

**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**SU ATOMİZASYON YÖNTEMİ İLE METAL TOZU ÜRETİMİ
İÇİN YENİ BİR SANTRİFUJ ATOMİZASYON SİSTEMİ
TASARIMI VE İMALATI**

Hüseyin KARASU

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2024**

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tarihsel Arka Plan	2
1.2. Özel Metalurjik Özellikler	7
1.3. Özel Mekanik veya Yapısal Özellikler	7
1.4. Rekabetçi Üretim Yöntemlerine Göre Ekonomik Avantajlar	8
1.5. Metal Toz üretimi	14
1.5.1. Kimyasal yöntemler.....	15
1.5.1.1 Kimyasal indirgeme	15
1.5.2. Fiziksel yöntemler	16
1.5.2.1 Elektrolitik yöntem	16
1.5.3 Atomizasyon.....	17
1.5.3.1. Gaz atomizasyonu	17
1.5.3.2. Su atomizasyonu	23
1.5.3.3. Sıvı gaz atomizasyonu	27
1.5.3.4. Santrifüj atomizasyonu	27
1.5.3.5. Vakum atomizasyonu	39
1.5.3.6. Ultrasonik atomizasyon	40
1.5.4. Mekanik yöntemler.....	41
1.6. Metal Tozlarının Karakterizasyonu ve Testleri	42
1.6.1. Metal toz malzemesinden numune alma	42
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	44
3. MATERYAL ve YÖNTEM	65
3.1. Deney Düzeni Tasarımı ve Yapılışı.....	65
3.3. Pompa Fanı Sürücü Sisteminin Tasarımı	80
3.4. Metal Eriğin Toz Haline getirilmesinde Kullanılan Pompa Fanı ve Kanatlı diskler	86
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	95
4.1. DeneySEL Sonuçlar	95
4.1.1 Toz üretimi ve ortalama parçacık hesaplanması	95
4.2.1. Kavisli kanatlı disk atomizasyonu	116
4.2.2.1. Kurşunun kavisli kanatlı disk atomizasyonu	116
4.2.2. Kanat sayısının metal toz üzerindeki etkisi	122
4.3. Tozların Şekli ve Mikro Yapısal Analizi	122
4.3.1. Tozların şekil analizi ve tozların mikro yapısı	123
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	125
KAYNAKLAR	135

ÖZET

Doktora Tezi

SU ATOMİZASYON YÖNTEMİ İLE METAL TOZU ÜRETİMİ İÇİN YENİ BİR SANTRİFUJ ATOMİZASYON SİSTEMİ TASARIMI VE İMALATI

Hüseyin KARASU

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Cengiz DOĞAN
Yıl: 2024. Sayfa: 143

Bu çalışmada, imalat sanayinde yaygın olarak kullanılan metal tozlarının daha ekonomik nasıl üretilebileceği su atomizasyon yöntemi ile araştırılmıştır. Su atomizasyon yönteminde kullanılan pompa fanı, ısı fırın ve demir potanın üretilen metal tozunun karakteristik özelliği üzerindeki etkileri ilgili literatürden yararlanılarak belirlenmiştir. Su atomizasyon yöntemi ile metal tozu üreten ve bir pompa fanı, bir ısı fırın ve bir demir potadan oluşan bir deney düzeneğinin tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde pompa fanının dönüş hızı, sıvı metal çıkış hızı ve sıvı metal sıcaklığı istenilen değerlerde hesaplanabilmektedir. Ayrıca metal tozu özelliklerini etkileyen faktörler incelenmiştir. Su atomizasyon yönteminde kullanılan pompa fanı, metal tozları üzerindeki etkilerini incelemek için farklı şekil ve boyutlarda test edilmiştir. Isıl fırın için yüksek sıcaklığa dayanıklı kanallı ateş tuğlası, ısı kaybını en düşük seviyede tutmak için ise düşük sıcaklığa ve ısıya dayanıklı gazbeton malzeme kullanılmıştır. Isıl fırını ısıtmak için yüksek erime sıcaklığına sahip bir nikel-krom elektrik direnç teli kullanılmıştır. Dairesel kanallı ateş tuğlalarının kanallarına uygun çap, uzunluk ve sarım sayısı için geliştirilen formüller kullanılarak söz konusu elektrik direnci elde edilmiştir. Pota, yüksek ısı direnci ve ısı iletim katsayısı nedeniyle demir malzemeden imal edilmiştir. Isıl fırının tasarımında sıcaklığın önemli bir rolü vardır. Sıcaklık ölçümlerinde termokupl kullanılmıştır. Isı transferi ve sınır koşullarında kullanılan denklemler, potanın sıcaklık dağılımı için kullanılır. Çalışmada üretilen pota ve fırınların benzer imalat teknolojilerine göre daha ekonomik ve daha kolay imal edilmesi çalışmanın öne çıkan yönüdür. Kurşun ve diğer düşük erime noktasına sahip metaller üzerinde çok sayıda deney yapılmıştır. Üretilen tozlar elek analizlerinden geçirilerek ortalama toz boyutları ve toz dağılımları belirlenmiştir. Tozlar metalografik yöntemlerle optik mikroskop altında incelenmiştir. Test sonuçları ile üretilen metal tozlarının TM alanında kullanımının uygun olduğu tespit edilmiştir. Küre şeklindeki çok küçük tozların, suya çarpmadan havada katılaşığı görülmüştür. Büyük tozların ise su etkisiyle katılaşmalarından karmaşık geometrik şekiller oluşturdıkları tespit edilmiştir. Çok kanallı disk kullanımının toz üretim miktarında önemli bir parametre olmadığını göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELELER: Atomizasyon, Metal Tozu, Pota, Pompa Fanı, Isıl fırın

ABSTRACT

PhD Thesis

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A CENTRIFUGAL ATOMIZATION DISC SYSTEM BY A NEW TYPES OF WATER ATOMIZATION METHOD FOR METAL POWDER PRODUCTIONS

