



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ÇİFT YARIKLI NOZUL TASARIMI ve GAZ
ATOMİZASYON METODU İLE METAL
TOZU ÜRETİMİ**

Musa VURAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

**MAYIS-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Musa VURAL
30.05.2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ ÇİFT YARIKLI NOZUL TASARIMI ve GAZ ATOMİZASYON METODU İLE METAL TOZU ÜRETİMİ

Musa VURAL

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hakan Burak KARADAĞ

2023, 79 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Hakan Burak KARADAĞ
Doç. Dr. Hakan GÖKMEŞE
Dr. Öğr. Üyesi Onur ALTUNTAŞ

Bu çalışmada, gaz atomizasyon metodu ile AA1070 (Etial-7) kalite saf alüminyum metali atomize edilmiştir. Gaz atomizasyon verimliliğini artırmak ve daha dar bir toz dağılımını gerçekleştirmek için hem sonik hem de süper sonik bölgeye sahip bir çift yarıklı nozul tasarlanmıştır. Bilindiği üzere nozul geometrisi toz boyutu ve dağılımını birinci dereceden etkilemektedir.

Bu yapılan çalışmada özgün olarak tasarladığımız çift yarıklı nozulun üç ana problemi çözebileceği düşünülmüştür. Bunlardan ilki, sonik bölgeden düşük basınç ve hızda çıkan gazın sıvı metal viskozitesini kontrol ederek atomizasyon bölgesine iletilmesine katkıda bulunmak ve daha küçük küresel tanelerin oluşumuna yardımcı olmak. İkincisi, yakından eşlemeli sistemlerin en büyük sorunlarından olan metal akış borusu ucundaki katılaşma sorununu ve pozitif basınç oluşumunu ortadan kaldırmak. Üçüncüsü ise, süpersonik nozul geometrisiyle de kapalı geçiş bölgesi de denilen gaz genişleme bölgesinin basıncının sabit tutularak kapanmasını önlemektir.

Gaz atomizasyon sistemine entegre edilen çift yarıklı nozul ile üretim parametrelerini (gaz basıncı, ergitme sıcaklığı, akış borusu çapı vb.) optimize edilerek katma değeri yüksek alüminyum metal tozları üretilmiştir.

Çalışma sonunda optimum verimlilik için 35 bar basınçta argon gazı, 830 °C ergitme sıcaklığı ve 3 mm akış borusu kullanılarak yapılan çalışmada üretilen tozların ortalama tane büyüklüğü 25,4 mikron ve toz şeklinin ise 97% oranında küresel olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum tozu, Çift yarıklı nozul, Gaz atomizasyonu, Yakından eşlemeli sistem.

ABSTRACT

MS THESIS

METAL POWDER PRODUCTION BY GAS ATOMIZATION METHOD and DOUBLE SLIT NOZZLE DESIGN

Musa VURAL

**NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY INSTITUTE OF NATURAL SCIENCES
DEPARTMENT OF METALLURGICAL MATERIALS ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. Hakan Burak KARADAĞ

2023, 79

Jury

Asst. Prof. Hakan Burak KARADAĞ

Assoc. Prof. Hakan GÖKMEŞE

Asst. Prof. Onur ALTUNTAŞ

In this study, AA1070 (Etial-7) quality pure aluminum metal was atomized by gas atomization method. A double-slit nozzle with both a sonic and a supersonic region has been designed to improve the gas atomization efficiency and realize a narrower dust distribution. As is known, the nozzle geometry affects the first-order dust size and distribution.

In this study, it was thought that the double slit nozzle that we originally designed could solve three main problems. The first of these is to contribute to the transmission of gas from the sonic region to the atomization region at low pressure and speed by controlling the viscosity of the liquid metal and to help the formation of smaller spherical grains. Secondly, to eliminate the solidification problem and the formation of positive pressure at the metal flow pipe end, which is one of the biggest problems of closely matched systems. The third is to prevent the closure of the gas expansion zone, also called the closed transition zone, by keeping the pressure constant with the supersonic nozzle geometry.

With the double slit nozzle integrated into the gas atomization system, we can calculate the production parameters (gas pressure, melting temperature, flow pipe diameter, etc.) by optimizing, aluminum metal powders with high added value have been produced.

At the end of the study, it was determined that the average grain size of the powders produced in the study using argon gas at a pressure of 35 bar, a melting temperature of 830 °C and a 3 mm flow pipe for optimal efficiency was 25,4 microns and the powder shape was spherical by 97%

Keywords: Aluminum powder, Closely matched system, Double slit nozzle, Gas atomization,

TEŞEKKÜR

Tezimin her aşamasında desteklerini ve tecrübelerini benimle paylaŐan ve yol gÖsteren baŐta Doç. Dr. Hakan GÖKMEŞE ve Yrd. Doç. Dr. Hakan Burak KARADAĞ hocalarıma, Eti Alüminyum AŐ. Genel Müdürü Sn. Mehmet ARIKAN Bey'e, Kalite Kontrol ve AR-GE Müdür yardımcısı Sn. Serkan ERTUĐRAL Bey'e ve 3M Laboratuvarı çalıŐanlarına sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalıŐmalarımın her aşamasında desteğini hiç eksik etmeyen araŐtırmalarımında yardımcı olan çok sevgili eŐim Tülay VURAL' a ve çocuklarıma tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

Musa VURAL
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ	v
RESİMLER LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. TOZ METALURJİSİ	2
2.1. Tarihsel Süreçte Toz Metalurjisi.....	4
2.2. Toz Metalurjisinin Kullanılabilirliği.....	5
2.3. Alüminyum Tozları ve Metalurjisi	7
2.4. Alüminyum Toz Özellikleri ve Karakterizasyonu.....	8
2.5. Metal Tozu Üretim Yöntemleri	9
2.5.1. Öğütme.....	10
2.5.2. Elektroliz.....	10
2.5.3. Kimyasal Yöntemler	11
2.5.4. Atomizasyon	12
2.6. Atomizasyon Yöntemleri	13
2.6.1. Döner Disk	14
2.6.2. Döner Elektrot.....	15
2.6.3. Vakum Atomizasyonu	15
2.6.4. Su Atomizasyonu	16
2.6.5. Gaz Atomizasyonu.....	17
2.7. Gaz Atomizasyonu İle Metal Tozu Üretimi	18
2.7.1. Gaz Atomizasyon Sistemleri	18
2.7.2. Gaz Atomizasyon Mekanizmaları	19
2.7.3. Gaz Atomizasyon Üniteleri	21
2.7.4. Nozul Çeşitleri ve Özellikleri	24
2.7.5. Süpersonik Nozulların Toz Karakteristiğine Etkileri	26
2.7.6. Çift Yarıklı Nozul	27
2.7.7. Negatif ve Pozitif Basınç Oluşumları	28
2.7.8. Gaz Geçiş Bölgesinin Gaz Atomizasyonuna Etkisi.....	30
3. KAYNAK ARAŞTIRMASI	32

4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	34
4.1. Malzeme.....	34
4.2. Gaz Atomizasyon Ünitesi	35
4.2.1. Ergitme Fırını.....	37
4.2.2. Çift Yarıklı Nozul	38
4.2.3. Atomizasyon Kulesi.....	39
4.2.4. Kule-Siklon Toz Toplama	41
4.2.5. Atomizasyon Gazı.....	43
4.3. Saf Alüminyum Tozu Üretim Adımları.....	45
4.4. Tane Büyüklüğü Analizi	46
4.5. XRD Analiz Çalışmaları	47
4.6. SEM Analiz Çalışmaları	48
4.7. BET Analiz Çalışmaları.....	48
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	49
5.1. Tane Büyüklüğü Analiz Sonuçları.....	50
5.2. XRD Analiz Sonuçları	52
5.3. SEM Analiz Sonuçları	54
5.4. BET Analiz sonuçları.....	57
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	59
6.1 Sonuçlar	59
6.2 Öneriler	60
7. KAYNAKLAR	62
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

AA1070
SiC
gr/cm³
°C
m²/gr
pH
mJ
Ar
Na
Fe
Ti
Pb
Mg
Al
Si
Ti
l/dk
µm
MPa

Açıklama

Saf Alüminyum
Silisyum Karbür
Gram/santimetre küp
Derece
Metrekare/gr
Potansiyel hidrojen
Milijoul
Argon
Sodyum
Demir
Titanyum
Kurşun
Mağnezyum
Alüminyum
Silisyum
Titanyum
Litre/dakika
Mikrometre
MegaPascal

Kısaltmalar

T/M
XRD
SEM
BET
AISI

Açıklama

Toz Metalurjisi
X-ışını kırınımı
Taramalı Elektron Mikroskobu
Yüzey Alanı Ölçümü
Amerikan Çelik Standardı

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 4.1. AA 1070 (Etial-7) saf alüminyum kimyasal kompozisyonu	35
Çizelge 4.2. AA 1070 (Etial-7) saf alüminyum fiziksel özellikleri	35
Çizelge 5.1. Deneysel çalışmalar	50
Çizelge 5.2. Tane boyutu cihaz verileri	52



RESİMLER LİSTESİ

Resim 4.1. Gaz atomizasyon ünitesi	36
Resim 4.2. Ergitme fırını	37
Resim 4.3. Grafit pota ve akış borusu.....	38
Resim 4.4. a) Çift yarıkli nozul kesiti, b) İmal edilmiş çift yarıkli nozul resmi.....	39
Resim 4.5. Atomizasyon kulesi, siklonlar ve aspiratör.....	40
Resim 4.6. Atomizasyon kulesi ve siklonlar.....	41
Resim 4.7. Kule toz toplama ünitesi	42
Resim 4.8. Birinci siklon toz toplama ünitesi	42
Resim 4.9. İkinci siklon toz toplama ünitesi.....	43
Resim 4.10. 230 bar iç basınca sahip argon tüpü, bağlantı hortumu ve manometre	44
Resim 4.11. Manometre, hortum ve pnömatik rekor.....	44
Resim 4.12. Malvern tane büyüklüğü analiz cihazı.....	47
Resim 4.13. GNR EXPLORER xrd cihazı	48
Resim 4.14. SEM cihazı	48
Resim 4.15. BET analiz cihazı.....	49
Resim 5.1. Deney :9, SEM görüntüleri.....	54
Resim 5.2. Deney:18, SEM görüntüleri.....	55
Resim 5.3. Deney:27, SEM görüntüleri.....	56

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Metal tozlarından parça üretim safhaları [7]	2
Şekil 2.2. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş parçaların kullanım oranları [11].	4
Şekil 2.3. Toz metalurji prosesi [16].....	5
Şekil 2.4. Hammadde-enerji grafiği [17].	6
Şekil 2.5. Dişli [21].....	7
Şekil 2.6. Kasnak [22].....	7
Şekil 2.7. Aglomerasyon oluşumu [23].	9
Şekil 2.8. Bilyalı değirmen [26].....	10
Şekil 2.9. Elektroliz hücresi [28].	11
Şekil 2.10. Demir tozu üretimi [30].	11
Şekil 2.11. Düşey gaz atomizasyon ünitesi [31]	12
Şekil 2.12. Üretim metotlarına göre toz şekilleri [32]	13
Şekil 2.13. Döner disk atomizasyonu [40].....	14
Şekil 2.14. Döner elektrot sistemi [41].	15
Şekil 2.15. Vakum atomizasyon sistemi [44].	16
Şekil 2.16. Su atomizasyon ünitesi [45].	16
Şekil 2.17. Su atomizasyonunda tane oluşumu [46].....	17
Şekil 2.18. Serbest düşmeli ve yakından eşlemeli sistemler [52].	19
Şekil 2.19. Sıvı metalin parçalanma evreleri [53].	20
Şekil 2.20. Toz oluşum evreleri [54].	21
Şekil 2.21. Yatay Ünite [56].	22
Şekil 2.22. Düşey Ünite [56]	23
Şekil 2.23. Subsonik ve süpersonik nozul geometrileri [50].	24
Şekil 2.24. Subsonik nozul gaz akış bölgesi ve toz oluşumu [50].....	25
Şekil 2.25. Supersonik nozul gaz akış bölgesi ve toz oluşumu [50].....	25
Şekil 2.26. İki farklı nozul geometrisi [59].....	26
Şekil 2.27. Çift yarıklı nozul.....	28
Şekil 2.28. Negatif basınç oluşumu [65].....	29
Şekil 2.29. Pozitif basınç oluşumu [65].....	30
Şekil 2.30. Gaz dolaşım bölgesi [66]	31
Şekil 5.1.Deney:9, tane boyutu analizi sonuçları.....	51
Şekil 5.2.Deney:18, tane boyutu analizi sonuçları.....	51
Şekil 5.3.Deney:27, tane boyutu analizi sonuçları.....	52
Şekil 5.4.Deney:18, XRD görüntüsü	53
Şekil 5.5.Deney:27, XRD görüntüsü	53
Şekil 5.6. Deney 18’de üretilen tozun BET analiz sonucu.	57
Şekil 5.7. Optimum şartlarda (Deney:27) üretilen tozun BET analiz sonucu.	58

1. GİRİŞ

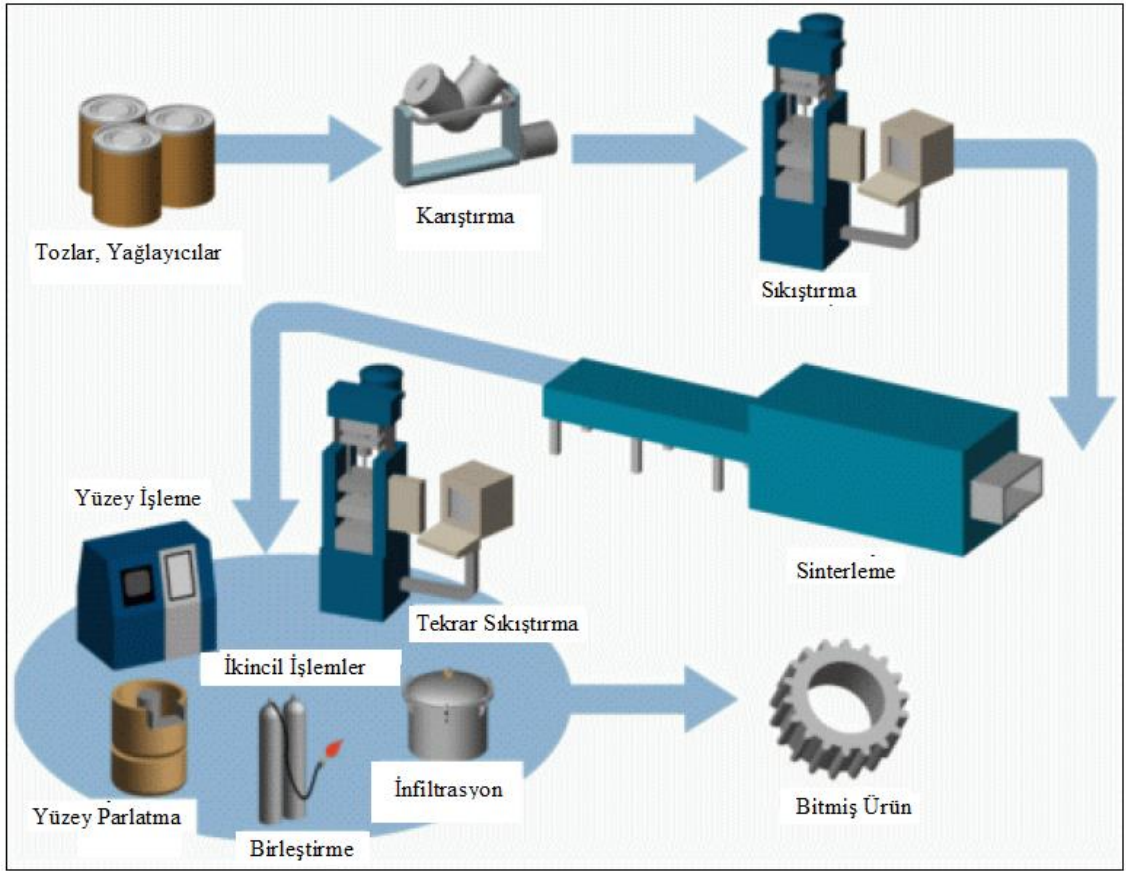
Dünyada çelikten sonra kullanılan en önemli malzeme alüminyum alaşımlarıdır [1]. Teknolojik malzemelerin üretiminde ileri imalat yöntemlerinden biri olan “Toz Metalurjisi (TM)” yöntemi, küçük parça imalatı ve maliyet düşüklüğü açısından önemli bir yöntemdir. Düşük yoğunluk ve korozyon direncinden dolayı alüminyum ve tozları gelişen teknolojiye bağlı olarak yüksek mukavemetli parçaların üretimini mümkün hale getirmiştir. Özellikle alüminyum tozları, savunma sanayi, havacılık ve otomotiv endüstrisinde bolca kullanım alanı bulabilmektedir. Manyetik alandan etkilenmemesinden dolayı çeşitli elektronik devre elemanlarında kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının geliştirilmesi için gaz atomizasyon tekniği ilk kez XVIII. yy ortalarında kullanılmıştır [2]. Özellikle talaşlı imalatta üretilmesi zor ve maliyetli parçaların imalatında daha ekonomik olan metal tozları kullanılır. Sanayi alanındaki ince tozlara olan ihtiyaç gün geçtikçe artmakta ve bununla beraber küresel ince tozların üretimi için özel gereksinimlere ihtiyaç duyulmaktadır [3].

Yüksek üretim hızı, toz kalitesi ve üretim oranından dolayı günümüzde atomizasyon sistemlerinde yakından eşlemeli nozul sistemleri kullanılır. Ergimiş metal atomize olurken atomize tozlar katılaşmalarını kule içinde serbest düşme yaparken tamamlar [4]. Küresel tozlara olan ihtiyacın karşılanması için yüksek basınçlı gaz atomizasyon sistemleri kullanılır. İnce ve küresel aynı zamanda yüksek performans elde etmek için atomizasyon şartlarının kontrol altında tutulması çok önemlidir [5]. Yakından eşlemeli gaz atomizasyon tekniği ile üretilen tozların parçacık boyutu 1µm-1000µm arası değişmektedir [6]. Gaz atomizasyon parametrelerinden ergime sıcaklığı, nozul geometrisi, gaz basıncı ve akış borusu iç çapı parçacık boyut ve dağılımı açısından oldukça önem taşır.

Bu tez çalışmasında yakından eşlemeli ve özgün olarak tasarlanan çift yarıklı bir nozul sistemi kullanılarak AA 1070 (Etial-7) saf alüminyum tozu üretilmiştir. Üretim sürecinde özellikle çift yarıklı nozul performansı, ergimiş metal sıcaklığı ve gaz basıncı, akış borusu iç çapı parametrelerinin toz şekil ve morfolojisine etkileri incelenmiştir.

2. TOZ METALURJİSİ

Toz metalürjisi, günümüzde önem kazanmaya devam eden ileri teknoloji malzemelerin üretimi ile farklı endüstriyel uygulamalarda da kullanılabilen bir imalat yöntemidir. En önemli avantajlarından biri ise yüksek hassasiyetlerle çalışabilmesinin yanında diğer üretim metotlarının ihtiyaç duyduğu yüzey işleme işlemine olan gereksinimi minimuma indirerek küçük boyutlardaki çok sayıda ürünü ekonomik bir şekilde üretilmesinde rol oynar. Şekil 2.1. de metal tozlarından parça üretim safhaları verilmiştir.



Şekil 2.1. Metal tozlarından parça üretim safhaları [7]

Toz metalürjisi yöntemi yaygın olarak tercih edilen endüstriyel alanların (plastik şekillendirme, döküm, ekstrüzyon, kaynak, talaşlı imalat vb.) yanı sıra son yıllarda tercih edilmeye başlanmıştır. Bunların başlıca nedenleri olarak ekonomik nedenler, üretimi yapılan parçaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin üreticinin kontrolünde olması ve kısıtlı bir süre zarfında seri üretimi yapılabilecek (makine aksamaları, yan sanayi ürünleri vb.) belli boyutlardaki ürünlerin üretimindeki rolünün çok büyük olduğudur [8].

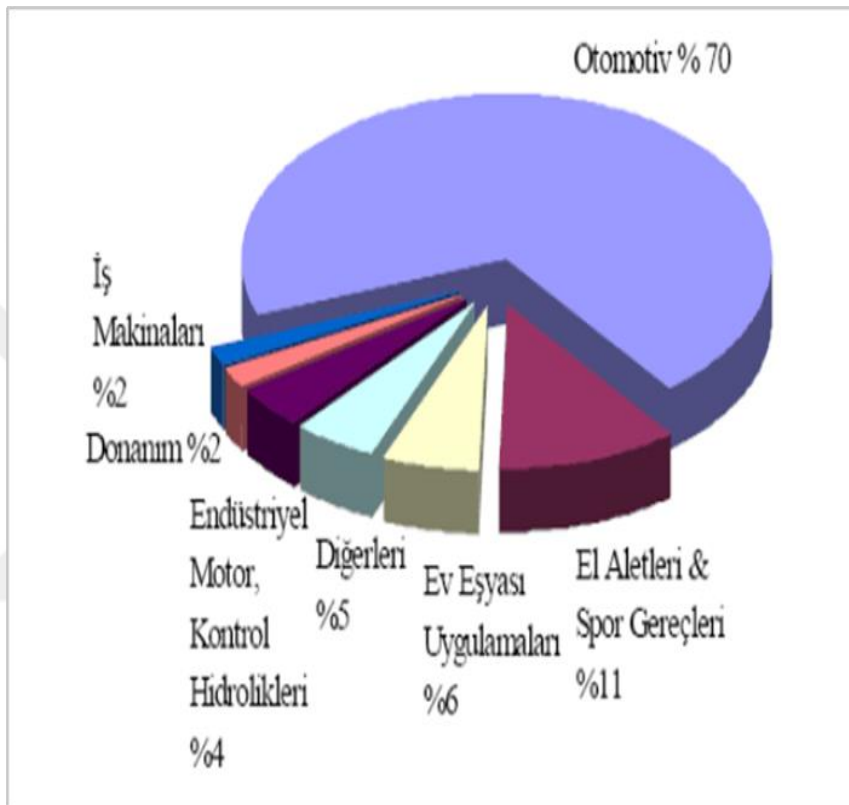
Alışagelmiş üretim yöntemi olan döküm yönteminde, belirli boyutlardaki büyük veyahut hacimli olan ve alaşımlı malzemelerden oluşan (motor blokları, akslar, makine aksam parçaları vb.) ürünlerin üretiminin ekonomik olduğu bilinmektedir fakat seri üretimi yapılacak malzemelerin boyutları ve istenen tolerans aralıkları düştüğünde ve birim zamandaki üretim sayısı arttırıldığında toz metalürjisi (T/M) yöntemi döküm ve talaşlı imalat sektörünün önüne geçerken aynı zamanda da aynı özelliklere ya da daha üstün özelliklere sahip parçaların üretiminde farklı alaşımların kullanılmasına da olanak sağlar [9].

Toz metalürjisi yönteminin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Maliyeti düşüktür.
- Üretim hızı yüksektir.
- Minimum malzeme kaybıyla malzemelerin kullanım oranı yüksektir.
- Yüksek toleranslı ürünlerin üretimi yapılabilir.
- Yüksek hassasiyet ve tolerans değerleriyle düzgün yüzey kalitesi sağlanabilir.
- Ergime dereceleri yüksek olan metallerin imalatı yapılabilir.
- Metal alaşımları ve metal matrisli kompozit parçaların üretimi
- Sadece basit değil karmaşık şekilli parçaların üretimi yapılır.
- Yoğunluğu yüksek parçaların üretimi.
- Malzemedeki gözenek ve geçirgenlik özellikleri üretici kontrolündedir.
- Seçkin özellikte mikro yapıya sahip parçaların üretimi.

Toz metalürjisi (T/M) yöntemi çeşitli şekil, boyut ve paketlenme özelliğindeki metal tozlarını yüksek tolerans ve performanslı ürünlere dönüştürür. Bahsedilen dönüştürme işleminin basamakları; presleme veya şekillendirme ve parçacıkların ısı olarak bağlanması için gerekli olan sinterleme işlemidir. T/M yöntemi diğer üretim yöntemlerine kıyasla daha yüksek malzeme kullanımına ve daha düşük enerji tüketimine sahip otomasyon sistemlerine uygundur. T/M yönteminin getirmiş olduğu bu pozitif özellikler günümüzdeki hammadde ve enerji kaygılarını minimuma indirir. Sonuç olarak T/M yöntemi klasik metal şekillendirme üretim yöntemlerinin yerini almaya başlayarak gelişmeye devam etmektedir [10].

