.72	97.25
148.72	2.75	180.00	100.00

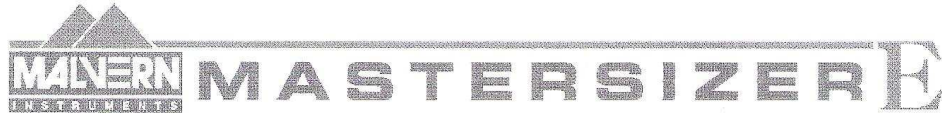


Malvern Instruments Ltd.
 Malvern, U.K.

MasterSizer E Ver. 1.2b
 Serial No. 7387

01 Feb 07 12:16

Ek 4. 3 nolu deneyde NZL-1 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Siklon)



Version 1.2b

Thu, Feb 01, 2007 12:04

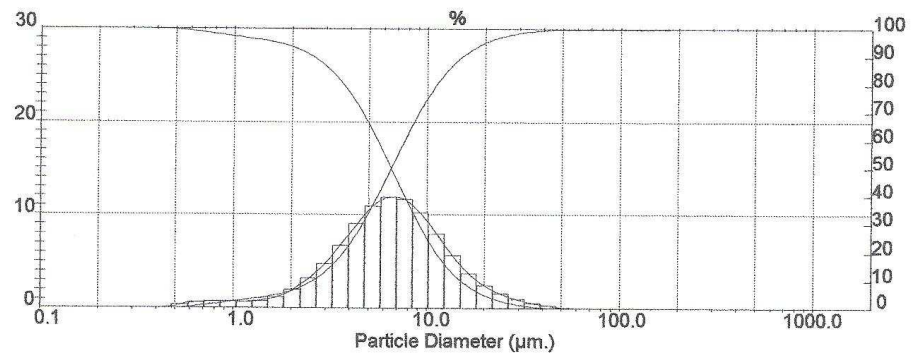
25.1.07 siklon :Run Number 13

Sample File Name: RUNAL , Record: 100 Source: Analysed
 Measured on: Thu, Feb 01, 2007 12:03 Last saved on: Thu, Feb 01, 2007 12:03

Presentation: 20HD Polydisperse model Volume Result Focus = 100 mm.
 Residual = 0.453 % Concentration = 0.019 % Obscuration = 26.99 %
 d (0.5) = 6.54 µm d (0.1) = 2.58 µm d (0.9) = 15.08 µm
 D [4, 3] = 8.09 µm Span = 1.91 Mode = 6.81 µm
 Sauter Mean (D[3,2]) = 4.52 µm Density = 1.00 gm. / c.c.
 Specific Surface Area = 1.3280 sq. m. / gm

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.20	0.11	0.48	0.11
0.48	0.44	0.59	0.55
0.59	0.68	0.71	1.23
0.71	0.78	0.86	2.01
0.86	0.78	1.04	2.79
1.04	0.76	1.26	3.55
1.26	0.85	1.52	4.40
1.52	1.23	1.84	5.63
1.84	2.02	2.23	7.65
2.23	3.25	2.70	10.90
2.70	4.80	3.27	15.70
3.27	6.80	3.95	22.51
3.95	9.03	4.79	31.54
4.79	10.91	5.79	42.45
5.79	11.94	7.01	54.39
7.01	11.65	8.48	66.04

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
8.48	10.19	10.27	76.23
10.27	7.99	12.43	84.22
12.43	5.72	15.05	89.95
15.05	3.82	18.21	93.77
18.21	2.50	22.04	96.26
22.04	1.63	26.68	97.89
26.68	1.04	32.29	98.93
32.29	0.63	39.08	99.56
39.08	0.33	47.30	99.89
47.30	0.11	57.25	100.00
57.25	0.00	69.30	100.00
69.30	0.00	83.87	100.00
83.87	0.00	101.52	100.00
101.52	0.00	122.87	100.00
122.87	0.00	148.72	100.00
148.72	0.00	180.00	100.00



Malvern Instruments Ltd.
 Malvern, U.K.