Hüseyin KARASU

**Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Cengiz DOĞAN

Year: 2023. Page: 143

The study has proven that metal powders, which are widely used in the manufacturing industry, can be produced more economically. At the beginning of the research, the effects of the pump fan, thermal furnace, and iron crucible used in the water atomization method on the characteristic feature of the metal powder to be produced were determined by using the relevant literature. Thus, the design and manufacture of the experimental setup to produce metal powder by the water atomization method were carried out. This experimental setup; consists of a pump fan, a thermal furnace, and an iron crucible. In the experimental setup, the rotation speed of the pump fan, the liquid metal outlet velocity, and the liquid metal temperature can be calculated at desired values. In addition, the factors affecting the metal powder properties were investigated. The pump fan used for the water atomization method was tested in different shapes and sizes to examine the effects on metal powders. High-temperature-resistant channel fire bricks were used for the thermal furnace, and a low-temperature and heat-resistant aerated concrete material was used to keep the heat loss at the lowest level. A high melting temperature nickel-chromium electrical resistance wire was used to heat the thermal furnace. The electrical resistance in question was obtained by using the formulas developed for the diameter, length, and number of turns suitable for the channels of the circular fire bricks and it is fixed by connecting, and the resistance wire is connected to the lathe machine from both ends of the rod and spiraled. The crucible is made of iron material due to its high heat resistance and heat transmission coefficient. The temperature has an important role in the design of this thermal furnace. For this, a temperature sensor called a thermocouple is used. Instant temperature values are shown on the screen of this temperature sensor. The equations used in heat transfer and boundary conditions are used for the temperature distribution of the crucible. The prominent aspect of the study is that the crucibles and furnaces manufactured in the study are more economical and easier to manufacture than similar manufacturing technologies. Numerous experiments were conducted on lead and other low-melting metals. The powders produced were brought from the sieve analysis and the average powder sizes and powder distributions were examined. The powders were examined under an optical microscope by metallographic methods. The test results have determined that the metal powders produced are suitable for use in the field of powder metallurgy. Very small powders are spherical in shape. This smallness of dust indicates that they solidified in the air without hitting the water. The shapes of large powders have complex geometrical shapes because they are solidified by water impact. It shows that the use of multi-channel discs is not an important parameter in the amount of metal powders production.

KEY WORDS: Atomization, Metal Powder, Crucible, Pump Fan, Thermal Furnace

TEŐEKKÖR

Bana bu alıőma konusunu veren, doktora alıőmamı yÖneten ve alıőmalarım esnasında her konuda yardımlarını esirgemeyen gerek bilimsel alıőmalarda gerekse de hayata olan olumlu bakıőı aısından yaőamıma kattığı değerlerden dolayı, danışman hocam Sayın Prof. Dr. Cengiz Doğan’a, Araőtırmamın yÖrÖtÖlmesi sırasında ve sonucunda değerli gÖrÖőlerinden yararlandığım Prof. Dr. HÖsamettin BULUT ve Prof. Dr. Paki TURėUT’a, gÖnÖlden sonsuz teőekkÖrlerimi sunarım.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 1.1. Gözenekliliğin demirin mekanik özelliklerine etkisi	9
Şekil 1.2. Gözeneklerin sinterlenmiş demir parçaların yorulma eğrileri üzerindeki etkisi.....	10
Şekil 1.3. Toz dövme bağlantı çubuğu yorulma testi sonuçları, sıcak dövme eğrisi üst üste bindirilmiş	11
Şekil 1.4. Dünyada demir tozu tüketiminin karşılaştırmalı eğilimi	12
Şekil 1.6. Yatay olarak erimiş metal akışına sahip VAMI aspirasyon nozulu tasarımı.....	18
Şekil 1.7. İnert gaz atomizasyon sistemi şeması ve nozülü	19
Şekil 1.8. Atomizer tasarımı a) serbest düşme tasarımı (gaz veya su) b) sınırlı nozul tasarımı (yalnızca gaz).....	21
Şekil 1.9. Bir su atomizerinin şematik gösterimi	24
Şekil 1.10. Su kullanılarak atomize edilen metal tozların parçacık boyutu ile basınç arasındaki ilişki	25
Şekil 1.11. Disk atomizörü	30
Şekil 1.12. Atomizasyon mekanizmaları, a) Doğrudan damlacık oluşumu b) Ligament oluşumu, c) Sıvı levha Oluşumu	33
Şekil 1.13. Dönen diskler için atomizasyon mekanizması	35
Şekil 1.14. Kanatlı disk atomizerin kenarından sıvı akışı ve hızları	37
Şekil 1.15. Döner disk atomizörü.....	38
Şekil 1.16. Kanatlı diskin üzerindeki metal eriğin akışı	39
Şekil 1.17. Vakumlu gaz atomizasyon sistemi	40
Şekil 1.18. Ultrasonik gaz atomizasyonunun şeması	41
Şekil 1.19. Numune bölme işlemi	43
Şekil 3.1. Isıl fırın imalatında kullanılan malzemeler a) Demir sac, b) Gazbeton, c) Kanallı taşlar, d) Elektrik direnç tel, e) Isıya dayanıklı klemens, f) Isıya dayanıklı izole boncuk, g) 3x6 antigran kablo.....	66
Şekil 3.2. Isıl fırının dış sac metal kabin boyutları	67
Şekil 3.3. Gazbeton plakların bir getirilmesi ve boyutlandırması	67
Şekil 3.4. Isıya dayanıklı fırın taşı, (a) resmi ve (b) teknik çizimde boyutları	68
Şekil 3.5. Elektrik direnç tellerinin taş fırını kanallarına geçirme ve hacim oluşturma getirme	69
Şekil 3.6. Elektrik bağlantısı yapılmış ısıl fırını.....	69
Şekil 3.7. a) Nikrom teli, b) Nikrom telin spiral durumuna getirilmesi	73
Şekil 3.8. Isıl fırının aktif olduğunda iç görünümü	73
Şekil 3.9. Isıl fırının a) ön, b) üst görünüşleri	74
Şekil 3.10. Sıcaklık kontrol ve ölçüm cihazı.....	74
Şekil 3.11. Termokupl ve kullanılan prob	74
Şekil 3.12. İmal edilen ısıl fırının deney düzeneği üzerinde montajı	75
Şekil 3.13. Farklı boyutlarda imal edilmiş potalar	76
Şekil 3.14. Demir potanın iki ve üç boyutlu kesitleri	77
Şekil 3.15. Demir pota ve pompa fanının kesiti	79
Şekil 3.16. Su püskürtmede kullanılan yüksek devirli motor	81
Şekil 3.17. Motor üzerindeki civata yuvaları	81
Şekil 3.18. Motorun elektrik bağlantısı ve mil üzerindeki kama.....	82
Şekil 3.19. Motorun üst görünüşü	82
Şekil 3.20. Yüksek devirli motorun sürücüsü ve kontrol kutusu.....	83
Şekil 3.21. Yüksek devirli motora etkiyen değişkenlerin ağırlık merkezi.....	83
Şekil 3.22. Yüksek devirli motorun devirin motora etkiyen ağırlıkla değişimi	84
Şekil 3.23. Üçayaklı deney düzeneği ve motor montajı	85
Şekil 3.24. Yaylar üzerinde monte edilen yüksek devirli motor	85
Şekil 3.25. Su püskürtülmesinde kullanılan pompa fanların resmi	86
Şekil 3.26. Pompa fanı (a,e) üç boyutlu, (b,d) ön kesit ve (c) içyapısı görünüşleri.....	87
Şekil 3.27. Kanatlı disk üst, ön kesit ve üç boyutlu içyapısı	87
Şekil 3.29. Yüksek devirli motor ve pompa fanı	88
Şekil 3.31. Metal toz üretimi için deney düzeneği	90
Şekil 3.32. Yüksek devirli motor sürücüsü	90
Şekil 3.33. Su debi ölçeri	90
Şekil 3.34. Metal eriğin sıcaklığı ve zamanı gösteren ölçüm ve kontrol cihazı	91