T/M yöntemiyle parça üretimi endüstride oldukça yaygındır. Endüstri uygulamaları, elektrik-elektronik, otomobil, motor parçaları, nükleer santraller, ortopedik elemanlar, jet motor parçaları, havacılık uygulamaları, yüksek sıcaklık elemanları, fren tertibatı, ofis ekipmanları, patlayıcı ve füze yakıtlarında, boya ve türevlerinde kimyasal katalizörlerde ve inşaat sektöründe kullanılmaktadır. T/M parçaların dünya genelindeki kullanım oranları Şekil 2.2. de verilmiştir.



Şekil 2.2. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş parçaların kullanım oranları [11].

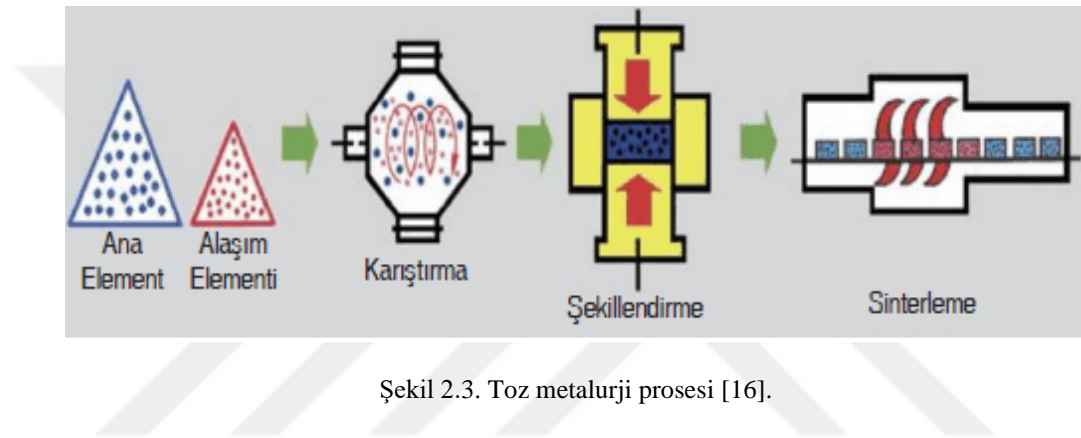
2.1. Tarihsel Süreçte Toz Metalurjisi

Yaklaşık 5000 yıl önce Mısırlılar tarafından metal tozların kullanıldığı bilinmektedir [12]. Daha sonraları ise İnkaların da değerli metal tozları kullanıldığı bilinmektedir. Modern anlamda ilk toz metalürjisi uygulaması XVIII yy. başlarında yapılmış lamba filamentleridir [13]. XVIII yy. ortalarına gelindiğinde ise bakır tozu üretilerek kendinden yağlamalı yataklar, XVIII yy. son çeyreğinde ise demir tozları kullanılarak çeşitli araba parçaları ve uçak parçaları gibi modern parça üretimleri gerçekleştirilmiştir.

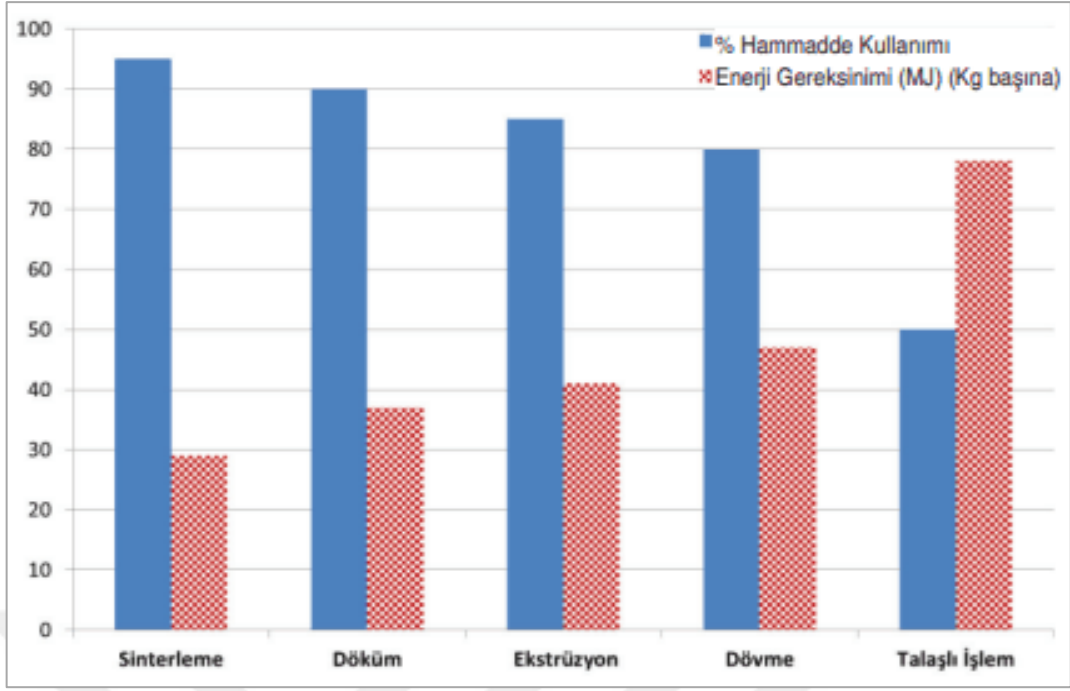
Şimdilerde toz metalürjisi ile üretilen kendinden yağlamalı yataklar, çok gözenekli filtreler geniş bir alan kaplamaktadır [14].

2.2. Toz Metalürjisinin Kullanılabilirliği

Metal veya seramik tozların belli bir kalıp içinde şekillendirilerek ergime sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda ısıtılmasına toz metalürjisi (TM) adı verilir. Tarihin akışı içerisinde tungsten metal tozundan imal edilen ince filamentler toz metalürjisinin miladı sayılabilir [15].



Enerji tüketimi ve hammaddenin ürüne dönüşme verimliliği açısından TM en uygun yöntemdir. Talaşlı imalata göre hammaddeden ürüne dönüşüm yaklaşık 45% daha fazladır. Enerji sarfiyatı açısından aynı miktarda ürün elde edebilmek için talaşlı imalatta kullanılan enerjinin yarısından daha azıyla sonuca gidilebilir [17]. TM'nin bazı avantaj ve dezavantajları şöyle sıralanabilir.



Şekil 2.4. Hammadde-enerji grafiği [17].

Avantajları;

- Hammaddeden ürüne giden süreçte malzeme zıyatı yok denecek kadar düşüktür.
- Geniş kesitli parçalar hassasiyetle imal edilebilir.
- Yoğunluk farklarından dolayı birlikte alaşımlanamayan veya ergitilemeyen malzemeler bu yöntemle üretilebilirler.
- Gözenekli ürünler üretilebilir.
- İmalat usulleri çok hızlıdır.

Dezavantajları;

- Üretilcek parçanın şekli, tozların kalıp içerisinde ilerleyişinin kısıtlı olmasından dolayı sorun yaratabilir.
- Kompleks yapılı parçalarda homojen bir yoğunluktan uzaklaşılabilir.
- Üretimi maliyetlidir.
- Dar kesitli parçalarda tolerans değeri düşüktür.
- Seri üretim yapılmadığı takdirde ekonomik değildir.

2.3. Alüminyum Tozları ve Metalurjisi

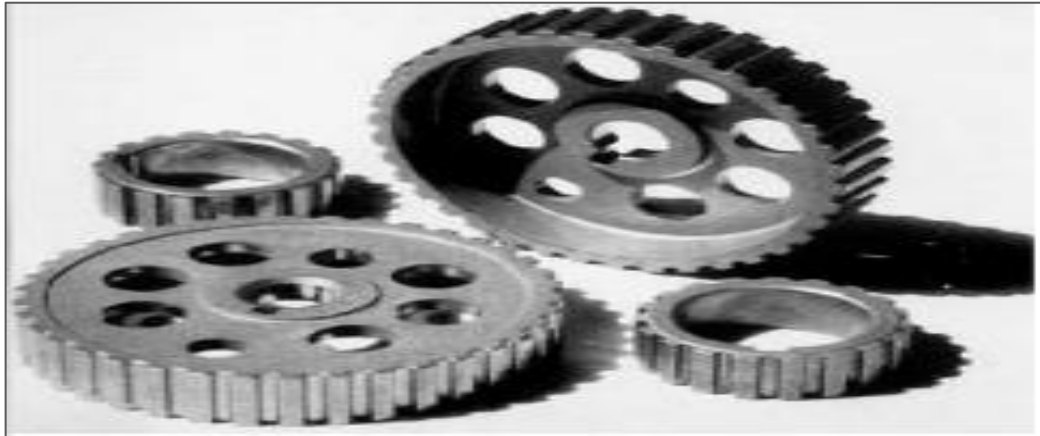
Alüminyum gri renkli, yoğunluğu 2,7 gr/cm³, ergime sıcaklığı 658 °C dir. Yüzeysel oksitlerin her daim üzerinde barındırmasından dolayı korozyon direnci oldukça iyidir.

TM sektörü alüminyum ve alaşım tozlarına ancak 20 yy. ortalarında ilgi duymaya başlamışlardır [18]. TM ile üretilen parçaların büyük çoğunluğu otomotiv imalat piyasasında kullanılmaktadır [19]. Alüminyum metal tozlarının sıcaklık altındaki elastik kabiliyetlerinden dolayı motor iç aksamalarında kullanımları oldukça dardır [20].

Şekil 2.5. ve 2.6. da toz metalurjisi ile üretilmiş bazı parçalar gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Dişli [21].



Şekil 2.6. Kasnak [22].

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş alüminyum alaşımlarında, genel olarak elementsel, ön alaşımlı veya alaşımlı tozlar kullanılır. Toz metalurjisi ile üretim esnasında tozların yüzeylerindeki oksit tabakasının kalınlığı yaklaşık olarak 10-20 angstrom Alüminyum tozlarının yüksek oksijen ilgisinden dolayı, üretiminde sistem tamamen inert gaz dolu ortamda gerçekleşmelidir. İner ortamda üretilmiş alüminyum tozlarına aktif toz da denilmektedir.

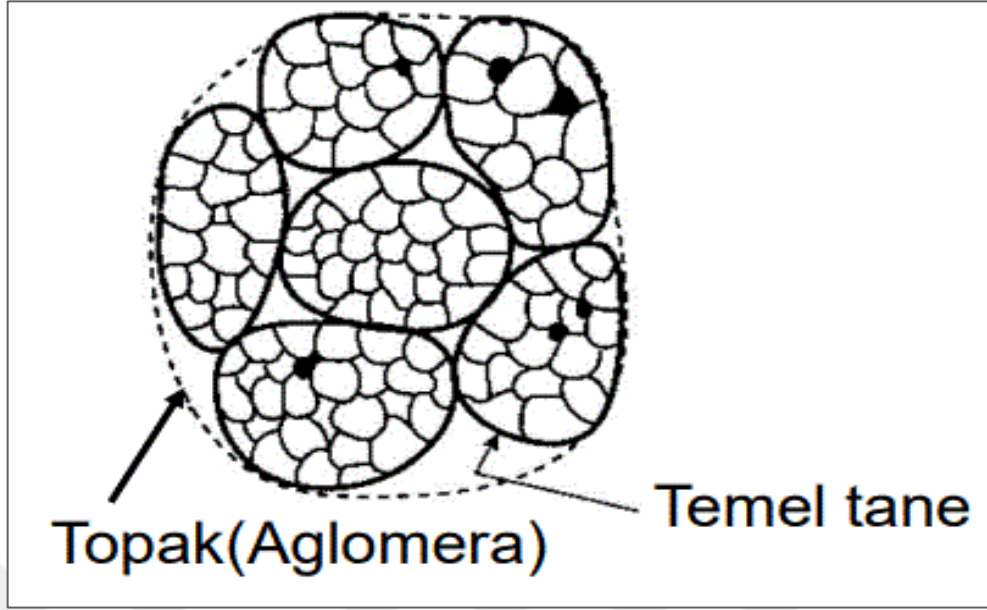
2.4. Alüminyum Toz Özellikleri ve Karakterizasyonu

Gaz atomizasyon metodu ile üretilmiş alüminyum ve alaşım tozları üretim parametrelerine göre farklı formlarda olabilir. Bu formların ticari anlamda en rağbet göreni ise küresel formdaki alüminyum tozlarıdır. Küresel tozlar kalıba akış performansı, sıkıştırılabilirlik gibi özelliklerinden dolayı tercih edilir. Alüminyum tozlarının çoğu diğer metale göre sertliklerinin düşük olması minimum basınçlı preslemede dahi yüksek yoğunluk değerlerine ulaşabilmesi bu tozu cazip kılmaktadır.

Toz metalurjisi ile imal edilen parçaların özelliğini, kullanılan tozun karakteristiği ve kompozisyonu belirler. Bundan dolayı üretilecek parçanın işlevinin tam olarak anlaşılması ve ona uygun tozun seçilmesi önemlidir.

Gaz atomizasyon yöntemiyle alüminyum toz üretimi esnasında oluşan yüzey oksitleri istenmeyen bir durumdur. Oksijene olan ilgisinden dolayı üretim esnasında veya daha sonrasında bünyesinde barındırdığı yüzey oksitleri, alüminyum tozunun patlama riskini ortadan kaldırmasına rağmen pres-sinter yöntemiyle üretim prosesinde farklı zorluklara ve sorunlara yol açmaktadır.

Atomizasyon sonunda elde edilen tozlar tek bir taneden oluşur. Oluşan taneler monokristal yapılarda olabildiği gibi çok kristalli veya amorf yapıda da olabilirler. Tozların kristal yapı oluşturmada çok hızlı soğumaları amorf tozları meydana getirir. Bu tozların mekanik mukavemetleri oldukça yüksektir. Tozlar oluşum esnasında bazen aglomere olabilirler. Aglomerasyon, katı fazda birden çok parçacık bulunmasıdır, topaklanma da denir. Zayıf veya güçlü bağlar oluşturabilirler. Toz topaklanmaları, atomizasyon sürecinde elektrostatik çekim kuvveti, sıcak kaynama ile oluşur.



Şekil 2.7. Aglomerasyon oluşumu [23].

Gaz atomizasyon yönteminde üretilen tozlar fiziksel görünüşlerini yerçekimi kuvveti etkisi altında kule içinde serbest düşerken kazanmalarına rağmen daha yavaş soğuyan iri tozlarla ince tozların bazen birleşerek yeni bir form oluşturdukları görülebilir. Bu formlara uydulaşma denir ve istenmeyen bir durumdur. Atomizasyon gazının nozul geometrisine bağlı olarak yüksek hızlarda sıvı metali homojen parçalaması ve serbest düşme esnasında sıvı parçacıkların atomizasyon kulesinde her bölgede stabil soğuma hızlarına ulaşması istenmeyen bu durumu ortadan kaldırabilir.

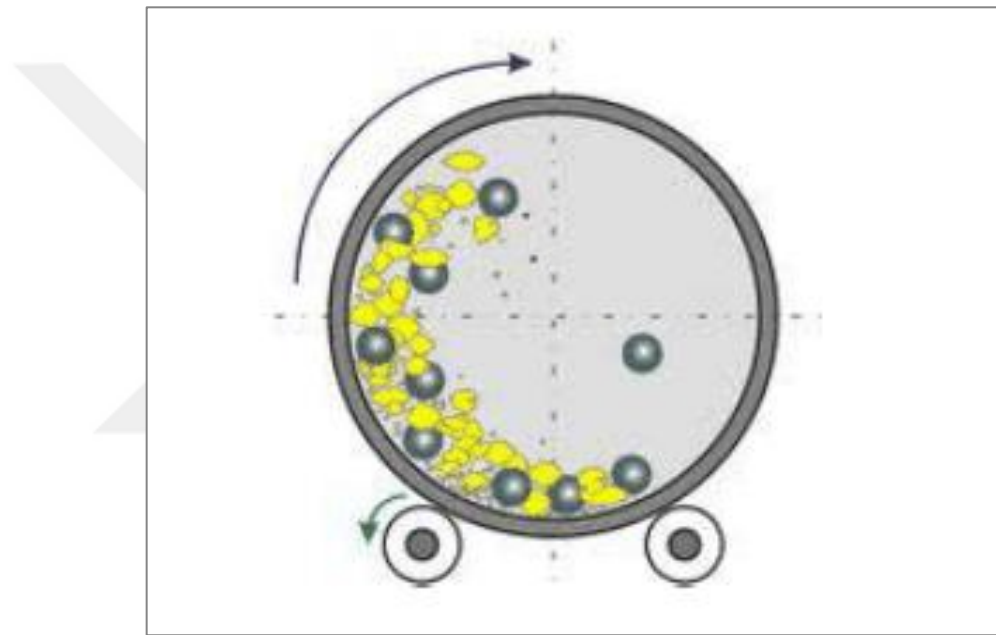
2.5. Metal Tozu Üretim Yöntemleri

Metal tozlarının kalitesi üretim yöntemine bağlıdır [24]. Metalik malzemeler uygun yöntemlerle toz haline dönüştürülebilirler. Bu yöntemler tercih edilirken öncelikle ekonomiklik tercih edilir. Başlıca üretim yöntemleri aşağıda verilmiştir [8,12].

- a. Mekanik yöntemler (Öğütme)
- b. Elektroliz yöntemler
- c. Kimyasal yöntemi
- d. Atomizasyon yöntemleri

2.5.1. Öğütme

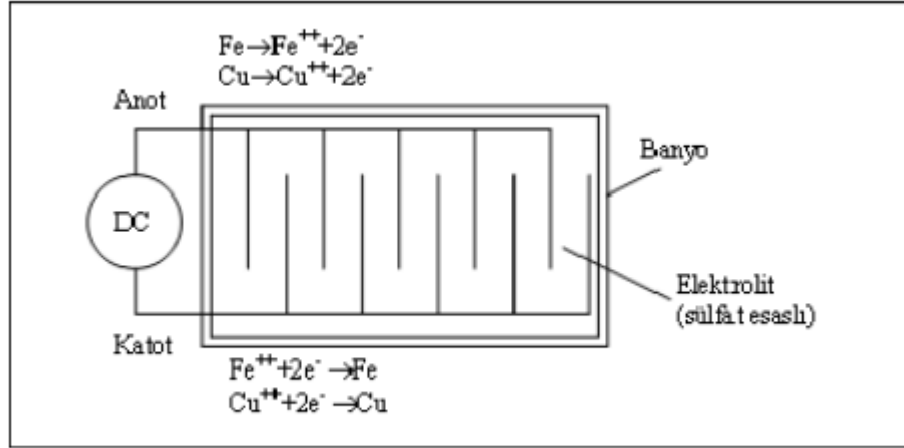
Öğütmenin temel prensibi tane boyutunu küçültmektir. Değirmende öğütülecek malzeme çeşitli kuvvetlerin etkisi ile toz haline gelir. Bilyalı öğütme metal tozu üretim yöntemlerinden biri olmasına rağmen, çeşitli metal-metal alaşımların yapılmasında ve pulsu(yapraksı) metal tozların üretim proseslerinde de kullanılır. Fakat sünekliği fazla olan metaller öğütülürken soğuk kaynak denilen bir durum ortaya çıkar bu durumu ortadan kaldırmak için çeşitli yağlayıcılar kullanılmaktadır [25].



Şekil 2.8. Bilyalı değirmen [26].

2.5.2. Elektroliz

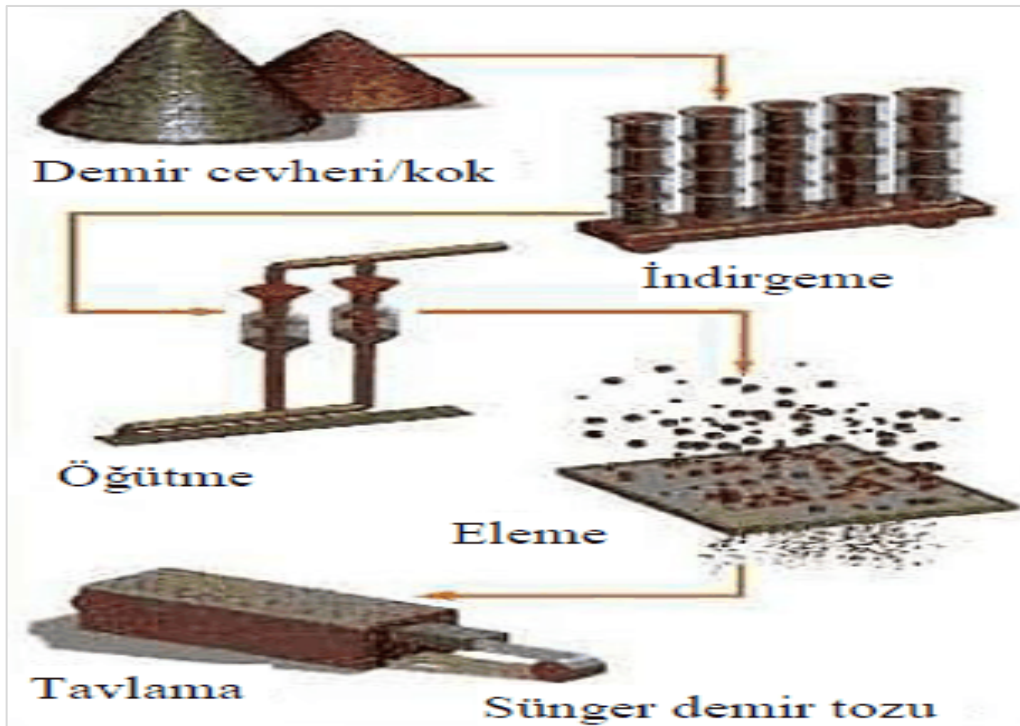
Bu üretim yönteminde amaç elektroliz hücresinde belirlenmiş çalışma şartlarında katot üzerinde süngerimsi ve dendritik yapıya sahip kırılabilir tozların birikmesidir. Bu yöntemle yüksek saflıklarda metal tozları üretebilir. Bu yöntemle toz üretimi belirli bir gerilim altında anot çözünmesiyle başlar. Metal tozlarının karakterleri, birikme esnasında banyo koşullarına ve sonraki adımlara bağlıdır. İyon derişimi azalması, akım yoğunluğunda artma, ara karışım çözeltileri ve asidik türde hücre kimyasalları, katotta gözenekli toz oluşumunu teşvik eder. Akışkan olmayan elektrolit kullanan sıcak olmayan ve çok az karıştırılan hücrede, gevşek katot birikintisi meydana gelir [27].



Şekil 2.9. Elektroliz hücresi [28].

2.5.3. Kimyasal Yöntemler

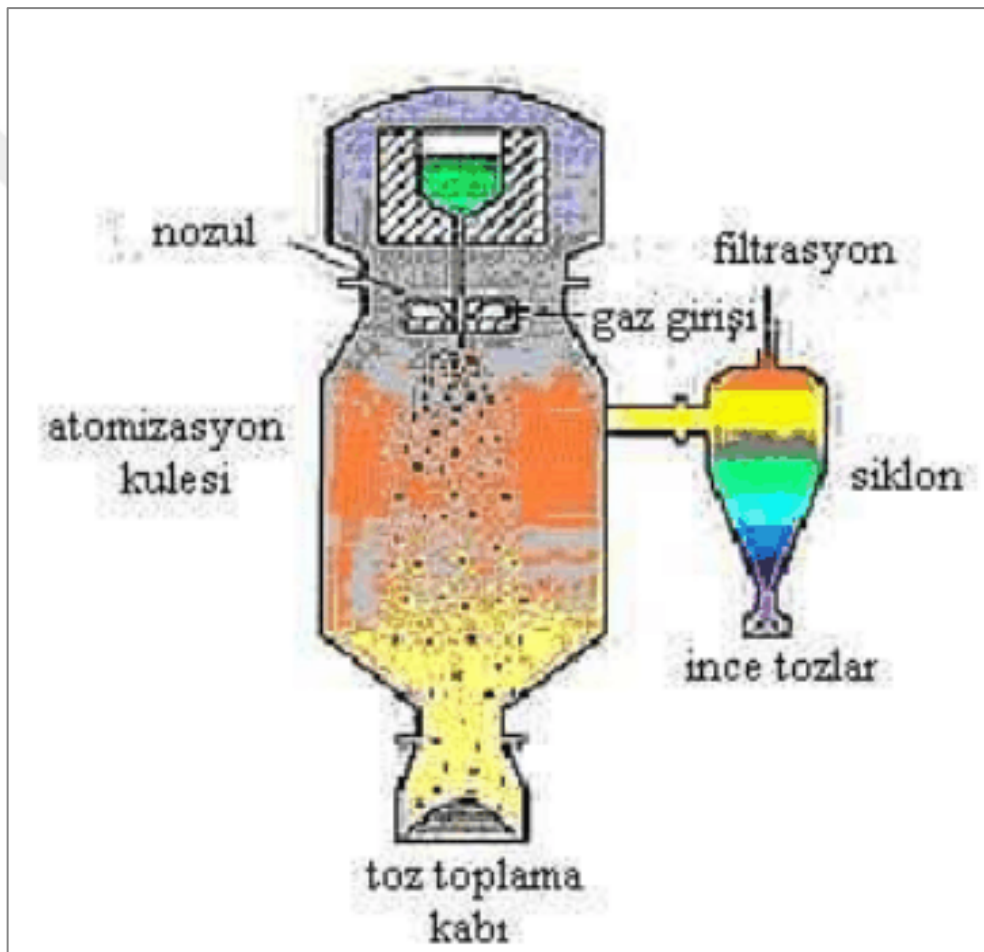
Tüm metal tozları kimyasal yöntemlerle üretilebilir. Üretim fraksiyonlarında yapılacak değişikliklerle farklı tane boyutu ve morfolojide tozlar üretilebilir [29]. Tozların saflık derecesi başlangıç malzemesine bağlıdır. Demir tozlarının üretiminde en fazla bu metot kullanılır. Oluşan tozlar spong yapıda ve yumuşaktır [20]. Birbiri içine kaynamış olan demir tozları öğütülerek istenilen tane büyüklüğünde ürüne gidilebilir.



