

GAZ ATOMİZASYONU İLE ÜRETİLEN
Al-Sn ALAŞIM TOZLARININ ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ
Ali Rıza EBEOĞLU
Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Ekim-2008

GAZ ATOMİZASYONU İLE ÜRETİLEN
Al-Sn ALAŞIM TOZLARININ ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

Ali Rıza EBEOĞLU

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

Danışman : Doç. Dr. Rahmi ÜNAL

Ekim – 2008

KABUL ve ONAY SAYFASI

Ali Rıza EBEOĞLU' nun YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “GAZ ATOMİZASYONU İLE ÜRETİLEN Al-Sn ALAŞIM TOZLARININ ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

...../...../.....
(Sınav Tarihi)

Üye : Doç. Dr. Rahmi ÜNAL (Danışman)

Üye : Doç. Dr. Remzi GÖREN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa AYDIN

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

Prof. Dr. Sabri ÖZYURT
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**GAZ ATOMİZASYONU İLE ÜRETİLEN
Al-Sn ALAŞIM TOZLARININ ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Ali Rıza EBEOĞLU

Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2008

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Rahmi ÜNAL

ÖZET

Bu çalışmada, Al-20Sn-3Si, Al-15Sn-1Cu ve Al-15Sn-4Si-1,5Cu Alaşımları Dumlupınar Üniversitesi Gaz Atomizasyonu Ünitesi kullanılarak alaşım tozu halinde üretilmiş ve özellikleri incelenmiştir. Alaşım ergitme işleminin yapılabilmesi amacıyla elektrik rezistanslı bir ergitme fırını tasarlanarak imal edilmiştir. Alaşımlar fırın içerisine yerleştirilen pota içerisine saf alüminyum, kalay, bakır ve Al-Si master alaşımı ilave edilerek hazırlanmış ve azot ile atomize edilerek toz haline getirilmiştir. Üretilen tozlar 200 mikronluk elekten elenerek plastik kaplarda muhafaza edilmiştir. Üretilen tozların boyut analizi, mikroyapı incelemeleri, sertlik ölçümleri ve XRD analizleri yapılmıştır. Üretilen alaşım tozlarının ortalama boyutları 42,40 ve 60,30 mikron arasındadır. Toz boyutunun atomizasyon gaz basıncı artışı ve Gaz/metal kütleli debi artışı ile azaldığı görülmüştür. Üretimi gerçekleştirilen tozların çoğunluğunun küresel şekilde ve pürüzsüz bir yüzeye sahip olduğu tespit edilmiştir. İnce tozların daha iri tozlar üzerinde az miktarda uydulaşma oluşturdukları ve iri toz yüzeylerinde hücreli ve dendritik yapıların olduğu gözlemlenmiştir. Alaşım tozlarının hepsinde ana faz olarak Alüminyum ve kalay tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gaz atomizasyonu, metal tozu, Al-Sn Alaşımı

**INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF
Al-Sn ALLOY POWDERS PRODUCED BY GAS ATOMISATION**

Ali Rıza EBEOĞLU

Mechanical Engineering, Master of Science Thesis, 2008

Thesis Supervisor: Associate Prof. Rahmi ÜNAL

SUMMARY

In this study, Al-20Sn-3Si, Al-15Sn-1Cu ve Al-15Sn-4Si-1,5Cu alloy powders were produced by using Dumlupınar University Gas Atomisation Unit and the properties of the alloy powders were investigated. An electrical resistance furnace was designed and produced in order to melt the alloys. Alloys were prepared in the crucible placed in the furnace by adding pure aluminium, tin, copper and Al-Si master alloys and the alloy powders were atomised by nitrogen gas. The produced powders were sieved by using 200 microns mesh and stored in the plastic bags. Powder size analysis, microstructure investigations, hardness measurements, and XRD analysis were made. Powder size of the alloys were between 42,40 and 60,30 microns. It is observed that, powder size was reduced by increasing the both atomisation pressure and gas/melt mass flow ratio. Powder surfaces are clean and mostly spherical in shape. Some satellite formation by colliding of the small powders to the big powders was observed. The big powders have cellular and dendritic solidification structure on the surface. Aluminium and tin phases were determined in all of the alloy powders.

Keywords: Gas Atomisation, metal powder, Al-Sn Alloy

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması sırasında değerli katkılarıyla beni yönlendiren tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Rahmi Ünal'a, fırın tasarımı sırasındaki yardımları için Sayın Arş. Gör. Cem ÖZGÜR'e, deneysel çalışmalar sırasındaki değerli katkılarından dolayı laboratuarlarda görevli teknisyenlerimize, çalışmalarım boyunca beni maddi ve manevi destekleyen başta babam Sayın Yrd .Doç. Dr. Mehmet Ali EBEOĞLU' na ve tüm aile fertlerime teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| ÖZET..... | iv |
| SUMMARY..... | v |
| TEŞEKKÜR..... | vi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | x |
| ÇİZELGELER DİZİNİ..... | xii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ..... | xiii |
| | |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI..... | 3 |
| 2.1. Alüminyumun Elde Edilmesi..... | 3 |
| 2.2. Alüminyumun Genel Özellikleri..... | 4 |
| 2.3. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması..... | 6 |
| 2.3.1. Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlem Durumuna Göre Sınıflandırılması..... | 7 |
| 2.4. Alaşım Elemanları ve Kazandırdıkları Özellikler..... | 10 |
| 2.5. Alüminyum ve Kalay Alaşımları..... | 11 |
| 3. TOZ METALURJİSİ..... | 13 |
| 3.1. Metal Tozu Üretim Teknikleri..... | 15 |
| 3.1.1. Öğütme..... | 16 |
| 3.1.2. Elektroliz..... | 17 |
| 3.1.3 Kimyasal Yöntem..... | 17 |
| 3.2. Atomizasyon Yöntemleri..... | 18 |
| 4. GAZ ATOMİZASYONU..... | 23 |
| 4.1. Gaz Atomizasyon Üniteleri..... | 23 |
| 4.2. Atomizasyon Mekanizmaları..... | 26 |
| 4.3. Atomizasyon Sistemleri..... | 27 |
| 5. DENEYSEL YÖNTEM..... | 29 |
| 5.1. Gaz Atomizasyonu Ünitesi..... | 29 |
| 5.1.1. Gaz sistemi..... | 30 |
| 5.1.2. Metal ergitme..... | 30 |

İÇİNDEKİLER (Devam)

| | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| 5.1.3. Atomizasyon kulesi..... | 32 |
| 5.1.4. Toz tutma ve sistem temizliği..... | 32 |
| 5.2. Atomizasyon Gaz Debisinin Ölçümü..... | 33 |
| 5.3. Metal Akış Debisinin Ölçümü..... | 34 |
| 5.4. Atomizasyon Çalışmaları..... | 34 |
| 5.5. Toz Boyut Analizi..... | 34 |
| 5.6. Tozların Şekil ve Morfolojilerinin İncelenmesi..... | 35 |
| 5.7. Tozların Bakalite Alınması..... | 35 |
| 5.8. Tozların Mikro Sertlik Ölçümü..... | 37 |
| 5.9. Tozların Mikro Yapısı..... | 38 |
| 5.10. Tozların Görünür Yoğunluğu..... | 38 |
| 5.11. Tozların XRD Ölçümleri..... | 39 |
| 5.12. Tozların DTA ve TG Analizi..... | 39 |
| 6. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ..... | 40 |
| 6.1. Toz Üretim Şartlarının Değerlendirilmesi..... | 40 |
| 6.2. Toz Boyutu ve Dağılımı..... | 42 |
| 6.3. Toz Morfolojisi..... | 45 |
| 6.4. Tozların Mikro Sertlikleri..... | 51 |
| 6.5. Tozların Mikro Yapısı..... | 53 |
| 6.6. Tozların Görünür Yoğunluk Değerleri..... | 54 |
| 6.7. Tozların XRD Grafiği..... | 55 |
| 6.8. Tozların DTA ve TG Analiz Değerleri..... | 56 |
| 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 57 |
| 7.1. Sonuçlar..... | 57 |
| 7.2. Öneriler..... | 57 |
| KAYNAKLAR DİZİNİ..... | 58 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Şekil</u> | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| 2.1. Alüminanın elde edilme devresi..... | 4 |
| 2.2. Alüminyumun elde edilme devresi..... | 5 |
| 2.3. Alüminyum-kalay faz diyagramı..... | 12 |
| 3.1. Toz metal parçaların üretim aşamaları..... | 14 |
| 3.2. Toz morfolojileri (şematik)..... | 15 |
| 3.3. Mekanik öğütme ile toz üretiminin şematik gösterimi..... | 16 |
| 3.4. Elektroliz ile toz üretimi..... | 17 |
| 3.5. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi..... | 18 |
| 3.6. Su atomizasyon işlemi..... | 19 |
| 3.7. Düşey gaz atomizasyon ünitesi..... | 20 |
| 3.8. Tozların genel yüzey görüntüleri..... | 21 |
| 3.9. Döner elektrot atomizasyon yöntemi | 21 |
| 4.1. Yatay gaz atomizasyon ünitesi..... | 24 |
| 4.2. Düşey gaz atomizasyon ünitesi..... | 25 |
| 4.3. Sıvı metal tabakasının bölünme mekanizması..... | 26 |
| 4.4. Atomizasyon sistemleri..... | 27 |
| 5.1. Dumlupınar gaz atomizasyon ünitesi..... | 29 |
| 5.2. Fırında kullanılacak olan rezistans telin sarılmış hali..... | 30 |
| 5.3. Fırın yalıtımının boyutlandırılması..... | 31 |
| 5.4. Metal ergitme fırını..... | 31 |
| 5.5. Gaz atomizasyonu ünitesi kontrol panosu..... | 32 |
| 5.6. Toz tutma kaplarının görünüşü..... | 33 |
| 5.7. Kütleli debi ölçüm cihazı..... | 34 |
| 5.8. Lazer ışını prensibinin şematik olarak gösterimi..... | 36 |
| 5.9. JEOL JSM 6335-SEM marka SEM cihazı..... | 36 |
| 5.10. Struers Labopress-3 bakalite alma cihazı..... | 37 |
| 5.11. VICKERS Sertlik ölçüm cihazı..... | 37 |
| 5.12. Arnold metre görünür yoğunluk ölçüm düzeneği..... | 38 |
| 5.13. TG/DTA cihazı..... | 39 |
| 6.1. Üretilen alaşım tozlarının genel görünüşü..... | 41 |
| 6.2. Atomizasyon gaz basıncının toz boyutuna etkisi..... | 43 |
| 6.3. Gaz/ Metal kütleli debi oranının toz boyutuna etkisi..... | 43 |

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

| <u>Sekil</u> | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| 6.4. Tozların dağılım grafiklerinin karşılaştırılması..... | 44 |
| 6.5. Tozların toplam yüzde küçükler grafiklerinin karşılaştırılması..... | 44 |
| 6.6. Al-20Sn-3Si Alaşım tozlarının morfolojileri..... | 46 |
| 6.7. Al-20Sn-3Si Alaşım tozlarında uydulaşma ve sıvanma görüntüleri..... | 47 |
| 6.8. Al-15Sn-1Cu Alaşım tozlarının morfolojileri..... | 48 |
| 6.9. Al-15Sn-1Cu Alaşımının SEM görüntüleri..... | 49 |
| 6.10. Al-15Sn-4Si-1,5Cu Alaşım tozlarının morfolojileri..... | 50 |
| 6.11. Al-15Sn-4Si-1,5Cu Alaşımının SEM görüntüsü..... | 51 |
| 6.12. 1A alaşım tozu mikro yapısı..... | 53 |
| 6.13. 2A alaşım tozu mikro yapısı..... | 54 |
| 6.14. 3A alaşım tozu mikro yapısı..... | 54 |
| 6.15. Tozların XRD grafikleri..... | 55 |
| 6.16. Al-20Sn-3Si alaşım tozunun DTA analizi grafiği..... | 56 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| <u>Cizelge</u> | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| 2.1. Saf alüminyumun fiziksel ve mekanik özellikleri..... | 6 |
| 2.2. Alüminyum alaşımının çeşitleri..... | 9 |
| 6.1. Üretilen tozların ağırlıkça kimyasal bileşim oranları..... | 40 |
| 6.2. Alaşım tozlarının üretiminde atomizasyon koşulları ve ortalama toz boyutu..... | 41 |
| 6.3. Tozlarının üretiminde hazırlanan sıvı metal ve elde edilen toz miktarları..... | 42 |
| 6.4. Alaşım tozlarının boyut değerleri ve standart sapma miktarları..... | 42 |
| 6.5. Al-20Sn-3Si Alaşım tozu için sertlik değerleri..... | 52 |
| 6.6. Al-15Sn-1Cu Alaşım tozu için sertlik değerleri..... | 52 |
| 6.7. Al-15Sn-4Si-1,5Cu Alaşımı için sertlik değerleri..... | 53 |
| 6.8. Tozların görünür yoğunluk değerleri..... | 55 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| <u>Simgeler</u> | <u>Açıklama</u> |
|------------------------|------------------------------------|
| A | Nozul Çıkış Alanı, mm ² |
| A* | Boğaz Alanı, mm ² |
| d ₅₀ | Ortalama Toz Boyutu, µm. |
| M | Mach Sayısı |
| M ₂ | Genleşmiş Gazın Mach Sayısı |
| P _a | Atomizasyon Basıncı |
| P ₂ | Genleşme Basınç Değeri |
| γ | Özgül Isı Oranı |
| α | Nozul Gaz Çıkış Açısı, ° |
| Å | Angstrom |
| P _A | Tozların Görünür Yoğunluğu |

| <u>Kısaltmalar</u> | <u>Açıklama</u> |
|---------------------------|---|
| G/M | Gaz debisinin Metal Debisine Kütlesel Oranı |
| SEM | Taramalı Elektron Mikroskobu |
| T/M | Toz Metalurjisi |

1. GİRİŞ

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

T/M yönteminin hammaddesi olan tozun üretimi oldukça önemli bir asamadır. Birçok toz üretim tekniği arasından ticari olarak; mekanik yöntemler, kimyasal yöntemler, elektroliz yöntemi ve atomizasyon yöntemi kullanılır. Atomizasyon ile üretilmiş tozlar, diğer üretim yöntemleri ile elde edilemeyecek özelliklere ve avantajlara sahiptir. Sıvı metal demetinin basınçlı akışkanlar ile veya mekanik olarak çok küçük damlacıklara ayrılması olarak tanımlanan atomizasyon işlemi için su atomizasyonu, gaz atomizasyonu, santrifüj atomizasyonu, vakum atomizasyonu ve ultrasonik gaz atomizasyonu yöntemleri kullanılmaktadır. Su ve gaz atomizasyonu, bu yöntemlerden en yaygın olarak kullanılanıdır. Bu yöntem, ergitilebilen tüm metal ve alaşım tozlarının üretiminde kullanılabilir. Gaz atomize tozlar küresel sekle sahiptir ve atomizasyon esnasında koruyucu atmosfer gazı kullanıldığı için yüzeylerindeki oksit miktarı daha düşüktür. Üretilen tozlar arasında paslanmaz çelik, pirinç, demir, alüminyum, magnezyum, çinko, kalay ve kursun gibi metal ve alaşımların tozları sayılabilir. Gaz atomizasyonunda sıvı metal demetini parçalamak için hava, azot, argon, karbondioksit ve helyum gibi gazlar kullanılabilir. Gaz atomizasyon işleminde nozul sistemleri genel olarak serbest düşmeli ve yakından eşlemeli olmak üzere ikiye ayrılır. Yakından eşlemeli atomizasyon sistemleri daha iyi kinetik enerji transferi sağladığı için serbest düşme yöntemine göre daha üstündür. Yakından eşlemeli sistemlerde daha ince boyutlarda ve daha dar dağılıma sahip tozlar üretmek mümkün olmaktadır.

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

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

Bu araştırmanın amacı, Gaz atomizasyon sisteminde kullanılacak bir ergitme fırını tasarlamak ve Al-20Sn-3Si, Al-15Sn-1Cu, Al-15Sn-4Si-1,5Cu alaşımlarını gaz atomizasyonu sisteminde toz halinde üreterek tozların özelliklerinin incelenmesidir.

2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

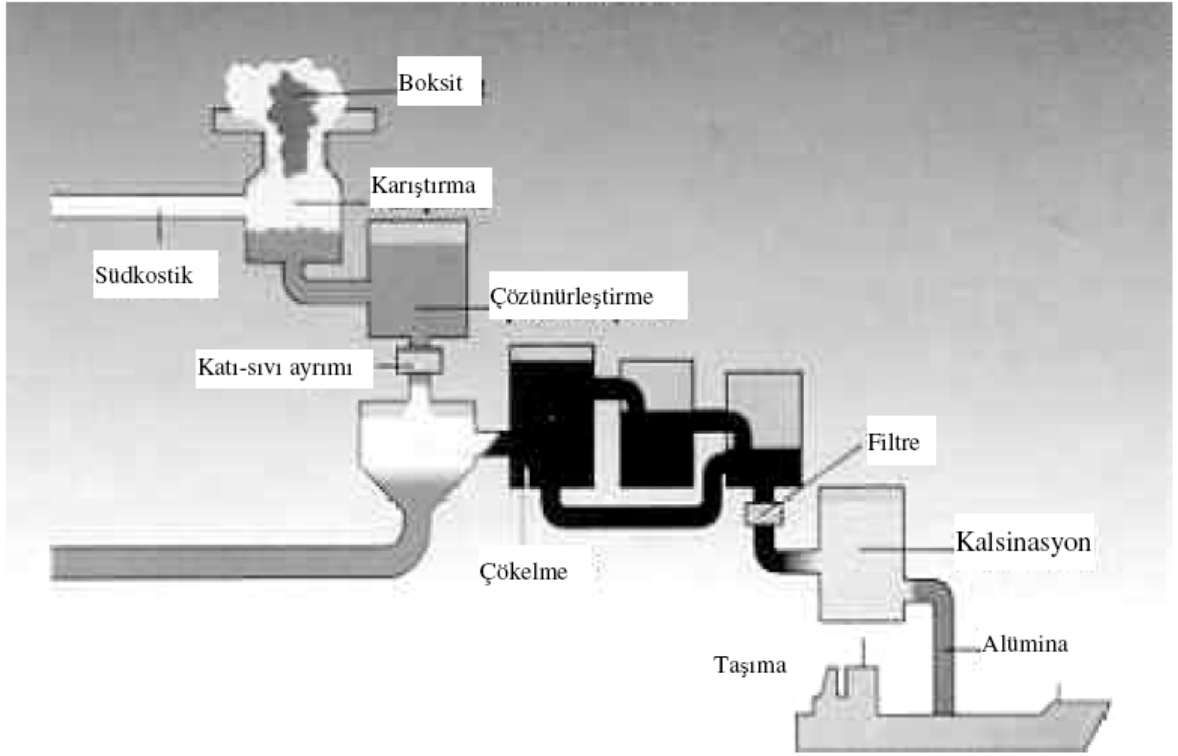
Metaller, medeniyetin gelişmesinde önemli görev yapmaktadır. Bu gelişme sürecinde, alüminyum önemli bir rol oynamaktadır. Alüminyum kendine has özellikleri ile, çok eski çağlardan beri bilinen, ağaç, bakır, demir ve çelik gibi birçok malzemedan daha fazla önem kazanmış bulunmaktadır. 19. yüzyılın ikinci yarısından beri endüstriyel çapta üretilen çok genç bir metal olmasına rağmen, bugün bakır ve alaşımları, kurşun, kalay ve çinko gibi tüm demir dışı metallerin toplam kullanımından daha çok miktarda kullanılmaktadır [1]. Dünya alüminyum tüketimi kullanım miktarı ve piyasa değeri hesaplandığında demir hariç diğer metallerden fazladır ve dünya ekonomisinin hemen hemen tüm sektörlerinde tercih edilen önemli bir metaldir [2].

Saf alüminyum, genel olarak, paketlenme malzemesi olarak mutfak ve ev aletlerinde, depolama ve tanklarda, yüzeyi elokse edilmiş sac ve profil olarak dekorasyonda, indirgen madde olarak çelik sanayinde ve alüminyum boyalarında kullanılmaktadır. Ayrıca elektrik iletim malzemesi olarak kablo ve akım raylarında önemli bir kullanım alanına sahiptir. Alüminyumun saf halde kullanımı yukarıda belirtilen alanlar dışında oldukça sınırlıdır. Alüminyum daha çok alüminyum alaşımları halinde kullanılmaktadır.