Şekil 3.35. Metal toz üretimi için deney düzeneği	92
Şekil 3.36. Deney tezgâhın ön görünüşü ve silindir metal saç	92
Şekil 3.37. Deney tezgâhı üzerinde monte edilen pompa fanı ile ısıt fırının kesiti	92
Şekil 3.39. Deney tezgâhı tüm detayları.....	93
Şekil 3.40. Deney tezgâhında ısıt fırın ve yüksek devirli motorun bir başka görünüşü	94
Şekil 4.1.Portland çimentosunun kümülatif boyut dağılımı (lazer difraksiyon sonuçları)	97
Şekil 4.2. Dönen disk sistemine etki eden kuvvetler.....	104
Şekil 4.3. Düz kanatlı disk için su damlacığının bileşke hız bileşenleri (Cerović ve ark,2018)	109
Şekil 4.4. Kavisli kanat disk için su damlacığının hız bileşenleri	111
Şekil 4.5. Düz kanatlı disk atomizasyon yöntemiyle elde edilen kurşunun toz büyüklük dağılımı, D ₃₂ =83µm, N=18000 rpm, T=1000°C, Q=0,1 lt/s.....	114
Şekil 4.6. Kümülatif Partikül Boyut Dağılımı (D ₃₂ =83µm, N=18000 rpm, T=1000°C, Q=0,1 lt/s) .	114
Şekil 4.7. Düz kanatlı disk atomizasyon yöntemiyle elde edilen kurşunun toz büyüklük dağılımı, D ₃₂ =83µm, N=18000 rpm, T=1000°C, Q=0,1 lt/s	116
Şekil 4.8. Kümülatif Partikül Boyut Dağılımı, D ₃₂ =83µm, N=18000 (rpm.) T=1000°C, Q=0,1 l/s.	116
Şekil 4.9. Kavisli kanatlı disk atomizasyon yöntemiyle elde edilen kurşunun toz büyüklük dağılımı, D ₃₂ =83µm, N=18000 (rpm.) T=1000°C, Q=0,1 l/s.....	118
Şekil 4.10. Kümülatif Partikül Boyut Dağılımı, D ₃₂ =83µm, N=18000 (rpm.) T=1000°C, Q=0,1 l/s	118
Şekil 4.11. Kavisli kanatlı disk atomizasyon yöntemiyle elde edilen kurşunun toz büyüklük dağılımı, D ₃₂ =83µm, N=18000 rpm, T=1000°C, Q=0,1 l/s	120
Şekil 4.12. Kümülatif Partikül Boyut Dağılımı, D ₃₂ =83µm, N=18000 rpm, T=1000°C, Q=0,1 l/s .	120
Şekil 4.13 Metal toz boyutunun kanalı disk sayısına göre dağılımı	122
Şekil 4.14.Elde edilen tozların genel görünüşleri, şekil ve mikro yapı analizi.....	124

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 1.1. Dövme ve Toz Dövme Çeliğin Özelliklerinin Karşılaştırılması	10
Çizelge 1.2. 2005 Yılına Ait Metal Tozları İçin Tahmini Küresel Pazarlar	13
Çizelge 1.4. Düz Diskler İçin Damlacık Boyutu Tahmini.....	35
Çizelge 4.1. Parçacıkların inceliği ve parçacık boyutu dağılımlarının genişliği	97
Çizelge 4.2, farklı parçacık boyut aralıklarındaki parçacıklar için kullanılan toz terimleri	97
Çizelge 4.3. Eşdeğer çaplar veya parçacık boyutları.....	98
Çizelge 4.4.Düz kanatlı disk ile atomize edilmiş kurşunun toz boyut dağılımı (disk hızı= 18000 (devir/dk.), disk çapı=13.5cm, kanat sayısı=4).....	113
Çizelge 4.5. Düz kanatlı disk ile atomize edilmiş kurşunun toz boyut dağılımı (disk hızı= 18000 devir/dk., debi 0,1 lt/s ve 1000°C).....	113
Çizelge 4.6.Düz kanatlı disk ile atomize edilmiş kurşunun toz boyut dağılımı (disk hızı= 18000 (devir/dk.), disk çapı=13.5cm, kanat sayısı =4).....	115
Çizelge 4.7.Düz kanatlı disk ile atomize edilmiş kurşunun toz boyutu dağılımı (fan dönme hızı 18000 (d/dk) fan çapı = 13.5 cm, kanat sayısı = 4)	115
Çizelge 4.8. Kavisli kanatlı disk ile atomize edilmiş kurşunun toz boyutu dağılımı (disk hızı = 24000 (d/dk) , disk çapı = 16 cm, kanat sayısı = 4).....	117
Çizelge 4.9. Kavisli kanatlı disk ile atomize edilmiş kurşunun toz boyutu dağılımı (disk hızı = 24000 (d/dk) , disk çapı = 16cm, kanat sayısı = 4).....	117
Çizelge 4.10 Kavisli kanatlı disk ile atomize edilmiş kurşunun toz boyutu dağılımı (fan dönme hızı = 19000 rpm, fan çapı = 16 cm, kanat sayısı = 4).....	119
Çizelge 4.11.Kavisli kanatlı disk ile atomize edilmiş kurşunun toz boyutu dağılımı (fan dönme hızı = 18000 (d/dk) disk çapı = 16cm, kanat sayısı = 4).....	120