Şekil 2.10. Demir tozu üretimi [30].

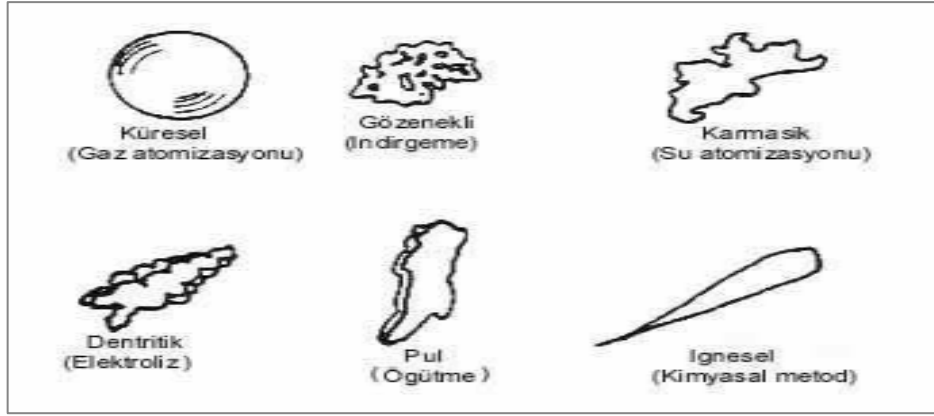
2.5.4. Atomizasyon

Ergitilebilen tüm metaller atomize edilerek toz haline getirilebilirler. Bu yöntemin çalışma prensibi ergime sıcaklığının biraz üstüne ısıtılmış metal, ergime potası altında bulunan bir akış borusu içinden geçirilerek yüksek hızda gaz veya su ile çarpıştırılarak kinetik enerji aktarımı yapılır ve sıvı metal parçalanır. Oluşan toz boyut aralığı 1 μm -1000 μm aralığında olabilir. Atomizasyon yöntemi diğer üretim yöntemleri arasında en çok tercih edilen yöntemdir [31].



Şekil 2.11. Düşey gaz atomizasyon ünitesi [31]

Atomizasyon şartlarındaki değişikliklere bağlı olarak toz morfolojisindeki değişiklikler Şekil 2.12. de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Üretim metotlarına göre toz şekilleri [32]

2.6. Atomizasyon Yöntemleri

Eriyik halde bulunan metal, yüksek hızlarda hareket eden sıvı veya gaz ile çarpıştırılarak küçük damlalara parçalanır ve parçalanma sonrasında damlacıklar kule yan duvarlarına temas etmeden serbest düşerken hızlıca soğurlar ve katılışrlar. Bu metot, gerçekte ergimiş metali yüksek enerjili sıvı veya gaz kullanarak parçalama işlemidir. Kısacası, atomizasyon işlemi sıvı metalin, sıvı veya gazdan kinetik enerji aktarımı yapılarak parçalanmasıdır. Argon, helyum, azot ve hava en çok kullanılan gazlardır. Sıvılarda ise su kullanılmaktadır. Gaz kullanılan sistemlerde tasarlanan nozul yapısı ve gazın basıncı, iletim borusu çapı değiştirilerek farklı morfoloji ve büyüklüklerde toz üretimi mümkündür. Toz şeklini etkileyen ise soğuma hızıdır. Oluşan taneler hızlı şekilde soğutulursa daha ince taneler üretilebilir.

Özellikle metal alaşımlarının atomizasyonu sonucu oluşan tanelerin kimyasal kompozisyonu her tanede homojen şekilde aynı olması bu yöntemi kullanılabilir kılmaktadır [33].

Atomizasyon metotları;

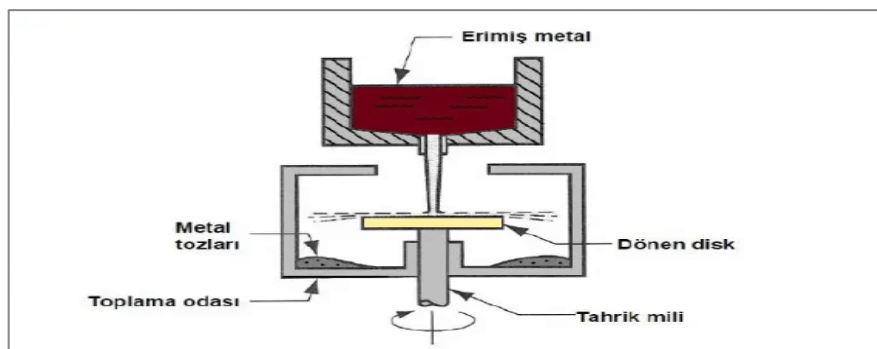
1. Döner Disk
2. Döner Elektrot
3. Vakum Atomizasyon
4. Su Atomizasyonu
5. Gaz Atomizasyonu

2.6.1. Döner Disk

Bu yöntem, ergimiş metalin yüksek hızlarda dönen bir disk üzerine akıtılarak santrifüj etkisiyle parçalanmasıdır [34,35,36]. Parçacıkların katılma hızı büyüklükleriyle ters orantılıdır [37,38]. Yüzey kütle oranı büyük olan yani, küçük taneli tozlar daha hızlı katılırlar. Katılmanın hızlı ve düzenli olması için genelde disk yüzeyleri ısı iletim katsayısı yüksek olan bakır vb. maddelerle kaplanır veya imal edilir [34]. Bu yöntemle elde edilen tozlar genellikle küresel formdadır. Disk hızının arttığı durumlarda tane boyutunun küçüldüğü tespit edilmiştir. Genelde disk hızları 15000-25000 devir/dakika olarak kullanılır. Bu metodun en büyük avantajları arasında aynı anda disk üzerine birden fazla sıvı metalin beslenebilmesi, düşük basınçlarda besleme yapılabilmesi, daha az enerji sarfiyatı sayılabilir.

Döner disk atomizasyonunda üretilen karmaşık şekilli toz morfolojisi ve mikroyapısı parçalanma mekanizmasındaki değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Konkav tasarıma sahip bir diskle yapılan atomizasyon sonucu çıkan ürünlerin tane büyüklüğünün daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Disk yüzeyinde önceden katılmış metal tabakasının parçalanmasıyla karmaşık şekilli parçacıkların oluşur. Boyutsal dağılım ise disk tasarımı ve açısal hız bileşenine bağlıdır [39].

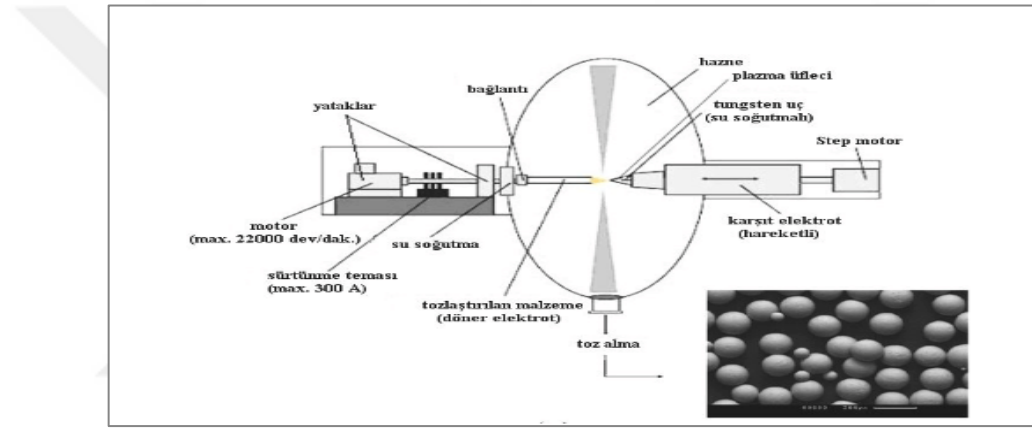
Şekil 2.13. de döner disk atomizasyonunun görseli bulunmaktadır.



Şekil 2.13. Döner disk atomizasyonu [40].

2.6.2. Döner Elektrot

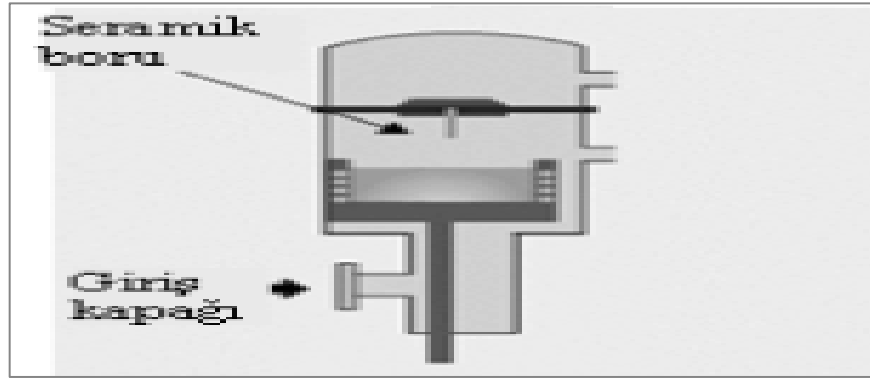
Genelde ergitmesi maliyetli veya normal yöntemlerle ergitilemeyen metal tozlarının üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Özellikle titanyum, zirkonyum, kobalt vb. tozların üretiminde kullanılır. Sistem gereksinimleri arasında tungsten elektrota sahip bir torç bulunur. Toz haline getirilecek metal kendi ekseninde hızla döndürülürken aynı zamanda tungsten torç da malzemeye yaklaştırılarak ark yaptırılır. Sıvı faza geçen metal ise merkez kaç kuvvetinin etkisiyle savrulur ve toz haline geçer. Oluşan toz taneleri neredeyse aynı büyüklükte küresel formdadır. Sistem içinde oluşan tozların oksit etkiden arındırılması için sistem gövdesi inert gaz ile doldurulabilir.



Şekil 2.14. Döner elektrot sistemi [41].

2.6.3. Vakum Atomizasyonu

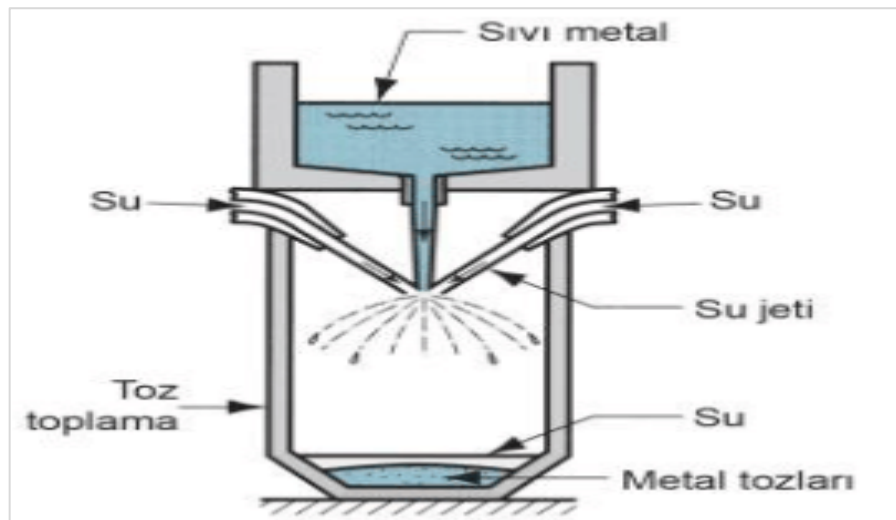
Bir tankın içinde bulunan sıvı metal potasıyla (altta bulunur) vakumlu gaz odası (üstte bulunur) birbirlerinden sıvı metal akış borusunu taşıyan bir levhayla birbirlerinden ayrılırlar. Akış borusu ucunda seramik veya grafit bir boru bulunur. Vakum altında bulunan sıvı metal indüksiyon ısıtma ile belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Sonrasında bu bölüme hidrojen gazı ilave edilir. Hidrojen gazı çözüldükten sonra akış borusu sıvı metal içerisine daldırılarak üst kısmın vakum ortamında bulunmasından dolayı sıvı metal hızla basınç farkından dolayı vakum ortamına doğru hareket ederek parçalanır ve katılaşır. Oluşan tozların tamamına yakını küresel formdadır [42]. Kısacası vakum atomizasyonu, sıvı metale uygulanan ani vakum etkisiyle gazın genişleşip sıvı metalin parçalanması olayıdır [43].



Şekil 2.15. Vakum atomizasyon sistemi [44].

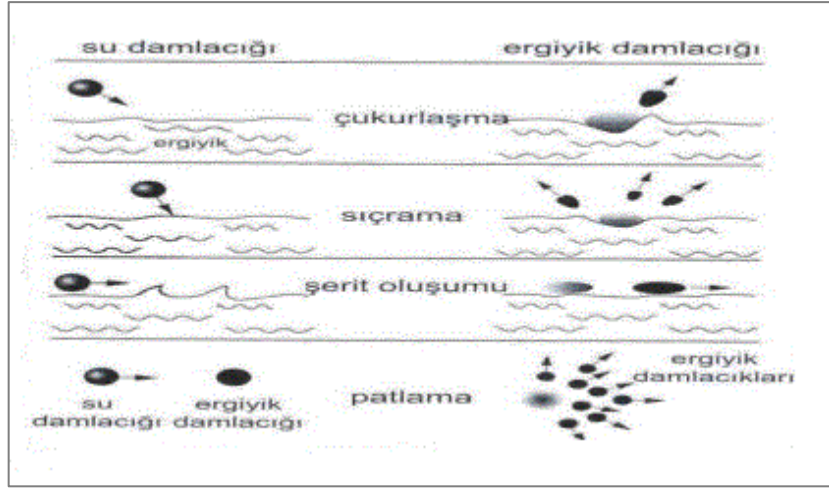
2.6.4. Su Atomizasyonu

Ergimiş sıvı demetini yüksek basınçlı su jetleriyle pulverize ederek toz haline getirmeye su atomizasyon metodu denir. Yüksek sıcaklıklarda eriyen ve reaktif olmayan metallerde su atomizasyonu kullanılır. Gaz atomizasyonuna göre tane katılaşması daha hızlıdır. Üretilen tozların oksijen içerikleri gaz atomizasyon metodunda üretilen tozlara göre fazladır. Jet beslemesindeki su basıncının artması atomizasyon şartlarını optimize etmekte etkilidir. Son ürün genellikle karmaşık şekillidir. Su ile sıvı metalin reaksiyona girmesi sonucu su içindeki hidrojen açığa çıkmaktadır.



Şekil 2.16. Su atomizasyon ünitesi [45].

Su atomizasyonunda, toz oluşum evreleri Şekil 2.17. de gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Su atomizasyonunda tane oluşumu [46].

Atomizasyonda kullanılan suyun pH değerinin oluşan toz oksidasyonlarına doğrudan etkisi vardır [47].

2.6.5. Gaz Atomizasyonu

Helyum, argon, azot veya hava kullanılarak sıvı metal demetinin yüksek hızlara ivmelendirilmiş gaz akışı altında parçalanması olayına gaz atomizasyonu denilmektedir. Bu metotla üretilen metal tozları $1\mu-1000\mu$ aralığında olabilir [48].

Bu üretim prosesinde elde edilen yüksek küreselliğe sahip metal tozları hızlı katılaşmasından dolayı mükemmel yakın mekanik özelliklere sahiptir.

Gaz atomizasyonu üç aşamada gerçekleşir [7].

- Sıvı metalin ergitilmesi
- Atomizasyon işlemi
- Tanelerin soğuyarak katılaşması

İnert gaz atomizasyonu prosesinde sıcaklığın sabit, gaz basıncının artırıldığı durumlarda tane boyutunun küçüldüğünü fakat uydulaşmanın arttığı, sıcaklığın yükseltip basıncın sabit tutulduğu durumlarda ise oldukça küresel ve pürüzsüz yüzey kalitesine sahip tozlar oluşmuştur [49].

2.7. Gaz Atomizasyonu İle Metal Tozu Üretimi

Bu yöntemin temel gayesi yüksek hızda ivmelendirilen gazın kinetik enerjisini sıvı metale aktararak mikron boyutunda toz elde etmektir [50]. Gaz atomizasyon sisteminin verimli ve sistematik çalışması için aşağıdaki adımların gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

- a) Maksimum yeterlilikte gaz ivmelendirme (maksimum kinetik enerji)
- b) Akış borusu ucunda oluşabilecek pozitif basıncın minimize edilmesi veya hiç olmaması. Tasarladığımız nozul ile pozitif basınç tamamen ortadan kaldırılmıştır.
- c) Metal akışını nozul geometrisinin de katkısıyla kontrol ederek basınç farklarının dengede tutulması.

Gaz atomizasyon sistemlerinde klasik olarak tasarlanmış sonik veya süpersonik nozullar başlıca üç temel prensibi gerçekleştirirler.

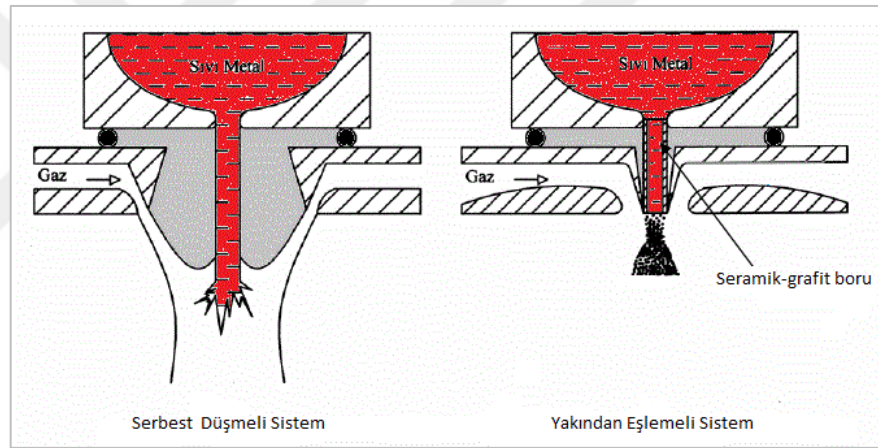
- a) Gerekli olan kinetik enerji aktarımını sıvı metal üzerine yaparak sıvı metali parçalamak.
- b) Parçalanmış damlacıkları düzenli gaz akışı içinde ivmelendirmek.
- c) Gaz akışı içinde ivmelendirilen parçacıkların soğuyarak katılaşmalarını sağlamak.

Gaz atomizasyonu ile üretilen tozların tane büyüklüğünü ve morfolojisini doğrudan etkileyen üç değişken vardır. Bunlar; sıvı metal, nozul ve gaz değişkenleridir. Sıvı metalin aşırı ısıtılması ve alaşım seçimi, nozul geometrisi, akış borusu mesafesi ayrıca kullanılan gazın seçimi ve gaz/metal debisi toz boyut ve morfolojisini doğrudan etkilemektedir.

2.7.1. Gaz Atomizasyon Sistemleri

Gaz atomizasyon sistemleri yakından eşlemeli ve serbest düşmeli olmak üzere ikiye ayrılır [50,51]. Yakından eşlemeli sistemlerde, sıvı metal gaz genişleme bölgesine grafit veya seramik bir boru vasıtasıyla iletilir. Toz morfolojisi ve tane büyüklüğü

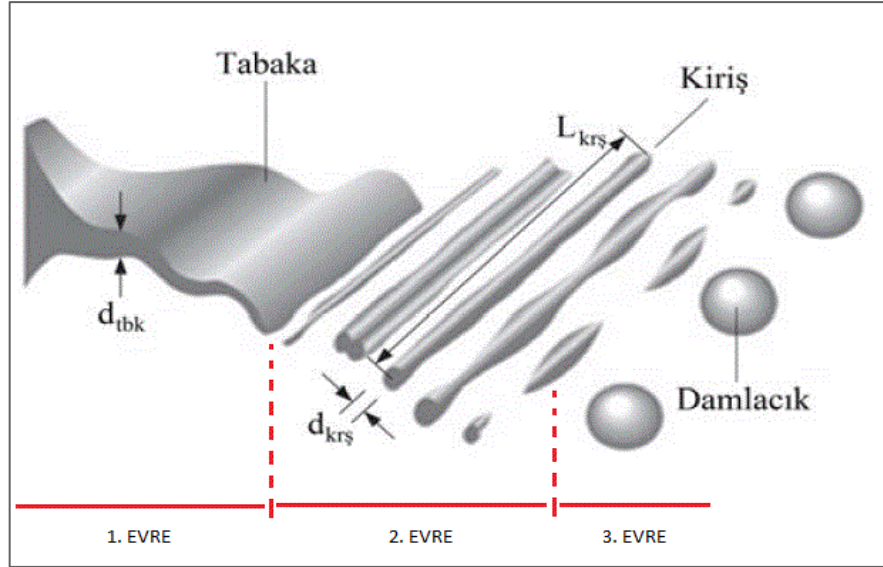
kullanılan borunun çıkıntı mesafesiyle doğrudan alakalıdır. Ayrıca çıkıntı mesafesinin fazla olması atomizasyon esnasında metalin hızlı katılaşmasına, kısa olması ise pozitif basınç oluşumuna yol açarak akış borusunun içinde metalin katılaşmasına sebep olarak atomizasyonun durmasını mümkün kılar. Hesaplamaları iyi yapılmış bir yakından eşlemeli sistem hem verimlilik bakımından hem de reaksiyonlarının hızlı olmasından dolayı mali açıdan ekonomik ve sürdürülebilir. Yukarıda bahsedildiği gibi yakından eşlemeli sistemler yüksek verimlilik oranlarına sahip olmasına rağmen bazı güçlüklerle karşılaşmaktadır. Bunlardan en önemlisi akış borusu ucunda meydana gelen pozitif basınçtır, pozitif basınç atomizasyonu tamamen durdurup metalin katılaşmasına yol açtığından dolayı toz üretim maliyeti artırmaktadır. Tasarlanmış olduğumuz nozul ile bu problemi ortadan kaldırmış olduk. Serbest düşmeli sistemlerde ise özellikle sıvı metal akışının stabil kontrol edilememesi akışın sadece yer çekimi tarafından sağlanmasından dolayı verimliliği düşüktür.



Şekil 2.18. Serbest düşmeli ve yakından eşlemeli sistemler [52].

2.7.2. Gaz Atomizasyon Mekanizmaları

Aşırı ısıtılmış sıvı metal, nozulu terk ettiği esnada atomizasyon gazı, metalin özelliği ve nozul yapısına bağlı olarak çeşitli evrelerden geçerek parçalanır ve zaman içerisinde yerçekiminin de etkisiyle serbest düşerken katılaşarak son şeklini alır. Bu parçalanma ve şekil değiştirme evreleri aşağıdaki gibi gerçekleşir.



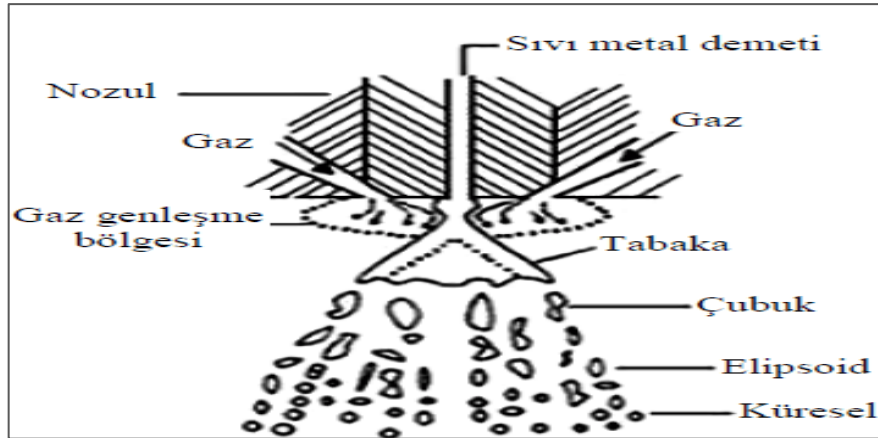
Şekil 2.19. Sıvı metalin parçalanma evreleri [53].