MasterSizer E Ver. 1.2b
 Serial No. 7387

01 Feb 07 12:04

Ek 5. 4 nolu deneyde NZL-2 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Toz Toplama Kabı)



Version 1.2b

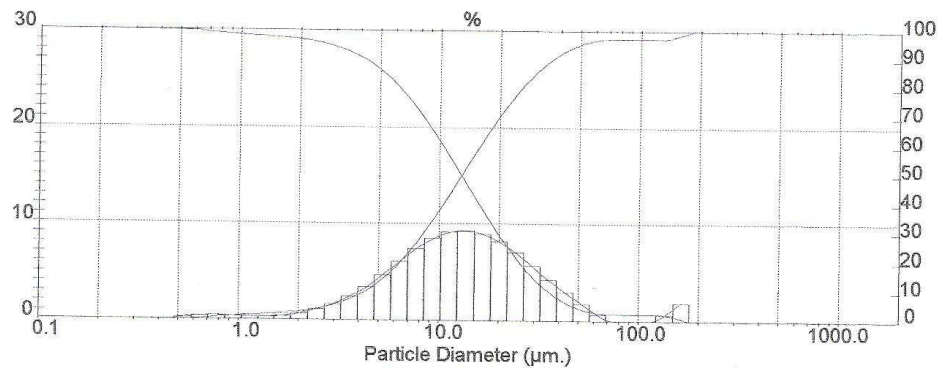
Fri, Apr 20, 2007 10:13

01.03.07 tk :Run Number 11

Sample File Name: RUNAL , Record: 110 Source: Analysed
 Measured on: Fri, Apr 20, 2007 10:12 Last saved on: Fri, Apr 20, 2007 10:12

Presentation: 20HD Polydisperse model Volume Result Focus = 100 mm.
 Residual = 0.558 % Concentration = 0.027 % Obscuration = 22.13 %
 d (0.5) = 12.89 μm d (0.1) = 4.23 μm d (0.9) = 35.97 μm
 D [4, 3] = 19.57 μm Span = 2.46
 Sauter Mean (D[3,2]) = 7.63 μm Mode = 13.06 μm
 Specific Surface Area = 0.7861 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 %
0.20	0.08	0.48	0.08	8.48	8.48	10.27	39.10
0.48	0.29	0.59	0.37	10.27	9.13	12.43	48.23
0.59	0.42	0.71	0.79	12.43	9.29	15.05	57.52
0.71	0.46	0.86	1.25	15.05	8.95	18.21	66.47
0.86	0.41	1.04	1.66	18.21	8.18	22.04	74.65
1.04	0.35	1.26	2.01	22.04	7.06	26.68	81.71
1.26	0.33	1.52	2.34	26.68	5.69	32.29	87.40
1.52	0.45	1.84	2.79	32.29	4.31	39.08	91.72
1.84	0.73	2.23	3.52	39.08	3.05	47.30	94.77
2.23	1.17	2.70	4.70	47.30	1.85	57.25	96.61
2.70	1.71	3.27	6.41	57.25	0.72	69.30	97.34
3.27	2.48	3.95	8.88	69.30	0.00	83.87	97.34
3.95	3.50	4.79	12.38	83.87	0.00	101.52	97.34
4.79	4.73	5.79	17.11	101.52	0.01	122.87	97.35
5.79	6.11	7.01	23.22	122.87	0.74	148.72	98.09
7.01	7.40	8.48	30.62	148.72	1.91	180.00	100.00

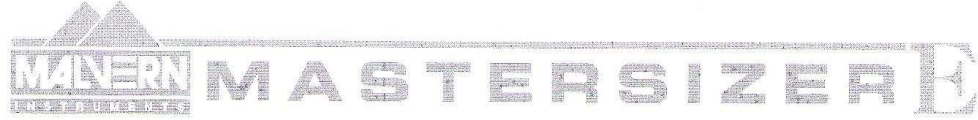


Malvern Instruments Ltd.
 Malvern, U.K.