Tüketimde, alüminyum ve alaşımlarının, demir-çelikle mukayese edilecek duruma gelmesi son yıllarda elektrik, kimya, tıp, inşaat ve otomotiv sanayinde ve bunların yan kollarında her geçen gün artan bir şekilde kullanılması gün geçtikçe önemini bir kat daha arttırmaktadır. Bu önemi ile hafif metal sınıfında olan alüminyum; yumuşak ve demirden yaklaşık üç kat daha hafifliği, mukavemetin ağırlığa oranla çok yüksek olması, yüksek elektrik ve ısı iletkenliğine sahip olması, kolay işlenebilirlik, korozyona dayanıklılık, dekoratiflik, sıcak ve soğuk şekillendirilebilme gibi özelliklere sahip olmaktadır [3].

2.1. Alüminyumun Elde Edilmesi

Alüminyum, yüzyıldan beri tüm dünyada Bayer yöntemiyle elde edilmektedir. Bayer yöntemiyle alüminyum eldesi iki aşamada gerçekleşir. Birinci aşamada, boksit cevherinden alümina elde edilir (Şekil 2.1). İkinci aşamada ise, elektroliz ile alüminadan alüminyum elde edilir. Boksit cevheri, kostik eriyiği ile muamele edilerek alüminyum hidroksit eldesi gerçekleşir. Bu işlem sonucunda oluşan erimeyen kalıntılar (kırmızı çamur) ayrılır ve alüminyum hidroksitin kalsinasyonu ile “alümina” (alüminyum oksit) elde edilir [4].

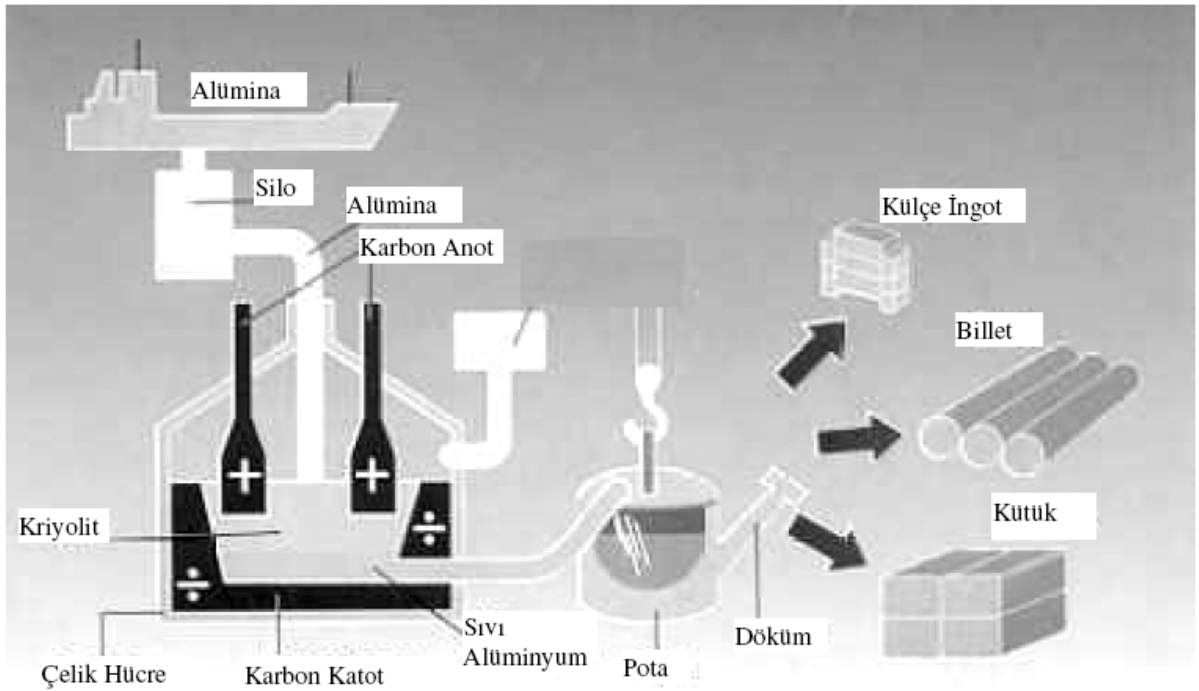


Şekil 2.1. Alüminanın elde edilme devresi [4]

Bundan sonraki aşama “alümina”nın “alüminyum”a dönüştürülmesidir. Beyaz bir toz görünümündeki alümina elektroliz işleminin yapılacağı hücre adı verilen özel yerlere alınır. Şekil 2.2’de alüminadan alüminyum eldesini gösteren şekil bulunmaktadır. Burada amaç alüminyum oksijenden ayırmaktır. Elektroliz işlemi için 4-5 volt gerilimde doğru akım uygulanır. Dipte biriken alüminyumun alınması ile işlem tamamlanır [4].

2.2. Alüminyumun Genel Özellikleri

Alüminyum 13 atom numarasıyla periyodik cetvelin üçüncü grubunda yer almaktadır. Atom çapı 1,43 Å, iyon çapı 0,86 Å ve atom ağırlığı 26,98 g/mol’dür. Alüminyum diğer metallerde olduğu gibi elektron dizilisine bağlı olarak bileşik oluşturur. Elektron yapısı incelendiğinde 1s yörüngesinde iki elektronla doymuş K seviyesi ve 2s ve 2p yörüngesinde toplam sekiz elektronla doymuş L seviyesi ile karakterize edilir ve atomun dış M seviyesinde üç elektron bulunur. İki 3s ve biri 3p yörüngesinde. Bu sebeple alüminyum üç değerli olarak bilinir.



Şekil 2.2. Alüminyumun elde edilme devresi [4]

Alüminyum yumuşak ve demirden yaklaşık üç kat daha hafiftir. Diğer metallerin katılmasıyla alaşımlandırıldığında, yoğunluğunun bir miktar artmasına karşılık mekanik dayanımında önemli oranda artışlar meydana gelmektedir. Magnezyum ve berilyumdan sonra en hafif metal olan alüminyumun yoğunluğu $2,7 \text{ g/cm}^3$ 'dür. Hem sıvı hem de katı alüminyumun yoğunluğu artan safiyet derecesi ile orantılı olarak düşmektedir.

Alüminyum alaşımlarının havayla temas eden yüzeyinde ince bir oksit filmi oluşur. Ergitme kaynağında alüminyum parça ve ilave metalin uygun birleşmesi ve lehimlemenin veya yapıştırmanın iyi olması için bu oksit filmi takip edilmelidir. Temizleyici maddelerde, soygaz atmosferlerindeki koruyucu gaz arkıyla veya mekanik ya da kimyasal yöntemlerle oksit filmi giderilmeye çalışılır.

Önemli bir özelliği de elektrik iletkenliğidir. Alüminyum iletkenliği bakırın iletkenliğinin yalnızca %60'ı kadar olmasına karşılık düşük yoğunluğundan dolayı birim kütleye düşen iletkenlik bakımından bakırdan daha yüksek iletkenliğe sahiptir.

Alüminyum yüksek ısı iletkenliği nedeniyle çeşitli ısı kazanları parçaları olarak kullanılmaktadır. Ayrıca ısı iletkenliği saflık derecesine bağlı olarak artar. Bu %99,489 saflıkta

alüminyum alaşımı için $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de $0,5\text{ cal/cm s }^{\circ}\text{C}$ ve %99,7 saflıkta alüminyum alaşımı için $0,531\text{ cal/cm s }^{\circ}\text{C}$ 'dir.

Alüminyumun oksijene karşı ilgisi çok fazladır. Hava ile temas neticesinde, kısa zamanda oksijen ile birleşerek alümina (Al_2O_3) oluşturur. Bunun sonucu bütün yüzeyi çok renkli alümina tabakası ile örtülür. Alüminyum bu özellikleri korozyona karşı mukavemetini yükseltmektedir. Oluşan bu oksit tabakası su ile yıkamak suretiyle çıkartılamaz. Alüminyum bu özelliği kullanma sahasını genişletmiştir. Soğuk şekil değiştirme korozyon mukavemetini düşürür. Alüminyum saflık derecesi azaldığı takdirde de korozyon mukavemeti düşer. Yabancı elemanlar, korozyon mukavemetini azaltmaktadır [5].

Çizelge 2.1. Saf alüminyumun fiziksel ve mekanik özellikleri [2]

| | |
|--|--|
| Kimyasal Sembolü | Al |
| Atom Numarası | 13 |
| Atom Ağırlığı | 26,98 g/mol |
| Kafes Yapısı | Yüzey Merkezli Kübik (YMK) |
| Yoğunluğu ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de katı) ($660\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de sıvı) | 2,6989 g/cm ³ 2,37 g/cm ³ |
| Elastisite Modülü (E) | 70 GPa |
| Kayma Modülü (G) | 27 GPa |
| Ergime Sıcaklığı | 660,24 $^{\circ}\text{C}$ |
| Elektrik İletkenliği | 37,74 m/ohm.mm ² |
| Isı İletkenliği (λ) | 0,55 cal/cm.s. $^{\circ}\text{C}$ |
| Akma Mukavemeti | 10 MPa |
| Çekme Mukavemeti | 45 MPa |
| Uzama Değeri | %50 |

2.3. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum'a çeşitli özellikler vermesi için çeşitli metaller karıştırılır. İlave edilen metallere göre sınıflandırma yapılır (Çizelge 2.2).

Bir alaşım 4 rakamdan oluşan notasyon ile tanımlanır. Alüminyum alaşımlarının işaretlendirilmesi için dört tam sayılı endeks sistemi kullanılır. Bunlardan birincisi alaşımı gruplandırmaya, son ikisi de alaşımı tanıtmaya yani alüminyumun saflık derecesini göstermeye

yarar. İkinci sayı ise alaşımın geçirdiği değişiklikleri veya yabancı madde miktarlarının sınırlarını gösterir.

2xxx den 8xxx e kadar olan alüminyum alaşımlarında ilk rakam alaşım türünü, ikinci rakam ise alaşım kompozisyonundaki değişimleri gösterir. Son iki rakam ise değişik alaşımları tanıtmak için kullanılır.

9xxx dizisi ise yalnızca deneysel olarak geliştirilmekte olan alaşımlar için kullanılır. Üretimine geçildiği andan itibaren de 9xxx simgesi bu alaşımda alınır, en uygun gerçek simge verilir. Bu alaşım standart olarak kabul edilinceye kadar dört rakamlı simgesinin önüne bir X konulur.

Minimum %99,00 saf alüminyum içeren 1XXX grubunun son iki rakamı minimum alüminyum yüzdesini göstermektedir. Buna göre 1030, yabancı madde bakımından bir kontrol gerektirmeyen, minimum alüminyum miktarı %99,30 olan bir alüminyum gösterir. 2XXX'den 8XXX'e kadar olan alaşım gruplarında, dört tam sayıdan son ikisi özel bir anlam taşımayıp, ancak gruptaki muhtelif alaşımları ayırt etmeye yarar.

Mekanik işlem alüminyum alaşımları ısı işlem davranışına göre iki bölüme ayrılırlar: Isıl işlem uygulanabilenler ve ısı işlem uygulanamayanlar. Genellikle 2xxx, 4xxx, 6xxx ve 7xxx dizileri ısı işlemle özellikleri yükseltilebilen alaşımlardır. 3xxx ve 5xxx serilerine ise ısı işlem uygulanmaz. Bu serilerde, alaşımın dayanımı soğuk deformasyonla meydana gelen gerilim mukavemetlenmesi mekanizmasıyla arttırılmaktadır.

Saf alüminyumun iyi olan birçok özelliğinin (hafiflik, iyi haddelenebilme özelliği, yüksek elektrik iletkenliği, korozyona karşı mukavemet, manyetik olmayışı vs.) yanı sıra dökme ve mekanik özellikleri çok kötüdür. Kötü olan bu özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla alüminyuma ilave alaşım elementleri katılmaktadır. Alaşımların kullanılma yerlerine göre seçimlerinin yapılabilmesi açısından, alaşım elementlerinin alüminyum üzerindeki etkileri bilinmelidir [7].

2.3.1. Alüminyum alaşımlarının ısı işlem durumuna göre sınıflandırılması

Alüminyum yarı ürün veya ürünler üretildikten sonra belirli fiziksel özelliklere sahip olmaları için bazı işlemlerden geçirilirler. Genel olarak alüminyum alaşımları iki gruba ayrılırlar [7]:

1- Isıl işlem uygulanabilir alaşımlar; 2XXX, 6XXX ve 7XXX serisi alaşımlar

2- Isıl işlem uygulanamayan alaşımlar; 1XXX, 3XXX ve 5XXX serisi alaşımlar

F. Fabrikasyon maksadı ile kullanılan ürünler için ısıl işlem veya biçimlendirme neticesinde sertlik miktarının üzerinde, özel kontrol gerektirmeyen üretimlere uygulanır. Bu üretimlerin mekanik özellik limitleri yoktur.

O. Tavlanmada tekrar kristalize edilmiş, ısıl işlem görmemiş yumuşak mamuller için kullanılır.

H. Germede sertleştirilmiş ve kısmi tavlanmış ürünlerin kodu olup; alaşımlı metalin kısmi olarak tavlanması için yeterli oda sıcaklığında ısıl işleme tabi tutulmuş yada tabi tutulmamış ve soğuk işlem ile sertleştirilmiş üretimlere uygulanır.

W. Çözeltiye alma ısıl işlemi yapılmış fakat stabilize edilmemiş ürünlerin kod adı olup; çözeltiye alma ısıl işlemine tabi tutulmuş ve soğutulmuş daha sonra oda sıcaklığında yaşlandırılmış alaşımlar için uygulanabilen bir ısıl işlemdir.

T. Isıl işlemle sertleştirilmiş malzemenin kod adı olup, ilgili ısıl işlemler şu şekilde uygulanır; Çözeltiye alma ısıl işlemi, soğutma, doğal yaşlandırma, suni yaşlandırma

T1. Sıcak şekillendirmeden sonra soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış.

T2. Tavlanmış (sadece döküm malzemeler için).

T3. Çözeltiye alma ısıl işlemi yapılmış ve sonra soğuk işlenmiş.

T4. Çözeltiye alma ısıl işlemi yapılmış ve sabit şartlarda tabi olarak yaşlandırılmış.

T5. Sıcak ekstrüzyondan sonra soğutma yapılmış ve sonra suni olarak yaşlandırılmış.

T6. Çözeltiye alma ısıl işlemi yapılmış ve suni yaşlandırılmış.

T7. Çözeltiye alma ısıl işlemi yapılmış ve sonra stabilize edilmiş.

T8. Çözeltiye alma ısıl işlemi yapılmış, soğuk işlenmiş ve sonra suni yaşlandırılmış.

T9. Çözeltiye alma ısıl işlemi yapılmış, suni yaşlandırılmış ve soğuk işlem yapılmış.

T10. Suni yaşlandırılmış ve sonra soğuk işlenmiş.

Çizelge 2.2. Alüminyum Alaşımının çeşitleri [8]

| <i>Alaşım Grubu</i> | <i>Ana Alaşım Elementi ve Tipik Özellikler</i> |
|---------------------|---|
| <i>1XXX</i> | <i>Alaşımsız Alüminyum (minimum %99 Al); Yüksek korozyon direnci, kolay birleşme özelliği, düşük dayanım, düşük işleme kabiliyeti, yüksek elektrik iletkenliği ve termal iletkenlik.</i> |
| <i>2XXX</i> | <i>Bakırlı Alaşım; Yüksek dayanım, nispeten düşük korozyon direnci, işlenebilme kabiliyeti çok iyi, ısıl işlem görebilir.</i> |
| <i>3XXX</i> | <i>Manganezli Alaşım; Düşük-orta arası dayanım, iyi korozyon direnci, işleme kabiliyeti düşük.</i> |
| <i>4XXX</i> | <i>Silisyumlu Alaşım; Ekstrüzyon işlemi için kullanışlı değildir.</i> |
| <i>5XXX</i> | <i>Magnezyumlu Alaşım; Düşük sayılabilecek dayanım, denizcilikte mükemmel korozyon direnci, çok iyi kaynak kabiliyeti.</i> |
| <i>6XXX</i> | <i>Silisyumlu ve Magnezyumlu Alaşım; Ekstrüzyonda en popüler alaşımdır. İyi ekstrüzyon edilebilme özelliği, iyi dayanım, iyi korozyon direnci, iyi işlenebilme kabiliyeti, iyi kaynak kabiliyeti, iyi plastik şekillendirilme kabiliyeti.</i> |
| <i>7XXX</i> | <i>Çinkolu Alaşım; Çok yüksek dayanım, talaşlı işlenebilme kabiliyeti iyi, ısıl işlenebilir.</i> |
| <i>8XXX</i> | <i>Demir ve Silisyumlu Alüminyum Alaşımı</i> |
| <i>9XXX</i> | <i>Yeni bulunan Alaşımlar (Örneğin: Lityumlu Alaşımlar)</i> |

T11. Sıcak şekillendirmeden sonra, soğutulmuş, soğuk işlem yapılmış ve tabii yaşlandırılmış.

T12. Sıcak biçimlendirmeden sonra, soğutulmuş ve suni olarak yaşlandırılmış. Suni yaşlandırmanın uygulanabildiği alaşımlar 2XXX, 6XXX ve 7XXX serileridir.

H- Isıl işlemleri ise 1XXX, 3XXX, 4XXX, 5XXX ve 8XXX'li serilere uygulanabilir [8].

2.4. Alaşım Elemanları ve Kazandırdıkları Özellikler

Bakır: Genel olarak bakır alüminyuma sertlik, dayanım, iyi döküm yapılabilme ve işlenebilme kolaylığı gibi özellikler kazandırmaktadır. Alüminyum içinde bakırın %12'ye kadar olan değeri dayanımı artırmaktadır. %12'den fazlası yapıda gevreklik meydana getirir. Ancak bakır dövme alaşımlarında %3 ile %5 arasında kullanılır. %5'den fazlası mekanik işleme güçlüklerinin ortaya çıkmasına, elektrik iletkenliği ve korozyon direncinin düşmesine sebep olur. Alüminyum içinde bakır genellikle yüksek sıcaklık özellikleri ile işlenebilirliği artırmaktadır [3].

Magnezyum: Magnezyum yüksek mukavemet, süneklik ile korozyon mukavemeti ve kabiliyeti sağladığı gibi malzeme yoğunluğunu da düşürmez. Mg_2Si (magnezyum silisit) yapacak miktarda magnezyum ve silisyum ihtiva eden alaşımlar ısı ileme tabi tutulabilen ve kolay işlenebilen alaşımlardır.

Silisyum: Silisyum miktarı arttıkça çekme ve akma mukavemeti artış gösterir. Alaşımın içerisindeki silisyum fazın şekli ve dağılımı önemlidir. Küçük ve yuvarlak primer faz veya ötektik yapı yüksek mukavemet ve süneklik verir. İğne şeklindeki silisyumlu faz çekme mukavemetini arttırmakla beraber süneklik, darbe ve yorulma mukavemetini düşürür [5].

Çinko: Alaşımda yer alan çinko alaşımın dökülebilirlik özelliğini düşürmekte, buna karşılık çekme mukavemeti, haddelenebilme ve işlenebilme kabiliyetini artırmaktadır. Yüksek oranda çinko ihtiva eden alaşımlar sıcak çatlama ve soğuma çekmesi meydana getirirler [7].

Demir: Demir alüminyum alaşımlarında tane küçültücü etki gösterir. Ayrıca bazı alüminyum alaşımlarında yüksek sıcaklık mukavemetini artırır. Dökümlerin sıcak çatlama eğilimini azaltıcı yönde rol oynamaktadır. İndirgeme ve izabe işlemlerinde istenmeyerek de olsa bir miktar demir alaşımda kalır.