1. Evre: Aşırı ısıtılmış sıvı metal süper sonik hızlarda nozuldan çıkan gazlarla çarpıştığı anda aktarılan enerjinin etkisiyle sinüs dalgaları gibi davranır. Aldığı enerjiden dolayı dalga görünümündeki sıvı metal tabakasının kalınlığı yer yer değişmektedir. Atomizasyon kulesi boyunca devam edecek bu hareket metal tabakasında bazı ayrışma ve kopmalara yol açar.

Evre: Zamanla kararsızlaşan sıvı metal tabakasında yüzey gerilimlerinin tesiriyle kırılmalar başlar. Bu kırılmalar sonucunda oluşan parçacıklar çubuk veya pulsu şekillerde olabilir. Oluşan şekillerin kütle/yüzey alan oranı fazladır.

3. Evre: Kinetik enerjinin aktarımının devam etmesi durumunda ise parçalanmalar devam ederek damlacıklar oluşur.

Gaz atomizasyonunda parçacık oluşumu literatüre göre üç safhada gerçekleşir. Bunlardan ilkinde yüksek hızlardaki gazın etkisiyle sıvı metalde yüzey gerilimlerinin başlayıp sıvı metalin kararsızlık başlangıcıdır. İkinci safhada dinamik gaz kuvvetlerine maruz kalan ve tamamen kararsız hale gelen sıvı metal demeti maksimum yüzey gerilmelerine ulaşır ve form değiştirerek çubuksu veya pulsu görünümüne kavuşur. Üçüncü safhada ise zamana ve gaz kesme kuvvetlerine bağlı olarak küreselleşir ve soğurlar.



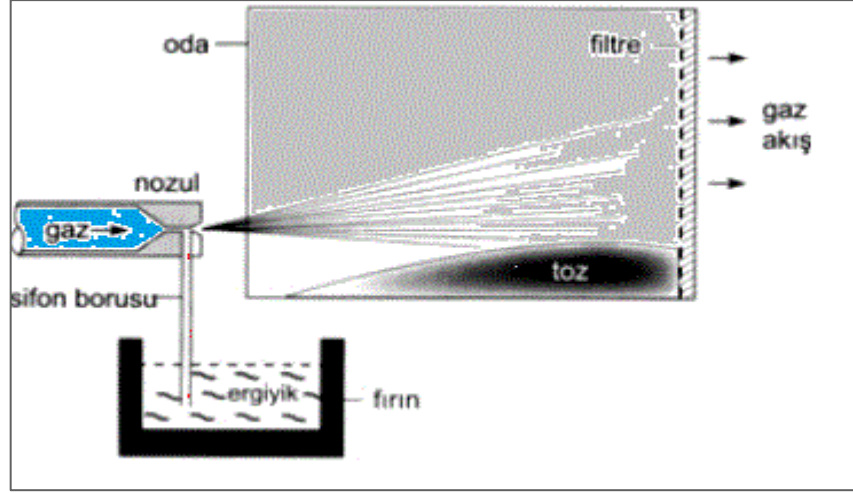
Şekil 2.20. Toz oluşum evreleri [54].

Metal tozu, oluşumunu kule içerisinde dinamik kuvvetler ve yerçekimi etkisiyle serbest düşme esnasında tamamlar. Bu tamamlanmanın gerçekleştiği anda gazın kinetik enerjisi parçalanmış olan sıvı metalin enerjisine neredeyse eşittir. Bu aşamaya gelindiğinde artık enerji transferinden bahsedilemez yani artık parçalanmalar ve ayrışmalar olmaz. Fakat farklı veya aynı doğrultuda hareketlerine devam eden tozlar çarpışarak bütünleşir ya da parçalanırlar. Katılma hızların toz boyutuna ve morfolojisine doğrudan etkisi vardır.

2.7.3. Gaz Atomizasyon Üniteleri

Gaz atomizasyon üniteleri donanımsal tasarım bakımından iki çeşittir. Donanım bakımından farklılık olsa da amaç sıvı metali yüksek hızda bir gaz ile parçalayarak toz elde etmektir.

Ergime sıcaklıkları düşük olan metaller için genelde atomizasyon üniteleri yatay olarak tasarlanır. Nozul çıkışında yüksek hız ve düşük basınca sahip atomizasyon gazı sıvı metali seramik veya grafit tüpten sifon etkisiyle çekerek gaz genişleme bölgesine iletir. Bu bölgede pulverize olan sıvı metal küçük damlacıklara ayrılarak katılır. Oksitlemenin önüne geçmek için kapalı bir oda kullanılır [55]. Genelde kapalı oda yan çeperine montajlanmış geniş yüzeyli filtreler ince tozları tutmakla beraber atomizasyon gazının da tahliyesine izin verir. Şekil 1.15. de yatay tasarlanmış bir ünite gösterilmektedir.



Şekil 2.21. Yatay Ünite [56].

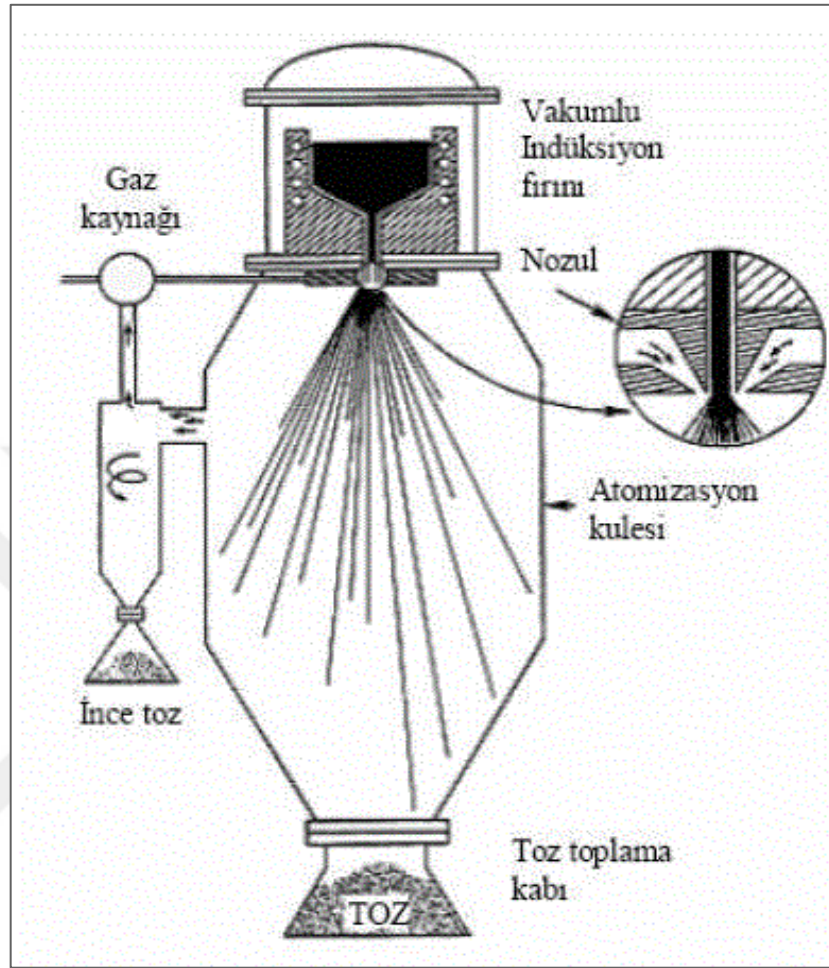
Yatay sistemde üretilen tozlar düşey sistemlerde üretilen tozlara göre daha iri ve geniş dağılım bandına sahiptir [57].

Düşey sistemler ise ergime sıcaklığı yüksek olan metaller için imal edilmişlerdir. Düşey sistemler çoklu donanıma sahiptirler. Bunlar, indüksiyon fırını, yeterli yüksekliğe sahip paslanmaz çelikten imal edilmiş kule, toz sınıflandırma ve gaz tahliyesine imkan veren siklon veya siklon gurupları, toz toplama kısmı son olarak nozul sayılabilir. Sistem çalışması ise şöyledir,

- Metal, ergime sıcaklığının üstünde bir sıcaklığa kadar ısıtılır.
- Kule ana gövde içi inert bir gaz ile doldurulur.
- Akış borusu vasıtasıyla nozul içerisine gönderilir.
- Nozuldan yüksek hızda çıkan gaz ile parçalanır [56].
- Parçalanmış tozlar yeterli yükseklikteki kule içerisinde serbest düşerken katılaşır.
- Atomizasyon gazının etkisiyle sürüklenen ince tozlar siklonlar tarafından tutulurlar.

Düşey gaz atomizasyon sistemlerinde toz boyutunu ve dağılımını etkileyen birden fazla değişken vardır. Bunlar nozul, atomizasyon gaz türü ve basıncı, gaz sıcaklığı, akış borusu iç çapı ve çıkıntı mesafesi, kule iç atmosferi, ergimiş metal sıcaklığı ve alaşımı, metal akışkanlık derecesi gibi değişkenler farklı kombinasyonlarda bir araya getirilerek

farklı boyut ve dağılımda tozlar elde edilebilir [56]. Şekil 1.16. da düşey tasarlanmış bir ünite gösterilmektedir



Şekil 2.22. Düşey Ünite [56]

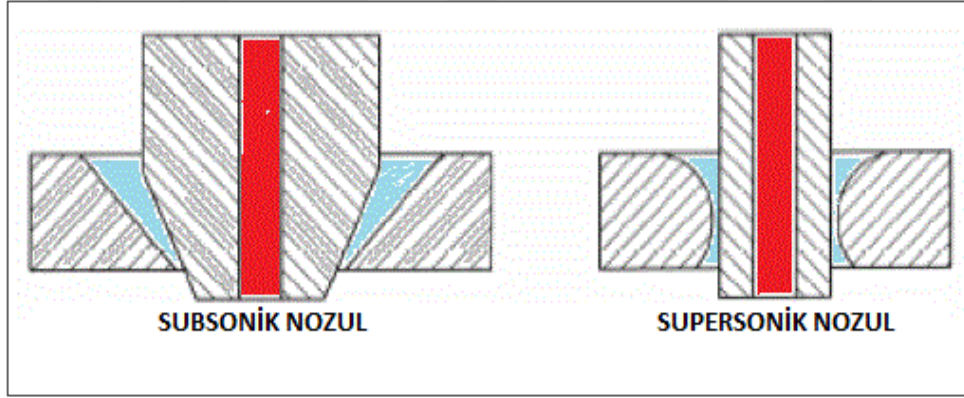
Oksitlenme riski barındıran metal veya alaşımlarında atomizasyon gazı soy gazlardan seçilmelidir ve kule ana gövdesi de bir soy gaz ile doldurulmalıdır. Özellikle alüminyum ve magnezyum gibi aktif metal tozlarının oksijen anfinitesinin yüksek olmasından dolayı üretimleri esnasında daha çok argon gazı kullanılmaktadır. Bu tarz metal tozları üretim proseslerinden dolayı aktif toz olarak anılırlar. Bu tozlar açık havaya kontrollü olarak çıkartılırlar, aksi halde oksijene olan ilgilerinden dolayı ani tutuşma ve parlama yaşanır. Bu sistemlerde üretilen tozların kimyasal bakımdan homojen, küresel ve paketlenme özelliğinin de çok iyi olması tercih sebebidir [58]. Ancak hava atomizasyonunda üretilen tozlar düzensiz şekillidir.

2.7.4. Nozul Çeşitleri ve Özellikleri

Gaz atomizasyon sistemlerinin en kritik parçası nozullardır. Farklı geometrik yapılarda olabilirler. En önemli görevi yüksek basınçta giren gazı yüksek hızlara çıkartarak sıvı metal demetini parçalamaktır. Sisteme entegre edilen nozulun mekanik yapısında bir değişiklik olmadığı müddetçe gaz basıncı ve cinsi, metal sıcaklığı, akış borusu çıkıntı mesafesi optimizasyonu ile yüksek verimlilikte ve istenen dağılımda toz üretilebilir. Fakat bazı parametre değişikliklerinin verimlilik hesabı ile uygun olmaması bizleri ekonomik optimizasyonlara sevk etmektedir. Örneğin helyum gazının enerji iletim hızı argona göre yüksek olmasına rağmen ve daha ince toz üretilebilirken maliyetinin fazla olmasından dolayı tercih edilmemektedir [59]. Literatürde nozullar iki kısma ayrılır;

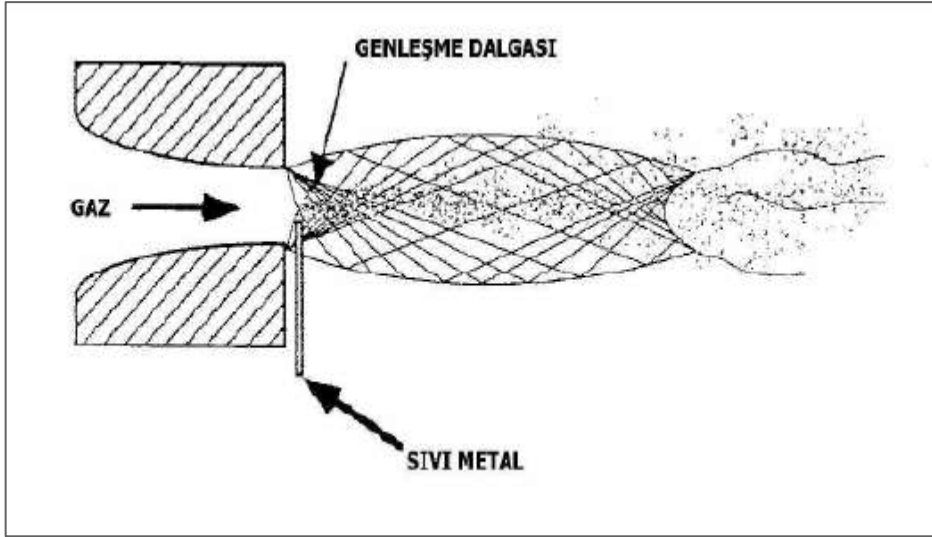
- Ses altı (subsonik) nozullar.
- Ses üstü (süpersonik) nozullar.

Bu tezde kullanılacak çift yarıklı nozuldan ikinci bölümde bahsedilecektir.

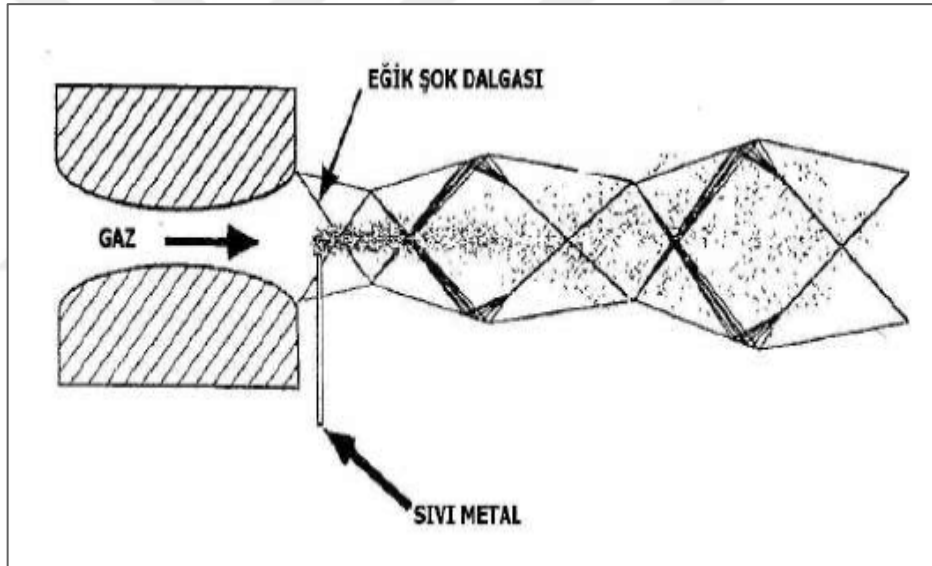


Şekil 2.23. Subsonik ve süpersonik nozul geometrileri [50].

Yüksek verimlilikte ve sistematik çalışan bir atomizasyon sistemi için uygun bir nozul tasarlamak oldukça önemlidir. Nozulun izlenebilirliği ve performansı toz kalitesini doğrudan etkileyen parametrelerdendir. Bu inceleme nozulun iç kanallarında daralan veya daralıp genişleyen bölgelerinin geometrisiyle alakalıdır.



Şekil 2.24. Subsonik nozul gaz akış bölgesi ve toz oluşumu [50].

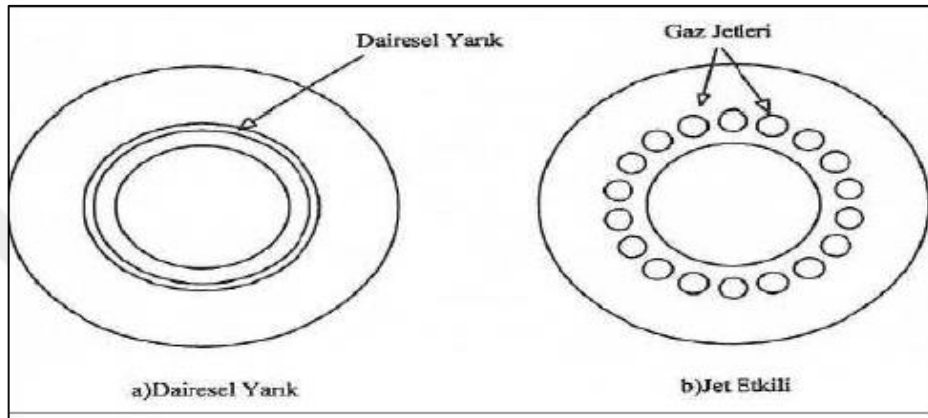


Şekil 2.25. Supersonik nozul gaz akış bölgesi ve toz oluşumu [50].

Tasarımından dolayı düşük basınçlarda bile yüksek performans sergileyen süpersonik nozullar en çok tercih edilen nozullardır. Çünkü süpersonik nozullardan çıkan gaz hızı, ses hızı ve katlarında olduğundan oldukça yüksek bir kinetik enerjiye ve kesme kuvvetine sahiptir [60]. Bunun aksine daralan bir geometriye sahip olan subsonik nozullar ses hızlarına çok yüksek gaz basınçlarında çıkabildikleri için çok tercih edilmezler. Literatürde daralan geometrili subsonik yapıdaki nozullara Mannesmann tipi nozullar, daralıp genişleyen geometrili supersonik yapıdaki nozullara ise Laval tipi nozullar denilmektedir.

2.7.5. Süpersonik Nozulların Toz Karakteristiğine Etkileri

Metal eriyiği kararsızlaştıracak kadar yüksek enerji elde etmek için nozul tasarımı oldukça önemlidir. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda iki farklı süpersonik nozul tasarımı kullanılmaktadır. Bunlardan bir tanesi dairesel yarıklı diğeri ise jet etkili tasarıma sahip nozullardır [61].



Şekil 2.26. İki farklı nozul geometrisi [59].

Dairesel yarıklı nozulda gaz eriyiği dairesel bir biçimde çevreleyerek keser. Çoklu gaz jetlerinde ise belirli açılarda yerleştirilmiş dairesel deliklerden çıkan gaz, sıvı metali çoklu temas ile keser. Dairesel yarıklı nozullar en çok kullanımı tercih edilen nozullardır [61].

Atomizasyon gaz basıncının üretilen toz üzerindeki etkisi birçok araştırmaya konu olmuştur. Gaz atomizasyonunda nozuldan çıkan düşük basınç ve yüksek hızdaki helyum gazı argon gazına göre en ince taneleri oluşturur ancak endüstride genellikle maliyet açısından argon veya azot gazı kullanılır [62].

Eriyiğin parçalanması tamamen gaz dinamik basınç kuvvetleri tarafından nozul alt ucunda gerçekleşir bu kısım birincil parçalanmanın gerçekleştiği ilk evredir. Fakat gaz transfer hızı azalıp enerji eşitlenene kadar atomizasyon devam eder [60]. Nozula beslenen gaz basıncındaki artış dinamik gaz kuvvetlerinin momentumlarını artırarak daha geniş bir gaz genleşme bölgesi oluşturmaktadır. Dairesel yarıklı süpersonik nozullar daha yüksek ses hızlarına çıkabildikleri için daha güçlü dinamik basınç kuvvetleri yaratır [60].

Yakından eşlemeli ve serbest düşmeli sistemlerde kullanılan süper sonik nozullar aynı çıkış hızlarına sahip olabilirler. Bu nedenle toz karakterizasyonunu diğer atomizasyon parametreleri belirler.

Eğer çalışılan süper sonik etkili farklı nozullarda durgunluk basıncı ve gaz/metal debi oranları optimize edilebilirse elde edilen tozlar neredeyse aynı özelliklere sahip olurlar. Dar parçacık dağılımını elde edebilmek için süper sonik etkili bir nozul, dar kesitli bir akış borusu ve uygun sıcaklıkta basınçlı bir gaz seçilmelidir.

2.7.6. Çift Yarıklı Nozul

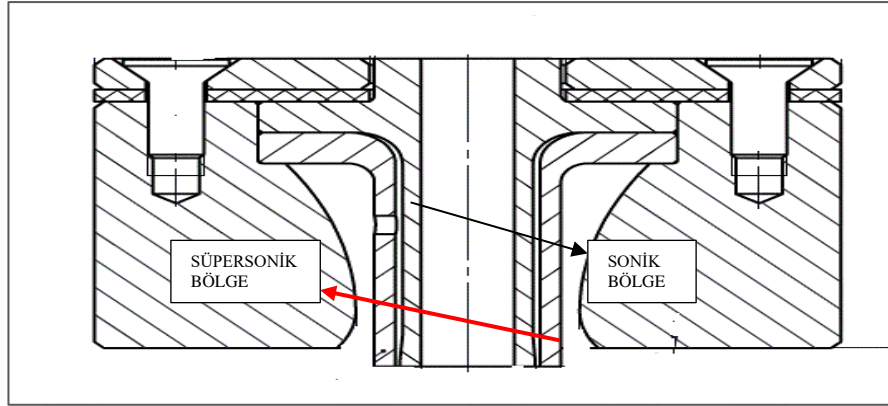
Metal tozunun özelliklerini esasen nozul geometrisi ve gaz parametreleri belirler. Yakından eşlemeli gaz atomizasyon sistemlerinde sıvı metal akış borusu ucunda oluşan gaz akışı ve negatif basınç oluşumu tamamen gaz dinamiğine ve nozul geometrisine bağlıdır. Dolayısıyla bu dinamiği son derece verimli hale getirmek ve ayrıca akış borucu ucunda meydana gelecek eriyik katılaşma problemlerinin önüne geçebilmek amacıyla çift yarıklı bir nozul geliştirilmiştir. Metal akış borusu ucunda oluşturulan negatif basınç sıvı metale etki eden dolaşım bölgesindeki gaz akış kuvvetlerinin toplamıdır. Çift yarıklı bir nozul tasarımının yapılmasının üç ana problemi çözebileceği düşünülmektedir.

Bunlardan ilki, sonik bölgeden düşük basınç ve hızdaki gazın sıvı metal viskozitesini kontrol ederek atomizasyon bölgesine iletilmesine katkıda bulunmak ve daha küçük küresel tanelerin oluşumuna yardımcı olmak.

İkincisi, yakından eşlemeli sistemlerin en büyük sorunlarından olan metal akış çubuğu ucundaki katılaşma problemlerinin ortadan kaldırılması.

Üçüncüsü ise, süper sonik nozul geometrisi belli bir basınç değerinde kapalı geçiş bölgesi de denilen ve atomizasyon işlemini etkileyen geniş bir gaz genleşme bölgesi oluşturur [47]. Bu basınç değerinin sabit tutulması ve genleşme bölgesinin kapanmaması oldukça önemlidir. Bu bölgenin stabil tutulması daha küçük ortalamada toz boyutu ve daha dar bir toz dağılımı eldesi için oldukça önemlidir.

Yapılan literatür araştırması neticesinde, önerilen konu ile ilgili literatürün son derece kısıtlı olduğu görülmüştür. Bu bakımdan önerilen çalışma neticesinde elde edilecek bilgilerin literatüre ciddi anlamda katkısı olacağı açıktır.