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

CIP	Soğuk izostatik presleme
GA	Gas Atomizasyonu
HIP	Sıcak izostatik presleme
L-PBF	Lazer toz yatak birleştirme
MA	Mekanik Alaşım
MEK	Metal enjeksiyon kalıplama
MSDI	Mono-boyut dağılımı indeksi
SPAN	Partikül boyut dağılımının genişliği
Oh	Ohnesorge
PSD	parçacık boyut dağılımı
Re	Reynolds
RSP	Hızlı Katılaştırma Süreci
SA	Su Atomizasyonu
SMD	Sauter Ortalama Çapı
SS	Paslanmaz çelik
SUV	Spor İkinci El Araç
TM	Toz metallürjisi
VAMI	Rus Ulusal Alüminyum-Magnezyum Enstitüsü
We	Weber sayısı
v_g	gaz kinematik viskozitesi
v_m	sıvı metalin kinematik viskozitesi
q_r	Temas olmaksızın iki nesne arasındaki ısı geçişidir(joule).
m	Isıtıcı elemanın kütlesi kütlesi(kg)
c	Isıtıcı elemanın öz ısı kapasitesi(kJ/(kg.K))
ρ	Isıtıcı elemanın öz direnci ($\Omega.m$)
D	Isıtıcı elemanın yoğunluğu(kg/m^3)
T_0	Isıtıcı elemanın oda sıcaklığındaki başlangıç sıcaklığı($^{\circ}C, K$)
T_{∞}	Hava sıcaklığı ($^{\circ}C, K$)
T_n	Herhangi bir n zamandaki Isıtıcı elemanın sıcaklığı ($^{\circ}C, K$)
h	Isı taşınım katsayısıdır(W/m^2K)
ε	Isıtıcı elemanın ışıyım katsayısı
σ	Stefan-Boltzman sabiti
%	Yüzde
$^{\circ}C$	Santigrat derece
mm	Milimetre
cm	Santimetre
m	Metre
g	Gram
kg	Kilogram
lt	Litre
pH	Power of Hidrojen
dk	Dakika
MPa	Mega paskal
α	apex açısı
Q	akış debisi
ρ	yoğunluk
ω	dönme hızı
μ	viskozite
σ	sıvı yüzey gerilimi,

1. GİRİŞ

Toz Metalurjisi (TM), metal tozları üretme sanatı ve bilimi olarak tanımlanmış olup, tek tek, karışık veya alaşımlı metal tozlara, metalik olmayan elementler ilave edilerek veya edilmeyerek yarı bitirmiş ve tam bitirmiş metal tozu elde etme sürecidir. TM parçalarının üretimi, basit veya alaşımlı tozların katkı maddeleri ve yağlayıcı maddelerin karışımı içerir. Bu karışımı bir kalıp içine koyup, sıkıştırılarak yeşil kompaktlar elde edilir. Yeşil kompaktlar, metal tozları ve bağlayıcı maddelerin karışımından oluşur ve genellikle ilk üretim aşamasını temsil eder. Daha sonra sinterleme veya ısıl işlem adımlarıyla bu yeşil kompaktlar, daha dayanıklı ve nihai ürün haline getirilir. Elde edilen metal parçalar, çeşitli uygulama alanlarında kullanılmak üzere yeterli dayanıklılık ve yoğunluğa sahip katı malzemenin son ürünleridir.

Katı malzeme gövdelerinin yoğunluğu, taneciklerin birbirine nasıl bağlandığına ve sinterleme veya ısıl işlemin şartlarına bağlı olarak değişir. Bu bağlanma süreci, TM sürecinde önemli bir adımdır. Partiküller sıkıştırılır, şekillendirilir ve sinterleme sırasında birbirine yapıştırılır. Bu işlem, malzemenin daha dayanıklı, sert ve yoğun bir form almasını sağlar. Daha yüksek sinterleme sıcaklıkları veya daha uzun ısıl işlem süreleri genellikle daha yüksek yoğunluğa yol açar, bu da malzemenin daha dayanıklı olmasına katkıda sağlar. Bu özellik, metal parçalarının belirli uygulamalarda kullanımını etkileyebilir. TM yöntemi, çeşitli avantajları nedeniyle endüstride geniş bir kullanım bulmaktadır. Bu yöntemle çeşitli malzemelerin üretilebileceği ve belirli özelliklere sahip parçaların elde edilebileceği birçok imkân bulunmaktadır. TM yöntemi kullanmasıyla elde edilmiş malzemelerin bazı numuneleri şunlardır.

Çok sayıda gözeneklere sahip parçalar: Bu malzemenin gözeneklerini kontrol etmekle ve hedeflenen özelliklere bağlı olarak fazla gözenekli malzemelerin elde edilmesini sağlar. Bu durum, malzemedeki hafiflik veya çok özel alanlarda sesi absorbe edilmesini sağlar. Fazla randımanlı elemanlara sahip olması: TM, karmaşık şekilli ve son derece hassasiyete sahip parçaların üretiminde etkili bir tekniktir. Hassas bir şekilde malzeme katarak ve işleyerek, uygun yerler için istenilen vasıflarda parça üretimi sağlamak mümkündür. Mikro yapılar elde edilmesi: TM yöntemi, mikro

düzeyde üretilen metal parçalara mekanik özellik kazandırılabilir. Malzemenin mikro yapılar, farklı, sıcaklık, süre ve uygun basınç şartlarında sinterleme işlemiyle ayarlanabilir. Bu şekilde çeşitli mekanik ve termodinamik özelliklere sahip dereceli mikro yapılar elde edilebilir.