Manganez: Manganez korozyon mukavemetini düşürmeden mekanik özellikleri iyileştirir. %0.75'e kadar Mn ilavesi, döküm alaşımlarında sertliği artırır, sünekliği azaltır. Dövme alaşımlarında Mn, yüksek mukavemet, korozyona karşı dayanıklılık ve iyi kaynak kabiliyeti verir. Fazla miktarda Mn veya Mg veya her iki elementin fazlaca bir arada olması haddeme sırasında çatlak oluşumuna yol açar. Mn, %10 Mn-Al alaşımı halinde alaşıma ilave edilir [5].

Nikel: Nikel alüminyum alaşımlarına yüksek sıcaklık mukavemeti ve boyutsal kararlılık sağlamak için ilave edilir [7].

Krom: Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarında korozyona karsı mukavemeti artırır ve gerilmeli korozyon ihtimalini azaltır. Krom, alaşıma %2 Cr-Al esas alaşım halinde ilave edilir. AlMgSi alaşımlarının sıcak Şekillendirme işlemlerinde yeniden kristalleşmeyi geciktirici rol oynar [5].

Kurşun: Özellikle kalay ve bizmut ile kullanıldığında alaşımın islenebilme kabiliyetini artırır. Alüminyum içersindeki erirliği çok düşüktür.

Fosfor: Fosfor, genellikle boksitte bulunan fosfatlardan gelen bir safsızlık elemanıdır. Ötektik üstü alüminyum-silisyum alaşımlarına silisyumlu primer fazın daha küçük ve daha muntazam dağılmış olarak bulunması için ilave edilir.

Titanyum: Titanyum genellikle, boksitte çok az miktarda bulunan TiO_2 'den gelen bir safsızlıktır.

Berilyum: Yüksek magnezyumlu (%4 ve daha fazla) döküm alaşımlarında curuflanmayı azaltmak ve yeniden ergime esnasında magnezyumun yanarak kaybolmasını önlemek için berilyum ilave edilir.

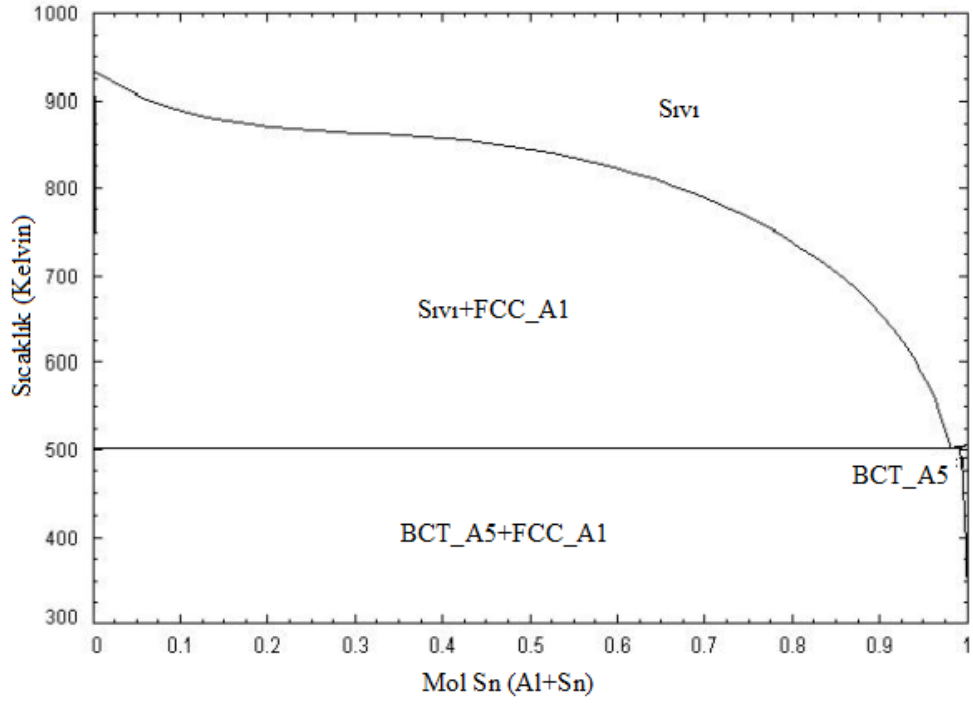
Zirkonyum: Zirkonyum tane küçültücü gerilmeli korozyona mani olan ve yüksek sıcaklıkta sürünme mukavemetini arttıran bir alaşım elemanıdır.

Sodyum: Sodyum, alüminyum-silisyum alaşımlarını modifiye etmek için kullanılır. Sodyum ihtiva eden alüminyum alaşımlarında mekanik özelliklerde süneklik ile darbe mukavemetinde çok düşme, sertlikte de çok az artma yapmakla beraber %0.01 mertebesindeki sodyum, sıcak yırtılmaya yol açabileceği gibi korozyon mukavemetini de düşürür.

Bor: Genellikle %0.01 oranında kullanılır. Titanyumla beraber iyi bir tane küçültücüsüdür [7].

2.5.Alüminyum ve Kalay Alaşımları

Metal ergidikten sonra ilavesi oldukça kolaydır. Alüminyum alaşımlarında kalay, düşük ve yüksek sıcaklıklarda dayanımı düşürür.Al-Sn faz diyagramı Şekil 2.3'de verilmiştir. Alüminyum-Kalay alaşımları çelik kılıf kullanarak her çeşit araç, makine, su pompaları, yağ pompaları vs. için 2000 çeşitten fazla burç, eksantrik yatağı ve motor yataklarında kullanılmaktadır [7].



Şekil 2.3. Alüminyum-Kalay Faz Diyagramı [22]

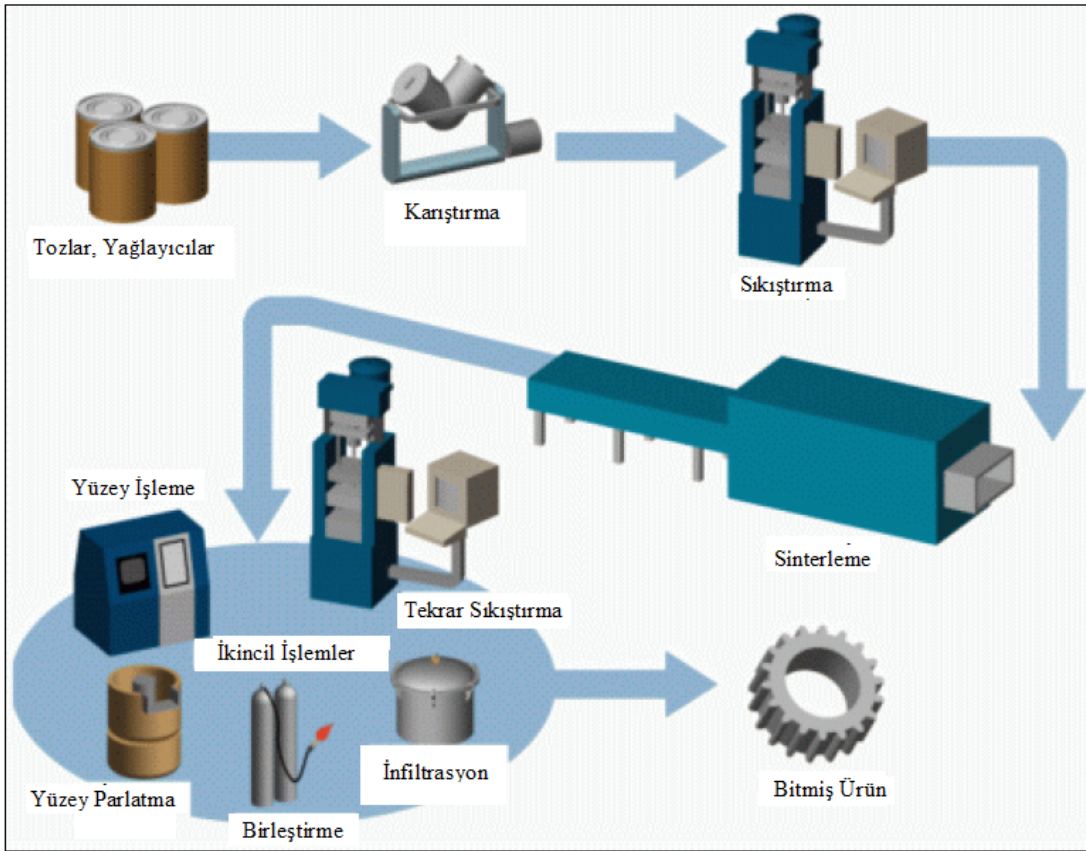
3. TOZ METALURJİSİ

Türk Standartları Enstitüsü Toz Metalurjisini “metalurjinin metalik toz veya bu tozların şekillendirilip sinterlenmesiyle ilgili bölümü” olarak tanımlamaktadır. Çok eskilerden beri bilinen ve uygulanan bir yöntem olmasına rağmen uygulama açısından yeni sayılabilecek bir üretim tekniğidir. Toz metalurjisini cazip kılan, ekonomik açıdan, çok yüksek hassasiyette karmaşık şekilli, yüksek kalitede parça üretiminin mümkün olmasıdır. Ergime sıcaklığı döküm yoluyla şekillendirme için gerekenden çok daha yüksek olan metaller, T/M ile kolaylıkla şekillendirilebilirler. Döküm, gibi alışlagelmiş üretim tekniklerinde yaşanan oksidasyon, segregasyon, gaz absorpsiyonu ve yüksek yoğunluk farkından dolayı alaşım oluşturmama gibi birçok problem T/M yöntemi ile kolaylıkla ortadan kaldırılabılır. Bir üretim yöntemi olmasının yanı sıra T/M aynı zamanda önemli bir malzeme ve yarı mamul üretim yöntemidir. T/M, kompozit malzeme üretiminde de kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yolla alışlagelmiş malzemelerden daha farklı ve üstün özelliklerde malzeme üretmek mümkündür [10].

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

Toz Metalurjisi T/M üretim yöntemi metal tozlarının üretimi ve üretilen bu tozların imalatı istenilen parçaların şekline dönüştürülmesi işlemidir. Bu yöntem toz üretimi, üretilen tozların karıştırılması, tozların preslenmesi, sinterleme ve isteğe bağlı işlemler (infiltrasyon, yağ emdirme, çapak alma, vb.) olmak üzere belirli aşamalardan oluşur (Şekil 3.1) [11].

Makine parçalarının hızlı, parçadan beklenen fonksiyonları yerine getirecek mukavemet ve özelliklerin yanı sıra istenen boyut hassasiyetlerinde üretimi gittikçe önem kazanmaktadır. Toz metalurjisi ile üretilen parçalar bu gereklilikleri her geçen gün daha fazla yerine getirmektedir. Karışık şekilli parçaların üretiminin yanında diğer yöntemlerle üretilmesi zor



Şekil 3.1. Toz metal parçaların üretim aşamaları [11]

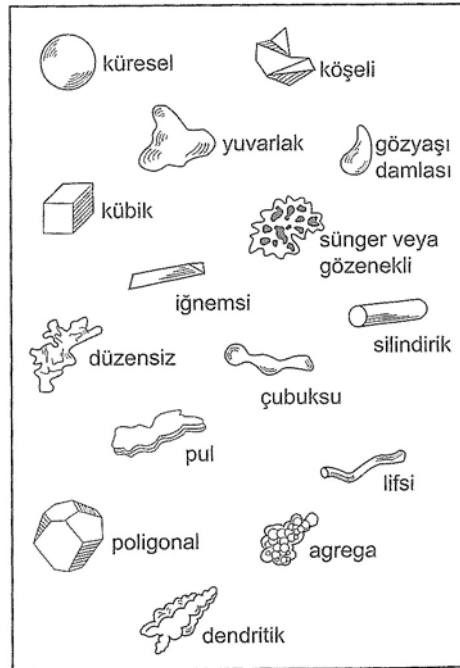
parçalar kısa sürede ve beklenen özelliklerde toz metalurjisi yöntemiyle üretilebilmektedir. Ayrıca istenilen kimyasal bileşimdeki metallerin tozları ile parça üretebilmenin yanı sıra farklı metallerin tozlarından oluşan karışımlar da kullanılabilir. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen makine parçaları ek bir talaşlı işlem gerektirmemektedir. Beklenen mekanik özelliklere ve toz bileşimine bağlı olarak belirlenen sinterleme işlemi sonunda makine parçası olarak doğrudan kullanılabilir [13].

Toz metalurjisi (T/M) yöntemi ile imal edilen makine parçalarının özellikleri toz tanelerinin şekli, boyutu, bileşimi, yağlayıcı cinsi, sıkıştırma basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresi, bitirme işlemleri gibi çok sayıda parametreye bağlı olduğundan özellikler hakkında genel sonuçlara varmak zordur. T/M parçaların mekanik özellikleri genellikle yoğunluğa bağlı olarak değişmektedir. T/M parçalarda gözenek miktarı azaldıkça genel anlamda mekanik özellikler iyileşmektedir. Bu genelleme kabaca kabul görürken, iyileşme oranının hangi parça yoğunluğu değerleri üzerinde önem kazandığı net değildir. Ancak düşük izafi yoğunluklarda toplam gözeneklilik miktarı ana faktör olarak gözlenirken, yüksek yoğunluklarda gözenek boyutu, sekli

ve dağılımı ile birlikte matris malzeme mikro yapısı daha önemli faktörler olarak dikkat çekmektedirler [11].

3.1. Metal Tozu Üretim Teknikleri

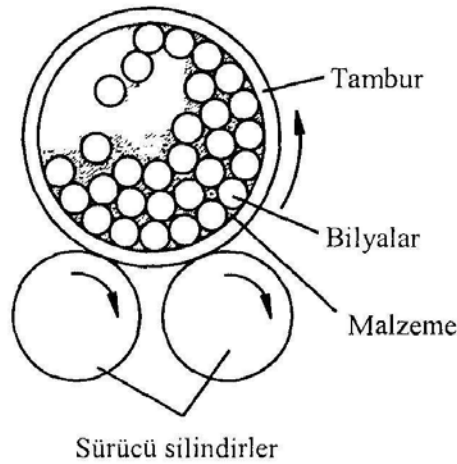
Hemen hemen bütün malzemeler toz haline getirilebilir, fakat tozları üretmek için seçilen metodlar malzeme özelliklerine bağlıdır. Öğütme, elektroliz, kimyasal indirgeme ve atomizasyon dört ana toz üretim yöntemidir. Bu üretim yöntemlerine ilave olarak, bazı seçilmiş malzemeler için özel toz üretim teknikleri de kullanılır. Endüstride kullanılan tozların % 60'dan fazlası atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir. Tozun geometrik şekli üretim yöntemine bağlı olarak küreselden, dendritik formlara kadar çok farklı olabilmektedir (Şekil 3.2). Aynı şekilde tozun yüzey durumu da düzgün veya gözenekli olması yine üretim yöntemine göre değişiklik göstermektedir [11].



Şekil 3.2. Toz morfolojileri (şematik) [6]

3.1.1. Ögütme

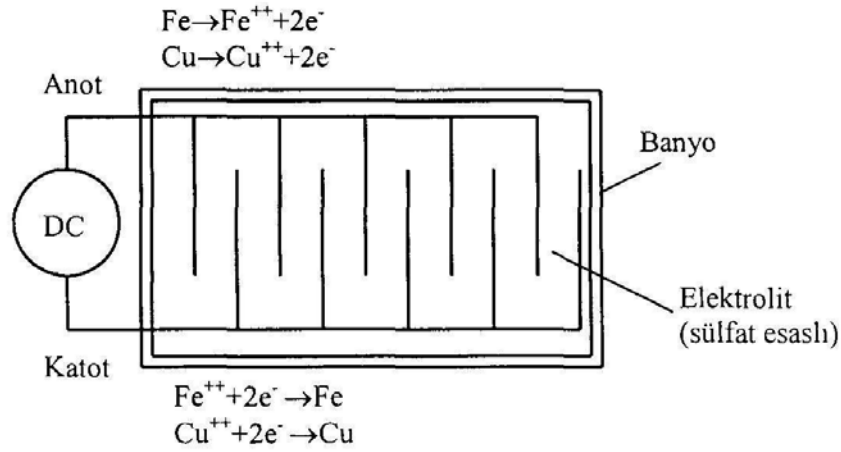
Metaller arası bileşikler, demir alaşımları, demir-krom, demir-silisyum v.b. gibi kırılğan malzemeler mekanik olarak bilyalı değirmenlerde (Şekil 3.3) ögütülürler. Fakat ögütme işleminin bir çok sünek metal için uygun değildir; çünkü bu metaller kolayca kırılmazlar. Sünek tanecikler kırılma yerine birbirleri ile soğuk olarak kaynaklanır ve daha büyük tanecik oluştururlar. Gevrek olmayan malzemelerin kırılması zor olduğu için ögütme işlemi genellikle bu tür malzemelere uygulanmaz, bunun yerine bazı sünek malzemeler sıvı azot ile soğutularak gevrek hale gelmesi ve ögütme işlemine elverişli hale gelmesi sağlanır. Sünek malzemelerin ögütülmesi özellikle alüminyumun ögütülmesinde yapışmayı engelleyici yağlayıcılar kullanılır. Bu yöntemde diğer bir uygulama da hidrürler oluşturmak ve sonra bu hidrürlerin vakum ortamında giderilmesi ile metal veya tozlarının eldesi sağlanır, bu yöntem daha çok titanyum için kullanılan bir yöntemdir. Burada elde edilen toz, kütleler halindedir ve yüksek oranda hidrojen ve oksijen içerir [10].



Şekil 3.3. Mekanik ögütme ile toz üretiminin şematik gösterimi [23]

3.1.2. Elektroliz

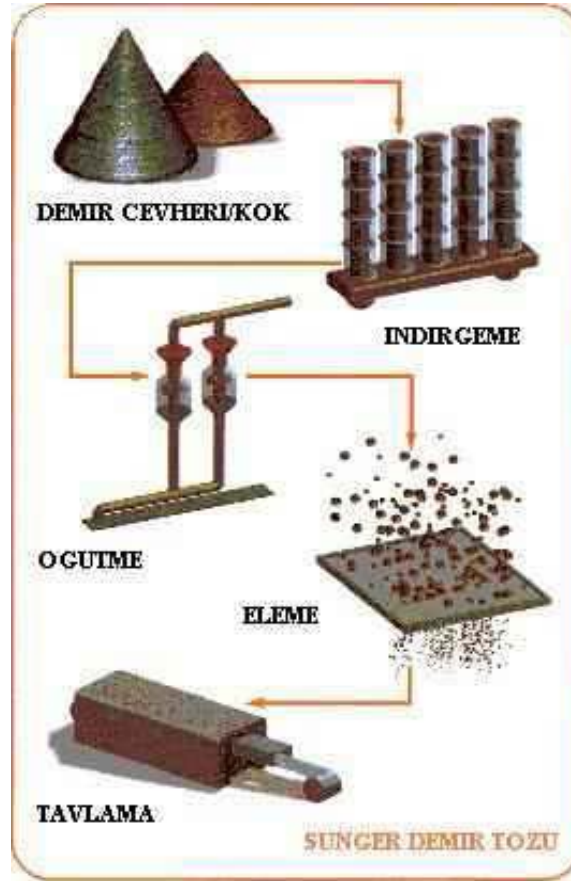
Elektrolitin kimyasal bileşimi ve mukavemeti, sıcaklık, akım yoğunluğu gibi şartları uygunca seçerek, bir çok metal sünger veya toz durumunda katot üzerinde biriktirilebilir (Şekil 3.4). Daha sonraki işlemler olarak, yıkama, kurutma, indirgeme, tavlama ve öğütme gerekli olabilir. Bu yöntemle üretilen metallerin başında bakır gelir, aynı zamanda krom ve magnezyum da bu yöntemle üretilir. Elektrolitik tozlar çok saftırlar [11].