MasterSizer E Ver. 1.2b
 Serial No. 7387

20 Apr 07 10:13

Ek 6. 4 nolu deneyde NZL-2 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Siklon)



Version 1.2b

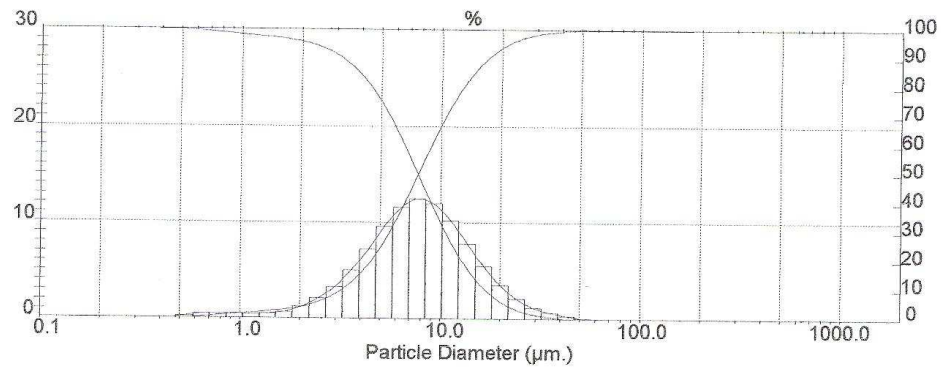
Fri, Apr 20, 2007 10:07

01.03.07 siklon :Run Number 5

Sample File Name: RUNAL , Record: 107 Source: Analysed
 Measured on: Fri, Apr 20, 2007 9:58 Last saved on: Fri, Apr 20, 2007 9:58

Presentation: 2OHD Polydisperse model Volume Result Focus = 100 mm.
 Residual = 0.384 % Concentration = 0.017 % Obscuration = 20.13 %
 d (0.5) = 7.71 μ m d (0.1) = 3.21 μ m d (0.9) = 16.95 μ m
 D [4, 3] = 9.26 μ m Span = 1.78
 Sauter Mean (D[3,2]) = 5.44 μ m Mode = 7.88 μ m
 Specific Surface Area = 1.1027 sq. m. / gm Density = 1.00 gm. / c.c.

Size (Lo) μ m	Result In %	Size (Hi) μ m	Result Below %	Size (Lo) μ m	Result In %	Size (Hi) μ m	Result Below %
0.20	0.08	0.48	0.08	8.48	11.98	10.27	68.24
0.48	0.30	0.59	0.38	10.27	10.22	12.43	78.46
0.59	0.46	0.71	0.84	12.43	7.86	15.05	86.33
0.71	0.53	0.86	1.37	15.05	5.48	18.21	91.81
0.86	0.52	1.04	1.90	18.21	3.55	22.04	95.36
1.04	0.50	1.26	2.39	22.04	2.16	26.68	97.52
1.26	0.54	1.52	2.93	26.68	1.25	32.29	98.77
1.52	0.76	1.84	3.69	32.29	0.71	39.08	99.48
1.84	1.26	2.23	4.95	39.08	0.39	47.30	99.87
2.23	2.12	2.70	7.07	47.30	0.13	57.25	100.00
2.70	3.29	3.27	10.37	57.25	0.00	69.30	100.00
3.27	5.00	3.95	15.37	69.30	0.00	83.87	100.00
3.95	7.24	4.79	22.60	83.87	0.00	101.52	100.00
4.79	9.59	5.79	32.19	101.52	0.00	122.87	100.00
5.79	11.60	7.01	43.79	122.87	0.00	148.72	100.00
7.01	12.48	8.48	56.26	148.72	0.00	180.00	100.00

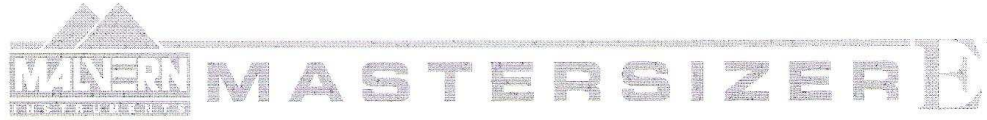


Malvern Instruments Ltd.
 Malvern, U.K.

MasterSizer E Ver. 1.2b
 Serial No. 7387

20 Apr 07 10:07

Ek 7. 5 nolu deneyde NZL-3 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Toz Toplama Kabı)



Version 1.2b

Fri, Apr 20, 2007 10:02

10.04.07 tk :Run Number 7

Sample File Name: RUNAL , Record: 108 Source: Analysed
 Measured on: Fri, Apr 20, 2007 10:01 Last saved on: Fri, Apr 20, 2007 10:01

Presentation: 2OHD
 Polydisperse model

Volume Result

Focus = 100 mm.