Bu özellikler, TM yöntemini özellikle karmaşık parçaların, özel uygulamaların veya belirli özelliklere ihtiyaç duyan endüstriyel uygulamaların üretiminde tercih edilen bir yöntem haline getirmektedir. TM yöntemi, malzemenin içeriğini istenilen özelliklere göre ayarlamak için büyük bir esneklik sağlar. Bu, farklı uygulama gereksinimlerine uygun malzemelerin üretilmesini mümkün kılar ve minimize edilmiş segregasyon TM sürecinde önemli bir hedeftir. Bu segregasyon, metal tozları ve diğer bileşenlerin homojen bir şekilde karıştırılması ve ayrışmanın en aza indirilmesini sağlar ve değişen fiziksel ve mekanik özelliklere sahip derecelendirilmiş mikro yapıları üretme yeteneği gösterir. TM aynı zamanda, kalite, maliyet, hassasiyet, üretkenlik açısından dökme metalürjiye karşı avantajlara sahiptir ve malzeme kullanımının yüksek seviyesi ile kritik hammaddelerin korunması konusundaki yeteneği de dikkate değerdir

1.1. Tarihsel Arka Plan

TM, bugün birçok endüstriyel ürünün üretilmesinde en önemli imalat süreçlerinden biri olarak kabul edilmekte olup, tarihsel bir geçmişe sahiptir. Antik çağlarda kullanılan TM yöntemlerinden en eski örneklerinden biri, demir cevherinin odun kömürü eritmesi ile içindeki oksijeni azaltarak sünger demir(mikro düzeyde gözenekli) tozlarının üretilmesini kapsamaktadır. Bu tozlar daha sonra çekiçle şekillendirilerek kullanışlı formlar haline getirilmiştir. Antik TM eserlerinin tipik örnekleri arasında Delhi'deki demir malzemesi ile inşa edilmiş Ashoka Sütunu ve daha da eskilere dayanan Inka eserleri bulunmaktadır. TM'nin önemi, 19. yüzyılın başlarında tungsten tozlarının üretilip elektrik lamba filamentlerinde kullanılmak üzere Thorium oksit (ThO_2) ile güçlendirilmesiyle ortaya çıkmıştır. Tungsten karbür takımlarının geliştirilmesi, modern TM endüstrisinin büyümesinde önemli bir kilometre taşıydı. TM ile gözenekli yataklar, yatakların üretilmesi ve büyümesinde

hızlandırdı. Daha sonra, TM ile üretilen demirli ve demirli olmayan parçalar, kompozitler ve dispersiyonla güçlendirilmiş alaşımlar kullanılmaya başlandı. Elde edilmiş ürünlerin yanı sıra, TM modern teknolojiye bir dizi faydalı uygulama alanında da kullanılmaktadır. Bu kategorideki önemli örnekler arasında metal tozlarının enjeksiyon kalıplama yöntemiyle şekillendirilmesi, kimya endüstrisinde katalizör üretimi için kullanılması ve gıda endüstrisinde özel kaplama malzemeleri için kullanılan hijyenik ve dayanıklı metal tozların kullanılması bulunmaktadır.

Birçok endüstri gibi, yeni yüzyılın başındaki jeopolitik olaylar, 1990'ların sonunda yapılan sürekli büyüme tahminlerini ortadan kaldırmıştır. Kuzey Amerika'da, 2000 yılı birçok metal tozu üretici ve tüketicisi için başarılı bir yıl olmuştur. Sonrasında, otomotiv endüstrisinin üretimi 2001'de azaltıldığında, demir ve bakır esaslı tozların sevkiyatları ve parça imalat endüstrisi, en büyük bir yıllık düşüşlerini yaşamıştır. ABD'deki ekonomik daralma kısa ömürlü olmasına rağmen, TM parça işinin toparlanması 2003'e kadar sürmüştür. 2004 yılı, Kuzey Amerika endüstrisinin yeni bir zirveye ulaştığı bir yıl olsa da, on yılın sonunda olan görünüm o kadar olumlu değil. Büyük yerli otomobil üreticilerinin devam eden pazar payı kaybı ve nakil üreticiler tarafından TM parçalarının çok daha az kullanılması nedeniyle bu eğilim, hibrit araçların artan popülerliği ve büyük SUV(Spor İkinci El Araç)'ların azalmasıyla daha da kötüleşecektir.

Avrupa ve Japonya'da, ABD ekonomisinden gelen olumsuz etki, demir tozu sevkiyatlarına TM parça üretimi için belirgin bir şekilde yansımada. 2000 yılında canlanmasının ardından, hem Avrupa hem de Japon pazarları, TM işi 2003-4 yıllarında tekrar yükselmeye başlayana kadar temelde durgun kalmıştır. Avrupa, TM otomotiv sektöründe büyüme için Doğu'ya yönelirken, Japonya'da ise yeni otomotiv TM uygulamalarının önümüzdeki yıllarda kilit olması beklenmektedir. Çin ve diğer Asya ülkelerinde, toz metal parça imalatı için metal tozu tüketimi, yüzyılın başından bu yana hızlanmaktadır. Çin, otomobil üretimi ve altyapı inşaatının hız kazanmasıyla öncülük edecektir.

Otomotiv sektörü dışında, mobil telefonlar ve diğer taşınabilir elektronik cihazlardaki fenomenal büyüme, nikel ve kobalt tozlarının talep ve fiyatlandırması üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur. Aynı zamanda batarya üretiminin Uzak Doğu'ya kaymasıyla birlikte şarj edilebilir piller için özel nikel tozu sınıfları, geçen on yılda önemli bir büyüme göstermiştir. Nikel-kadmium pillerin nikel-metal hidrit ve lityum iyon türleri ile değiştirilmesine yol açarak değişen batarya teknolojisi, kobalt kimyasalları ve tozu talebi üzerinde özellikle Çin'de önemli bir etkiye sahiptir. Çin'in endüstrileşmesi, işleme vb. için tungsten karbür tabanlı kesici aletlere artan bir talep yaratmaktadır. Çin aynı zamanda dünyanın başlıca tungsten mineral kaynağıdır. Çin hükümeti, tungsten hammadde arzını diğer ülkelere sınırlayarak, yerel endüstrinin ihracat için aynı zamanda iç pazar için de petrol ürünlerinin üretimine odaklanmasını teşvik etmektedir. Bu hamle, tungsten tozu pazarı için açık bir implikasyona sahiptir ve diğer yerlerde petrol ürünleri, sadece başka bir alternatif malzeme kaynağı değil, malzeme tercihi olduğu uygulama veya özel pazar yerlerinde bulunmuştur.