Şekil 3.4. Elektroliz ile toz üretimi [23]

3.1.3. Kimyasal yöntem

Toz üretiminde ana kimyasal işlemleri metal oksit, karbonatlar, nitratlar veya halojenli (VII Grup element, F, Cl, Br, I) bileşiklerin bir gaz (genellikle H_2) veya katı (karbon veya yüksek oranda reaktif metal) yardımıyla indirgemesi oluşturur. Çoğu kez indirgenecek bileşik katı haldedir. Demir tozlarının üretiminde bu metod çok kullanılmaktadır. Bu yöntemde seçilen cevher öğütülür, kokla karıştırılır, karışım indirgemenin olduğu sürekli fırından geçirilir ve kek şeklinde sünger demir elde edilir (Şekil 3.5). Sünger demir daha sonra öğütülür, metalik olmayan malzemelerden ayrılır ve elenir. Tozların saflığı ham malzemelere bağlıdır. Düzensiz süngerimsi tanecikler yumuşaktır ve kolayca preslenebilir ve böylece ham mukavemeti iyi olan ürünler oluşur [11].



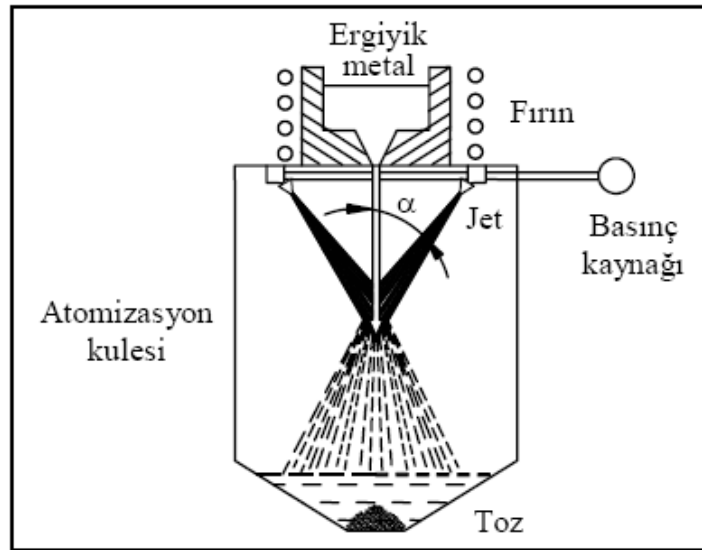
Şekil 3.5. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi [11]

3.2. Atomizasyon Yöntemleri

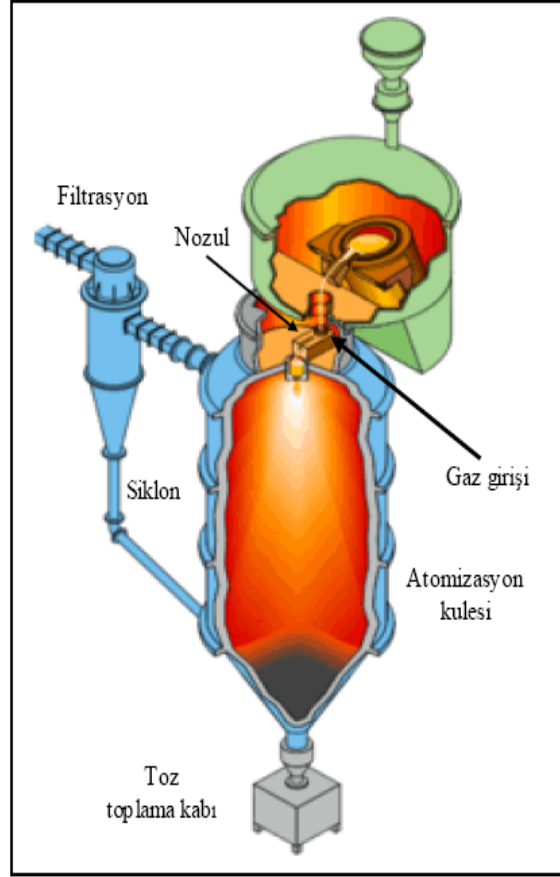
Atomizasyon, bir sıvı demetinin farklı boyutlardaki çok sayıda damlacıklara ayrılmasıdır. Temel prensip, bir potanın dibindeki delikten akmakta olan ergimiş metalin üzerine yüksek basınçlı gaz veya sıvı püskürtülmesidir. Hava, azot ve argon sıklıkla kullanılan gazlardır ve su ise çok sık tercih edilen sıvıdır. Burada gaz veya sıvı, ergiyik haldeki metal demetini farklı boyutlarda çok sayıda damlacıklara ayırır. Damlacıklar daha sonra katılarak metal tozlarını oluştururlar. Bu üretim yöntemi Ergitme, Atomizasyon, Katılma gibi üç ana bölüme ayrılır [15].

Metal tozlarının üretiminde yaygın olarak kullanılan atomizasyon yöntemleri paslanmaz çelik, pirinç, demir, alüminyum, çinko, magnezyum, kalay ve kurşun gibi metal ve alaşımları için oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Ayrıca atomizasyon yöntemleri, alüminyum ve alaşım tozlarının üretiminde en yaygın ve en ekonomik olan yöntemlerdir.

Atomizasyon yöntemlerinden su atomizasyonu (Şekil 3.6), sıvı metalin su jeti ile parçalanması, gaz atomizasyonu ise gaz jeti ile parçalanması olarak tanımlanır. Çevresel olarak yerleştirilmiş olan memelerde oluşan basınçlı su jetleri sıvı metali keserek parçalar. Oluşan damlacıklar tankın dibine doğru hareket ederken soğuyarak katılaşırlar ve dibe çökelirler. Su çok iyi bir soğutucu olduğundan, suyla atomizasyon tankları kısadır (1m civarında). Gaz atomizasyonu da benzeri şekilde oluşur. Ancak gazlar iyi soğutucu olmadıklarından gaz atomizasyon tankları daha uzundur (Şekil 3.7) [15].

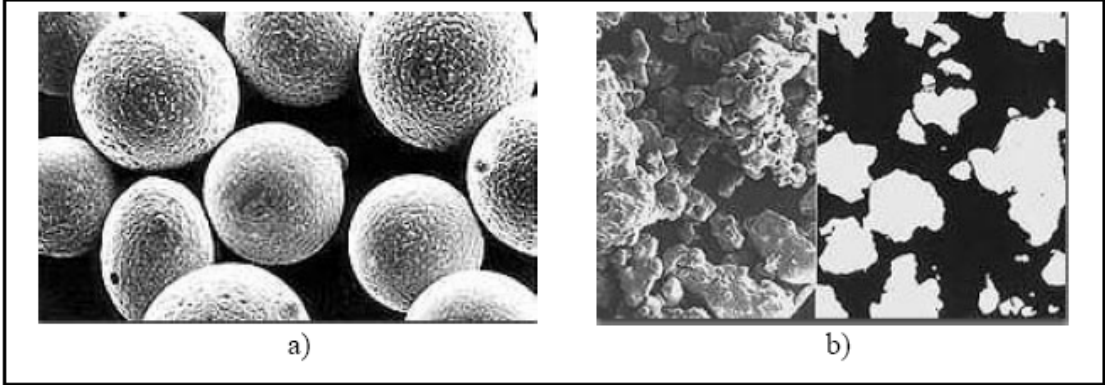


Şekil 3.6. Su atomizasyonu işlemi [23]



Şekil 3.7. Düşey gaz atomizasyonu ünitesi [23]

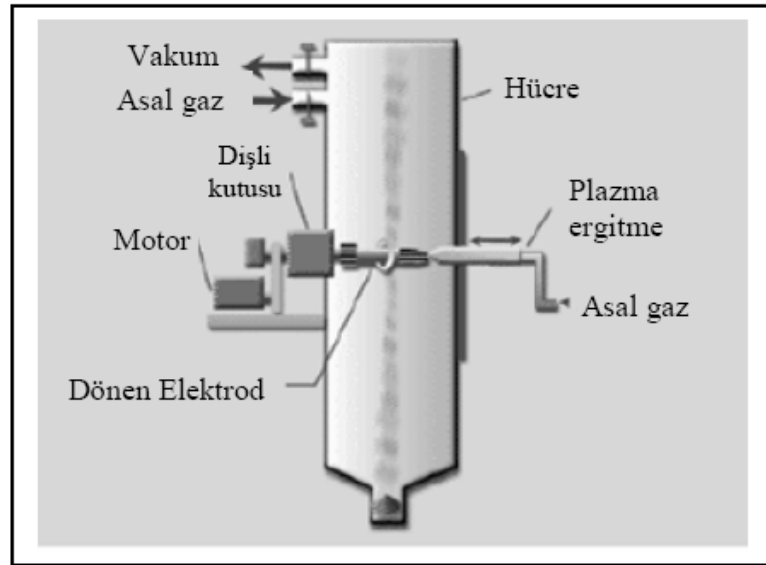
Gaz atomize tozlar küresel veya küresele yakın şekillidirler (Şekil 3.8a) Su atomize tozlar genel olarak karmaşık şekilli olup (Şekil 3.8b), bu tozların sıkıştırılabilirlikleri ve sıkıştırılma sonrası ham mukavemetleri yüksektir [16].



Şekil 3.8. Tozların genel yüzey görüntüleri [16]
a) Gaz atomize tozlar b) Su atomize tozlar

Ergiyik metalden toz üretimi için merkezkaç kuvvetinin kullanılması olarak bilinen döner disk santrifüj atomizasyon yönteminde, sıvı metal dönen bir disk üzerine akıtılır. Disk üzerindeki set ve yarıklara çarpan sıvı metal parçalanarak saçılır. Saçılan metal parçacıklar soğutulularak katılaşmaları sağlanır [23].

Döner elektrot kullanılarak yapılan santrifüj atomizasyon yöntemi ise, dönmekte olan elektrotun ergiyen ucundaki sıvı metal damlaların atomize olması esasına dayanır (Şekil 3.9) [11].



Şekil 3.9. Döner elektrot atomizasyon yöntemi [11].

Döner elektrot kullanılarak yapılan santrifüj atomizasyon yönteminde tozu elde edilecek metalden yapılmış elektrot ile ergimeyen tungsten elektrot arasında ark oluşturulur. Ergiyen elektrotun döndürülmesiyle, elektrik arkı altında oluşan damlacıklar savrulur ve tankta toplanır. Oksidasyonu önlemek için toz toplama tankı helyum, argon gibi asal gazlarla doldurulur. Döner elektrot yöntemiyle, kobalt, krom ve titanyum alaşım tozları üretilmektedir.

Atomizasyon yöntemleriyle bir tozun ortalama boyutu, toz boyutu dağılımı, toz şekli, yüzey kompozisyonu da dahil olmak üzere kimyasal bileşimi ve mikro yapısı kontrol edilebilir. Bu temel özellikler, tozların ve bitmiş parçaların görünür yoğunluk, sıkıştırılabilirlik ve tokluk gibi özelliklerini belirler. Bunların yanı sıra, atomizasyon yöntemlerindeki yüksek toz üretim hızı, ekonomik olarak bir üstünlüktür. Her atomize partikül bir ön alaşım veya küçük bir kütük gibidir ve her partikülde bileşim aynıdır [23].

4. GAZ ATOMİZASYONU

Toz metalurjisinde gaz atomizasyonu işlemi sıvı metal demetinin, yüksek hızlı gaz akışı etkisiyle parçalanması olarak tanımlanır. Sıvı metal damlacıkları parçalanma sonrasında küreselleşir, soğur ve katılaşılarak, tipik tane boyutu dağılımları 1 mikrondan 1mm'ye kadar değişen metal tozları meydana gelir. Gaz atomizasyonu ile üretilen küresel alaşım tozları, işlem esnasında gösterdiği hızlı katılma karakteristiğinden dolayı üstün özelliklere sahiptir ve bu da gaz atomizasyon yöntemini cazip kılmaktadır [18].

Gaz atomizasyon yönteminde amaç yüksek hızda genleşen gazın kinetik enerjisini sıvı metale aktararak metali küçük damlacıklara ayırmaktır. Düzenli bir gaz atomizasyon işlemi için aşağıdaki koşullar sağlanmalıdır [11].

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

Atomizasyonda gaz jeti üç fonksiyonu yerine getirir. Başlangıçta sıvı metal demetini kesip parçalamak için gerekli kinetik enerjiyi damlacıklara aktarır. Daha sonra damlacıkları gaz akısı içinde ivmelendirir ve son olarak uçuşma esnasında onların soğumasına neden olur [15].

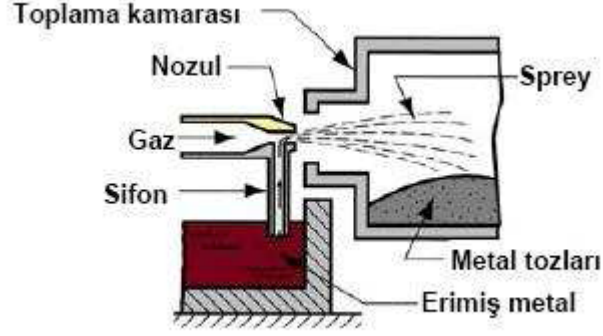
Gaz atomize tozların üstün özellikleri şunlardır [19]:

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

4.1. Gaz Atomizasyonu Üniteleri

Gaz atomizasyon üniteleri metal besleme mekanizmaları, ergitme ve toz toplama bölümlerinin yapısı bakımından farklılık gösterirler. Fakat hepsinde sıvı metal demetine enerji aktarmak suretiyle toz üretilmektedir. Düşük ergime sıcaklığına sahip metaller için gaz atomizasyon üniteleri yatay olarak tasarlanır. Şekil 4.1'de görülen ünite, nozuldan geçen yüksek hızdaki gaz sifon etkisi yapar ve ergiyik metal gaz genleşme bölgesine çekilir. Burada

metal demetinin püskürtülüp parçalanmasıyla elde edilen damlacıklar, toz toplama odasındaki uçuşma esnasında ısı kaybına uğrar ve katılaşırlar [11].

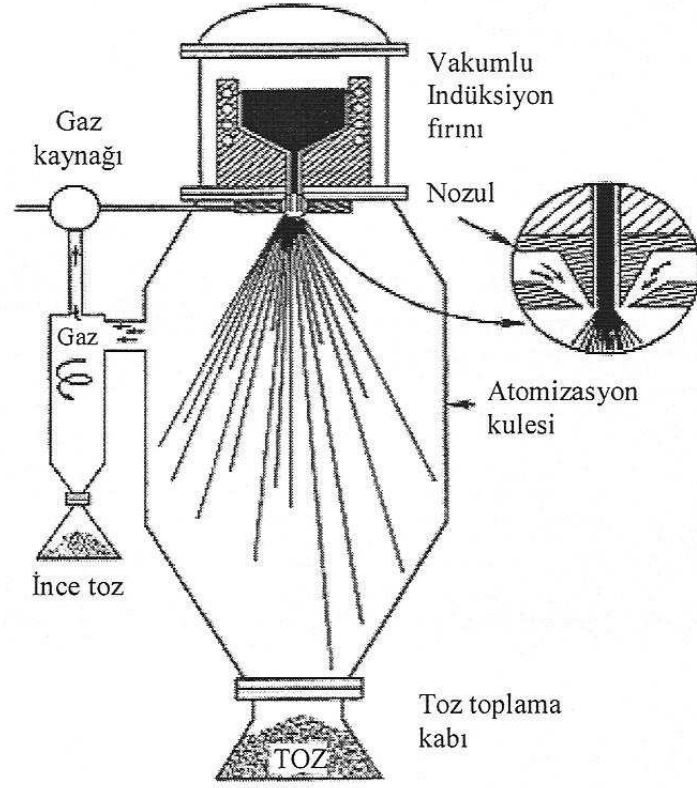


Şekil 4.1. Yatay gaz atomizasyon ünitesi [17]

Yatay üniteye atomize edilmiş tozlar, düşey olarak atomize edilmiş tozlara göre daha iridir ve daha geniş aralıkta bir toz dağılımına sahiptir.

Yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin atomizasyonunda, içi asal gaz ile doldurulan kapalı bir kuleye sahip, düşey gaz atomizasyon üniteleri kullanılır (Şekil 4.2) ve böylece oksidasyon önlenir. Bu tip ünitelerde metal, indüksiyon fırını ile ergime sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve eriyik metal nozul içersine akıtılır. Atomizasyon kulesi damlacıkların kule çeperine çarpmadan katılaşmasına imkan verecek şekilde olmalıdır. Kuleler paslanmaz çelikten imal edilirler. Atomizasyon işleminde kullanılan gazın kule iç basıncını yükseltmesine engel olmak için bu gazın kule dışına tahliyesi önemlidir. Bu amaçla siklon kullanılır. Siklon aynı zamanda ince tozların tutulması amacıyla da kullanılır [11].

Gaz atomizasyonunda sıvı metal demetini parçalamak için kullanılan gaz jeti azot, argon, karbondioksit ve helyum gibi gazlar veya hava olabilir. Asal gazlar, süper alaşımlar ve titanyum gibi reaktif metaller atomize edildiğinde veya oksijen miktarının düşük seviyelerde olması istendiğinde kullanılır ve küresel tozlar elde edilir. Hava atomize tozlar ise karmaşık



Şekil 4.2. Düşey gaz atomizasyon ünitesi şematik görünüm [6]

şekillidir. Küresel toz şekli, ticari T/M uygulamalarında gruplandırma ve karıştırma kolaylığı açısından tercih edilen bir özelliktir [20].

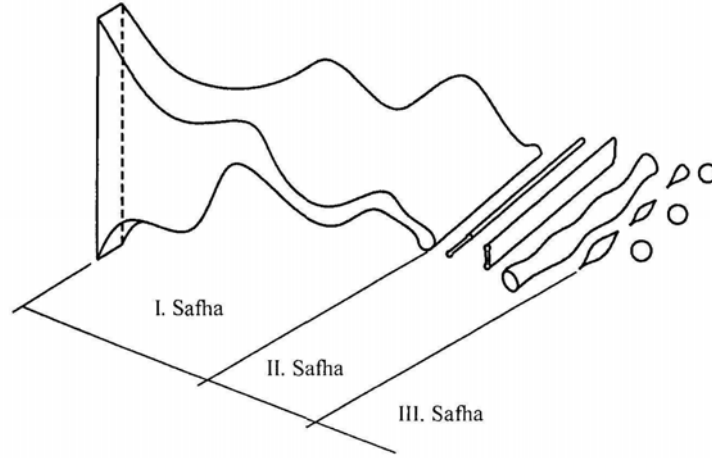
Gaz atomizasyonunda toz karakteristiklerini belirleyen çok sayıda üretim değişkeni mevcuttur. Bunları, sıvı metal ile ilgili olanlar ve gaz sistemi ile ilgili olanlar diye iki ana gruba ayırabiliriz. Sıvı metal ile ilgili olanlar: ergiyik metalin sıcaklığı, viskozitesi, yüzey gerilmesi ve akış debisidir. Gaz sistemi ile ilgili olanlar: gazın cinsi, basıncı, debisi, hızı ve nozul geometrisidir [11].

4.2. Atomizasyon Mekanizmaları

Bir nozuldan atmosfere aniden çıkan sıvı metal demeti, sıvı metalin, onu çevreleyen gazın fiziksel özelliklerine, atomizasyon ortamının hız ve basıncına ve nozul tasarımına bağlı olarak, silindirik kolon, yassı tabaka veya konik bir yüzey seklini alabilir. Atomizasyon mekanizmaları literatürde geniş bir şekilde açıklanmaktadır. Bunların hepsinde ortak nokta, atomizasyon işleminin birkaç safhada meydana geldiğidir (Şekil 4.3).

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

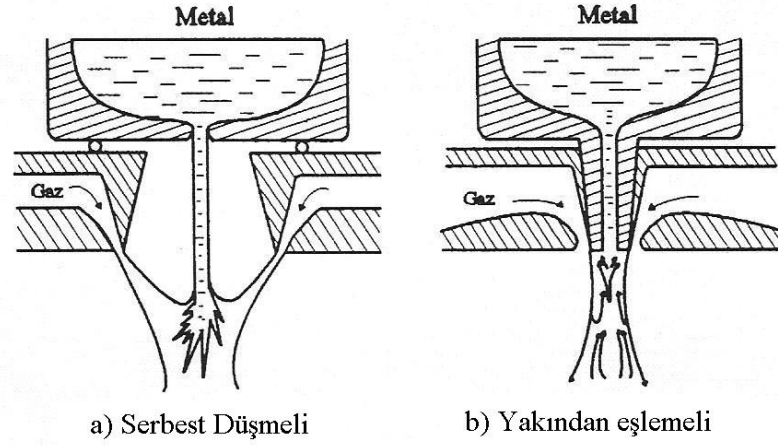
Tozların soğuması ve katılması atomizasyon kulesi içinde havada uçarken meydana gelir. Sıvı metal damlacıklarının katılma hızı önemlidir çünkü bu hız tozların seklini belirler [11].