Residual = 0.590 %

Concentration = 0.019 %

Obscuration = 16.90 %

d (0.5) = 13.11 µm

d (0.1) = 4.05 µm

d (0.9) = 39.60 µm

D [4, 3] = 20.49 µm

Span = 2.71

Mode = 12.52 µm

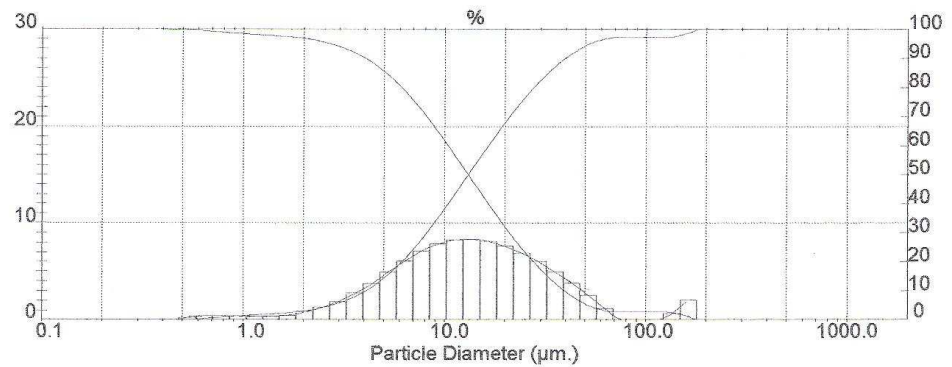
Sauter Mean (D[3,2]) = 7.61 µm

Specific Surface Area = 0.7886 sq. m. / gm

Density = 1.00 gm. / c.c.

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.20	0.08	0.48	0.08
0.48	0.27	0.59	0.35
0.59	0.41	0.71	0.76
0.71	0.44	0.86	1.20
0.86	0.41	1.04	1.61
1.04	0.35	1.26	1.96
1.26	0.36	1.52	2.32
1.52	0.50	1.84	2.82
1.84	0.82	2.23	3.64
2.23	1.31	2.70	4.96
2.70	1.91	3.27	6.87
3.27	2.72	3.95	9.59
3.95	3.75	4.79	13.35
4.79	4.91	5.79	18.25
5.79	6.10	7.01	24.35
7.01	7.12	8.48	31.48

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
8.48	7.89	10.27	39.37
10.27	8.30	12.43	47.67
12.43	8.37	15.05	56.04
15.05	8.12	18.21	64.16
18.21	7.64	22.04	71.80
22.04	6.94	26.68	78.74
26.68	6.01	32.29	84.74
32.29	4.95	39.08	89.70
39.08	3.82	47.30	93.52
47.30	2.53	57.25	96.05
57.25	1.17	69.30	97.21
69.30	0.07	83.87	97.28
83.87	0.00	101.52	97.28
101.52	0.01	122.87	97.29
122.87	0.69	148.72	97.98
148.72	2.03	180.00	100.00



Malvern Instruments Ltd.
 Malvern, U.K.

MasterSizer E Ver. 1.2b
 Serial No. 7387

20 Apr 07 10:02

Ek 8. 5 nolu deneyde NZL-3 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Siklon)



Version 1.2b

Fri, Apr 20, 2007 10:05

10.04.07 siklon :Run Number 8

Sample File Name: RUNAL , Record: 109 Source: Analysed
 Measured on: Fri, Apr 20, 2007 10:04 Last saved on: Fri, Apr 20, 2007 10:04

Presentation: 2OHD
 Polydisperse model

Volume Result

Focus = 100 mm.