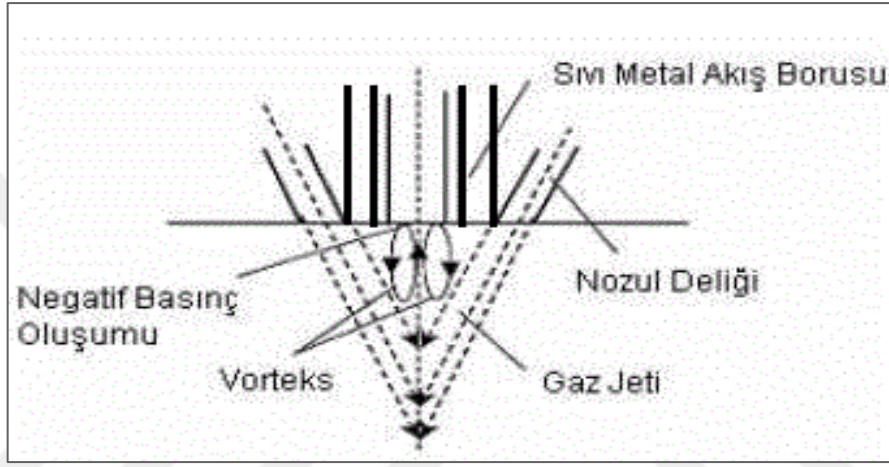
Şekil 2.27. Çift yarıklı nozul

Tamamen özgün bir tasarıma sahip olan çift yarıklı nozulda iki tür gaz çıkış bölgesi vardır (Şekil 2.27.). Bunlardan ilki birincil soğumanın gerçekleştiği sonik bölge, ikincisi ise ikincil ve final atomizasyonun gerçekleştiği süpersonik bölgedir. Bu nozul aynı zamanda viskozitesi yüksek ve aşırı ısıtılmış eriyikler için idealdir

2.7.7. Negatif ve Pozitif Basınç Oluşumları

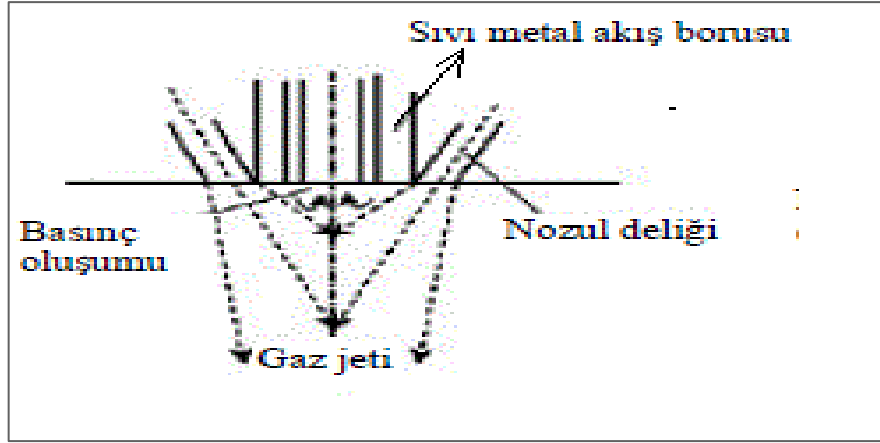
Akış borucu ucunda meydana gelen pozitif ve negatif basınçlar tamamen gaz değişkenine bağlıdır. Bu değişkenler gaz basıncı ve hızı veya nozul gaz çıkış bölgesinin açısal pozisyonudur. Negatif basınç, atomizasyonun sürekliliği açısından istenen bir durumken, pozitif basınç kuvvetleri atomizasyonu durdurduğundan dolayı istenmeyen bir durumdur [63]. Negatif basınç oluşumunda nozul çıkışındaki gaz, sıvı metal akış borusuna emme etkisi yaparak atomizasyon bölgesine sürekli ve düzenli bir metal beslemesi sağlar ve bu istenen bir durumdur [64]. Akış borusu ucunda gerçekleşen negatif basınç dolaşım bölgesine etki eden tüm gaz kuvvetlerinin toplamıdır [64]. Bilindiği üzere gaz akışı ve kesme kuvveti tamamen nozul tasarımına ve geometrisine bağlıdır. Dolayısıyla süpersonik olarak tasarlanan nozulların gaz akış hızı ve kesme kuvveti büyük olduğundan akış borusu ucunda subsonik nozullara göre daha güçlü negatif basınç kuvvetleri meydana getirir [63]. Bu durum ise süpersonik nozulları daha cazip kılar.

Akış borusu çıkıntı mesafesi ise negatif basınç oluşuma doğrudan etki eden faktörlerdendir. Akış borusu çıkıntı mesafesinin artmasıyla birlikte negatif basınç artarken bir problemi de beraberinde getirmektedir o da boru ucundaki metal katılaşmasıdır. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre maksimum çıkıntı mesafesinin 10mm olduğu durumda en yüksek negatif basınç oluşmaktadır [48]. Negatif basınç kontrol altında tutulabildiği sürece atomizasyon işlemi maksimum optimizasyona ulaştırılabilir. Çünkü negatif basıncın kontrol edilmesi gaz dolaşım bölgesine iletilecek sıvı metalin kütle oranını belirler bu da direkt toz boyutuna etki eder [64].



Şekil 2.28. Negatif basınç oluşumu [65].

Atomizasyon esnasında gaz akış borusu ucunda meydana gelen basıncın pozitif olması durumunda akış yavaşlar veya durur, akış borusu içine doğru ters yönde hareket ederek boru içinde katılaşmaya sebep olur. Bu istenmeyen bir durumdur. Nozuldan yüksek hızda çıkan gaz uygun şekilde konumlandırılmış akış borusu yan çeperlerinden gaz genişleme bölgesine kadar boru yüzeyinden akar ve hemen boru uç alt bölgesinde sıvı metalle buluşarak atomizasyon işlemini başlatır. Fakat boru çıkıntı mesafesinin kısaltılmasıyla beraber ortaya atomizasyonu yavaşlatan hatta durduran pozitif kuvvetler ortaya çıkar.

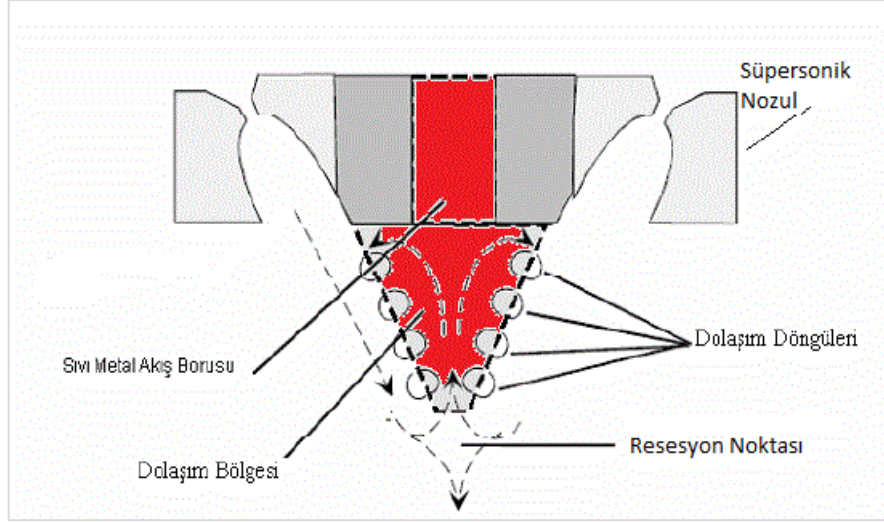


Şekil 2.29. Pozitif basınç oluşumu [65]

Tasarladığımız ve ikinci bölümde anlatılacak olan çift yarıkli nozul ile pozitif basınç oluşumu riski tamamen ortadan kaldırılmıştır.

2.7.8. Gaz Geçiş Bölgesinin Gaz Atomizasyonuna Etkisi

Süpersonik geometrili gaz atomizasyon nozulları kritik basınç değerlerine ulaştığında akış borusu alt ucunda bir dolaşım bölgesi oluşturur. Gaz atomizasyon işlemine doğrudan etki eden bu bölgeye gaz genişleme bölgesi de denir [60]. Kapalı geçiş bölgesi ise gaz genişleme bölgesinin içinde yer alır. Bu bölge bazı gaz basınç değerlerinde kapanabilir, ondan dolayı bu basınç değerlerini bilmek önemlidir. Bu basınç değerlerinin üstündeki değerlerde altındaki değerlere göre daha ince toz ortalaması ve daha dar toz dağılımı oluşur. Ayrıca, akış borucu çıkıntı mesafesinin daha kısa tutulması da pozitif gelişen basıncın etkisiyle geçiş bölgesini kapatarak atomizasyonun durmasına sebep olur. Gaz geçiş bölgesinin kapanmasını anlaşılır bir biçimde açıklamak için gaz dolaşım bölgesinin ve gaz dinamik kuvvetlerinin simüle edilebilmesi gerekmektedir. Atomizasyon gazı, kütle korunumu yasasına göre geçiş bölgesine resesyon bölgesinden girer ve akış borusu alt kısım dairesinden çıkar. Resesyon basınç noktasındaki gazın dairesel hızı nozul çıkış açısına bağlıdır. Resesyon basıncı ile dairesel hız doğru orantılıdır [66].



Şekil 2.30. Gaz dolaşım bölgesi [66]

Tasarladığımız çift yarıklı nozul ile gaz dinamiğinden kaynaklanan geçiş bölgesi kapanma sorunları elimine edilerek atomizasyon sürekli hale getirilmiştir.

3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Ünal ve arkadaşları gaz atomizasyonu, sıvı metal demetinin basınçlı bir gaz yardımıyla parçalanması işlemi olarak tanımlarlar ayrıca nozul geometrisi, gaz basıncı ve akışı, akış borusu iç çapı gibi değişkenleri optimize ederek toz boyutunu ve dağılımının kontrol edilebileceğini savunmuşlardır ve tozların soğuma hızlarının doğrudan toz şeklini etkilediğini savunmuşlardır. [50].

Berndt ve arkadaşları ince ve küresel metal tozu üretiminde en etkili yöntemin gaz atomizasyon tekniği olduğunu belirtmişlerdir [67].

Sarı ise gaz atomizasyonunu, yüksek hızda genişleyen gazdan sıvı metale kinetik enerji aktarımı ile metal damlacıklarının kesilmesi ve parçalanması işlemi olarak tanımlar [55].

Tıng ve arkadaşları sıvı metalin parçalanması sonunda kule içinde serbest düşerken küresel şekle kavuştuğunu soğuduğunu ve oluşan tozların 1µm-1000 µm arasında olacağını savunmuşlardır, aşırı ısıtılmış sıvı metalin atomizasyon esnasında yüzey oksitlerden korumak amacıyla kule içinin asal bir gazla doldurulması sonucuna varmıştır [66].

Antipas, toz şeklini belirleyen etmenlerin başında gaz ve sıvı metalin özelliklerinin etkili olduğunu belirtmiştir [68].

Anderson ve arkadaşları yaptıkları çalışmada nozuldan çıkan yüksek hızlı gazın daha küçük taneler oluşturduğu sonucuna ulaşmışlardır [70].

German, atomizasyon gazı olarak azot, argon, karbondioksit ve helyumun kullanılabilirliğini belirtmiştir [56].

Yıldız yaptığı çalışmada oksijen anfinitesi yüksek olan metallerde soy gazların kullanılması gereği üzerinde durmuştur [7].

Literatürde atomizasyon işlemini optimize etmek için birçok çalışma yapılmıştır. Miller ve arkadaşları nozul geometrisinde aksenal simetrik ve asimetrik tasarımlar içinde en ince tozların aksenal simetrik olmayan nozul geometrileriyle oluştuğunu tespit etmişlerdir [71].

Mates ve arkadaşları dört farklı nozul üzerinde çalışmalar yapmış, damlacık parçalanmasının dinamik gaz kuvvetleri tarafından gerçekleştirildiğini ve hemen nozul uç bölgesinde meydana geldiğini belirtmişlerdir. Aslında atomizasyonun eriyik çıkışında başlayıp süpersonik bir nozul kullanılarak gaz dinamik kuvvetlerinin de artmasıyla beraber daha ince tozların elde edilebileceğini görmüşlerdir. [71].

Mates ve Settles tasarladıkları dairesel yarıklı süpersonik nozullun yüksek dinamik basınç kuvvetlerine sahip olduğunu ve yakından eşlemeli sistemlerde daha verimli çalıştığını belirtmişlerdir [60].

Aksoy ve Ünal yaptıkları çalışmada atomizasyon gaz basıncının artmasıyla birlikte toz boyutunun da küçüldüğü göstermiştir. Akış borusu çıkıntı mesafesinin azalmasıyla birlikte gaz/sıvı kütle oranı artmaktadır, eriyik akış miktarının azalması sabit basınç altında gaz dolaşım bölgesinin etkisindedir [72].

Özbilen yaptığı çalışmada uydulaşmayı şöyle tanımlamıştır, farklı sıcaklıklarda ve ölçülerdeki tozların kule içinde uçuşma esnasında hızlı soğumuş daha küçük tozların daha yavaş soğuyan iri tozlar üzerine yapışarak oluşturduğu bir yapıdır. Ayrıca atomize edilecek metalin oksijene olan ilgisi fazla olduğunda ortamdaki oksijen miktarı ve gaz basıncının kaba toz oluşumunu kontrol edilebileceğini, toz yüzey oksitlerinin kalınlıklarının homojen olmamasının ise yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkilediğini savunmuştur [44].

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında gaz atomizasyon metodu kullanılarak AA 1070 (Etial-7) kalite saf alüminyum metali özgün olarak tasarladığımız çift yarıklı nozul kullanılarak atomize edilmiştir.

Özgün bir tasarıma sahip çift yarıklı nozul kullanılarak, toz üretim aşamasında toz boyut ve dağılıma doğrudan etki eden gaz basıncı, akış borusu iç çapı ve eriyik sıcaklığı gibi parametreler değiştirilerek ekonomik değeri yüksek ince boyutlu ve dar bir boyut dağılımına sahip saf alüminyum tozu üretilmiştir.

Çalışmalarımızda yüksek saflıkta argon (Ar) gazı kullanılmıştır. Gaz basıncı 15-40 bar aralığında çalışılmış ve bu gaz değerlerine istinaden ergitme sıcaklığı ise 810 °C,-830 C⁰ aralığında, metal eriyik akış borusu iç çapı ise 3mm-5mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Tüm bu şartlar kombine edilerek optimizasyon şartları belirlenmiş ve hedeflenen toz boyut ve dağılımı gerçekleştirilmiştir.

Atomizasyon başlangıcında kullanılan metalin yaklaşık %80,82'si küresel morfolojiye sahip tozlara dönüştürülmüştür. %10,18 oranındaki toz kaybının ise kule yan duvarlarına yapışan ve vakum pompasındaki filtrede tutulamayan tozlardır.

Atomizasyon sonrasında elde edilen tozlar toz toplama ve siklon toz toplamalardan ayrı ayrı alınarak tane boyutu yapılmıştır. Ortalama tane büyüklüğü 25,4µm olarak ölçülmüştür. Alınan tozlar uygun şekilde paketlenip muhafaza edilmiştir.

Çalışma sonunda elde ettiğimiz numuneler üzerinde yapılan tane büyüklüğü, XRD, SEM ve BET analizleri yapılmış ve sonuçlar paylaşılmıştır.

4.1. Malzeme

Bu tez çalışmasında kullanılan AA 1070 (Etial-7E) kalite saf alüminyum Eti Alüminyum A.Ş. Dökümhane Müdürlüğünden tedarik edilmiştir. Bu çalışmada düşey tasarlanmış yakından eşlemeli gaz atomizasyon ünitesi kullanılarak saf alüminyum tozu üretilmiştir.

Aşağıda çalışmamızda kullandığımız AA 1070 kalite saf alüminyum külçeye ait kimyasal kompozisyon ve fiziksel özellikler verilmiştir.

Çizelge 4.1. AA 1070 (Etial-7) saf alüminyum kimyasal kompozisyonu

ELEMENTLER	Al	Fe	Si	Ti	Mn	Zn	Cu	Mg
% ORAN	99,7	0,13	0,06	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03

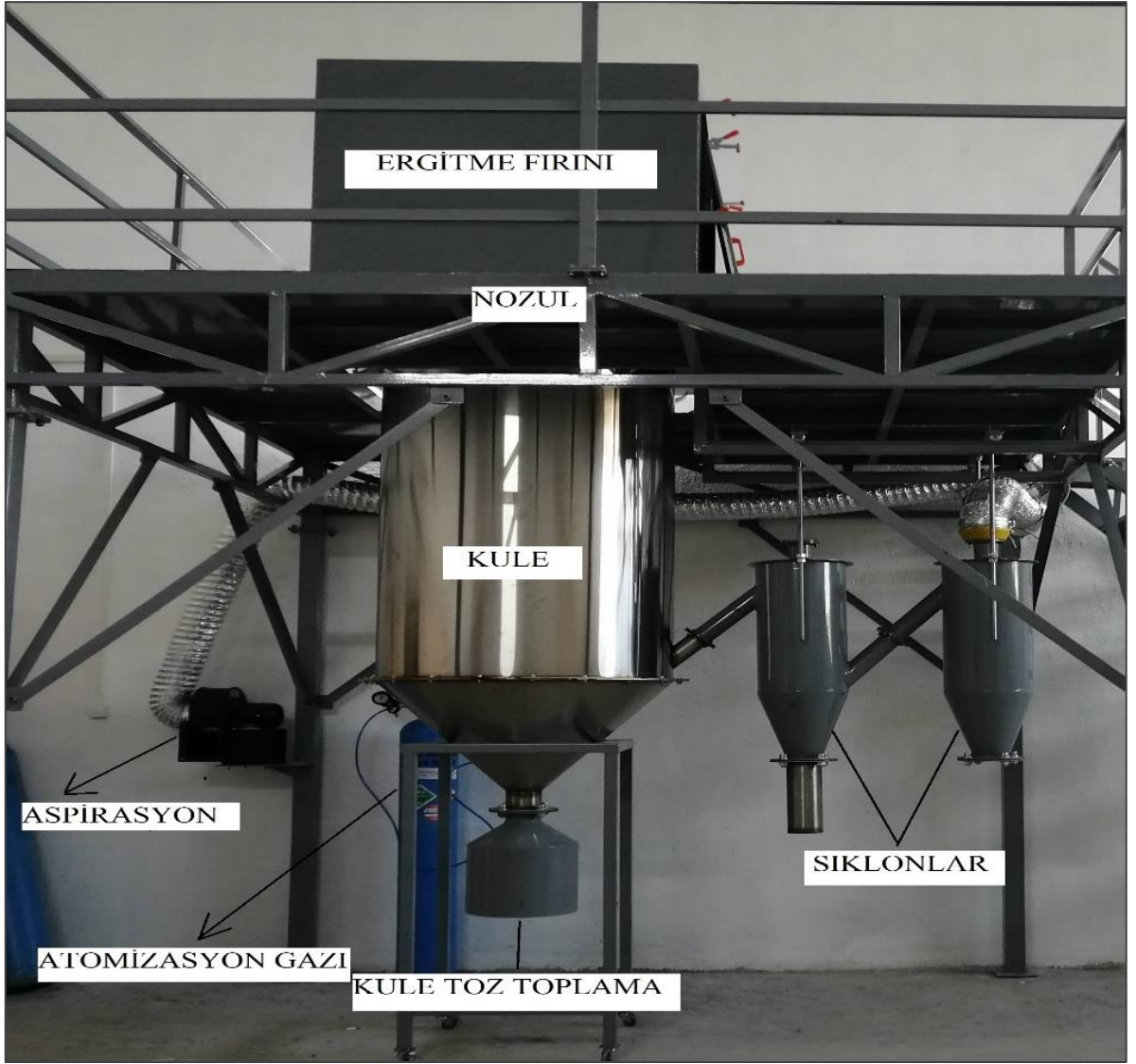
Çizelge 4.2. AA 1070 (Etial-7) saf alüminyum fiziksel özellikleri

FİZİKSEL ÖZELLİKLER	
Madde hali	Katı
Yoğunluk	2,7 g/ cm ³
Ergime Noktası	660 °C
Kaynama Noktası	2519 °C
Ergime Isısı	10,71 kJ/mol
Buharlaştırma Isısı	294 kJ/mol
Isıl İletkenlik	237w/m.K
Birinell Sertlik	22

Elde edilen tozlara ait yapılan testler ileriki bölmlerde ayrıntılı olarak verilmiştir

4.2. Gaz Atomizasyon Ünitesi

Bu çalışmada Resim 4.1.' de belirtilen gaz atomizasyon ünitesi kullanılmıştır. Kule ana gövde ve siklonlar AISI-316L paslanmaz çeliktir. Kulenin boy ve çapı atomizasyon şartlarına engel olmayacak şekildedir.



Resim 4.1. Gaz atomizasyon ünitesi

Yakından eşlemeli düşey tasarlanmış gaz atomizasyon ünitesinin ana yapı elemanları, bu çalışma için beş kısımda ele alınacaktır.

- Ergitme fırını
- Çift yarıklı nozul
- Kule
- Kule-siklon toz toplama
- Atomizasyon gazı

4.2.1. Ergitme Fırını

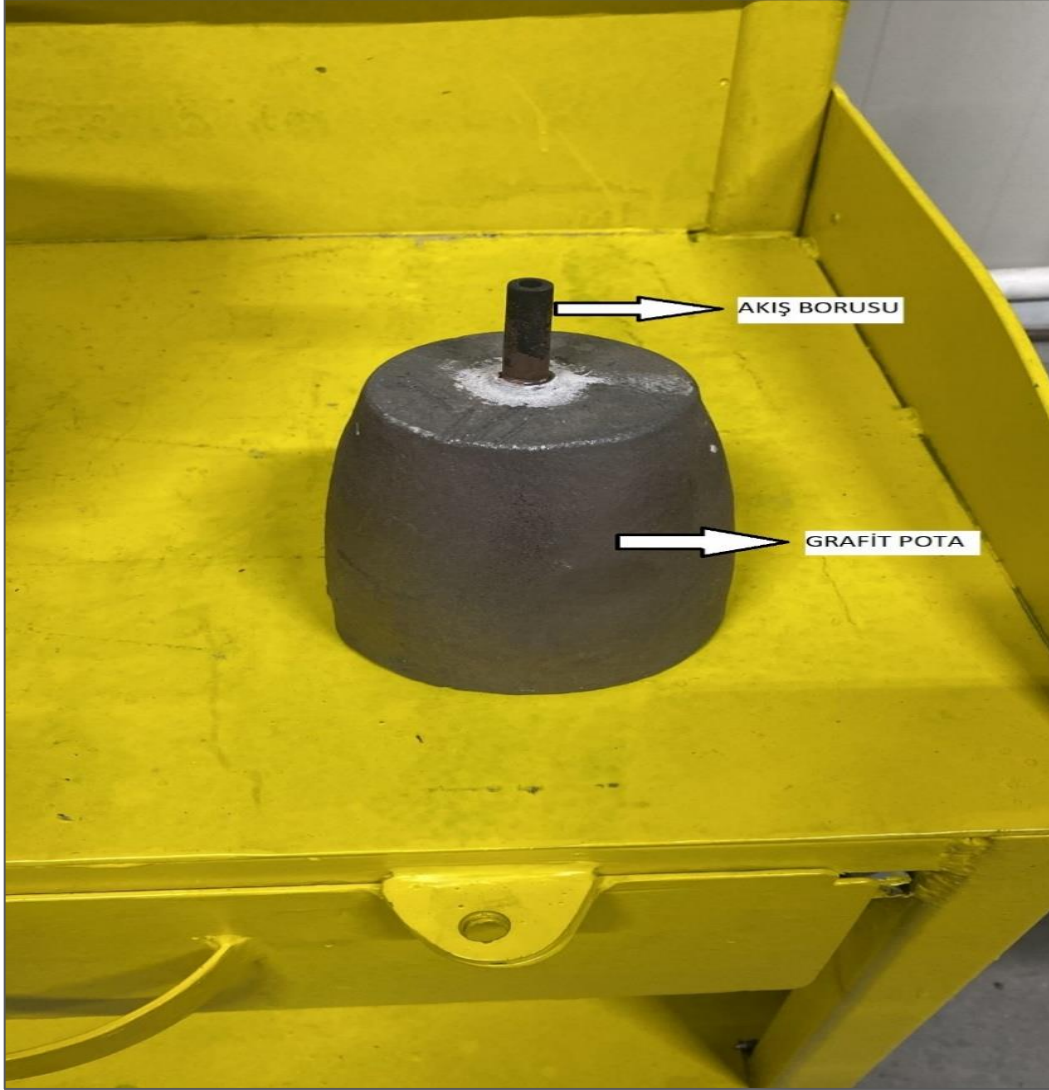
Gaz atomizasyon sistemlerinin ana bileşenlerinden olan ergitme fırını Resim 4.2. de verilmiştir. Ergitme fırını maksimum 1300 °C sıcaklığa çıkmaktadır. Fırın dış gövde alt kısmında bulunan yataklı rulmanlar vasıtasıyla kule üstüne sürülebilmektedir.