Şekil 4.3. Sıvı metal tabakasının bölünme mekanizması [11]

4.3. Atomizasyon Sistemleri

Atomizasyon sistemleri, serbest düşmeli ve yakından eşlemeli olmak üzere iki çeşittir. Serbest düşmeli (Şekil 4.4-a) sistemlerde sıvı metal, gaz jeti ile temas edinceye kadar serbest olarak akar. Sıvı metal yerçekiminin etkisinde belli bir süre aktıktan sonra gaz jeti ile temas eder. Yakından eşlemeli sistemlerde, sıvı metal nozul gaz çıkış bölgesine seramik bir akış borusu ile gönderilir. Yakından eşlemeli (Şekil 4.4-b) sistemlerde daha iyi enerji aktarımı gerçekleştiği için atomizasyon verimleri yüksektir.



Şekil 4.4. Atomizasyon Sistemleri (Şematik): a) Serbest düşmeli, b) Yakından eşlemeli

Yakından eşlemeli sistemler yüksek verimde çalışmalarına rağmen bazı zorluklara sahiptir. Bunlardan en önemlisi metal akış borusu ucunda oluşan basınçtır. Bu basınç negatif ya da pozitif olabilir. Yüksek atomizasyon basınçlarında, sıvı metal akışının kararlılığı, nozul ve metal akış borusunun boru ucunda negatif basınç oluşturacak geometride tasarlanmasıyla kontrol edilebilir. Yakından eşlemeli sistemlerde karşılaşılan sorunlardan bir diğeri ise yüksek atomizasyon basınçlarında sıvı metalin, metal akış borusu içinde katılaşması sorunudur. Sıvı metalin katılaşması sonucu atomizasyon işlemi sona erer. Bu yüzden metal ergime sıcaklığının 100-200 °C üzerine ısıtılır. Aşırı ısıtılmış metal atomizasyon bölgesine girmeden önce seramik akış borusunun içinden geçer. Sıvı metalin seramik akış borusu içersinde katılaşmasını önlemek

amacıyla seramik boru direnç telleri ile ısıtılır. Bu sistemlerde serbest düşme sistemlerine göre daha kolay bölünme gerçekleşir ve daha ince boyutlarda, sıkıştırılma kapasitesi ve akıcılığı yüksek küresel tozlar üretilir [18].

5. DENEYSEL YÖNTEM

Bu çalışmada, gaz atomizasyon sisteminde kullanılacak bir fırın tasarlanmış ve yine Dumlupınar Üniversitesi gaz atomizasyonu ünitesinde Al-20Sn-3Si, Al-15Sn-1Cu, Al-15Sn-4Si-1,5Cu alaşım tozları üretilerek özellikleri incelenmiştir.

5.1. Gaz Atomizasyonu Ünitesi

Bu tez çalışmasında alüminyum alaşımlarının üretilmesinde Dumlupınar Gaz Atomizasyonu Ünitesi (Şekil 5.1) kullanılmıştır. Atomizasyon ünitesinin bölümleri olan gaz sistemi, ısıtma ve ergitme, nozul, atomizasyon kulesi, toz tutma bölümleri kısaca açıklanmıştır.



Şekil 5.1. Dumlupınar gaz atomizasyonu ünitesi

5.1.1 Gaz sistemi

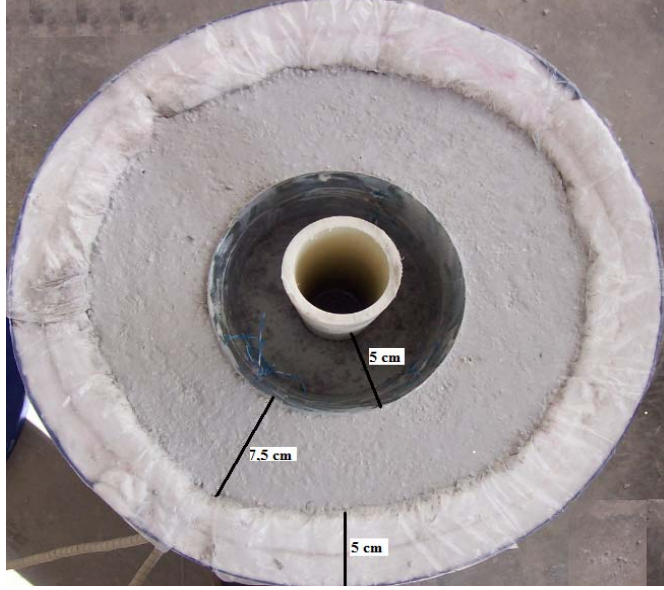
Yapılan deneylerde atomizasyon gaz kaynağı olarak 200 bar işletme basıncına sahip paralel olarak bağlı 12 adet basınçlı tüp kullanılmıştır. Atomizasyon basıncının ayarlanması, tüplerin çıkışına yerleştirilen bir regülatör yardımı ile yapılmıştır. Regülatör çıkışına bir küresel vana, vanadan sonra atomizasyon basıncını ölçmek amacıyla bir basınç algılayıcısı yerleştirilmiştir. En son noktada okunan dijital basınç değeri atomizasyon gaz basıncı olarak kabul edilmiştir. Atomizasyon gazı olarak azot (N_2) kullanılmıştır.

5.1.2 Metal ergitme

Metallerin ergitme işlemini gerçekleştirebilmek için rezistanslı fırın tasarlanmıştır. Fırının tasarımında DKP Sacından fırın şasesi, 1630 °C'a dayanıklı yoğun beton, 1260 °C'a dayanıklı seramik elyaf battaniye ve Kanthal A1 rezistans tel kullanılmıştır. Tasarıma başlarken ilk önce sıcaklığı 1000-1100 °C'a çıkartabilecek bir rezistans sisteminin hesabı yapılmıştır. Bu hesaplara 2200 W enerji verebilecek 26,8 m boyunda ve 1,5 mm çapında kanthal A1 rezistans teli kullanılmıştır. Rezistans teli torna makinasında 4 mm hatveyle sarılmış ve sarılan rezistans tel 10 cm çapında bir silindirik metalin etrafına eşit aralıklarla 5 kez sarılarak hazırlanmıştır (Şekil 5.2). Fırının yalıtımı ise 7,5 cm yoğun beton ve 5 cm kalınlığında seramik elyaf battaniye ile sağlanmıştır (Şekil 5.3). Fırının üst kapağı sıvı metalin sıcaklığını ölçmek için kullanılacak ısı çiftinin geçebileceği şekilde delinmiştir (Şekil 5.4). Isıtma işlemi 800-810 °C aralığında kontrol panosu vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.5).



Şekil 5.2. Fırında kullanılacak olan rezistans telin sarılmış hali



Şekil 5.3. Fırın Yalıtımının Boyutlandırılması



Şekil 5.4. Metal ergitme fırını



Şekil 5.5. Gaz atomizasyonu ünitesi kontrol panosu

5.1.3 Atomizasyon kulesi

Atomizasyon kulesi, sıvı metalin gaz ile buluşup atomize edildiği ve sonra da katılaşıp toz haline geldiği atmosfere kapalı hacimdir. Atomizasyon kuleleri genel olarak paslanmaz çelikten imal edilerek iç yüzeyleri parlatılmaktadır.

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

5.1.4 Toz tutma ve sistem temizliği

Ünitede iki ayrı toz toplama kabı mevcuttur. Bunlar kule altında bulunan toz toplama kabı ve siklondur (Şekil 5.6). Toz toplama kabı ünitenin en alt kısmında yer almaktadır ve atomize edilmiş tozların çoğunluğunun toplandığı yerdir. Paslanmaz çelikten imal edilmiştir ve tabanı tozların soğumasını hızlandırmak amacıyla ısı transfer katsayısı yüksek olan bakır ile kaplanmıştır.

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



Şekil 5.6. Toz tutma kaplarının görünüşü

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

5.2 Atomizasyon Gaz Debisinin Ölçümü

Gaz atomizasyonunda, metal tozu üretimi için kullanılan gaz miktarı, enerji kullanımı açısından önemli bir parametredir. Bunun için, bir fiziksel parametre olan gaz debisinin metal akış debisine oranı (G/M), işlem ekonomikliğin anahtar göstergesidir. Yapılan deneylerde farklı gaz debisi değerleri, ünite üzerinde yer alan SIEMENS SITRANS F C MASSFLO MASS 2100 tipi kütleli debi ölçüm cihazı (Şekil 5.7) kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 5.7. Kütlesel debi ölçüm cihazı

5.3 Metal Akış Debisinin Ölçümü

Yapılan atomizasyon deneylerinde işlem bir video - kamera yardımıyla görüntülenerek kaydedilmiştir. Metal akış debisi sıvı metalin akış süresi ile ilgili olduğu için sıvı metalin ilk akışı ile bitişi arasındaki zaman ve ergitilen malzeme miktarı göz önüne alınarak metalin kütlesel akış debisi hesaplanmıştır.

5.4 Atomizasyon Çalışmaları

Dumlupınar Gaz Atomizasyonu Ünitesi'nde yapılan deneylerde azot gazı kullanılarak alüminyum-kalay alaşımlarından, alaşımlarda belirtilen oranlarda katılarak ve her alaşımdan 1500 g olacak şekilde atomizasyon kulesi üzerindeki fırın içersinde bulunan potada 800-810 °C arasında ergitilerek atomize edilmiştir.

5.5 Toz Boyut Analizi

Toz boyutu, ortalama boyut ve toz boyutu dağılımı ile karakterize edilir. Bir tozun boyutunu ifade etmek için çeşitli ortalama çap ölçüleri kullanılır. Bunlardan en yaygın olanı, boyut dağılımı grafiğindeki birikimli yüzde eğrisinin % 50 değerine karşılık gelen kütle ortanca çapıdır (d_m veya d_{50}). Kullanışlı olan diğer ortalama çap ölçüleri ise, Sauter ortalama çapı (d_{vs}) ve hacim ortalama çapıdır (d_{vm}). Sauter ortalama çapı, ince tozların bulunduğu aralıklardaki değişmelere, hacim ortalama çapı ise kaba tozların bulunduğu aralıktaki değişmelere karşı duyarlıdır. Kütle ortalama çapı olan d_{50} , bundan sonra "ortalama boyut" olarak anılacaktır.

Ortalama boyut, bir tozu tanımlamak için her zaman yeterli olmayabilir ve logaritmik normal dağılımın standart sapmasına ihtiyaç duyulur. Standart sapmayı veren ifade şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\sigma_g = \left(\frac{d_{84.1}}{d_{15.9}} \right)^{1/2} = \left(\frac{d_{84.1}}{d_{50}} \right) = \left(\frac{d_{50}}{d_{15.9}} \right)$$

Gaz atomize alüminyum tozları için σ_g değeri, toz boyutuna ve atomizasyon şartlarına bağlı olarak 1.8 ile 2.5 arasında değişir. Boyut dağılımı, özellikle bitmiş ürün yoğunluğuna etkisi sebebiyle en az ortalama boyut kadar önemlidir. Gaz atomize tozlar genel olarak logaritmik normal dağılım göstererek tipik bir çan eğrisi oluştururlar. Tipik ürün, geniş bir aralığa sahip çok boyutlu tozlardır.

Toz boyut ölçümleri, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Laboratuvarında bulunan ve lazer ışığının kırınımı prensibine göre çalışan Malvern Mastersizer E toz boyutu ölçme cihazında yapılmıştır.

Ölçümler esnasında taşıyıcı ortam olarak su kullanılmıştır. İnce tozların topaklanmasını önlemek ve homojen bir dağılım elde etmek amacıyla tozlar beş dakika süreyle mekanik ve ultrasonik olarak karıştırılmıştır. Lazer ışını prensibinde tozlar bir sıvı haznesi içinde süspansiyon haline getirilir. Sıvı banyosuna lazer ışın demeti gönderilir. Tozlara çarpan lazer ışını tozun çapı ile ters orantılı olarak kırılır. Hazneden ve fourrier merceği üzerinden geçip detektör üzerine düşen kırılmış ışının açısı ve şiddeti ölçülerek toz boyut dağılımı belirlenir (Şekil 5.8).

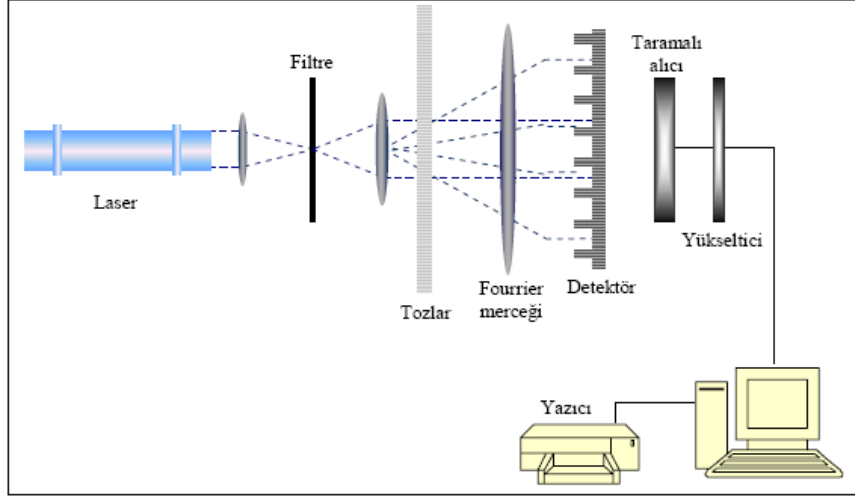
5.6 Tozların Şekil ve Morfolojilerinin İncelenmesi

Tozların şekil ve morfolojileri Tübitak Marmara Araştırma Merkezi'nde bulunan JEOL JSM 6335-SEM tipi taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımı ile incelenmiştir (Şekil 5.9).

5.7 Tozların Bakalite Alınması

Tozların bakalite alınma işlemi Osmangazi Üniversitesi Metalurji Mühendisliği Bölümünde bulunan Struers Labopress-3 cihazı ile yapılmıştır (Şekil 5.10). Bakalite alma

işleminde tozlar kalıplama presine konularak üzerine termoplastik reçine ile doldurulup 180 °C sıcaklık ve yüksek basınç altında bakalite alınmıştır.



Şekil 5.8. Lazer ısıyı prensibinin şematik olarak gösterimi



Şekil 5.9. JEOL JSM 6335-SEM marka SEM cihazı



Şekil 5.10. Struers Labopress-3 Bakalite Alma Cihazı

5.8 Tozların Mikro Sertlik Ölçümü

Bakalite alınan tozlar en son 1000'lik zımparalarla zımparalanıp elmas sprey ve çuha yardımıyla parlatıldıktan sonra Dumlupınar Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde bulunan VICKERS Sertlik ölçüm cihazı (Şekil 5.11) ile sertlikleri ölçülmüştür.



Şekil 5.11. VICKERS Sertlik Ölçüm Cihazı

5.9 Tozların Mikro Yapısı

Bakalite alınan tozlar zımparalanıp çuha ve elmas sprey yardımıyla parlatıldıktan sonra 15 s süreyle keller dağlayıcısı ile dağlanmışır. Dağlanan tozların mikroyapıları Dumlupınar Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği laboratuvarında bulunan Nikon marka optik metal mikroskobu ile çekilmiştir.

5.10 Tozların Görünür Yoğunluğu

Görünür yoğunluk serbest halde bulunan tozların birim hacimdeki kütlesidir. Tozların görünür yoğunluğu önemli bir parametredir. Görünür yoğunluk tozlardaki boşluk derecesi ve toz şeklinin bir fonksiyonudur. Toz şeklinin karmaşıklaşması ve gözenekliliğin artması görünür yoğunluğu düşürür. Görünür yoğunluğun düşmesi ise sıkıştırma aşamasında hacim azalmasını artırır ve böylece soğuk kaynak miktarını artırır. Neticede daha yüksek ham mukavemetli parça elde edilmiş olur. Parçanın sinterlenme verimi de soğuk kaynak miktarının artmasından dolayı artacaktır.

Üretilen tozların görünür yoğunluğu “Arnold metre” (Şekil 5.12) görünür yoğunluk ölçüm düzeneği kullanılarak ölçülmüştür. Ölçüm yapılırken MPIF 48 standartı dikkate alınmıştır. Tozlar, sistemdeki hareketli olan kaba konularak sabit ve 20 cm³ hacmindeki kaba, yüzeyi sıfırlanacak şekilde doldurulmuş ve dolan tozların ağırlığı ölçülerek görünür yoğunluk hesaplanmıştır.



Şekil 5.12. Arnold metre görünür yoğunluk ölçüm düzeneği

5.11 Tozların XRD Ölçümleri

Tozların XRD Ölçümleri Dumlupınar Üniversitesi Seramik Mühendisliği Bölümünde bulunan MiniFlex marka XRD Cihazı ile ölçülmüştür. Ölçümler 20° ile 90° arasında çekilmiştir.

5.12 Tozların DTA ve TG Analizi

Tozların DTA ve TG analizi Dumlupınar Üniversitesi Seramik Mühendisliği Bölümünde bulunan PerkinElmer marka TG/DTA cihazı (Şekil 5.13) ile yapılmıştır. Analiz azot gazı ortamında 700 °C sıcaklık ve 10°/dak hızda yapılmıştır.



Şekil 5.13. TG/DTA cihazı

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1. Toz Üretim Şartlarının Değerlendirilmesi

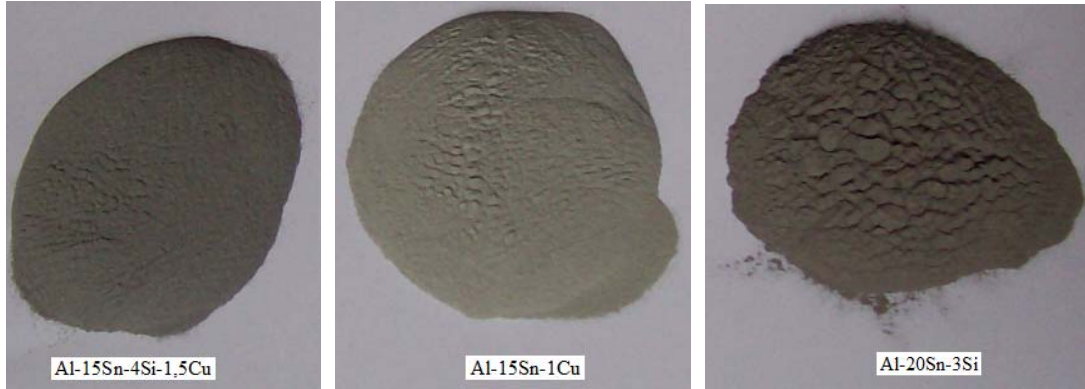
Deneylede atomizasyon işlemine başlamadan önce pota içersine yerleştirilen açma kapama çubuğu, pota altındaki delikten sıvı metalin akmamasını sağlayacak bir kuvvetle deliğe yerleştirilmiştir. Daha sonra yapılacak alaşımın bileşenleri oranında saf alüminyum, saf kalay, bakır ve Al-Si alaşımı pota içine konularak ergitme odası kapatılmış ve ergitme işlemi başlatılmıştır. Deneylede üretilen tozların kimyasal bileşimi Çizelge 6.1’de verilmiştir. Ergitme işlemi ile birlikte sıvı metalin donma sorununu ortadan kaldırmak amacıyla metal akış borusu da ısıtmaya başlanmıştır. Fırın alaşımların ergime sıcaklığının 150-200 °C üzerine ayarlanarak aşırı ısıtma yapılmıştır. Gaz akış hattındaki regülatör yardımıyla atomizasyon gaz basıncı ayarlanmıştır. Deneylede sisteme öncelikle gaz vanası açılarak azot gazı gönderilmiş, hemen ardından açma-kapama çubuğu pnömatik sistem yardımıyla açılarak atomizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Deney sonrasında ünite plastik bir çekiç ile dövülerek gözetleme noktalarına biriken ve ünite iç yüzeyine yapışan tozların toz toplama kabına düşmesi sağlanmıştır. Üretilen tozlar (Şekil 6.1) toz toplama kabı ve siklondan alınarak 200 mikronluk elekten elendikten sonra plastik kutularda saklanmıştır. Deney sonuçlarının birbirini etkilememesi amacıyla her deney sonrasında ünite bağlantı noktalarından sökülerek gözetleme pencereleri ve kule iç yüzeyi vakum süpürge ile süpürüldükten sonra bezlerle temizlenmiş ve tekrar kapatılmıştır.