Residual = 0.371 %

Concentration = 0.024 %

Obscuration = 27.79 %

d (0.5) = 7.77 µm

d (0.1) = 3.28 µm

d (0.9) = 16.67 µm

D [4, 3] = 9.23 µm

Span = 1.72

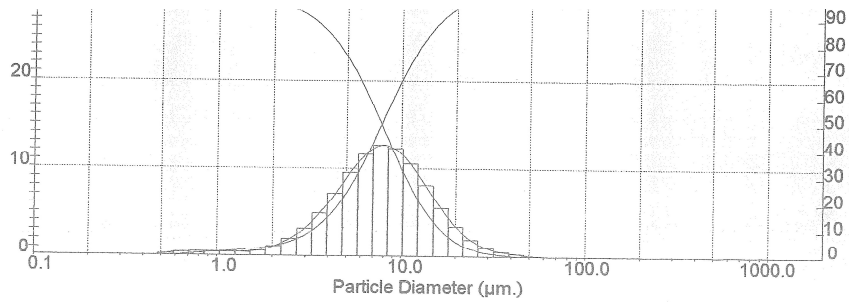
Sauter Mean (D[3,2]) = 5.50 µm

Mode = 8.00 µm

Specific Surface Area = 1.0916 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 %
0.20	0.08	0.48	0.08	8.48	12.26	10.27	68.09
0.48	0.30	0.59	0.38	10.27	10.54	12.43	78.64
0.59	0.46	0.71	0.84	12.43	8.10	15.05	86.73
0.71	0.52	0.86	1.36	15.05	5.55	18.21	92.28
0.86	0.51	1.04	1.87	18.21	3.47	22.04	95.76
1.04	0.47	1.26	2.33	22.04	2.01	26.68	97.76
1.26	0.50	1.52	2.83	26.68	1.10	32.29	98.86
1.52	0.70	1.84	3.53	32.29	0.62	39.08	99.49
1.84	1.19	2.23	4.72	39.08	0.36	47.30	99.85
2.23	2.03	2.70	6.75	47.30	0.15	57.25	100.00
2.70	3.20	3.27	9.95	57.25	0.00	69.30	100.00
3.27	4.92	3.95	14.88	69.30	0.00	83.87	100.00
3.95	7.17	4.79	22.04	83.87	0.00	101.52	100.00
4.79	9.55	5.79	31.59	101.52	0.00	122.87	100.00
5.79	11.62	7.01	43.21	122.87	0.00	148.72	100.00
7.01	12.63	8.48	55.83	148.72	0.00	180.00	100.00



Malvern Instruments Ltd.
 Malvern, U.K.

MasterSizer E Ver. 1.2b
 Serial No. 7387

20 Apr 07 10:05

Ek 9. 6 nolu deneyde NZL-4 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Toz Toplama Kabı)



Version 1.2b

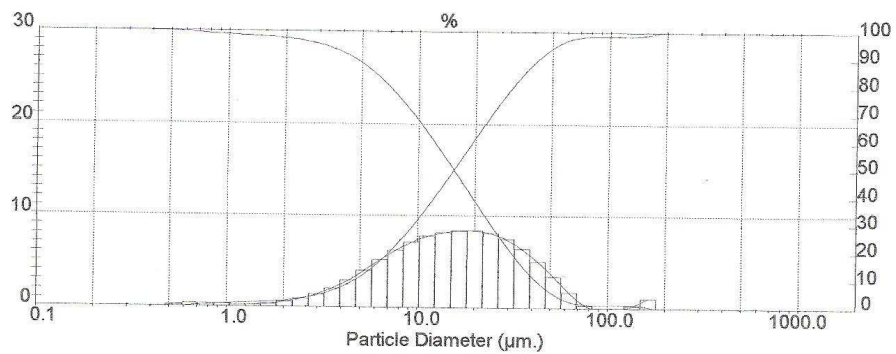
Fri, Apr 20, 2007 10:16

12.04.07 tk :Run Number 14

Sample File Name: RUNAL , Record: 112 Source: Analysed
 Measured on: Fri, Apr 20, 2007 10:15 Last saved on: Fri, Apr 20, 2007 10:16