Resim 4.2. Ergitme fırını

Fırın içine yerleştirilmiş SiC pota içinde ergitme işlemi gerçekleştirilmektedir. Ergimiş metali bir kepçe vasıtasıyla nozul üstüne entegre edilmiş küçük bir grafit potaya dökerek atomizasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Grafit pota ve akış borusu Resim 4.3.' de gösterilmiştir. Dış çapı 10 mm olan akış boruları grafit pota tabanı delinerek yerleştirilmiştir. Atomizasyon esnasında fırın ve SiC potaya zarar vermemek için 10 °C /dk kademeli ısıtma yapılmıştır. Bu çalışmada uygulanacak sıcaklık aralıkları olan 800 °C -830°C aralığında sağlıklı kontrol edilebilmesi için sıcaklık kontrol panosu ve termokupl kullanılmıştır.

Deneyler esnasında gerekli olduğu durumlarda ergitme potasına katı metal şarjı yapılmadan önce şarj edilecek metal ön ısıtmaya tabi tutulup iş güvenliği kurallarına riayet edilmiştir. Deneyler esnasında gözlük, siperlik, alüminize yanmaz tahaffuz malzemeleri kullanılmıştır.



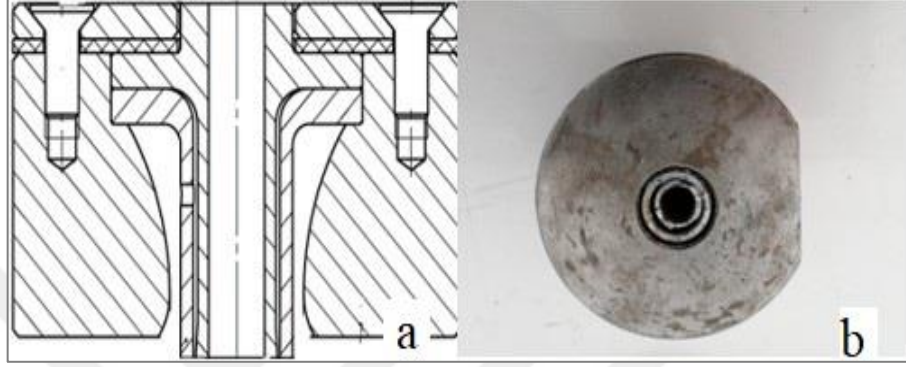
Resim 4.3. Grafit pota ve akış borusu

4.2.2. Çift Yarıklı Nozul

Özgün olarak tasarladığımız çift yarıklı nozul, paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Şekil 4.4.'de görüldüğü üzere iki adet gaz geçiş bölgesine ve geometriye sahiptir. Yapılan bu özgün çalışma ile literatürde bilinen Laval ve Mannesmann tipi iki farklı geometriyi birleştirmekteyiz. Bu nozul hem yakından eşlemeli hem de serbest düşmeli sistemlere montajlanarak çalışılabilir. Tasarladığımız çift yarıklı bu nozul ile yapılan deneyler boyunca metal akış borusu içinde ve ucunda katılaşma, pozitif basınç oluşumu, gaz

genleşme bölgesinin kapanması gibi atomizasyonu durduracak etkilerle karşılaşmamıştır.

Nozul montajı atomizasyon kulesi üst merkezine yapılmıştır. Atomizasyon gaz bağlantıları ve iletimi gerçekleştirilerek bir manometre yardımıyla giriş basınçları farklı değerlerde çalışılmış ve optimum aralık belirlenmiştir.



Resim 4.4. a) Çift yarıklı nozul kesiti, b) İmal edilmiş çift yarıklı nozul resmi

Nozul tasarımına bağlı olarak akış borusu uç çıkıntı mesafesi 2.2 mm olarak tasarlanmıştır. Tasarımda yapılan bu düzenleme atomizasyon esnasında grafit akış borusunun karşılaşacağı bir termal şok kaynaklı kırılmada akış borusu gibi davranmakta ve sistem çalışmaya devam etmektedir. Termal şok etkisinin ortadan kaldırılması amacı ile akış borusu ve grafit pota her atomizasyon öncesi ısıtılmaktadır.

4.2.3. Atomizasyon Kulesi

Atomizasyon kulesi 3mm et kalınlığına sahip, parlak AISI 316L paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Kule atomizasyon esnasında tozların yan duvarlara çarparak şekil değiştirmesine müsaade etmeyecek çapta, atomize tozların da soğuyarak katılaşmasına elverişli şekilde yüksek imal edilmiştir (Resim 4.5.).

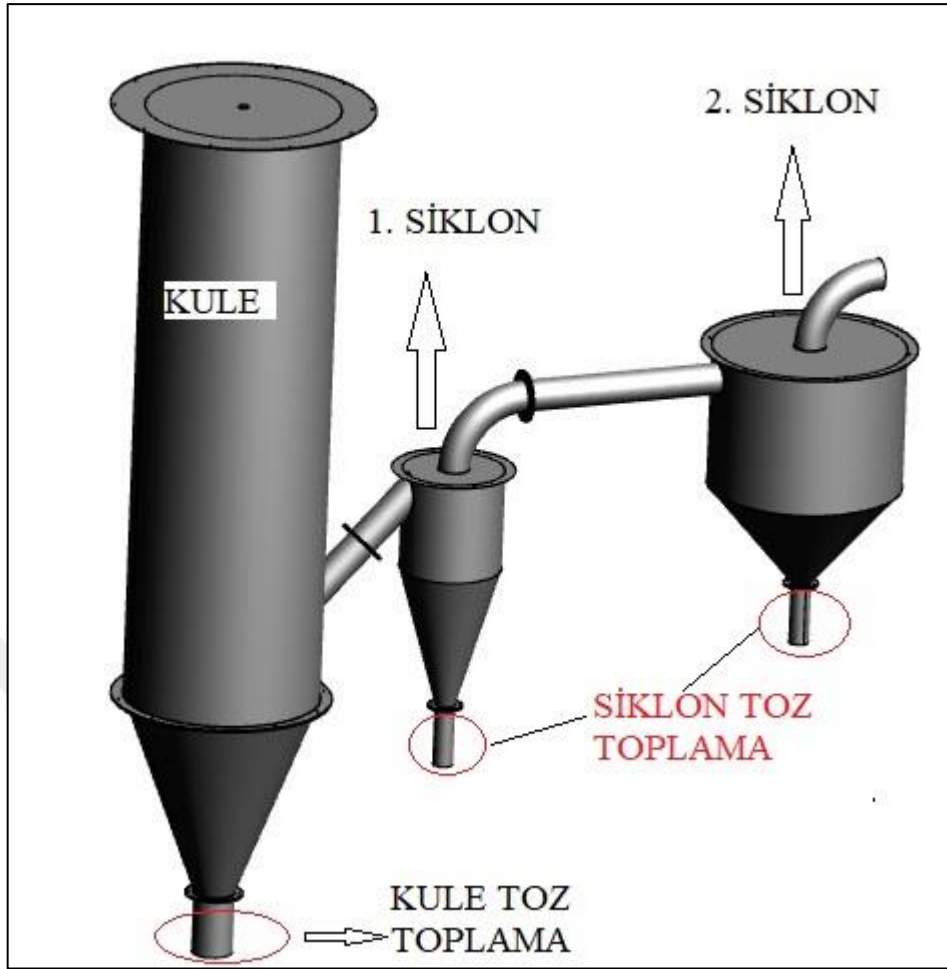
Yapılan deneylerde, atomizasyon esnasında özellikle ince tozların statik yüklenmesinden dolayı kule iç yüzeylerine yapıştığı gözlenmiştir. Her bir deney öncesi bu kalıntılar fırça yardımıyla temizlenmiştir. Kule üst kapağı, kule alt konik, kule toz toplama ve siklon geçişleri flanşlı imal edilmiştir. Atomizasyon sonrasında kule toz toplama kısmında özellikle siklon bölümlerine göre daha kaba taneler elde edilmiştir.

Ayrıca ince tozların tutulması ve atomizasyon gazının tahliyesi amacı ve toz sınıflandırılması için iki adet siklon kullanılmıştır. EN 61241-2-1 standardına göre, bir metreküp havada 65 gr. 10 μ m altı alüminyum tozlarının 10 mJ' lük enerji etkisiyle patlayıcı etkisi olduğundan özellikle kule içinde salınım yapan ince tozların tahliyesi için ikinci siklon çıkışına bir aspiratör bağlanmıştır.



Resim 4.5. Atomizasyon kulesi, siklonlar ve aspiratör.

Atomizasyon kule ve bağlantı elemanlarının üç boyutlu görünüşü Resim 4.6.' da verilmiştir.



Resim 4.6. Atomizasyon kulesi ve siklonlar

4.2.4. Kule-Siklon Toz Toplama

Kule konik alt kısmında ve siklon konik alt kısımlarında bulunan toz toplamalar her deney öncesi çıkartılmış, özenle temizlenmiş ve tekrar yerlerine takılmıştır. Kule toz toplamada, daha önce de bahsedildiği üzere siklonlara göre kaba tozların bulunduğu görülmüştür.

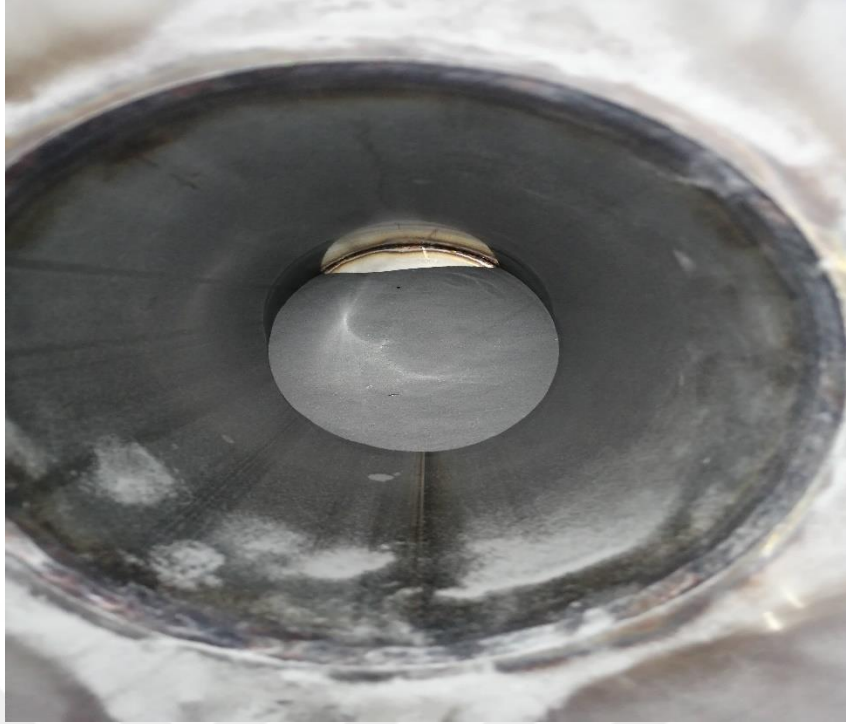
Aşağıda sırasıyla kule, birinci siklon, ikinci siklondan alınan tozların resimleri verilmiştir.



Resim 4.7. Kule toz toplama ünitesi



Resim 4.8. Birinci siklon toz toplama ünitesi



Resim 4.9. İkinci siklon toz toplama ünitesi

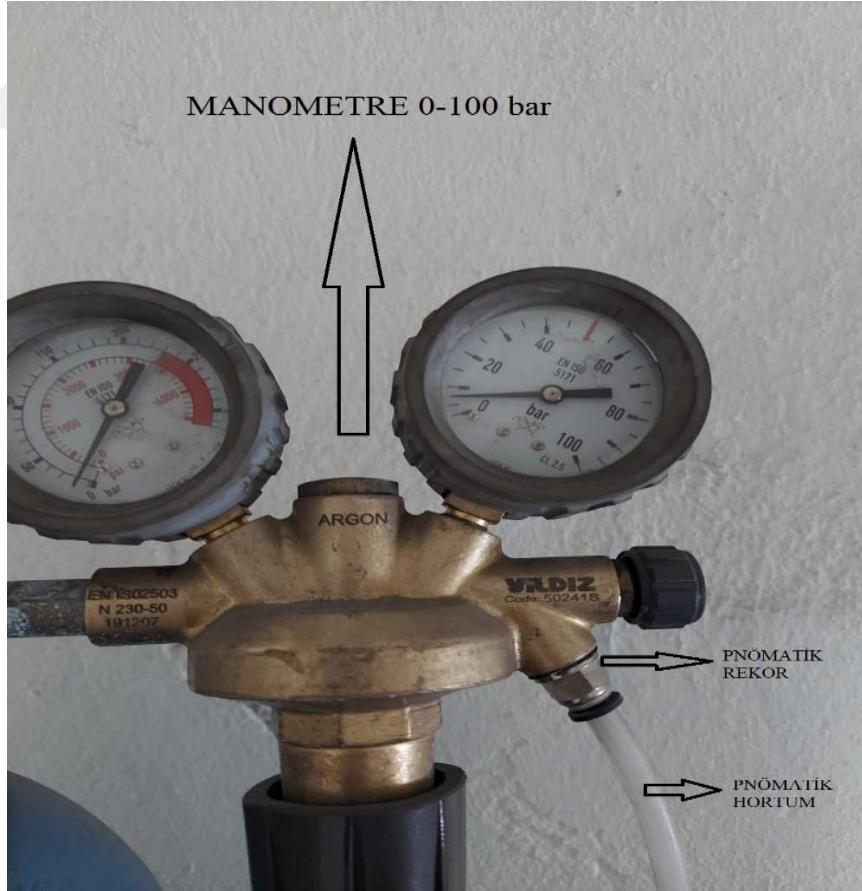
Yaptığımız çalışmalar sonunda ikinci siklonun toz boyut ve dağılımının diğer kısımlara göre daha ince olduğu görülmüştür.

4.2.5. Atomizasyon Gazı

Gaz atomizasyon sistemlerinde önemli parametrelerden bir tanesi de kullanılan gaz ve atomizasyon gaz basıncıdır. Bu çalışmada yüksek saflıkta argon (Ar) gazı kullanılmıştır (Resim 4.10.). Gaz basıncı parametrelerini değiştirmek için argon tüpü üstünde maksimum çıkış basıncı 100 bar olan bir manometre kullanılmıştır (Resim 4.11.). Manometre nozul gaz bağlantısı dış çapı sekiz mm olan pnömatik poliüretan hortumla gerçekleştirilmiştir. Nozul ve manometre hortum girişleri için çap 8mm pnömatik rekor kullanılmıştır. Argon tüpü 230 bar iç basınca sahiptir. Gaz akış debisi 35 bar optimize basınç altında 12 L/dak. dır.



Resim 4.10. 230 bar iç basınca sahip argon tüpü, bağlantı hortumu ve manometre



Resim 4.11. Manometre, hortum ve pnömatik rekor

4.3. Saf Alüminyum Tozu Üretim Adımları

Yapılan bu çalışmada hammadde olarak AA 1070 kalite saf alüminyum kullanılmıştır. Atomizasyon sırasında nozul geometrisi sabit tutulurken, gaz basıncı, akış borusu iç çapı, eriyik sıcaklığı istenilen toz boyut ve morfolojisi ortaya çıkana kadar denemeler yapılmış, ideal şartlar oluştuğunda ise alüminyum toz üretimi gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada yakından eşlemeli ve çift yarıklı nozul sistemi kullanılmıştır. Farklı gaz basınçları 15-40 bar aralığı testler yapılmış en ideal toz boyut ve morfolojisinin 35bar olduğu tespit edilmiş ve bu optimizasyonda tozlar üretilmiştir.

Sıvı metal viskozitesini azaltmak amacıyla ergime sıcaklıklarının üstündeki sıcaklıklara çıkılmıştır. Özellikle 810-830 °C aralığında çalışmalar yapılmış ve en ideal çalışma sıcaklığının 830 °C olduğu tespit edilmiştir.

Atomizasyon öncesinde nozul, kule üst flanş merkezine sabitlenmiştir. Özellikle nozulun kule üstüne sabitlenmesinin nedeni bağlantı elemanlarına yüksek sıcaklığın zarar vermemesi ve olası bir aksi durumda nozula hızlıca müdahale edilebilmesidir.

Atomizasyonda, farklı iç çaplardaki akış boruları kullanılmış ve en ideal akış borusu iç çapının 3mm olduğu saptanmıştır.

Gerçekleştirdiğimiz çalışmalar maddeler halinde kısaca sırasıyla aşağıda verilmiştir.

Ön hazırlık;

- İki kilogram saf alüminyum külçe fırın içerisine alınarak ergitme işlemi başlatılmıştır. Elektrik panosu üzerinden sıcaklık 830 °C 'ye set edilmiştir.
- Nozul, kule üst flanş merkezine sabitlenmiş ve gaz bağlantı aparatları takılmıştır.
- Argon tüpündeki iç basınç ve manometre çıkış basıncı kontrolleri yapılmıştır. Çıkış basıncı 35 bar olacak şekilde ayarlanmıştır.

- Grafit pota ve akış borusu ısıtması bir pürmüz yardımıyla yapılmıştır.

Atomizasyon işlemi sırasında;

- 830 °C 'ye ulaşmış olan fırın sıcaklığı sonrasında fırın içinde ergimiş halde olan sıvı alüminyum üzerinde oluşan oksit zarlaşmaları temizlenmiştir.
- Ön ısıtma yapılan grafit pota ve metal akış borusu nozul üzerine yerleştirilmiştir.
- Fan motoru çalıştırılmıştır.
- Ergime sıcaklığının üstüne çıkarılmış metal, bir kepçe yardımıyla alınıp nozul üzerindeki grafit potaya döküldüğü anda gaz devreye alınmıştır. Akış borusu içinden geçen sıvı metal, yüksek hızdaki gazla temas ederek parçalanmıştır.
- Atomizasyon işlemi sıvı metal bitinceye kadar kesintisiz devam etmiştir.

Atomizasyon işlemi sonrasında;

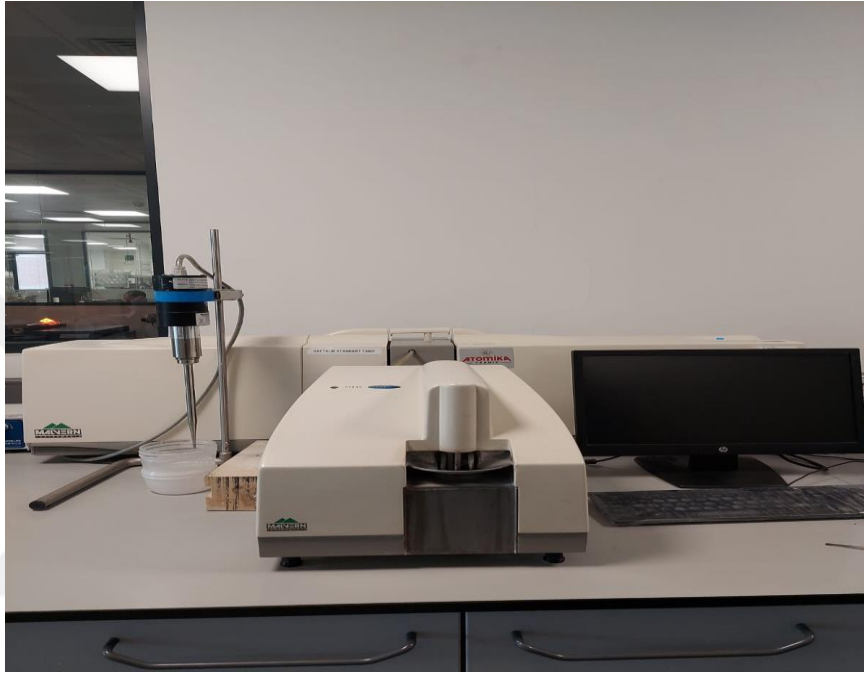
- Gaz sistemi kapatılmıştır.
- Ergitme fırını kademeli soğumaya bırakılmıştır.
- Fan sistemi yaklaşık 5 dakika daha çalıştırılıp kapatılmıştır.
- Kule üst flanşı çıkartılarak kule yan duvarlarına yapışan tozlar bir fırça yardımıyla temizlenmiştir, bu işlemden sonra fan tekrar 2 dakika daha çalıştırılmıştır. Fanın sıklıkla çalıştırılmasının sebebi havada askıda tozların daha yoğun bir ortam meydana getirmeden tahliyesi ve kazanımıdır.
- Kule ve siklon toz toplamalar açılarak üretimi gerçekleştirilen tozlar bir kaba alınmıştır.

Toz üretim ideal şartları yakalanana kadar yukarıdaki işlemler sırasıyla tekrar edilmiştir.

4.4. Tane Büyüklüğü Analizi

AA 1070 kalite saf alüminyumdan elde edilen tozların tane büyüklüğü, Eti Alüminyum A.Ş. Kalite Kontrol ve AR-GE Laboratuvarında bulunan Malvern

Mastersizer 2000 cihazı ile yapılmıştır (Resim 4.12.). Tane büyüklüğü analizi öncesinde atomize tozlar, topaklanma önleyici olan Sigma-Aldrich tarafından tedarik edilen Nonidet P-40 çözeltisiyle karıştırılıp bulamaç haline getirilmiştir. Karışım katı/sıvı konsantrasyon oranı, 0,1/1 olarak çalışılmıştır. Bulamaç haline getirilen karışım analiz öncesinde cihaz içerisinde beş dakika süre ile sulu ortamda ultrasonik muameleye tabi tutulmuştur. Optimum çalışma konsantrasyonu uygulamalara bağlı olarak farklılık gösterebilir.



Resim 4.12. Malvern tane büyüklüğü analiz cihazı

4.5. XRD Analiz Çalışmaları

AA 1070 kalite saf alüminyumdan elde edilen tozların faz analizleri, Eti Alüminyum A.Ş. Kalite Kontrol ve AR-GE Laboratuvarında bulunan GNR EXPLORER marka xrd cihazında yapılmıştır (Resim 4.13.). Cihaz theta/theta dikey gonyometre tasarımına sahiptir (Resim 4.14.). X-ışını kaynağı bakırdır. Üretilen saf alüminyum tozu analizi, tarama açısı 5-70⁰ arasında yapılmıştır.



Resim 4.13. GNR EXPLORER xrd cihazı

4.6. SEM Analiz Çalışmaları

SEM analizi, elde edilen toz numunelerinin biçim ve yapısı hakkında bilgi verir. Atomizasyon sonrasında elde edilen tozların yüzey oksitleri, yapısal deformasyonlar, dendritik oluşumlar gibi yüzey karakteristikleri incelenmiştir.



Resim 4.14. SEM cihazı

4.7. BET Analiz Çalışmaları

Optimizasyon şartlarından sonra üretilen tozların yüzey alan incelemeleri Eti Alüminyum A.Ş. Kalite Kontrol ve AR-GE Laboratuvarında bulunan NOVA 4200e BET

cihazında yapılmıştır (Resim 4.15.). Toz numunelerine analiz öncesinde 105 °C ‘de degasser işlemi uygulanmıştır.



Resim 4.15. BET analiz cihazı

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Yapmış olduğumuz bu tez çalışmasında AA 1070 kalite saf alüminyum özgün tasarımı olan çift yarıkli nozul ile atomize edilmiş ve optimizasyon şartları belirlenmiştir. Külçe halinde tedarik edilen hammadde fırın içerisine girebilecek ölçülere küçültülmüştür. Gaz basıncı, akış borusu iç çapı, ergime sıcaklığı gibi atomizasyon parametreleri optimize edilmiştir. Optimize edilmiş parametreler şöyle sıralanabilir, gaz

basıncı; 35 bar, akış borusu iç çapı; 3mm, ergime sıcaklığı; 830⁰ C dir. Üretilen tozlar öncelikle elek analizine tabi tutulmuştur.