Çizelge 6.1. Üretilen tozların ağırlıkça kimyasal bileşim oranları

| Alaşım Kodu | Alaşım | Kalay | Silisyum | Bakır | Alüminyum |
|-------------|-------------------|-------|----------|-------|-----------|
| A1 | Al-20Sn-3Si | 20 | 3 | --- | 77,0 |
| A2 | Al-15Sn-1Cu | 15 | --- | 1,0 | 84,0 |
| A3 | Al-15Sn-4Si-1,5Cu | 15 | 4 | 1,5 | 79,5 |

Alaşım tozlarının üretiminde gerçekleşen atomizasyon koşulları ve ortalama toz boyutu Çizelge 6.2’de verilmiştir. Gaz atomizasyon işlemlerinde toz boyutuna etki eden en önemli değişkenlerden ikisi atomizasyon gaz basıncı ve gaz/metal kütleli debi oranıdır. Genel olarak gaz basıncı arttıkça ortalama toz boyutunda küçülme gerçekleşir. Bunun en önemli

nedenlerinden birisi birim sıvı metal kütlesi üzerine etki eden gaz miktarının artması dolayısıyla sıvı metale aktarılan enerjinin artmış olmasıdır.



Şekil 6.1. Üretilen alaşım tozlarının genel görünüşü

Gaz basıncı oldukça düşük olmasına rağmen elde edilen toz boyutlarının küçük olması atomizasyon işleminin veriminin yüksek olduğunun bir göstergesidir. 12,64 bar gaz basıncında ortalama toz boyutu 42,40 μ m iken 9,76 bar gaz basıncında 60,30 μ m olarak gerçekleşmiştir. Toz boyutunun gaz basıncına çok duyarlı olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.2. Alaşım tozlarının üretiminde atomizasyon koşulları ve ortalama toz boyutu

| Alaşım | Gaz Basıncı (bar) | Metal Debisi (kg/dak) | Gaz/Metal debi oranı | Ortalama Toz Boyutu (μ m) | Atomizasyon Süresi (s) |
|--------|-------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------|------------------------|
| A1 | 12,64 | 1,619 | 1,14 | 42,40 | 56 |
| A2 | 10,85 | 1,603 | 0,998 | 52,21 | 55 |
| A3 | 9,76 | 1,885 | 0,748 | 60,30 | 50 |

Tozların üretimi için hazırlanan sıvı alaşım ve elde edilen toz miktarları Çizelge 6.3'de verilmiştir. Sıvı metale uygulanan aşırı ısıtma miktarı yaklaşık olarak ortalama 200 °C civarındadır. Aşırı ısıtmanın uygulanmasının nedeni atomizasyon sırasında sıvı metalin parçalanmasını kolaylaştırmak hemde sıvı metalin metal akış borusu içerisinde donmasını engellemektir. Toz boyutu ve atomizasyon işleminin gerçekleşmesi açısından değerlendirildiğinde aşırı ısıtmanın yeterli olduğu görülmüştür. Metal ergitme odasında sıvı metale üst basınç uygulaması yapılarak sıvı metalin akış debisinin sabit olması sağlanmış ve daha düzenli bir atomizasyon oluşumu elde edilmiştir. Üst basınç uygulanmasının diğer bir nedeni de nozul içerisinde metal akış borusu ucunda oluşabilecek pozitif basınç nedeniyle sıvı

metal akışı durmasının önüne geçmektir. Atomizasyon işlemlerinde uygulanan 120-150 mbar üst basınç yeterli olmuş ve herhangi bir sorun olmadan sıvı metal akışı sabit hızda sağlanmıştır. Ergitilen alaşım miktarı ortalama 1500g civarında iken elde edilen toz miktarları da ortalama olarak 1300g civarındadır. Aradaki fark çok önemli bir kayıp değildir. Farkın oluşmasının nedeni pota içerisinde bir miktar deney sonunda metal kalması ve bir miktar tozun ünite içerisinde kalmasıdır.

Çizelge 6.3. Tozların üretiminde hazırlanan sıvı metal ve elde edilen toz miktarları

| Alaşım | Sıcaklık (°C) | Üst Basınç (mbar) | Konulan Malzeme (g) | Toz Miktarı (g) |
|--------|---------------|-------------------|---------------------|-----------------|
| A1 | 810 | 125 | 1511 | 1319 |
| A2 | 810 | 120 | 1470 | 1285 |
| A3 | 810 | 150 | 1508 | 1252 |

6.2. Toz Boyutu ve Dağılımı

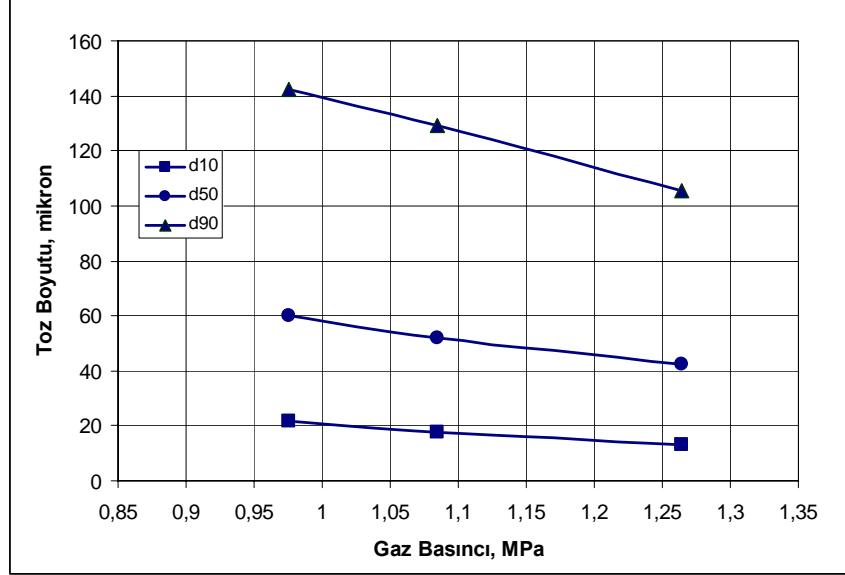
Malvern Mastersizer E laser boyut analiz cihazdan elde edilen analiz raporunda, üretilen tozlara ait ortalama toz çapı (d_{50}), Sauter ortalama çapı (d_{vs}), hacim ortalama çapı (d_{vm}), d_{10} ve d_{90} birikimli yüzde değerleri, belli aralıklardaki toz yüzdesi ve belli bir boyutun altındaki birikimli yüzde değerleri istatistiksel olarak yer almaktadır. Ayrıca raporda, toz boyutu dağılımı (frekans) ve birikimli yüzde eğrileri de yer almaktadır. Çizelge 6.4’de alaşım tozlarının boyut değerleri ve standart sapma miktarları verilmiştir.

Çizelge 6.4. Alaşım tozlarının boyut değerleri ve standart sapma miktarları

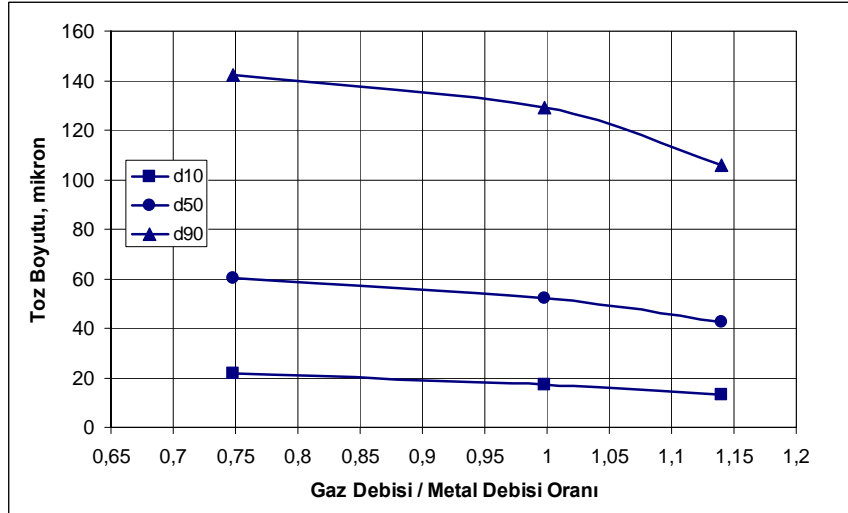
| Alaşım | d_{10} | d_{50} | d_{90} | Standart Sapma |
|--------|----------|----------|----------|----------------|
| A1 | 13,20 | 42,40 | 105,61 | 2,179 |
| A2 | 17,43 | 52,21 | 129,05 | 2,138 |
| A3 | 21,72 | 60,30 | 142,32 | 2,000 |

Üretilen tozların d_{10} , d_{50} ve d_{90} boyutlarının atomizasyon gaz basıncına ve gaz/metal kütleli debi değerlerine göre değişimleri sırasıyla Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere basıncın artışı ile toz boyutu küçülmüştür. A1 alaşım tozlarının ortalama boyutu en küçük olmasına rağmen en büyük standart sapma değerine sahiptir. A3 alaşım tozları ise en büyük ortalama toz boyutuna sahip olmasına rağmen en küçük standart sapma değerine

sahiptir. Toz dağılım grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 6.4, toplam yüzde küçükler grafiklerinin karşılaştırılması ise Şekil 6.5’de verilmiştir.



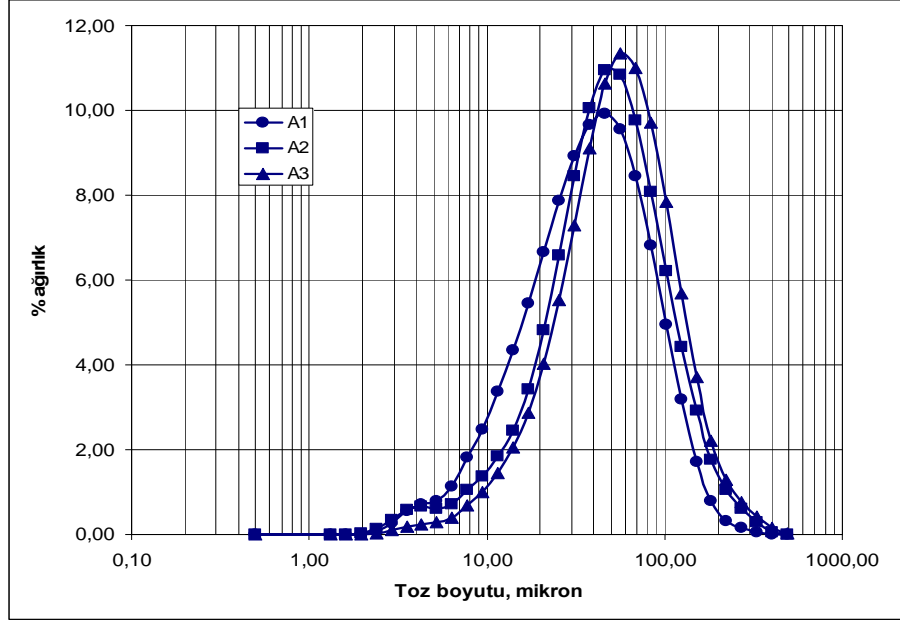
Şekil 6.2. Atomizasyon gaz basıncının toz boyutuna etkisi



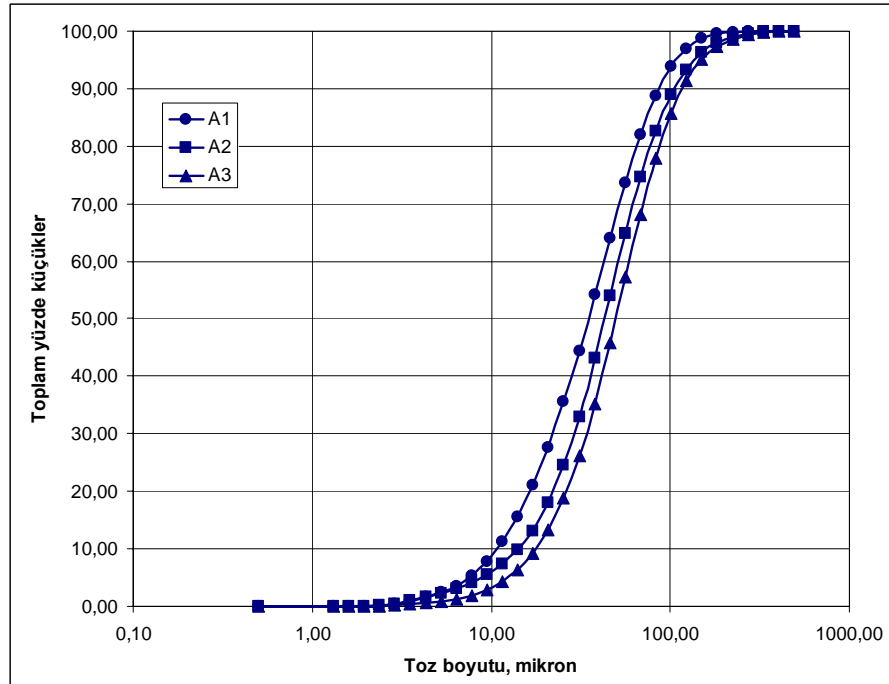
Şekil 6.3. Gaz/ Metal kütleli debi oranının toz boyutuna etkisi

Şekillerde görüldüğü üzere toz dağılımları normal dağılım eğrisi karakteristiği göstermektedir ve toz boyutuna göre dağılımın modları konum olarak bir miktar sapma göstermektedir. Frekans yüzdeleri incelendiğinde ise en büyük frekans A3 nolu alaşım

tozlarında 11,34 μm olarak, en küçük frekans ise A1 alayım tozlarında 9,93 μm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6.4. Tozların dağılım grafiklerinin karşılaştırılması

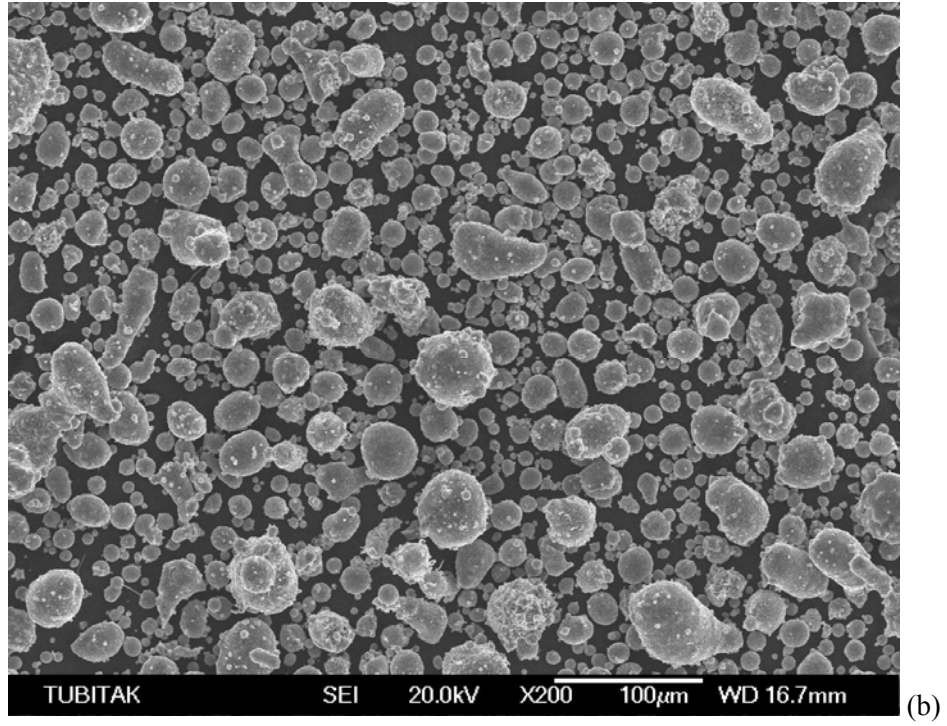
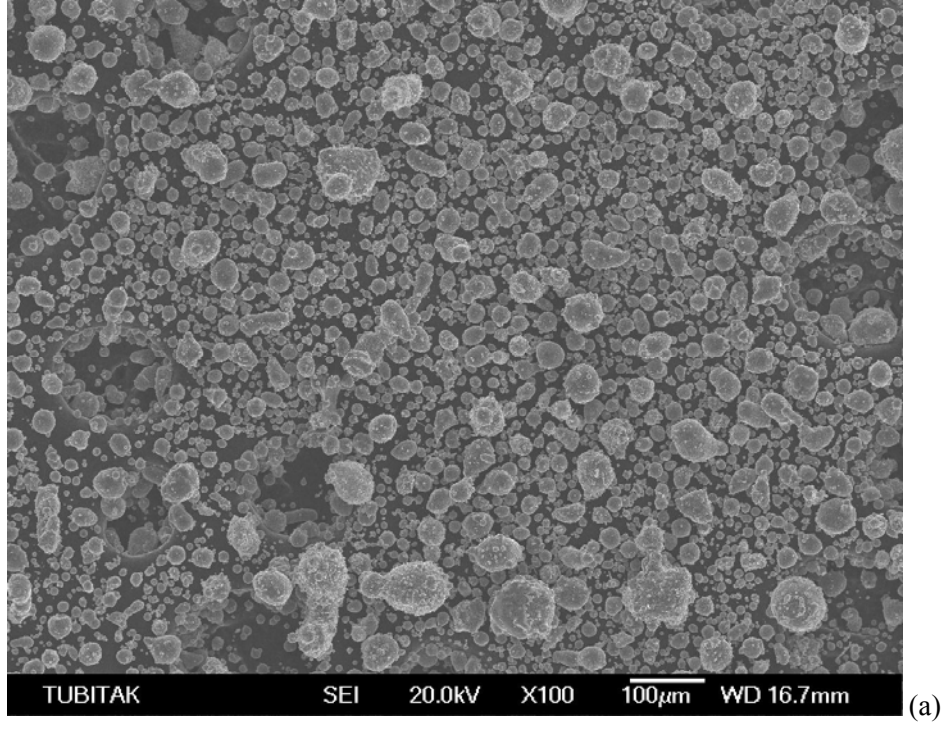