Presentation: 20HD Polydisperse model Volume Result Focus = 100 mm.
 Residual = 0.643 % Concentration = 0.021 % Obscuration = 15.72 %
 d (0.5) = 15.40 μm d (0.1) = 4.68 μm d (0.9) = 42.09 μm
 D [4, 3] = 21.21 μm Span = 2.43 Mode = 18.07 μm
 Specific Surface Area = 0.6890 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 %
0.20	0.06	0.48	0.06	8.48	7.13	10.27	33.00
0.48	0.23	0.59	0.29	10.27	7.79	12.43	40.78
0.59	0.34	0.71	0.62	12.43	8.21	15.05	48.99
0.71	0.37	0.86	0.99	15.05	8.42	18.21	57.41
0.86	0.34	1.04	1.33	18.21	8.42	22.04	65.83
1.04	0.29	1.26	1.61	22.04	8.15	26.68	73.98
1.26	0.28	1.52	1.89	26.68	7.46	32.29	81.44
1.52	0.38	1.84	2.27	32.29	6.41	39.08	87.85
1.84	0.61	2.23	2.88	39.08	5.07	47.30	92.92
2.23	0.98	2.70	3.87	47.30	3.47	57.25	96.39
2.70	1.45	3.27	5.32	57.25	1.76	69.30	98.15
3.27	2.12	3.95	7.43	69.30	0.39	83.87	98.53
3.95	3.00	4.79	10.43	83.87	0.00	101.52	98.54
4.79	4.03	5.79	14.47	101.52	0.00	122.87	98.54
5.79	5.17	7.01	19.64	122.87	0.33	148.72	98.87
7.01	6.23	8.48	25.86	148.72	1.13	180.00	100.00



Malvern Instruments Ltd.
 Malvern, U.K.

MasterSizer E Ver. 1.2b
 Serial No. 7387

20 Apr 07 10:16

Ek 10. 6 nolu deneyde NZL-4 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Siklon)



Version 1.2b

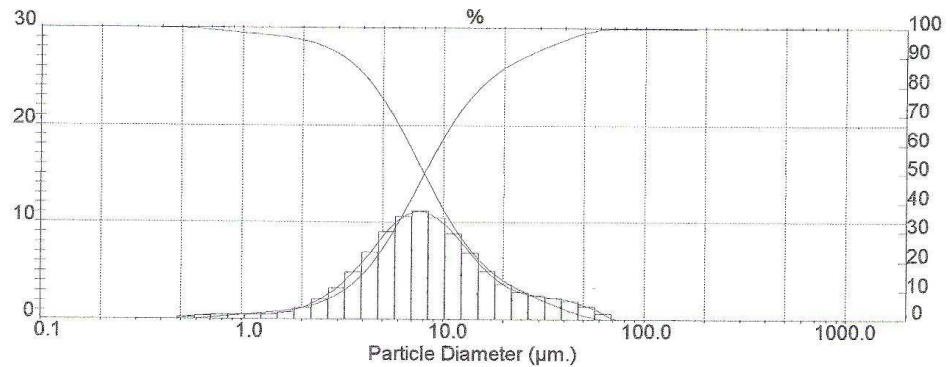
Fri, Apr 20, 2007 10:19

12.04.07 siklon :Run Number 15

Sample File Name: RUNAL , Record: 113 Source: Analysed
 Measured on: Fri, Apr 20, 2007 10:18 Last saved on: Fri, Apr 20, 2007 10:19

Presentation: 2OHD Polydisperse model Volume Result Focus = 100 mm.
 Residual = 0.351 % Concentration = 0.015 % Obscuration = 17.57 %
 d (0.5) = 8.04 µm d (0.1) = 3.20 µm d (0.9) = 24.92 µm
 D [4, 3] = 11.55 µm Span = 2.70
 Sauter Mean (D[3,2]) = 5.66 µm Mode = 7.64 µm
 Specific Surface Area = 1.0603 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 %
0.20	0.07	0.48	0.07	8.48	10.48	10.27	63.60
0.48	0.28	0.59	0.35	10.27	8.86	12.43	72.46
0.59	0.44	0.71	0.80	12.43	6.87	15.05	79.33
0.71	0.52	0.86	1.31	15.05	5.03	18.21	84.36
0.86	0.52	1.04	1.84	18.21	3.70	22.04	88.06
1.04	0.51	1.26	2.35	22.04	2.92	26.68	90.98
1.26	0.57	1.52	2.93	26.68	2.52	32.29	93.50
1.52	0.80	1.84	3.73	32.29	2.30	39.08	95.80
1.84	1.31	2.23	5.04	39.08	2.01	47.30	97.82
2.23	2.15	2.70	7.18	47.30	1.46	57.25	99.28
2.70	3.29	3.27	10.47	57.25	0.70	69.30	99.98
3.27	4.91	3.95	15.38	69.30	0.02	83.87	100.00
3.95	6.96	4.79	22.35	83.87	0.00	101.52	100.00
4.79	9.02	5.79	31.36	101.52	0.00	122.87	100.00
5.79	10.62	7.01	41.98	122.87	0.00	148.72	100.00
7.01	11.14	8.48	53.12	148.72	0.00	180.00	100.00