Çizelge 5.1. Deneysel çalışmalar

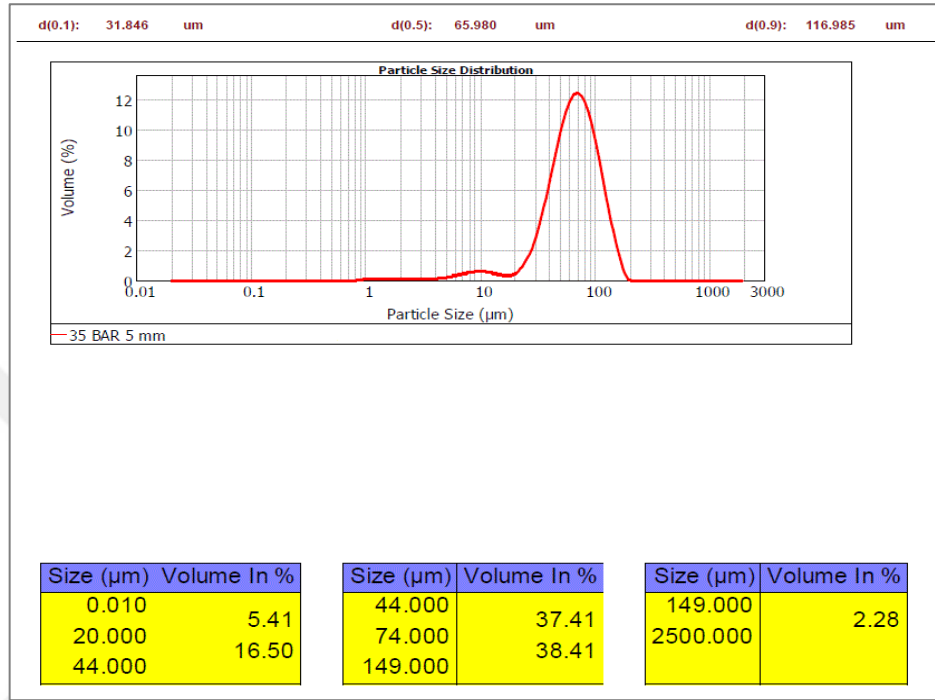
Deney No	Akış Borusu İç Çapı (mm)	Sıcaklık (°C)	Gaz Basıncı (bar)	Ortalama Toz boyutu (d ₅₀) (µm)
1	5	810	15	99,5
2	5	810	25	80,3
3	5	810	35	71,8
4	5	820	15	90,9
5	5	820	25	82,6
6	5	820	35	68,6
7	5	830	15	88,6
8	5	830	25	74,3
9	5	830	35	66,0
10	4	810	15	90,3
11	4	810	25	74,3
12	4	810	35	63,2
13	4	820	15	87,6
14	4	820	25	73
15	4	820	35	61,6
16	4	830	15	83,9
17	4	830	25	70,5
18	4	830	35	58,6
19	3	810	15	81,2
20	3	810	25	63,1
21	3	810	35	50,8
22	3	820	15	78,2
23	3	820	25	53,1
24	3	820	35	41,15
25	3	830	15	63,5
26	3	830	25	37
27	3	830	35	25,4

Yapılan deneysel çalışmalardan da görüleceği üzere ulaşılan en ince toz boyutu 830 °C sıcaklıkta, 35 bar gaz basıncında, 3mm iç çapa sahip akış borusu ile 25,4 mikrondur.

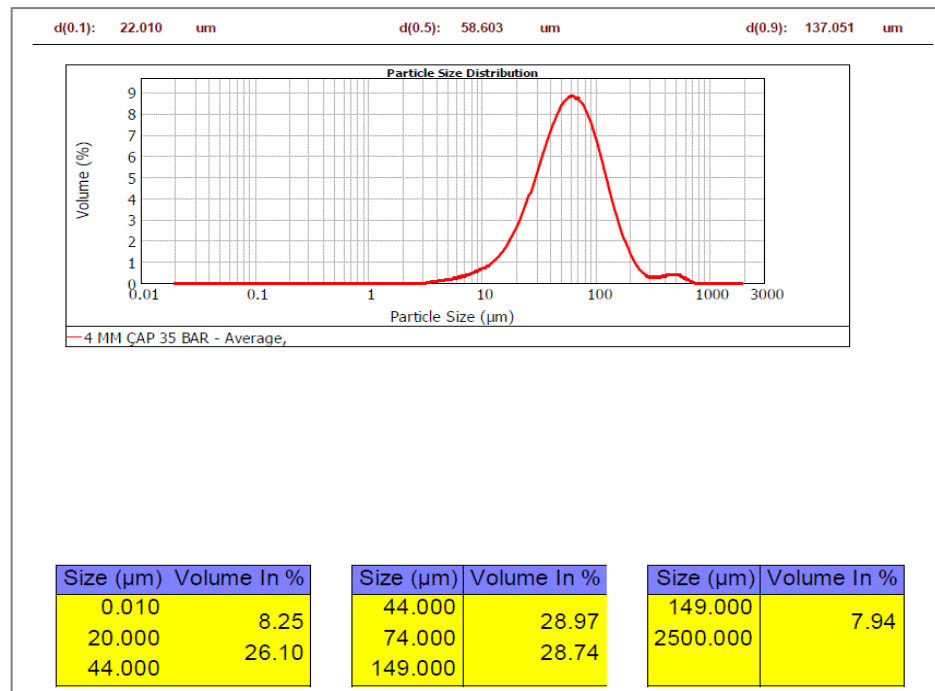
5.1. Tane Büyüklüğü Analiz Sonuçları

Kule ve siklonlardan alınan tozlar homojen şekilde karıştırılmış ve tane büyüklüğü analizi yapılmıştır. Çizelge 5.2.'de cihaz verileri ve Şekil 5.1.'de cihaz çıktısı paylaşılmıştır.

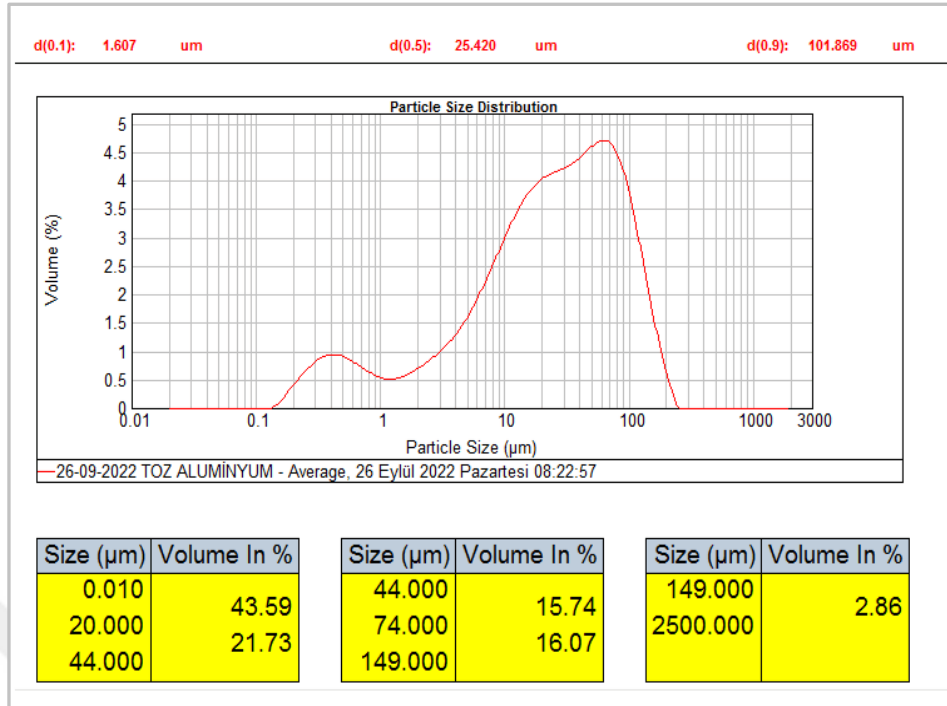
Artan gaz basıncı ve ergime sıcaklığına karşı akış borusu iç çapındaki azalma toz boyutunu küçültmüştür. Gaz basıncının 40 bar ve üzerindeki basınçlarda toz morfolojisinin ve tane büyüklüğünün olumsuz etkilendiği görülmüştür. Oluşan tozlar yapraksı bir görünümündedir.



Şekil 5.1.Deney:9, tane boyutu analizi sonuçları



Şekil 5.2.Deney:18, tane boyutu analizi sonuçları



Şekil 5.3. Deney.27, tane boyutu analizi sonuçları

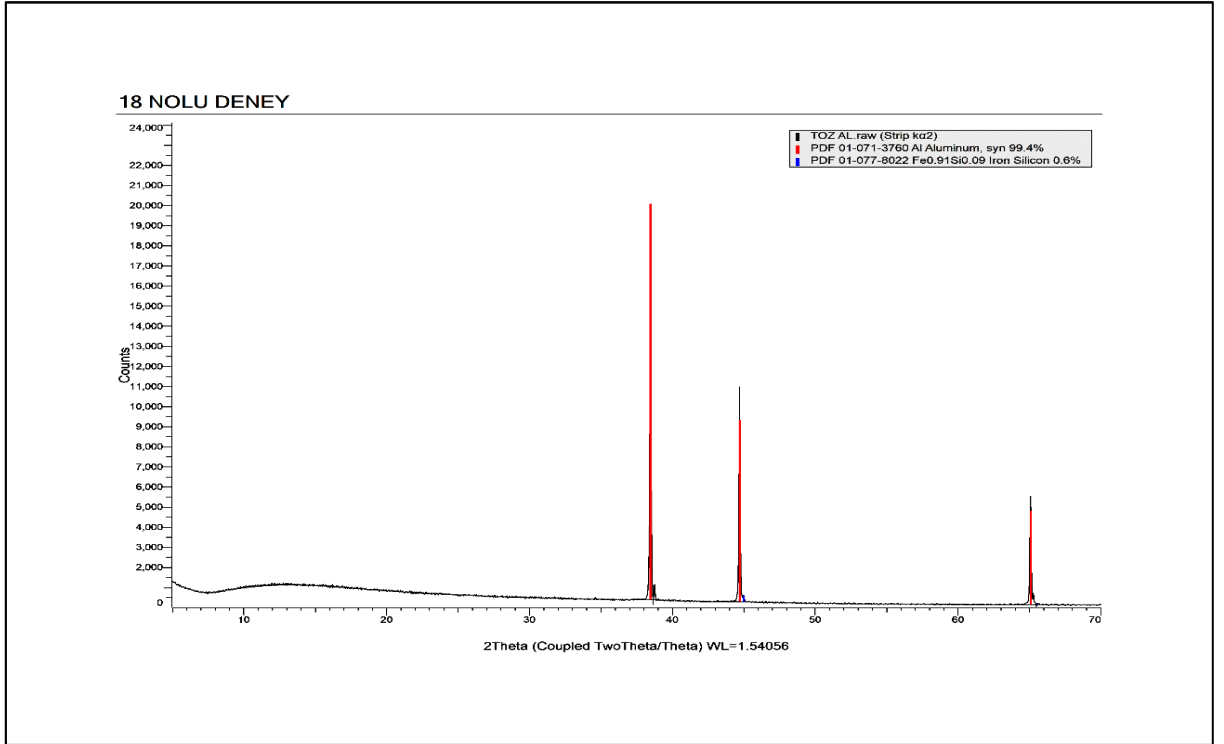
Çizelge 5.2. Tane boyutu cihaz verileri

Deney No	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀
9	31,85	65,98	115,99
18	22,01	58,6	137,05
27	1,6	25,4	101,9

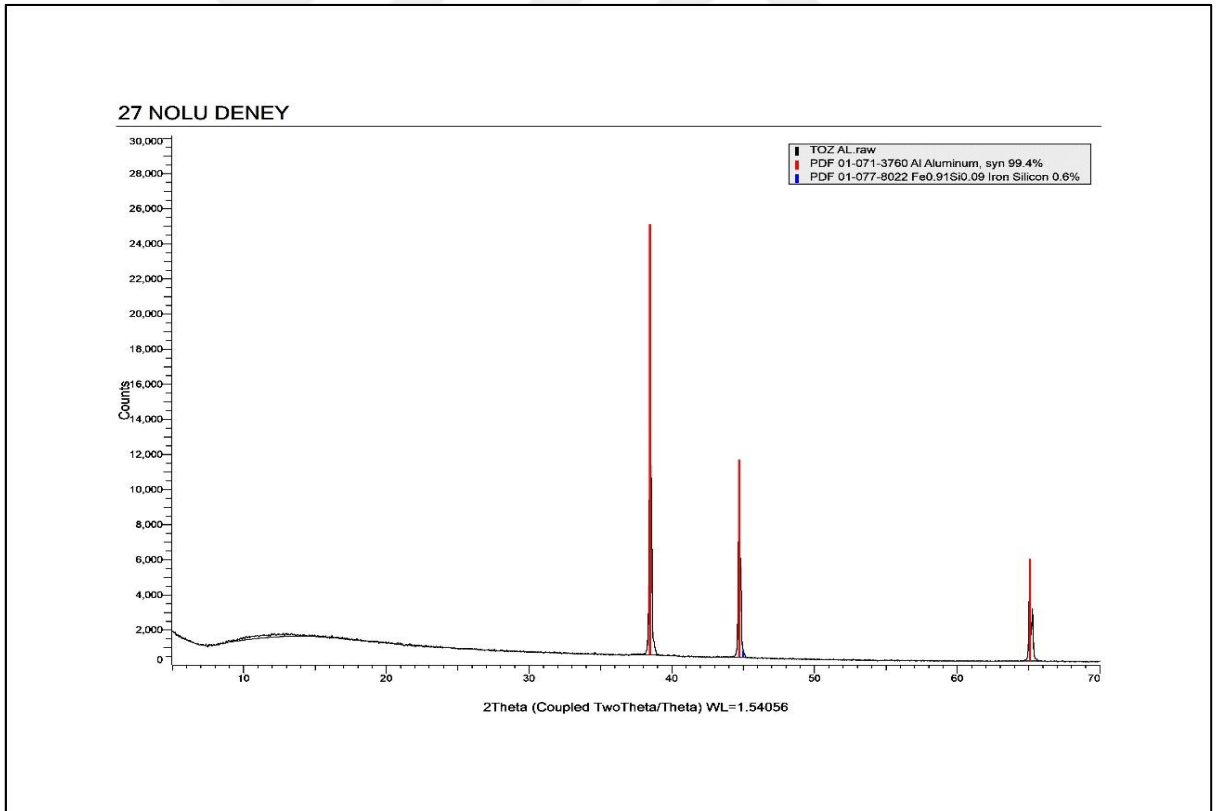
Yapılan tane büyüklüğü analizleri sonucunda sıcaklık ve gaz basıncı sabit tutulup boru iç çapı daraltıldığında tane büyüklüğünün küçüldüğü söylenebilir. Boru iç çapının azalması ile beraber birim zamanda atomizasyon bölgesine iletilen sıvı metal miktarı azalırken aynı oranda gaz tarafından aktarılan kinetik enerji artmakta ve dolayısıyla daha küçük taneler oluşmaktadır.

5.2. XRD Analiz Sonuçları

XRD numune kabına 20 kN. basınç altında preslenen toz numuneler $2\theta=5-70^\circ$ aralığında analiz edilmiştir. X-ışını difraksiyonu malzemelerin kristal yapısına ve fazlarına zarar vermeyen tahribatsız bir muayene tekniğidir. Kaba ve ince tozlara ait analizler aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.4.Deney:18, XRD görüntüsü

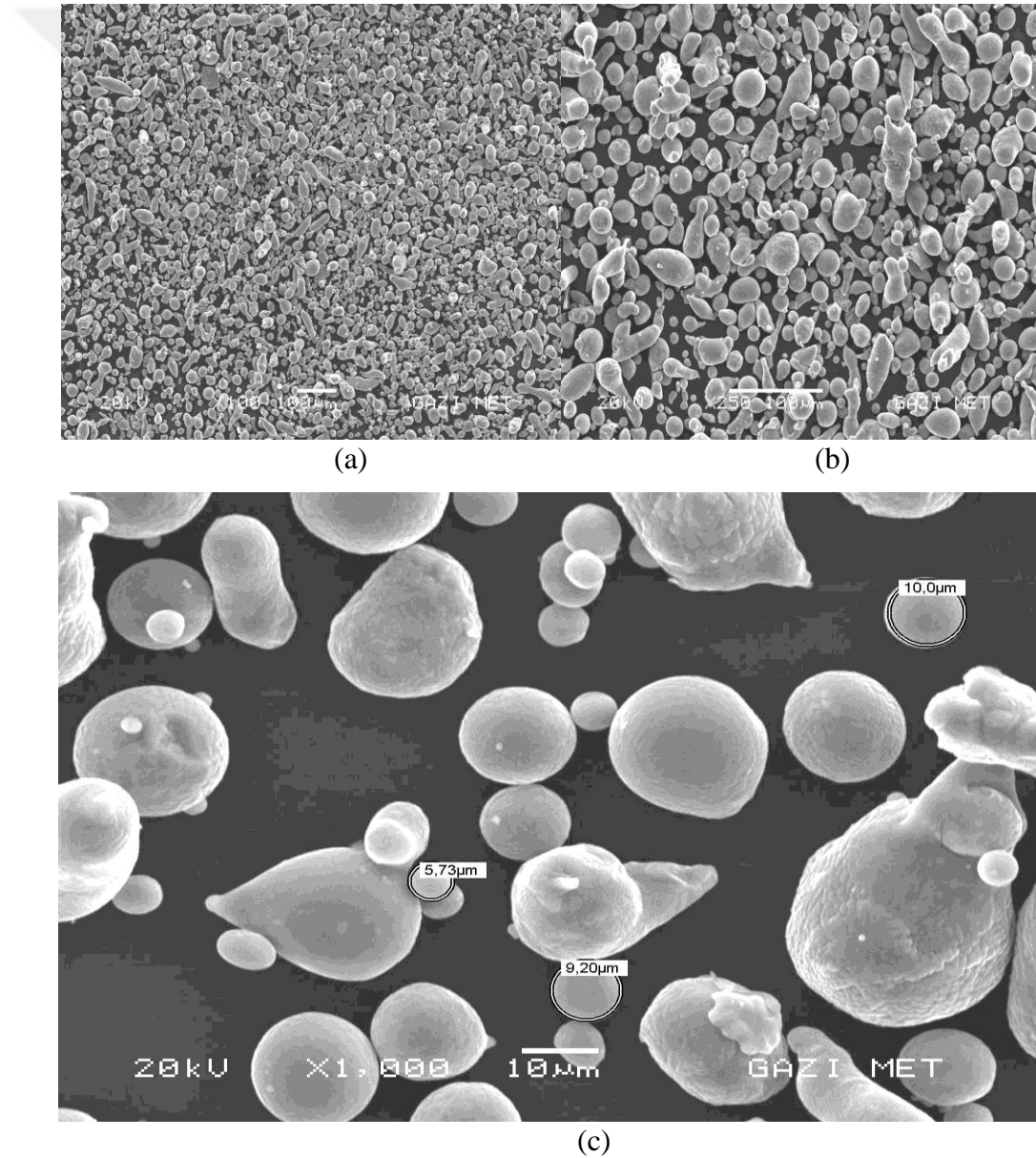


Şekil 5.5.Deney:27, XRD görüntüsü

27 nolu deneyde elde edilen tozlar preslenerek XRD cihazında $2\theta = 5-70$ derece arası analiz edildi. Difraktogram incelendiğinde ana faz yapının metalik alüminyum olduğu görülmüştür. Alüminyum tozunun kafes yapısı yüzey merkezli kübiktir.

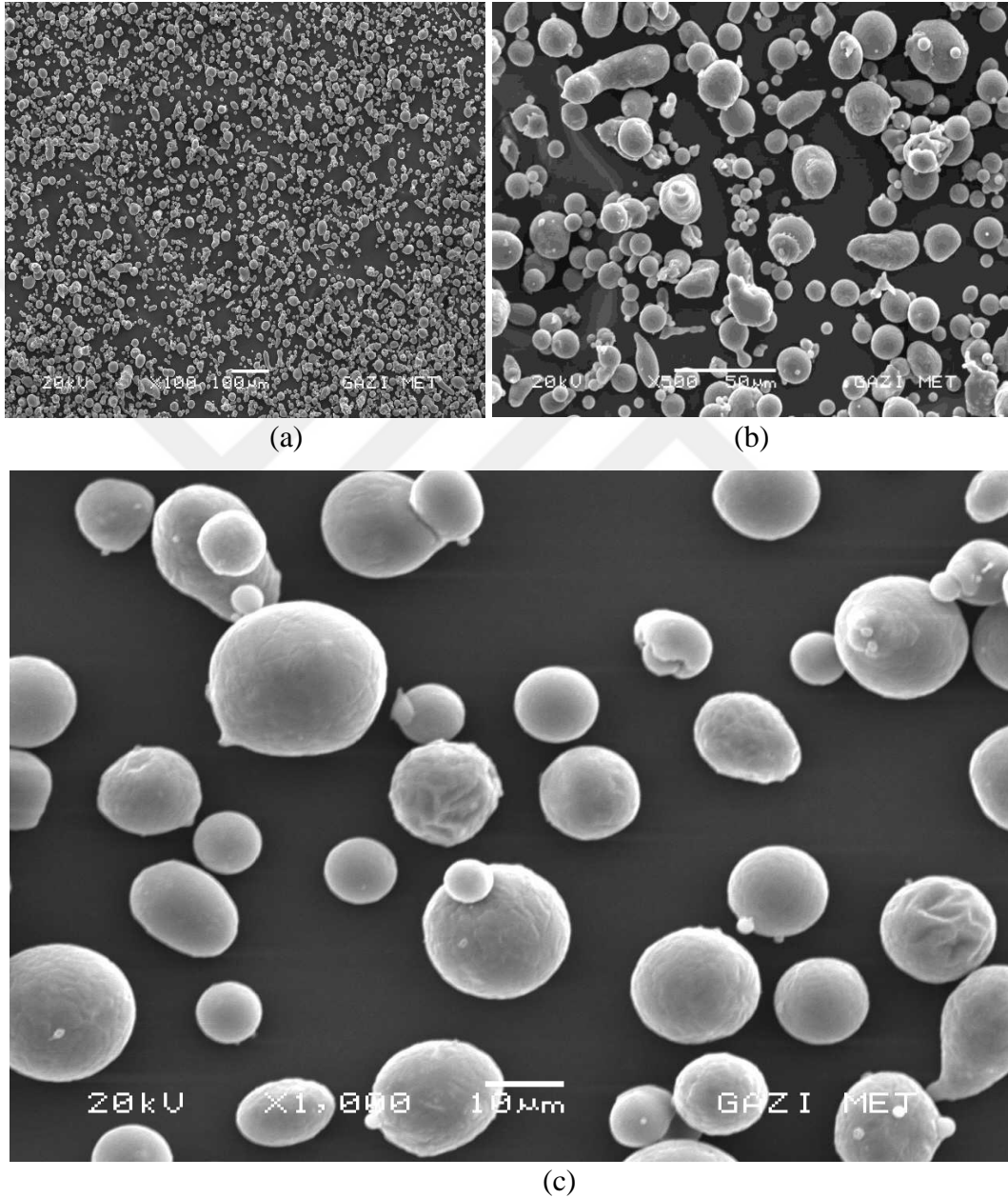
5.3. SEM Analiz Sonuçları

SEM analizlerinde özellikle, 9-18-27. Deney verileri çalışılmış ve cihaz sonuçları ayrıntılı olarak aşağıda verilmiştir. Özellikle bu çalışmada optimize edilmiş sıcaklık, gaz basıncı ve akış borusu iç çapının toz morfolojisi üzerindeki etkileri SEM görüntüleri ile doğrulanmıştır.



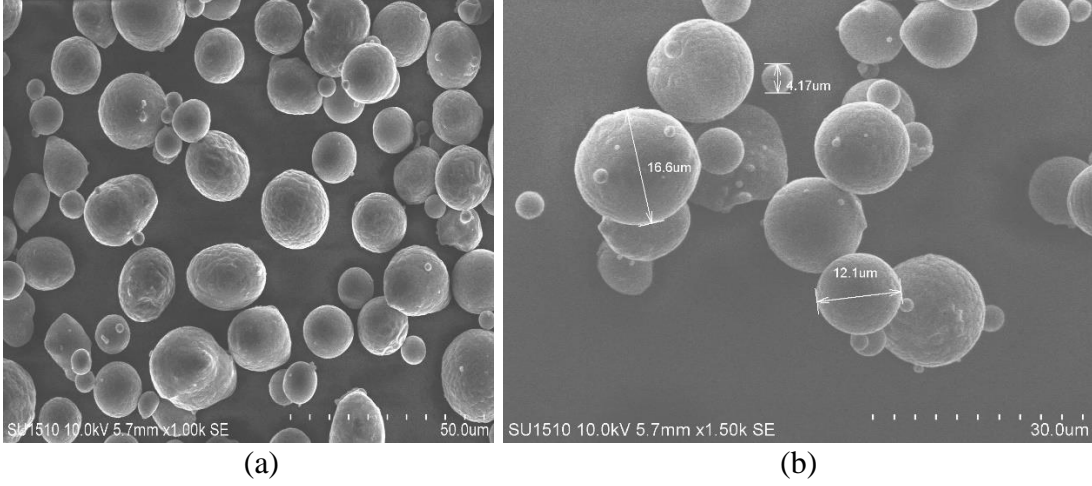
Resim 5.1. Deney :9, SEM görüntüleri.

Yukarıdaki üç adet SEM görüntüsü (a,b,c) sırasıyla, 100-250-1000 büyütmede çekilen 9. Deney, $d_{50} = 66 \mu\text{m}$ olan tozlara ait görüntülerdir. Resimler incelendiğinde üretilen tozların düzenli bir morfolojisinin olmadığı, küçük tanelerin küresel olmakla beraber daha büyük parçaların gözyaşı damlası ve diğer formasyonlarda olduğu görülmektedir.