Şekil 6.5. Tozların toplam yüzde küçükler grafiklerinin karşılaştırılması

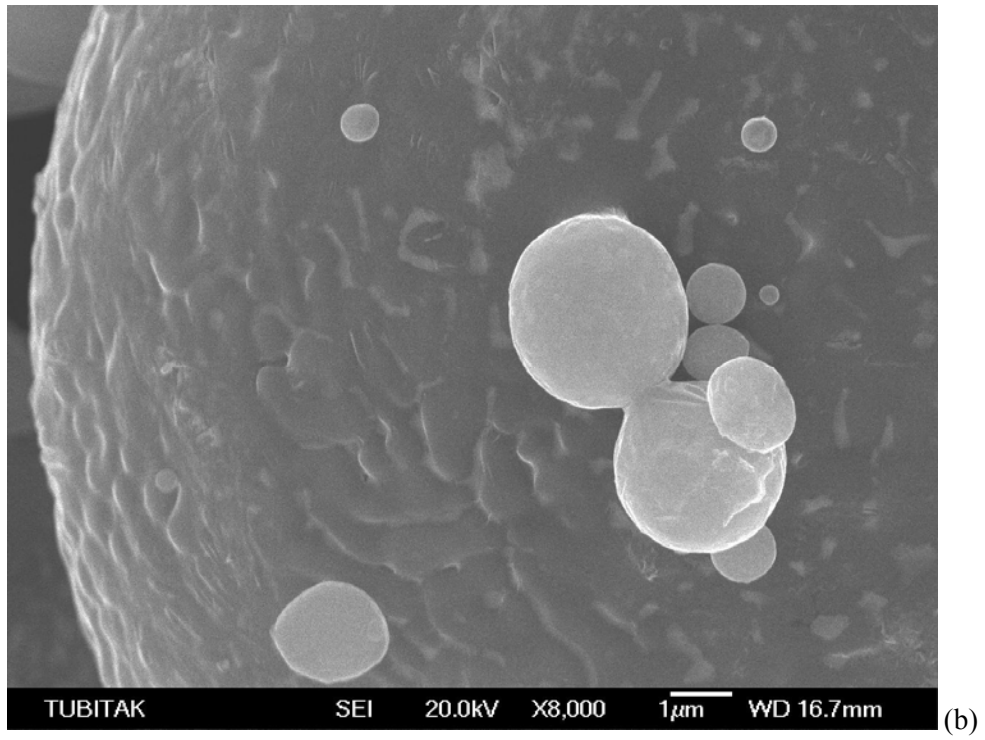
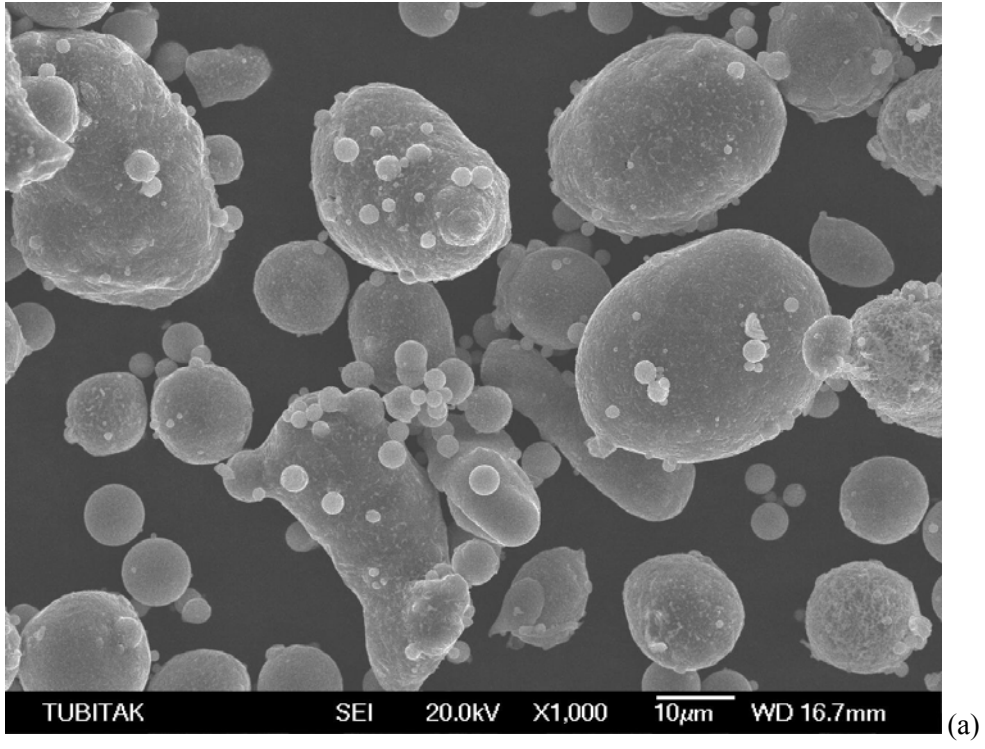
6.3. Toz Morfolojisi

Üretimini gerçekleştirdiğimiz Alüminyum alaşım tozlarının SEM ile elde edilen görüntüleri Şekil 6.6-11'de verilmiştir. Toz resimleri incelendiğinde tozların küresel ve küresele yakın şekilli olduğu görülmektedir. Küçük boyutlu tozlarda düzgün ve pürüzsüz toz yüzeyleri, daha iri tozlarda ise hücresele (Şekil 6.9) ve dendritik (Şekil 6.9) katılma yüzey yapısı gözlemlenmiştir. Hücresele yapı oluşumunun nedeni atomizasyon anında gerçekleşen ani soğuma olayıdır. Toz şeklinin toz boyutu ile değişimi incelendiğinde, küçük boyutlu tozların küresel şekilli, iri tozların küresel ve küresel şekle yakın tozlardan (Şekil 6.6) oluştuğu gözlenmiştir. Bu durum küçük tozların katılmayı küreselleştikten sonra tamamladıklarını yani küreselleşme zamanının katılma zamanından küçük olduğunu ifade etmektedir. Tozların genel görüntülerinden gaz atomizasyon mekanizmalarına ait aşamaları temsil eden örnekler elde edilebilir. Genel olarak azot atomize alüminyum alaşım tozları, bölünmenin bütün aşamalarını tamamlamış küresel tozlardan oluşmaktadır.

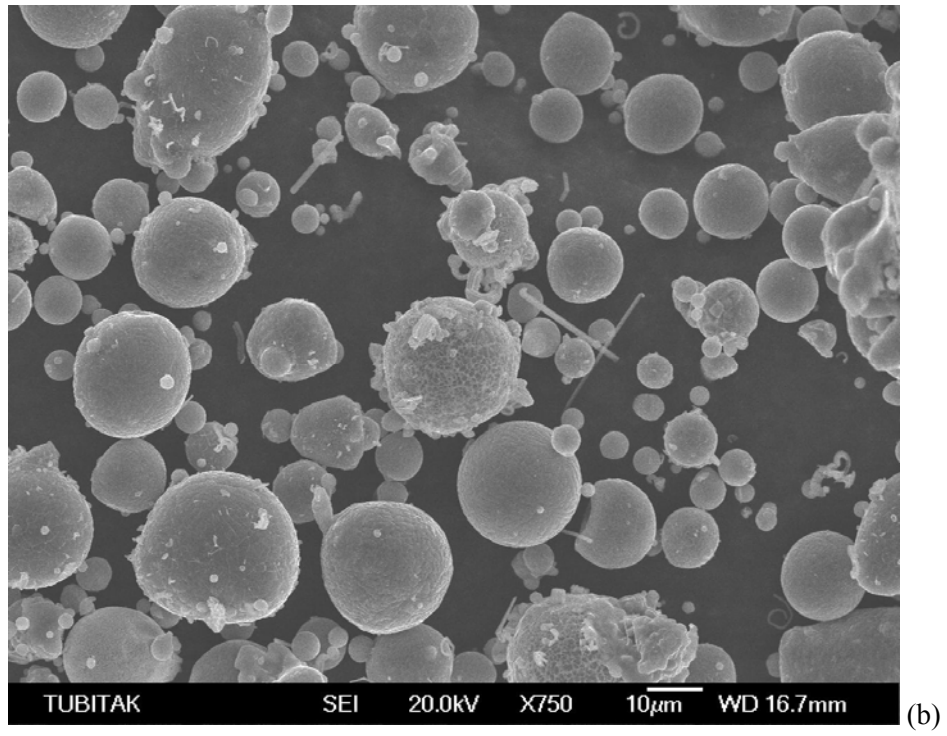
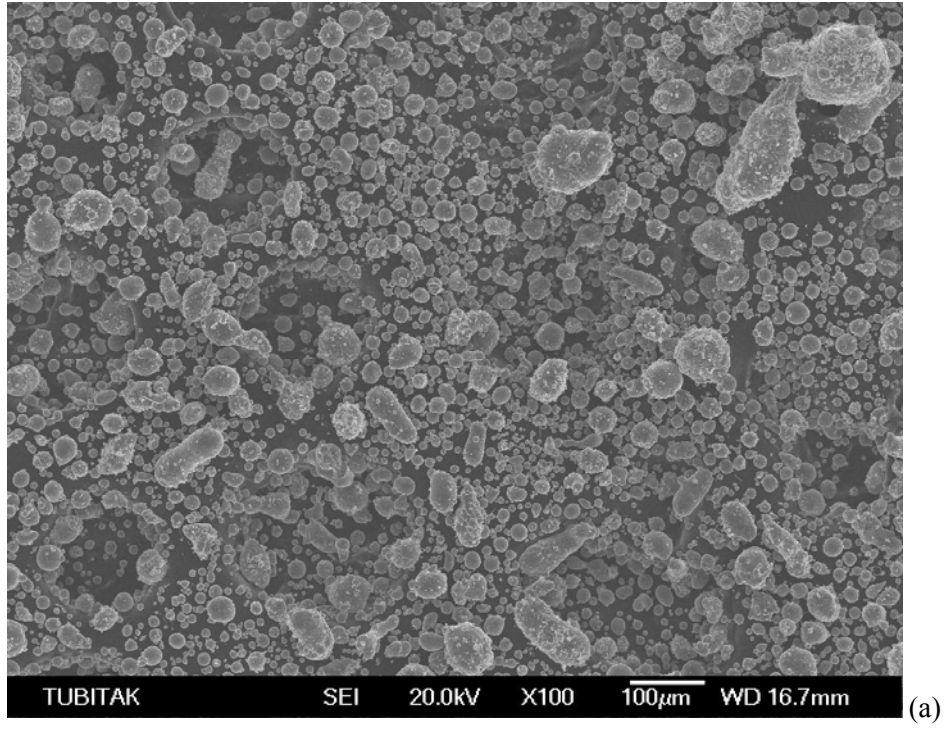
Yapılan atomizasyon çalışmalarında, küçük boyutlu tozların daha iri tozlar üzerinde uydulaşma oluşturduğu gözlemlenmiştir (Şekil 6.7). Uydulaşmalar küçük boyutlu tozların, henüz tamamen katılmasını tamamlayamamış daha büyük tozlara çarpması sonucu meydana gelir. Uydulaşma esnasında temas eden iki tozun sıcaklıklarının birbirinden farklı olması durumunda yüksek sıcaklığa sahip tozun, düşük sıcaklıktaki toz üzerine sıvandığı görülmektedir (Şekil 6.8, 6.10).



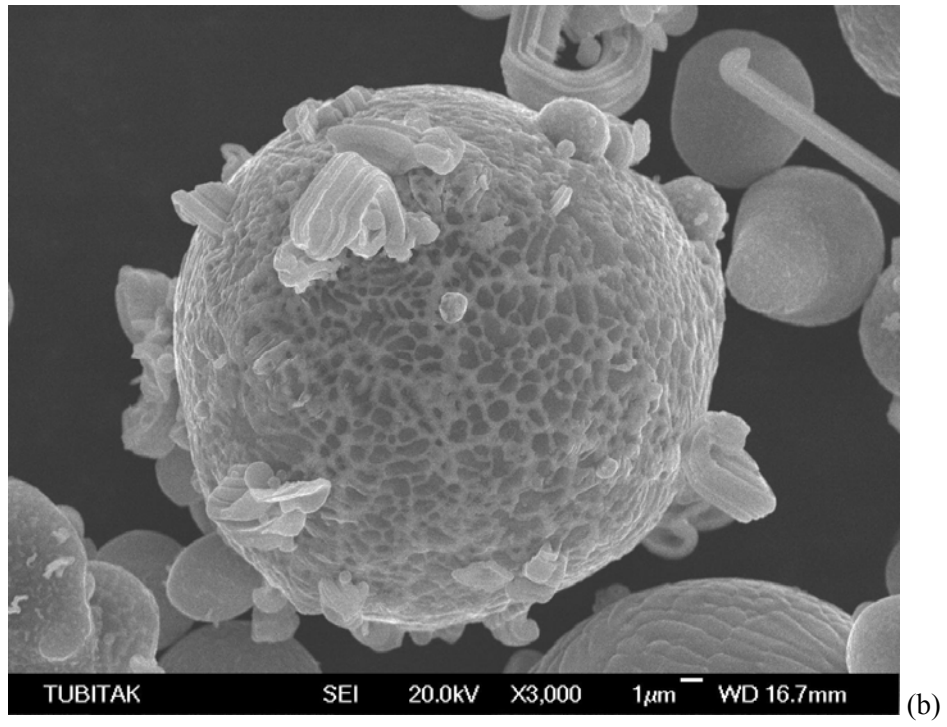
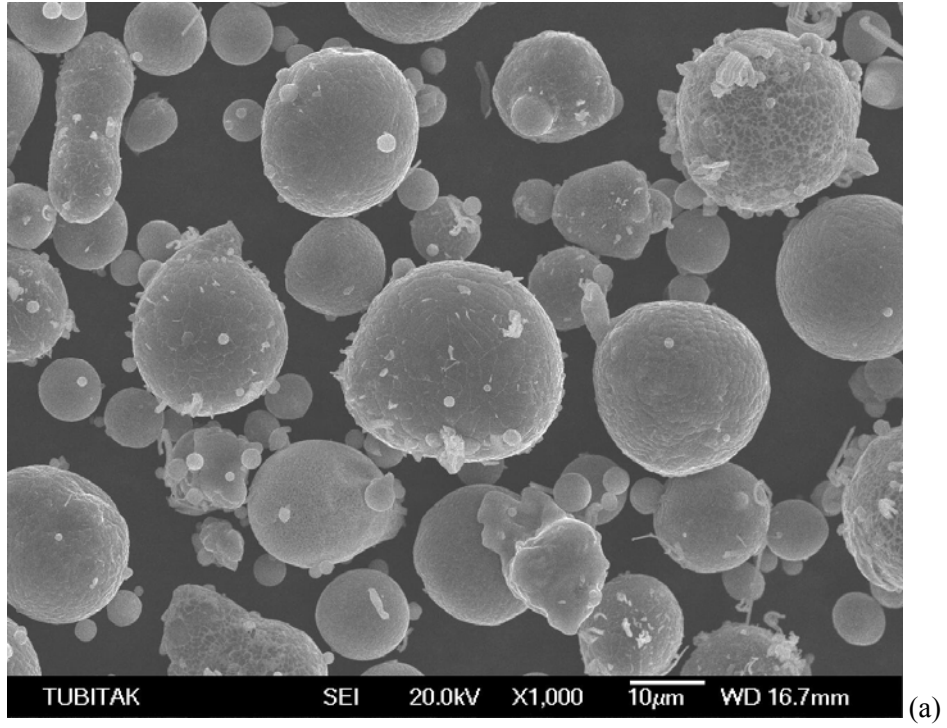
Şekil 6.6. Al-20Sn-3Si Alaşım tozlarının morfolojileri. Küçük tozlar küresel iri tozlar yuvarlak veya küresele yakın şekillidir.



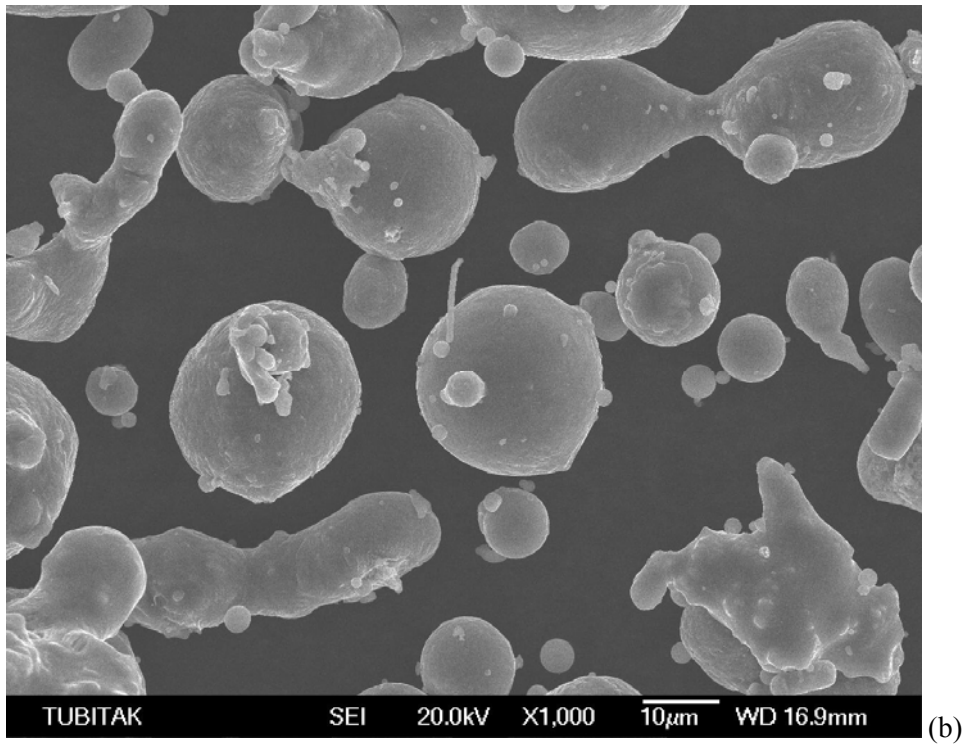
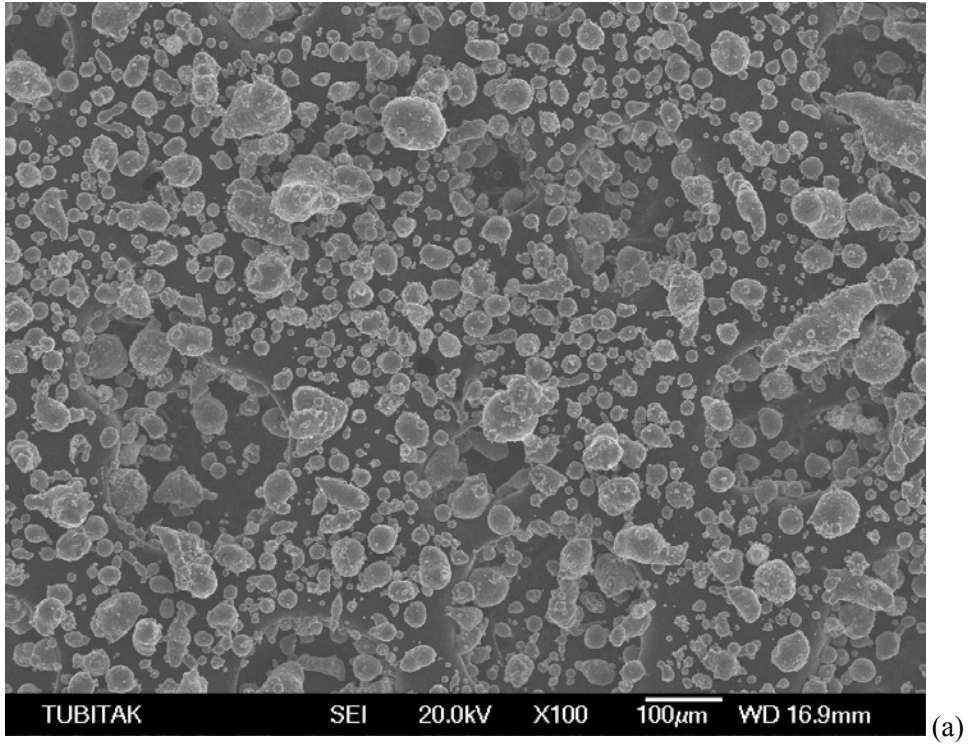
Şekil 6.7. Al-20Sn-3Si Alaşım tozlarında uydulaşma ve sıvanma görüntüleri



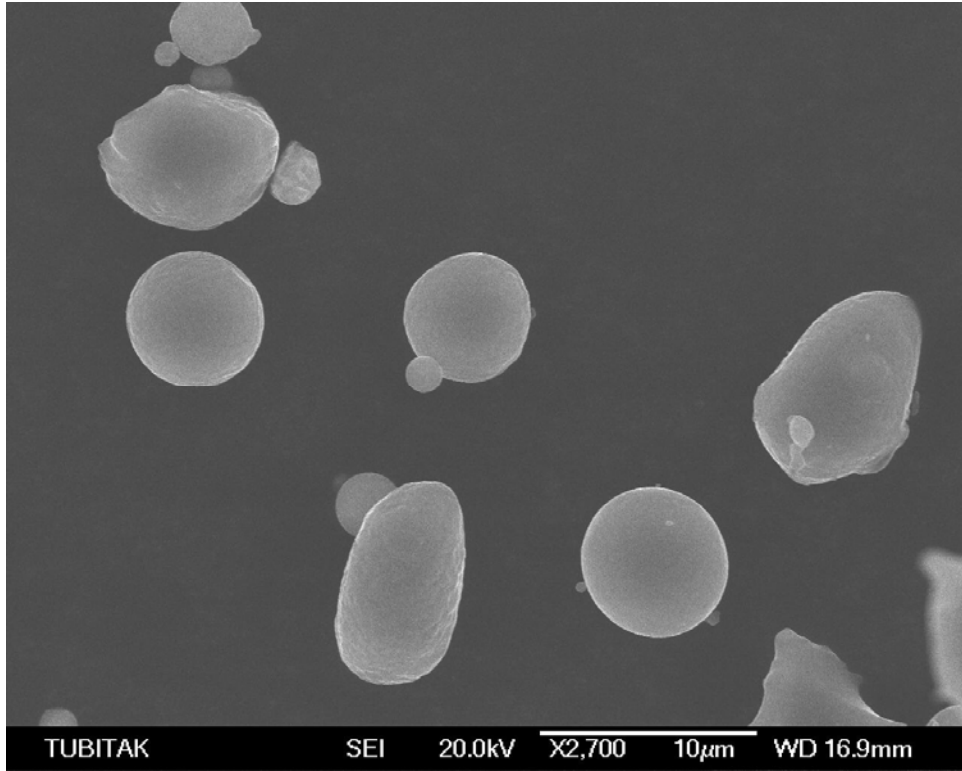
Şekil 6.8. Al-15Sn-1Cu Alaşım tozlarının morfolojileri. Küçük tozlar küresel iri tozlar yuvarlak veya küresele yakın şekillidir.