Malvern Instruments Ltd.
 Malvern, U.K.

MasterSizer E Ver. 1.2b
 Serial No. 7387

20 Apr 07 10:19

Ek 11. 7 nolu deneyde NZL-5 ile Üretilmiş Tozların Analiz Raporu (Toz Toplama Kabı)



Version 1.2b

Fri, Apr 20, 2007 10:24

13.04.07 tk :Run Number 19

Source: Analysed

Measured on: Fri, Apr 20, 2007 10:23

Presentation: 2OHD
Polydisperse model

Volume Result

Focus = 100 mm.

Residual = 0.667 %

Concentration = 0.028 %

Obscuration = 21.41 %

d (0.5) = 15.26 µm

d (0.1) = 4.38 µm

d (0.9) = 49.97 µm

D [4, 3] = 24.81 µm

Span = 2.99

Mode = 15.33 µm

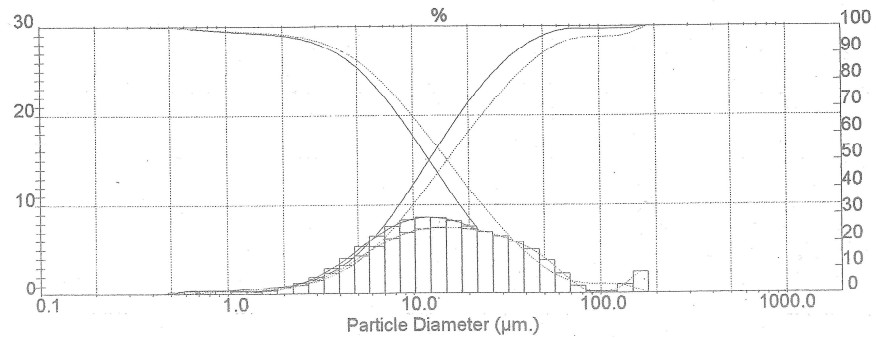
Sauter Mean (D[3,2]) = 8.38 µm

Density = 1.00 gm. / c.c.

Specific Surface Area = 0.7162 sq. m. / gm

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.20	0.07	0.48	0.07
0.48	0.26	0.59	0.33
0.59	0.38	0.71	0.71
0.71	0.42	0.86	1.13
0.86	0.38	1.04	1.51
1.04	0.32	1.26	1.83
1.26	0.30	1.52	2.13
1.52	0.41	1.84	2.54
1.84	0.68	2.23	3.22
2.23	1.11	2.70	4.33
2.70	1.65	3.27	5.97
3.27	2.38	3.95	8.35
3.95	3.31	4.79	11.66
4.79	4.33	5.79	15.99
5.79	5.38	7.01	21.36
7.01	6.26	8.48	27.63

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
8.48	6.95	10.27	34.58
10.27	7.36	12.43	41.93
12.43	7.53	15.05	49.46
15.05	7.50	18.21	56.96
18.21	7.34	22.04	64.30
22.04	7.04	26.68	71.34
26.68	6.54	32.29	77.88
32.29	5.87	39.08	83.75
39.08	5.01	47.30	88.76
47.30	3.81	57.25	92.57
57.25	2.33	69.30	94.91
69.30	0.96	83.87	95.86
83.87	0.21	101.52	96.07
101.52	0.29	122.87	96.36
122.87	1.16	148.72	97.52
148.72	2.48	180.00	100.00

Malvern Instruments Ltd.
Malvern, U.K.MasterSizer E Ver. 1.2b
Serial No. 7387

20 Apr 07 10:24