Resim 5.2. Deney:18, SEM görüntüleri

Yukarıdaki üç adet SEM görüntüsü (a,b,c) sırasıyla, 100-500-1000 büyütme çekilen 18. deneye ait $d_{50} = 58,6 \mu\text{m}$ olan tozlara ait görüntülerdir. Deney 9'a göre tozların daha küresel olduğu ve yer yer uydulaşmaların olduğu tespit edilmiştir.



Resim 5.3. Deney:27, SEM görüntüleri.

Özgün olarak tasarladığımız çift yarıkli nozul ile yakından eşlemeli gaz atomizasyon sisteminde ürettiğimiz tozlarının SEM görüntüleri irdelendiğinde, literatürde de bahsi geçen çubuk, gözyaşı damlası ve küresel toz morfolojileri saptanmıştır.

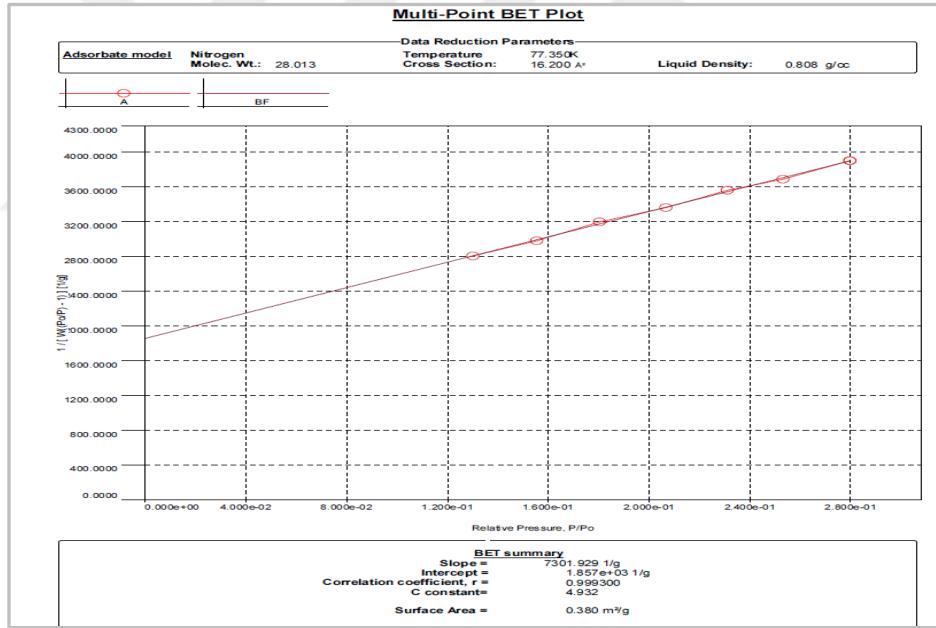
Deney 9'e ait SEM görüntüleri incelendiğinde çubuk ve gözyaşı damlası tozların oranının genel manada çok olduğu görülmüştür. Optimum şartlara göre sıcaklığın düşük kaldığı, akış borusu iç çapının ise büyük olması durumunda küresellik oranının düşük olduğu tespit edilmiştir. Özellikle akış borusu iç çapının geniş olduğu durumlarda toz boyut ve morfolojisini etkileyen temel etmen olan gaz/metal debisi azalmıştır. Debi azalması ile beraber birim zamanda gaz genleşme bölgesine iletilen sıvı metal miktarı artmıştır, dolayısıyla sıvı metal demetine aktarılan enerji, parçalama işlevini tam olarak yerine getirememiştir. Birinci aşamada oluşan çubuk şekilli tozlar ikincil bölünme evre aşamasında yüzey geriliminden kaynaklı bölünerek gözyaşı şekline dönmüştür. Kule içerisinde serbest düşme esnasında hızlı katılaştan ince tozların daha geç soğuyan kaba tozlara yapışarak uydulaşma eğiliminde olduğu görülmüştür.

Deney 18 SEM görüntüleri incelendiğinde küresel toz oranının diğer formlara göre arttığı tespit edilmiştir. Bunun sebebi olarak küçülen akış borusu iç çapı ve ergitme sıcaklığındaki artış olduğudur.

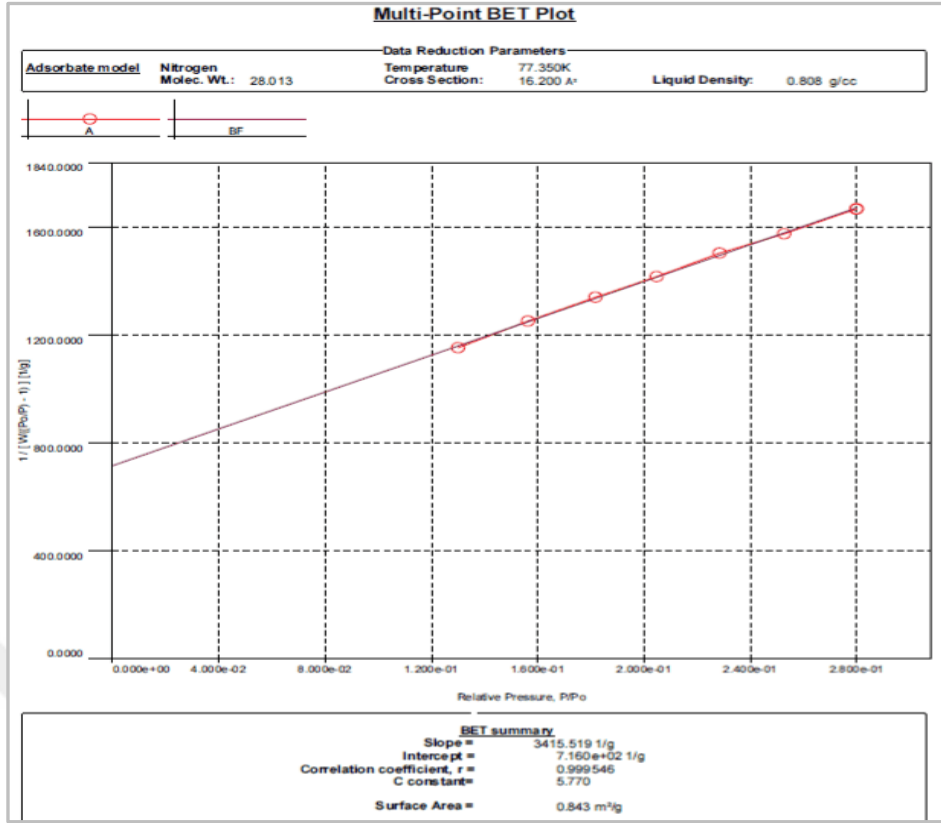
Optimum şartların sağlandığı Deney 27’de ise üretilen tozların tamamına yakınının küresel formda olduğu görülmektedir. Sıvı metal sıcaklığındaki artış ve akış borusu iç çapının daraltılması ile beraber tane boyutunun düştüğü ve yüksek oranda küresel toz elde edildiği görülmüştür. Uydulaşma görüntüleri özellikle yüksek büyütmelemede daha iyi görülmüştür. Optimum şartlar altında uydulaşma oranının diğer deney şartlarına göre daha az olduğu görülmüştür. Bunun ana nedeni olarak tane boyutunun daha küçük olması gösterilebilir. Çünkü küçük taneler büyük tanelere göre daha hızlı soğuyarak katılırlar.

5.4. BET Analiz sonuçları

Deney 18 ve optimum şartlarda elde edilen tozlara ait BET analizleri aşağıda paylaşılmıştır.



Şekil 5.6. Deney 18’de üretilen tozun BET analiz sonucu.



Şekil 5.7. Optimum şartlarda (Deney:27) üretilen tozun BET analiz sonucu.

Optimum şartlarda üretimi gerçekleştirilen tozun yüzey alanı 0,843 m²/gr, daha iri olan Deney 18'deki tozun yüzey alanı 0,380 m²/gr dır. Bu sonuçlardan yola çıkarak tane boyutu küçülen tozun yüzey alanı artmaktadır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Özgün tasarlanan çift yarıklı nozul ile gaz atomizasyon metodu kullanılarak üretilen AA 1070 saf alüminyum tozu üstünde yapılan deneysel çalışmaların genel manada sonuçları şöyle sıralanabilir.

- Gaz atomizasyon yönteminde toz boyut ve morfolojini etkileyen en büyük parametrelerden bir tanesi olan nozul bu çalışmada sabit tutulmuştur. Gaz basıncı, ergime sıcaklığı ve akış borusu çaplarında yapılan değişikliklerle optimum şartlar yakalanmıştır.
- Gaz basıncı, 35 bar akış borusu iç çapı, 3mm ve ergime sıcaklığı 830 °C olarak tespit edilmiş ve yapılan tüm değerlendirmelerde bu nokta referans alınmıştır.
- Yapılan tane büyüklüğü testlerinde en ince tane ve dar dağılımlı tane aralığının optimum şartlarda olduğu tespit edilmiştir. Tanelerin küçülmesiyle birlikte küresellik oranlarının arttığı görülmüştür. Daha dar bir tane dağılımının da uydulaşmayı azalttığı tespit edilmiştir.
- XRD faz çalışmasında difraktogram üzerinden yapılan veritabanı taraması sonucu ana fazın metalik alüminyum olduğu doğrulanmıştır. XRD sonuçları yarı kantitatifdir. Metalik alüminyumun referans pik noktası yüzey merkezli kübik bir kafes yapısına sahiptir.
- Yapılan SEM çalışmalarında tane büyüklüğünün, akış borusu iç çapı ve gaz basıncı ile doğrudan ilgili olduğu tespit edilmiştir.
- Akış borusu iç çapının azaldığı durumlarda atomizasyon bölgesine sürüklenen sıvı metal oranının düştüğü, dolayısıyla atomizasyon gazının kesici kuvvetinin daha etkili olduğu görülmüştür. Bu bağlamda gaz basıncının artmasıyla gaz kesici kuvvetinin de arttığı ve aktarılan kinetik enerjinin sıvı metali pulverize ederek küresel ve dar tane dağılımlı bir ürün ortaya çıkardığı tespit edilmiştir.

- Artan gaz basıncı ile beraber gerçekleşen başka bir durum ise daha az uydulaşmadır. Artan gaz basıncı ile birlikte küçülen taneler daha hızlı soğuyarak katılaşmakta ve uydulaşma oranı azalmaktadır.
- X-Işını kırınım yöntemiyle üretilen tozlara yapılan analiz sonucuna göre ana faz metalik alüminyum olduğu belirlenmiştir.
- Kaba taneler ve ince taneler ayrı ayrı analiz edildiğinde kaba yapılara ait piklerin daha dar, ince tanelerin piklerinin ise daha geniş olduğu tespit edilmiştir. Pik genişlikleri kristal boyutu ile alakalıdır. XRD analizine göre ince taneli (Deney:27) numunelerin intensitesinin, kaba taneli (Deney:18) numunelere göre daha fazla olduğu görülmüştür.
- Toz tane boyutu küçüldükçe yüzey alanlarının büyüdüğü tespit edilmiştir. Deney 18' in ortalama toz boyutu 59,8 μm , yüzey alanı 0,380 m^2/gr iken, deney 27' nin ortalama toz boyutu 25,4 μm ve yüzey alanı 0,843 m^2/gr bulunmuştur.

6.2 Öneriler

Bu çalışmada özgün tasarımı gerçekleştirdiğimiz çift yarıkli nozul ile AA1070 saf alüminyum gaz atomizasyon metodu ile üretilmiştir. Özellikle nozul geometrisinin bu şartlarda bir ilk olması nedeniyle literatüre katkı sağlayacağı ve sonraki çalışmalara yol göstereceği muhakkaktır. Yapılan bu çalışmaların bir adım daha öteye taşınabilmesi için aşağıda belirtilen konular araştırılabilir.

- Gaz atomizasyon metodunda en büyük gider kalemlerinden biri olan gaz maliyeti, nozul geometrisindeki iyileştirmelerle giderilebilir.
- Atomizasyon tamamen inert bir ortamda yapılarak tamamen aktif tozlar çok ince boyutta üretilebilirler.
- Kullandığımız AA 1070 kalite saf alüminyum yerine viskozitesi daha düşük olan diğer alüminyum alaşımları daha hızlı ve küçük tane boyutunda elde edilebilirler.
- Akış borusu çapı 2mm'ye indirilerek daha ince tozlar üretilebilir.

- Çift yarıklı nozul geometrisi kullanılarak serbest düşmeli atomizasyon da yapılabilir.



7. KAYNAKLAR

- [1] Gökçe, A., Fındık, F. ve Kurt, AO (2017). Alüminyum ve Üretimlerinin Toz Metalurjisi İşlemleri. *Engineer & the Machinery Magazine*, 58 (686), 21–46.
- [2] Akkaş, M., Em Akra, KM., Çetin, T., & Boz, M., (2019). Gaz Atomizasyon Yöntemi ile AZ31 Mg Tozu Üretiminde Gaz Basıncının Etkisinin Araştırılması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9 (2), 215–221.
- [3] Urionabarrenetxea, E., Avello, A., Rivas, A., & Martín, J. M., (2021). Experimental study of the influence of operational and geometric variables on the powders produced by close-coupled gas atomisation. *Materials & Design*, 199.
- [4] V.A. Arkhipov., (2016). Influence of operational parameters and design of the ejection nozzle on characteristics of finely dispersed aluminum powder: part I. Influence of operational parameters of the nozzle *Russ J NonFerro Met*, 57 (2) pp. 131-134.
- [5] Liu, T., Leazer, J. D., Menon, S. K., & Brewer, L. N., (2018). Microstructural analysis of gas atomized Al-Cu alloy feedstock powders for cold spray deposition. *Surface & Coatings Technology*, 350, 621–632.
- [6] Zhang, M., & Zhang, Z., (2020). Numerical simulation study on cooling of metal droplet in atomizing gas. *Materials Today Communications*, 25.
- [7] Yıldız, E.S., (2007). “Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretiminde nozul geometrisinin toz boyutuna etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 5-14.
- [8] Lawley, A., (1992). *Atomization: The Production of Metal Powders*, MPIF, New Jersey, 13-34.
- [9] Beddow, J.K., (1978). *The production of metal powders by atomization*, Heyden and Sonc Inc., Philadelphia.
- [10] Kurt, A.O., (2007). *Toz Üretim Yöntemleri Ve Sinterleme Ders Notları*, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
- [11] HÖGANAS (1996). - A.B., “Höganäs handbook for machining guidelines”., 65-70.
- [12] German, R. M., (2016). *Sintering Science : An Historical Perspective Sintering Science: German Materials Technology*, California.
- [13] Ramakrishnan, P., (1983). “History of Powder Metallurgy,” *Indian Journal of History of Science*, vol.18, no.1, p. 109–14].
- [14] German, R.M., (1998). “*Powder Metallurgy of Iron and Steel*, New York, NY, 496.
- [15] Pickens, J. R., (1981). “Aluminium Powder Metallurgy Technology for High-Strength Applications,” *Journal of Materials Science*, vol.16, no. 6, p. 1437–57.

- [16] Dowson, G., Whittaker, D., (2008). Introduction to Powder Metallurgy the Process and its Products, European Powder Metallurgy Association, London.
- [17] Moon, J. R., (2007). Introduction to PM, A Residential Training Course for Young Materials Engineers, Course Booklet, European Powder Metallurgy Association, London
- [18] Upadhyaya, G. S., (1999). Sintered Metallic and Ceramic Materials: Preparation, Properties and Applications, Chichester, New York
- [19] Schubert, T., Weißgärber, T., Kieback, B., Balzer, H., Neubing, H. C., Baum, U., etal., (2005). "Aluminium PM is a Challenge that Industry Can Overcome" Metal PowderReport, vol. 60, no. 3, p. 32–7.
- [20] Dowson, G., Whittaker, D., (2008). Introduction to Powder Metallurgy the Process and its Products, European Powder Metallurgy Association, London.
- [21] Fujiki, A., (2001). "Present State and Future Prospects of Powder Metallurgy Parts forAutomotive Applications," Materials Chemistry and Physics, vol. 67, no. 1–3, p. 298–306
- [22] Jangg, G., Danninger, H., Schroder, K., Abhari, K., Neubing, H., Seyrkammer, J., (1996). "PM Aluminum Camshaft Belt Pulleys for," vol. 89, p. 179–89
- [23] Rahaman, M. N., (2003). Ceramic Processing and Sintering. Second edn, (Marcel Dekker Inc., New York).
- [24] Alier, A.J., Losada, A., (1985). "Characteristics of atomized powders", Powder Metallurgy Int., 21(5): 15-19.
- [25] ASM Metals Handbook., (1998)." Powder Metallurgy and Applications", Vol. 7,1145 s ASM International , USA.
- [26] Antony L. V. M. and R. G. Reddy., (2003)."Process for Production of High Purity Metal Powders",Journal of Metals, , March, pp.14-18.
- [27] İnternet: <http://web.sakarya.edu.tr/~aokurt/dersler/tozuretım.htm>
- [28] Baksan, B., Gürler, R., (2003), Toz Metalurjisinin Savunma Sanayiinde Uygulanması,Osmangazi Üniversitesi Doktora Tezi, Metalurji Enstitüsü, Eskişehir.
- [29] Yılmaz, N., (2006). "Demir Esaslı Toz Metal Malzemelerin Talaşlı İşlenebilirliği". (Doktora tezi) 13–29s., Isparta
- [30] Turan, H., (1993). "Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara

- [31] Le, T., and Henein, H., (1996). "Effect of nozzle geometry and position on gas atomisation", The international Journal of Powder metallurgy , Volume 32(4): 353 -363.
- [32] Yaşa,A., (2008). Düz Dişlilerin Modellenmesi Ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması, Celal Bayar Ün. Yüksek Lisans Tezi,14-30
- [33] Evcin, A., (2007). Toz Üretim Teknikleri Ders Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
- [34] Patterson, R.J., (1984). Rotating Disc Atomization, Metals Handbook, 9th ed., Vol.7, Ohio, 45 – 47
- [35] Doğan, C., Sarıtaş, S., (1990). Döner Disk Atomizasyon Yöntemiyle Kurşun Tozu Üretimi,4. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, Eylül 1990, Ankara, Bildiriler Kitabı, 307 - 316.
- [36] Shen, N., Chen, L., Zhang, D., Yuan, X., Tang, Y., (1999). Rotating Blades Melt Quenching: A Kinetic Analysis, Journal of Materials Processing Tecnology, 350-353.
- [37] Doğan, C., Sarıtaş, S., (1994). Metal Powder Production by Centrifugal Atomization, The International Journal of Powder Metallurgy, Vol. 3, No. 4, 419 - 427.
- [38] Angers, R., Tremblay, R., Desrosiers, L., Dube, D., (1996). Rotating Disk Coatings For Centrifugal Atomization of Aluminium and Magnesium Alloys, Canadian Metallurgical Quarterly. V 35, No: 3, 291-297
- [39] Angers, R., Tremblay, R. and Dube, D., (1997). "Formation of irregular particles during centrifugal atomization of AZ91 alloy", Materials Letters, 33: 13-18
- [40] Sungkhaphaitoon, P., Plookphol, T., & Wisutmethangoon, S., (2012). Design andDevelopment of a Centrifugal Atomizer for Producing Zinc MetalPowder.International Journal of Applied Physics and Mathematics,2(2), 77.
- [41] Ş. Karagöz, R. Yamanoglu., (2005). "PREP Atomizasyonu ile Toz Üretim Karakteristiklerinin Belirlenmesi," 12. Uluslararası Metalurji-Malzeme Kongresi, İstanbul
- [42] Baksan, B., Gürler, R., (2003). Toz Metalurjisinin Savunma Sanayiinde Uygulanması, Osmangazi Üniversitesi, Metalurji Enstitüsü, Eskişehir.
- [43] Champagne, B., Angers, R., Fiset, M., (1984). Characteristics of powders produced by rotating electrode process, MPR.
- [44] Özbilen, S., (1999). Satellite formation mechanism in gas atomised owders. Powder metallurgy, 42(1), 70-78.
- [45] <http://web.itu.edu.tr/~dikicioglu/Toz%20metalurjisi.pdf>

- [46] Randall, M.G. (2007), Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing, MPIF,74-88
- [47] I, O. D., Vasilieva, G. I. Sameljuk, A. V. and Krajnikov, A. V., (2004). “Water atomized aluminium alloy powders”, Materials Science and Engineering, 383 (A): 7–13.
- [48] Uslan, İ., Küçükarslan, S., (2010). Kalay tozu üretimine gaz atomizasyonu parametrelerinin etkisinin incelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25 (1)
- [49] Liu, X., Xie, H., Wang, L., Luo, J. and Cai, Y., (2012). “Production of Fe-Si-Al-Ni-Ti softmagnetic alloy powder by inert-gas atomization”, Chinese Materials Conference,27:1426-1433
- [50] Ünal R., Aydın, M., (2008), Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yöntemi ile gaz atomizasyon nozulu modellenmesi, TÜBİTAK Destekli Proje, Dumlupınar Üniv.Mühendislik Fak. Makina Mühendisliği B1, Kütahya, Türkiye.
- [51] Yule, A.J. ve Dunkley, J.J., (1994), Atomization of Melts, Oxford Univ Press NewYork, A.B.D.
- [52] Ünal, A., (1990). “Production of rapidly solidified aluminium alloy powders by gas atomization and their applications”, Powder Metallurgy, 33(1), 53 – 64.
- [53] Duangkamchan W., Ronsse F., Depypere F., Dewettinck K. and Pieters J.G., (2012). CFD study of droplet atomisation using a binary nozzle in fluidised bed coating, Chemical Engineering Science, 68, 555-566.
- [54] Lawley, A., (1992). “Atomization: The production of metal powders”,Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, USA.
- [55] Sarı, D., (2010). “Elektroliz yöntemi ile toz üretiminde anot yüzey alanı ve bakırsülfatoranın toz boyutu ve şekline etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi,Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 13-65,
- [56] German, R.M., (2007). “Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri”, Çeviri Editörleri: Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., Türk Toz Metalurjisi Derneği,Ankara, 61-130.
- [57] Hohmann, M. Jonsson, S., (1990), New concepts for inter gas atomization Plants, Metal Powder Report, 47 – 50.
- [58] Oğuz, Ş., (2011). “Atomizasyon ünitesi imalatı ve kalay tozu üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 18-21.
- [59] Matei, G., Matei, D., Moraru, V., (1996), Studies on the metal and alloys atomization methods, 1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, 67-89.

- [60] Mates, S. P., & Settles, G. S. (2005). A study of liquid metal atomization using close-coupled nozzles, part 2: atomization behavior. *Atomization and sprays*, 15(1).
- [61] Zeoli, N., Tabbara, H., & Gu, S. (2011). CFD modeling of primary breakup during metal powder atomization. *Chemical engineering science*, 66(24), 6498-6504.
- [62] Strauss, JT (1999). Düşük basınçlı yakın bağlantılı gaz atomizasyonu. *Metal Tozu Raporu* , 3 (54), 38
- [63] Sun, J., Cao, F., Cui, C., Shen, J., & Li, Q., (2002). Dynamic behaviors of the gas velocity field during metal atomization. *Fenmo Yejin Jishu(Powder Metallurgy Technology)(China)*, 20, 79-81.
- [64] Connor, J., Ridder, S., Ting, J., (2005), High-speed cinematography of gas-metal atomization, *Materials Science and Engineering A*, 390(1-2): 452-460.
- [65] Aksel, M. H. and Eralp, O. C., (1994). "Gas Dynamics", Prentice Hall International Ltd., UK.
- [66] TING, J., Peretti, M.W. and Eisen, W.B., (2002)., The effect of the wake-closure phenomenon on gas atomization performance, *Materials Science and Engineering A*, Volum 326, Issue 1, 110-121
- [67] Berndt, C.C., Lenling, W.J., (2004). *Handbook of Thermal Spray Technology*. ASM International, Ohio, USA.
- [68] Antipas, G.S.E., (2009). "Modelling of the break up mechanism in gas atomization of liquid metals", *Computational Materials Science*, 46 (4): 955–959.
- [69] Anderson, I.E. and Terpstra, R. L., (2002). "Progress toward gas atomization processing with increased uniformity and control" *Materials Science and Engineering A*, 326 (1): 101–109.
- [70] Miller, S.A., Miller, R.S., Mourer, D.P., Christensen, R.W., (1997). *Int. J. Powder Metall.*33, 37–50.
- [71] Mates, S.P., Ridder, S.D., Biancaniello, F.S., (2000) In: *Proceedings of the TMS Annual Meeting, Tennessee, USA*, , pp. 71–81.
- [72] Aksoy A, Ünal R., (2013) Effects of gas pressure and protrusion length of melt delivery tube on powder size and powder morphology of nitrogen gas atomised tin powders [J]. *Powder Metallurgy*, 49(4): 349–354.