Şekil 6.9. Al-15Sn-1Cu Alaşımının SEM görüntüleri. Tozlarda hücrel dendritik katılaşma yapıları görülmektedir.



Şekil 6.10. Al-15Sn-4Si-1,5Cu Alaşım tozlarının morfolojileri. Küçük tozlar küresel iri tozlar yuvarlak veya küresele yakın şekillidir.



Şekil 6.11. Al-15Sn-4Si-1,5Cu Alaşımının SEM görüntüsü. Çok küçük tozların yüzeylerinde hücresel yapı görülmemektedir.

6.4. Tozların Mikro Sertlikleri

Yapılan ölçümler sonucunda (Çizelge 6.5), (Çizelge 6.6), (Çizelge 6.7)'da verilen sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde Al-15Sn-4Si-1,5Cu alaşım tozları ortalama 239 HV, Al-20Sn-3Si alaşım tozları ortalama 215 HV, Al-15Sn-1Cu alaşım tozları ortalama 147 HV sertlik değerine sahiptir.

Çizelge 6.5. Al-20Sn-3Si Alaşım tozu için sertlik değerleri

| Ölçüm Sayısı | D1 | D2 | HV |
|----------------|--------|--------|-----|
| 1 | 24,625 | 20,125 | 185 |
| 2 | 20,125 | 20,125 | 229 |
| 3 | 20,125 | 22,188 | 198 |
| 4 | 22,188 | 22,188 | 188 |
| 5 | 19,313 | 19,313 | 249 |
| 6 | 18,625 | 17,813 | 279 |
| 7 | 19,313 | 21,000 | 200 |
| 8 | 23,250 | 20,938 | 190 |
| Ortalama Değer | 20,945 | 20,461 | 215 |

Çizelge 6.6. Al-15Sn-1Cu Alaşım tozu için sertlik değerleri

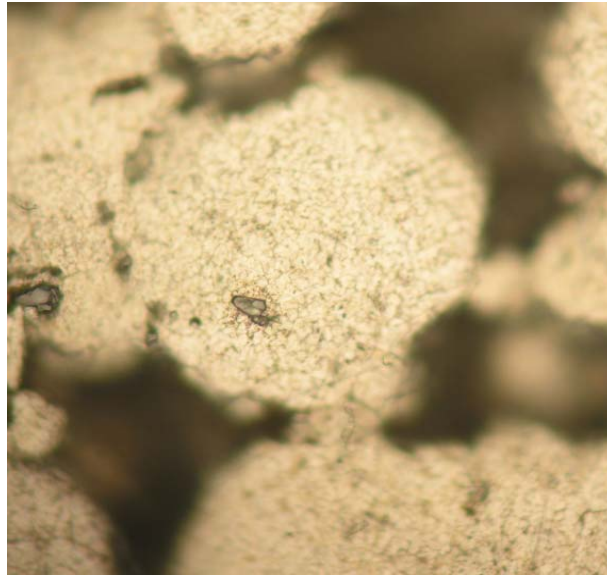
| Ölçüm Sayısı | D1 | D2 | HV |
|----------------|--------|--------|------|
| 1 | 21,438 | 23,188 | 186 |
| 2 | 22,938 | 22,938 | 170 |
| 3 | 28,25 | 27,75 | 118 |
| 4 | 22,938 | 20,813 | 194 |
| 5 | 25,188 | 18,688 | 193 |
| 6 | 36,625 | 34,000 | 74,1 |
| 7 | 27,313 | 25,563 | 133 |
| 8 | 28,375 | 30,750 | 106 |
| Ortalama Değer | 26,633 | 25,461 | 147 |

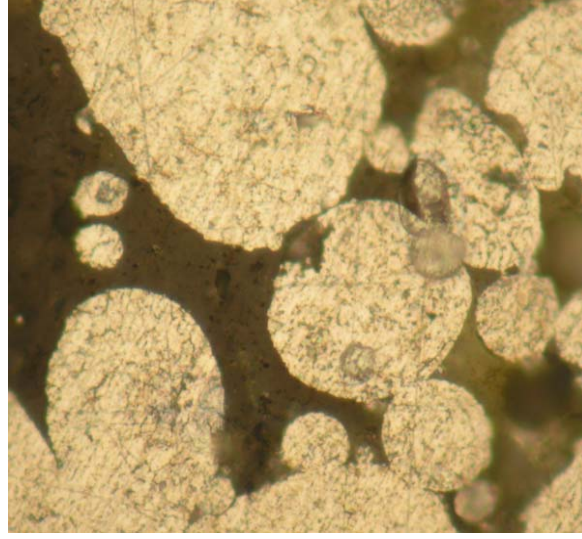
Çizelge 6.7. Al-15Sn-4Si-1,5Cu Alaşımı için sertlik değerleri

| Ölçüm Sayısı | D1 | D2 | HV |
|----------------|--------|--------|-----|
| 1 | 22,375 | 21,625 | 190 |
| 2 | 21,000 | 18,875 | 203 |
| 3 | 20,125 | 16,000 | 247 |
| 4 | 21,563 | 23,125 | 193 |
| 5 | 16,938 | 16,938 | 296 |
| 6 | 21,750 | 20,563 | 187 |
| 7 | 17,688 | 17,063 | 283 |
| 8 | 14,750 | 17,313 | 313 |
| Ortalama Değer | 19,52 | 18,93 | 239 |

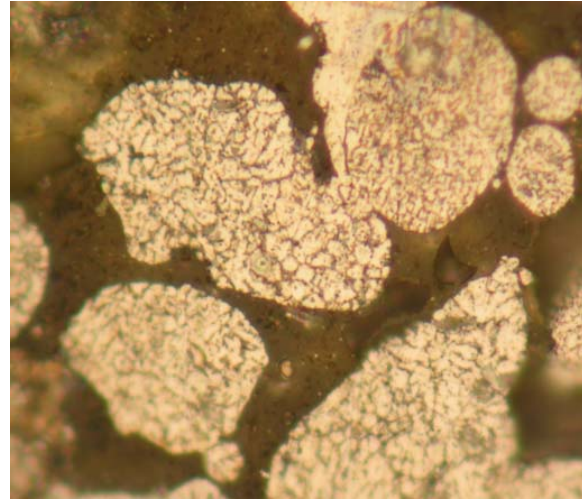
6.5. Tozların Mikroyapısı

Üretilen alaşım tozlarının mikro yapıları Şekil 6.12-14'de verilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde tozların hücresele-dendritik katılaşma yapısı gösterdiği ve tozların gözeneksiz yapıda olduğu görülmektedir.

**Şekil 6.12.** 1A alaşım tozu mikro yapısı.



Şekil 6.13. 2A alaşım tozu mikro yapısı



Şekil 6.14. 3A alaşım tozu mikro yapısı

6.6. Tozların Görünür Yoğunluk Değerleri

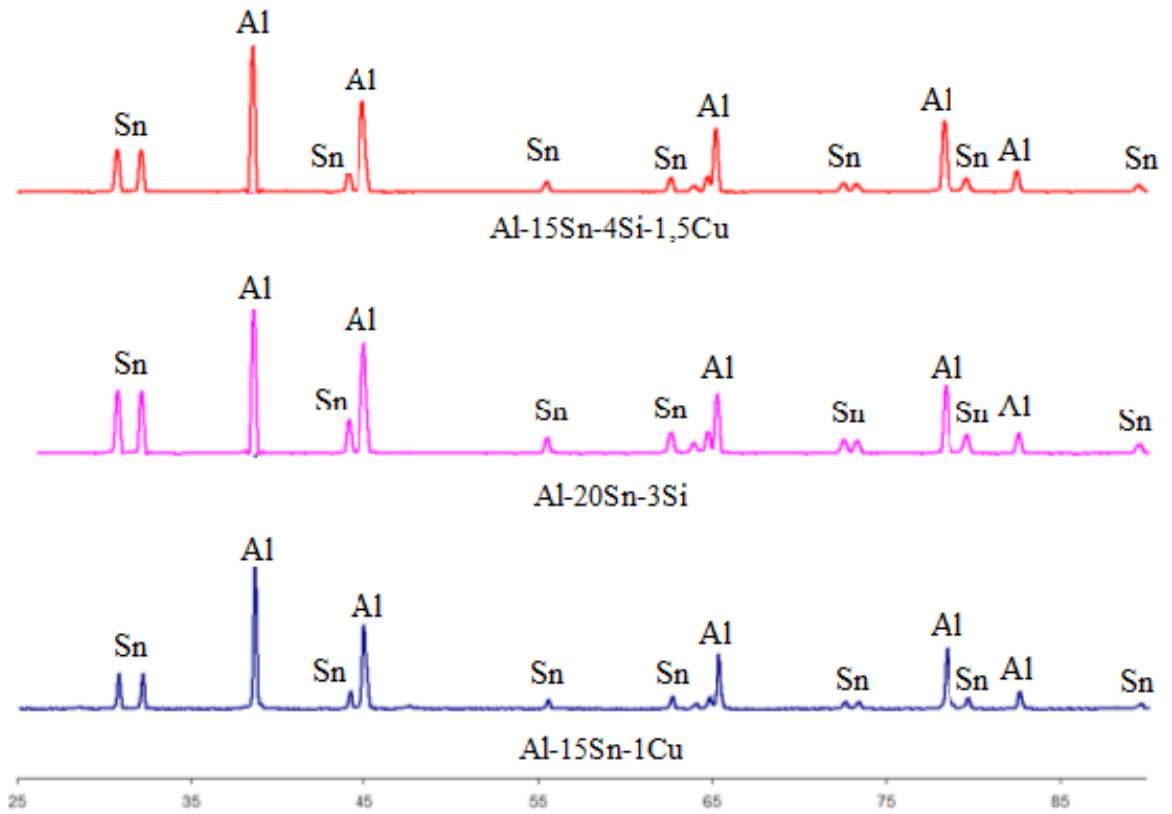
Tozlar Hall hunisinden 2,5 ve 5 mm çaplarda akmadığı için Arnold metre ile ölçülmüş olan görünür yoğunluk değerleri Çizelge 6.8’de verilmiştir. Yoğunluk değerleri incelendiğinde ince tozların daha yüksek yoğunluğa sahip oldukları görülmektedir.

Çizelge 6.8. Tozların görünür yoğunluk değerleri

| Alaşım | Görünür yoğunluk (g/cm ³) |
|--------|---------------------------------------|
| A1 | 1,505 |
| A2 | 1,465 |
| A3 | 1,430 |

6.7. Tozların XRD Grafığı

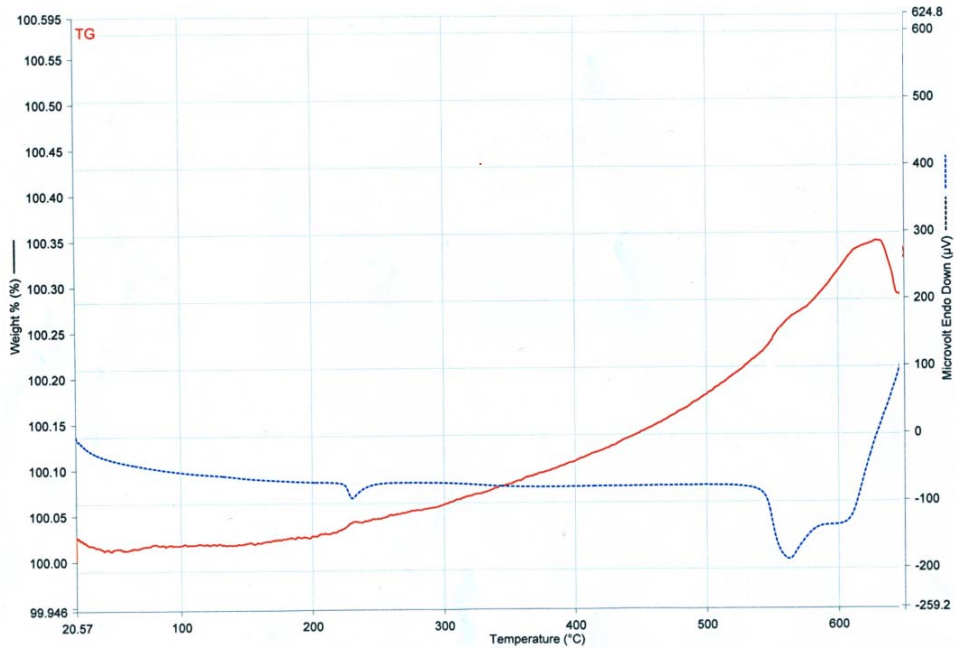
Tozlardan alınan XRD sonucu Şekil 6.15’de verilmiştir. Tozların Al ve kalay fazlarına sahip olduğu ve farklı bir faz meydana gelmediği görülmüştür. Si ve Cu’nun yapı içerisinde çözündüğü anlaşılmaktadır.



Şekil 6.15. Tozların XRD grafikleri

6.8. Tozların DTA ve TG Analiz Değerleri

Üretilen tozlardan Al-20Sn-3Si alaşımı için yapılan DTA analizi grafiği Şekil 6.16'da verilmiştir. Grafik incelendiğinde 232 derecede kalay fazının eridiği, alaşımın ise 620 °C'ta eridiği görülmektedir. Ayrıca 540 derece civarında bir reaksiyon başlamış ve 570 derece civarında tamamlanmıştır. Bu reaksiyon sonucunda oluşan fazın ne olduğu tespit edilmemiştir.



Şekil 6.16 Al-20Sn-3Si alaşım tozunun DTA analizi grafiği

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

1. Üretimi yapılan tozların logaritmik normal dağılım gösterdiği görülmüştür.
2. Tozların morfolojik incelemesinde üretilen azot atomize alaşım tozlarının büyük çoğunluğunun küresel şekle sahip, iri tozların ise küresele yakın şekilde olduğu gözlenmiştir.
3. Küçük boyutlu tozların, henüz katılaşmasını tamamlayamamış daha büyük tozlara çarpması sonucu küçük boyutlu tozların iri tozlar üzerine yapışarak uydulaşma oluşturdıkları gözlenmiştir.
4. Atomizasyon gazı basıncındaki artışlar, sıvı metale aktarılan enerjiyi artırdığından ortalama toz boyutunu küçülttüğü gözlenmiştir.
5. Gaz basıncı oldukça düşük olmasına rağmen elde edilen toz boyutlarının küçük olması atomizasyon işleminin veriminin yüksek olduğunun bir göstergesidir. 12,64 bar ortalama toz boyutu 42,40µm iken 9,76 bar gaz basıncında 60,30µm olarak gerçekleşmiştir. Toz boyutunun gaz basıncına çok duyarlı olduğu gözlenmiştir.
6. Üretilen alaşım tozlarında Al ve Sn fazlarının bulunduğu tespit edilmiştir.
7. Tozların ortalama boyutu küçüldükçe standart sapma değerinin büyüdüğü gözlenmiştir.
8. Küçük boyutlu tozlarda düzgün ve pürüzsüz toz yüzeyleri, daha iri tozlarda ise hücrel ve dendritik katılaşma yüzey yapısı gözlemlenmiştir.
9. Alaşım tozlarının sertlikleri karşılaştırıldığında Al-15Sn-4Si-1,5Cu alaşım tozunun en sert olduğu tespit edilmiştir.
10. Uydulaşma esnasında temas eden iki tozun sıcaklıklarının birbirinden farklı olması durumunda yüksek sıcaklığa sahip tozun, düşük sıcaklıktaki toz üzerine sıvandığı gözlenmiştir.
11. İnce taneli tozların daha yüksek görünür yoğunluğa sahip oldukları gözlenmiştir.

7.2. Öneriler

1. Atomizasyon deneyleri kontrollü atmosferde yapılarak tozların yüzey kısımlarında oluşan oksit tabakası en aza indirilebilir.
2. Tozların mikro yapıları SEM ve EDX analizi ile incelenmelidir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1]. www.aluminyumsanayi.com
- [2]. Daşcılar, B., 2006, Farklı ekstrüzyon hızlarında ekstrüze edilmiş AA6063 Alüminyum Alaşımlarının yüzey ve korozyon özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze
- [3]. Akgül, H., 2007, Çeşitli Alüminyum alaşımlarının ekstrüzyon kalıplarında şekillendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karaelmas Üniversitesi F.B.E, Zonguldak
- [4]. Tohumcu, S., 2005, Plazma Elektrolitik Oksidasyon Yöntemiyle Alüminyum alaşımlarının kaplanması, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi F.B.E, Bursa
- [5]. Yılmaz, B., 2002, Alüminyum Alaşımlarında Faz Yapılarının Mekanik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi F.B.E, Isparta
- [6]. German, R.M., 2007, Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri, Türk Toz Metalurjisi Derneği, Ankara
- [7]. Bingöl, S., 2006, Çeşitli ekstrüzyon şartlarında üretilen alüminyum alaşımı ürünlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi F.B.E, İstanbul
- [8]. Efendi, A., 2004, Alüminyum Biyetlerin Sürekli Dökümünde Biyet Yapısını Etkileyen Faktörlerin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, YTU Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [9]. www.doitpoms.ac.uk
- [10]. Baksan, B., Gürler, R. 2003, Toz Metalurjisinin Savunma Sanayinde Uygulanması, Osmangazi Üniversitesi, Metalurji Enstitüsü, Eskisehir.
- [11]. Yıldız, E.S., 2007, Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretiminde nozul geometrisinin toz boyutuna etkisinin araştırılması, Yüksek lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi F.B.E, Kütahya
- [12]. www.makinamuhendisi.com
- [13]. Atik, E., 2005, Demir esaslı toz metal parçaların borlamayla yüzey performansının artırılması, 4. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, 1032-1039.
- [14]. Aydın, M., 2005, Gaz atomizasyon yönteminde yeni bir nozul tasarımı ve toz üretimi, Yüksek lisans tezi, Dumlupınar Üniversitesi F.B.E, Kütahya
- [15]. Sarıtaş, S., 1994, Toz metalurjisi, Makine müh. el kitabı, MMO, 2.Baskı, I.Cilt.
- [16]. <http://web.sakarya.edu.tr/~aokurt/dersler/tozuretlim.htm>.
- [17]. www.turktoz.gazi.edu.tr

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- [18]. Anık, S., Dikicioğlu, A., Vural, M., 1994, İmal usulleri, Birsen Yayınevi, İstanbul
- [19]. Ünal,R., Kainer, K.U., Production of high strenght Al-Mg-Sc alloys by PM, Powder Metallurgy, Vol 41, No.2, p119-122.
- [20]. Uslan, İ., 1999, Gaz atomize alüminyum tozlarının özelliklerine üretim değişkenlerinin etkisinin araştırılması, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi F.B.E, Ankara.
- [21]. Singh, S.N., and Ojha S.N., 1992, Microstructural investigation on rapidly solidified cast iron powders, Int.J. Rapit Solidification, 7, 201 – 217.
- [22]. http://www.crct.polymtl.ca/fact/Documentation/SGTE/SGTE_list.htm
- [23]. http://mf.dumlupinar.edu.tr/~runal/toz/tozuretimi/powder_product.html