Metal tozlarının en geniş kullanım alanı, TM tarafından katı ürünlerin veya bileşenlerin üretimindedir. Hem demir hem de demir dışı tozlar, TM üretim sürecinde çeşitli tiplerdeki nihai ürünlerin üretiminde kullanılır. TM birleştirme süreci, tasarım hedeflerine ulaşmak için çeşitli farklı yollar izler. Geçmişte toz yolunu seçmenin ana nedeni genellikle ekonomik olmuş olsa da, daha yakın zamanda süreç, enerji koruma, temizlik ve geri dönüş açısından çevresel açıdan çekici olarak kabul edilmeye başlanmıştır. En yaygın uygulanan birleştirme süreci, ' Sıkıştırma ve sinterleme' yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Bu süreçte, gevşek toz, istenen bileşen gibi şekillendirilmiş bir kalıp boşluğunda sıkıştırılmış ancak henüz sinterlenmemiş bir parçayı üretir, ardından kalıptan çıkarılır ve parçacıkları bir araya getirmek için bir fırında ısıtılır veya sinterlenir. Sinterlenmiş parçalar genellikle artık gözenekliliğe sahiptir ve bu da mekanik dayanıklılık ve diğer özellikleri etkiler. Bu gözeneklilik, bazen filtrelerde ve yağ emdirilmiş kendiliğinden yağlamalı rulmanlarda olduğu gibi sinterlenmiş parçanın önemli bir olumlu özelliği olabilir.

Tamamen yoğunlaştırılmış TM bileşenleri, bir "ön-form" oluşturmak için basma ve sinterleme yaklaşımını kullanarak üretilebilir ve bu pre-form daha sonra ısıtılarak

ve sıcak dövme ile residual gözenekliği kapatılır. Metal tozları ayrıca izostatik presleme (sıcak veya soğuk) ve ultra ince toz/bağlayıcı karışımının enjeksiyon kalıplama ile yüksek yoğunluğa sahip bileşenlere dönüştürülebilir. Tamamen yoğunlaşmış TM ürünler veya yarı mamuller, toz haddeleme veya ekstrüzyon ile üretilir ve ardından sinterleme, özütlenme ve geleneksel metal işleme teknikleriyle daha fazla işleme tabi tutulur.

Gevşek veya konsolide edilmemiş metal tozları genellikle çok daha küçük hacimli uygulamalarda kullanılır. Bunlar, katı roket yakıtlarından ekmek ve kahvaltı gevreği katkı maddelerine kadar çeşitli uygulamalarda kullanılır. Başlıca uygulamalar arasında kaynak elektrotları için akış kaplamaları, termal püskürtme tozları, fotokopi tozları, lehimleme ve lehim pastaları, ayrıca boya, pigment ve baskı mürekkepleri için metalik pullar bulunmaktadır (Capus, 2005).

Son yüzyılda malzeme sentezi, malzeme işleme ve işleme konularında gerçekleşen önemli yeniliklere ortaya çıkmıştır. Bu yenilikler, TM yöntemini ticari uygulamalarda olduğu kadar havacılık, nükleer ve savunma alanlarında da önemli bir yöntem haline getirmiştir. Özellikle, Atomizasyon, Mekanik Alaşım (MA), Hızlı Katılaştırma Süreci (RSP) gibi yeni malzeme işleme tekniklerinin gelişimi ile TM'nin büyümesi, 20. yüzyılın son çeyreğinde olağanüstü bir şekilde artmıştır. Bu süreçler, toz üretimi için kullanılan Atomizasyon, mekanik alaşım, soğuk izostatik presleme (CIP) ve sıcak izostatik presleme (HIP) gibi modern yöntemleri içermektedir. TM metal tozlarından son ürün veya yarı mamul ürünlerin imalatında kullanılır. Örnek olarak çubuk ve levha gibi tamamlanmış veya yarı mamul parçalarını üretmek için kullanılır. TM, gözenekli rulmanlar ve filtreler ile karbür takımlar gibi birkaç endüstriyel malzemelerin üretimi ile de tek olma yolunda önemli bir hedefe ulaşmıştır. Ayrıca, TM ile üretilen parçaları, teknik özelliklerin yanı sıra çevre dostluğu ve enerji verimliliği gibi ek avantajlara da sahiptir. TM yöntem giderek çeşitli endüstrilerde daha fazla kullanmaya yol açmıştır.

Günümüzde TM, geleneksel metal şekillendirme yöntemleri kullanılarak üretilen parçaların özellikleriyle karşılaştırılabilir. TM ile üretilen malzemelerin nihai

istenen şekle oldukça yakın olması anlamına gelir ve genellikle ek işleme gerektirmez. Bu malzemelerin özellikleri, geleneksel yöntemlerle şekillendirilmiş parçaların özellikleriyle karşılaştırılabilir. Ayrıca, TM alışıla gelmiş yöntemlerle işlemesi zor olan geleneksel alaşımlar, karışmayan sistemler (birbirine karışmayan veya çözünmeyen malzemeler), seramikler ve kompozitleri işlemesi ve esnek metal şekillendirme yöntemlerinden biri olarak ortaya çıkmıştır. TM, yüksek erime noktalarına sahip metalleri işleme yeteneği ile öne çıkar. Özellikle tungsten ve molibden gibi metaller, geleneksel metal işleme yöntemleriyle zorlu hale gelebilir. Ancak TM, bu tür yüksek erime noktalarına sahip malzemeleri daha etkili bir şekilde işleyebilir. Ayrıca, TM, sert ve kırılgan malzemelerin, örneğin berilyum gibi, geleneksel yöntemlerle şekillendirilmesinin zor olduğu durumlarda avantajlıdır. TM, bu tür malzemeleri daha hassas ve karmaşık şekillerde işleyebilir ve bu da özel uygulamalar için önemlidir. TM'nin diğer avantajları arasında ince mikro yapıların oluşturulabilmesi, ayrışmanın minimal olması ve çeşitli mikro yapıların elde edilebilmesi yer almaktadır. Bu özellikler, malzemelerin istenilen özelliklere daha yakın bir şekilde üretilmesini sağlar ve nihai ürünlerin performansını artırabilir.

TM, metal tozu işleme anlamına gelmesine rağmen, seramikler ve polimerler (örneğin PTFE veya Teflon) dâhil olmak üzere tüm malzeme sınıflarını işleyebilir. Ayrıca, işleme sıcaklıkları, bileşen metallerin erime noktasından çok daha düşük olabilir. Ayrıca, yüksek üretim hızları, yakın tolerans seviyeleri ile hassas şekillendirme ve minimum veya hiç işleme gerektirmeyen parçaları elde etmeye yardımcı olur. Geleneksel TM bileşenleri genellikle birkaç gramdan başlayarak birkaç kilograma kadar olan ağırlıklara sahiptir, ancak çoğu 3 kg'dan daha az ağırlıktadır. TM, ekonomik bir şekilde basit şekillerden karmaşık şekillere kadar her türlü malzemeyi üretilmektedir. TM'nin günümüz imalatındaki artan önemini, otomobiller, televizyonlar, çamaşır makineleri, klima sistemleri, fotokopi makineleri ve bilgisayar parçaları gibi ev aletleri ile endüstriyel ve havacılık sektörlerinde giderek daha fazla sayıda TM parçasının kullanılmasıyla görülmektedir (Angelo ve ark, 2022).

Son elli yılda, TM ve toz teknolojisi dikkate değer bir ilerleme kaydetmiştir. Toz işleme yolu artık rekabetçi bir teknoloji ve döküm veya geleneksel metal

şekillendirmeye bir alternatif olarak tanınmakta ve saygı görmektedir. Ayrıca, potansiyel yalnızca toz fabrikasyon yoluyla yeni ve sıra dışı malzemelerin, parçaların ve bileşenlerin üretimindeki yeteneği kanıtlamanın yolunu açmıştır (Kuhn ve Lawyer, 1978). İki ayırt edici özellik, yani tozları şekillendirmek için presleme ve erime noktasının altında sinterleme, bu üretim yönteminin, döküm, dövme, zımbalama, gibi birçok teknikten bir veya daha fazlasını içeren, döküm veya işlenmiş metalin işlenmesi, başka herhangi bir üretim sürecinde elde edilemeyen özel metalürjik ve mekanik özellikler sağlamasına izin vermiştir. TM, literatürde iyi tanıtılmış diğer üretim teknolojilerine göre birçok teknik avantaja sahiptir (Beddow,1978). TM yönteminin avantajı, endüstride ortaya çıktıkları şekliyle aşağıdaki üç ana kategoride gruplandırılabilen bir dizi farklı ürüne yönelik uygulamalarının çeşitliliğinden kaynaklanmaktadır (Balke,1950).

1.2 Özel Metalurjik Özellikler

Ateşe dayanıklı veya tungsten gibi yüksek erime noktalı metaller molibden, tantal, kolombiyum, titanyum, zirkonyum ve bunların birbirleriyle olan alaşımları, tozları çubuk formuna, sinterleme ve çekiçleme veya yekpare ve kullanışlı şekilde haddeleme zorunlu olarak presleme yoluyla yapılmalıdır. Bu metalleri eritmek için ticari olarak kullanılacak refrakter potalar bilinmemektedir ve sonuçta gerçekten de bazılarının ortaya çıkan özellikleri, eğer eritilirse, onları mevcut kullanımları için elverişsiz hale getirecektir. Sement karpür endüstrisi inşa edilmiştir. TM tekniklerinin kullanımına ilişkindir. WC-Co bileşiminin bir kısmı erir ve %20'ye varan doğrusal büzölmeye neden olur. Ancak parçalar çiftçi pres şeklinin tüm ayrıntılarını korur (Stevenson,1984). Sıvı halde karışmayan metaller, toz halindeyken iyice karışabilir. Örnekler arasında kaynak elektrotları için tungsten bakır ve elektriksel temas noktaları için gümüş grafit ve gümüş- molibden yer alır (Schumacher ve Souden,1944).

1.3 Özel Mekanik veya Yapısal Özellikler

Farklı hiçbir üretim yöntemi, bir metal parçasında kontrollü gözeneklilik sağlayamaz. %50'ye kadar gözeneklilik, birbirine bağlı gözeneklerin hacmi gözenekli

yatak endüstrisini mümkün kılmıştır. Diğer gözenekli parçalar ve mevcut malzemeler arasında çeşitli metallere yapılmış metalik filtreler, tantal kondansatör elemanları ve gözenekli molibden bulunur (Arnold,1992). Doubleks yapılar, demir ve nikel gibi bir toz tabakasını diğerinin üzerine bastırarak ve şerit haline getirmek için haddeleyerek yapılan termal şeritleri içerir. İki metal mükemmel bir şekilde birbirine kaynaklanmıştır. Böylece ısı genleşmedeki farklılıklarından faydalanılabilir. Ametaller, fren balatalarında bir sürtünme malzemesi elde etmek için metalik tozlarla karıştırılabilir. Metalik kısım ısıyı yaymasına karşın, metalik olmayan bileşen sürtünme kalitesini sağlamasına çalışır (Lanel ve Özsever, 1980). Yalıtılmış metalik tozlar, elektronik uygulamalar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Parçacıkları karbonil demir tozu öyle işlenir ki birbirine bastırıldığında birbirlerinden yalıtılırlar. Bu özel yapı akort bobinlerinde avantajlıdır ve başka hiçbir üretim yöntemi ile yapılamaz.

1.4 Rekabetçi Üretim Yöntemlerine Göre Ekonomik Avantajlar

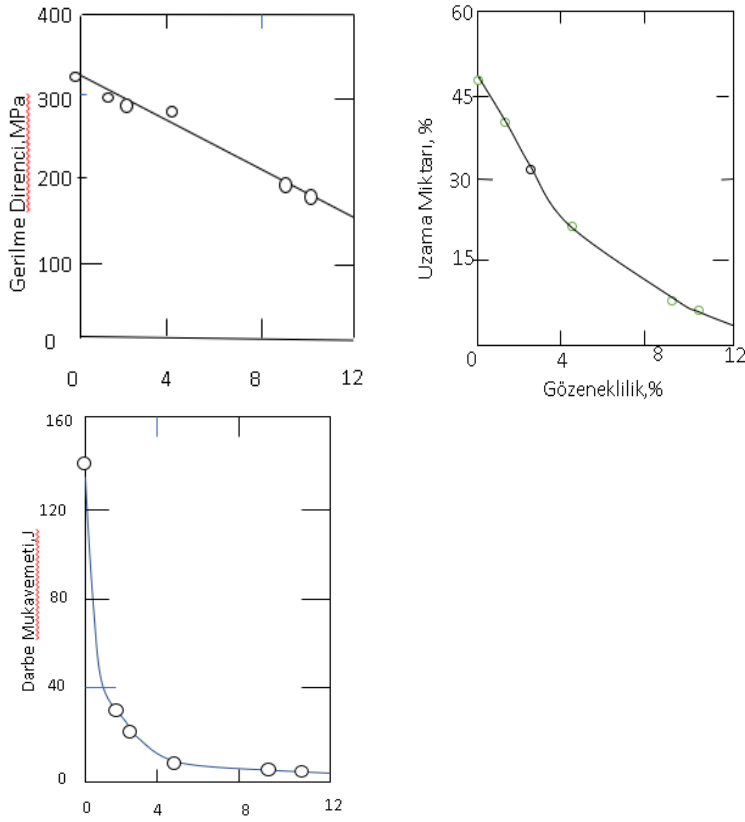
Fonksiyonel parçaların çoğu yapısı, aşağıdaki hususların herhangi birinden veya hepsinden kaynaklanabilecek ekonomik nedenlerle döküm veya dövme metalin işlenmesi tercih edilerek TM ile yapılır (Sarıtaş,1985).

- a) İkincil işlemlerin azaltılması veya ortadan kaldırılması,
- b) %50'ye varan metal tasarrufu
- c) genellikle daha uygun olan bir kalıplama süresi
- d) geleneksel yöntemlerle işlemek için maliyetli olan birçok tasarım özelliği kullanılabilir.

Toleranslar ve üretim oranları, söz konusu parçayı yapmak için TM işleminin seçilmesinde diğer belirleyici faktörler olabilir. Pek çok parça, yukarıda açıklanan avantajların üçünün de öğelerini sergiler. Özel ürünlerin tedarikinde ilk ikisi birincil öneme sahip olsa da ekonomik avantaj, dikkatle analiz edilmesi gereken avantajlardandır. Başka yollarla elde edilmesi mümkün olabilecek bir parçanın yapımında kullanılacak üretim yöntemi olarak TM seçilmiştir. Yüksek mukavemet

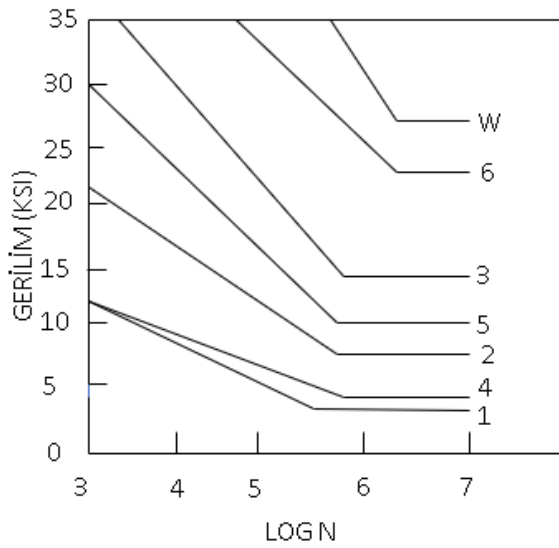
üretimi için TM tekniklerinin uygulanması parçalar, yeterli özellik düzeylerinin elde edilmesine bağlıdır. Bu artık gözenekliliğin ortadan kaldırılmasını gerektirir.

Şekil 1.1'deki veriler gösteriyor ki yoğunluk arttıkça çekme mukavemeti, süneklik ve tokluk da artar ve artık gözeneklilik ortadan kaldırıldığı için, tokluk ve süneklikteki artış önemlidir. Gerilme mukavemetinin doğrusal olarak azaldığını, ancak uzamanın ve özellikle darbe mukavemetinin artan gözeneklilik ile katlanarak azaldığını açıkça göstermektedir (Bockstiegel ve Blande 1976).



Şekil 1.1. Gözenekliliğin demirin mekanik özelliklerine etkisi

Şekil 1.2, yorulma özellikleri için benzer bir eğilimi göstermektedir. Ancak günümüzde gerçek yoğunluk işleme teknikleri ile teorik yoğunluğun %99,99'undan daha iyi yoğunluklar elde edilebilmektedir. Gerçek yoğunlukta, mekanik özellikler geleneksel dökümle işlenmiş bileşenlere neredeyse eşit ve bazen daha yüksektir (Brown ve Steed, 1974).



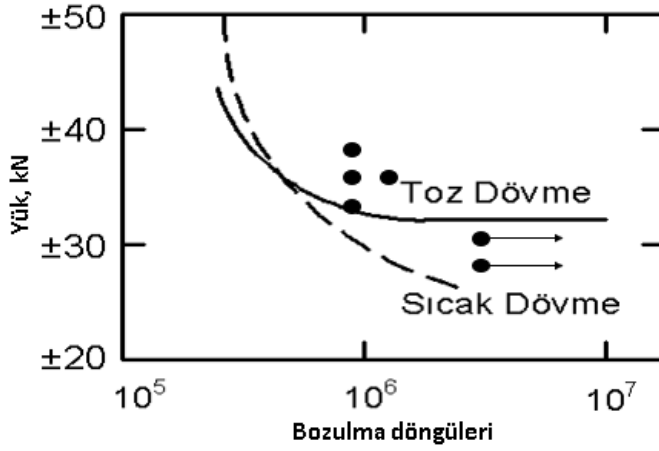
Şekil 1.2. Gözeneklerin sinterlenmiş demir parçaların yorulma eğrileri üzerindeki etkisi (Hayness, 1974)

Tablo 1.1, eşdeğer döküm ve toz dövme çeliklerin mekanik özelliklerini karşılaştırır. Ayrıca tam ölçekli nedeniyle bileşen testi çok yüksek yüzey kalitesi, toz dövme bağlantı çubukları, klasik sıcak dövme bağlantı çubuklarından daha iyi performans gösterir. Bu, Şekil 1.3'te gösterilmiştir (Brown ve Steed, 1973).

Çizelge 1.1. Dövme ve Toz Dövme Çeliğin Özelliklerinin Karşılaştırılması

Malzeme		U.T.S (N/mm ²)	Uzama miktarı (%)	Kırmızı Alan (%)	Darbe Mukavemeti(J)
Çelik Kütük Mn-Mo	Boyuna	920-980	17-19	60-62	100
	Enine	910-950	5-12	8-24	10
Metal Toz Dövme Ni-Mo		900-930	13-15	40-50	27

TM onlarca yıldır uygulama alanını inanılmaz bir şekilde genişletiyor. İlk günlerde, TM tarafından yalnızca sinterlenmiş ürünler üretiliyordu. Ancak, son kırk yılda, TM işleme teknikleri o kadar geliştirildi ki, bugün, herhangi bir yoğunluk seviyesinde hemen hemen her şekli üretmek mümkündür. Orijinal kompaktlaştırma ve sinterleme işlemlerine ek olarak sıcak dövme, soğuk ve sıcak izostatik presleme, toz enjeksiyon kalıplama ve spreyci şekillendirme işlemleri, TM'yi döküm-dövme işleme tekniklerine karşı çok yönlü ve rekabetçi bir alternatif haline getirmiştir (James, 1985).

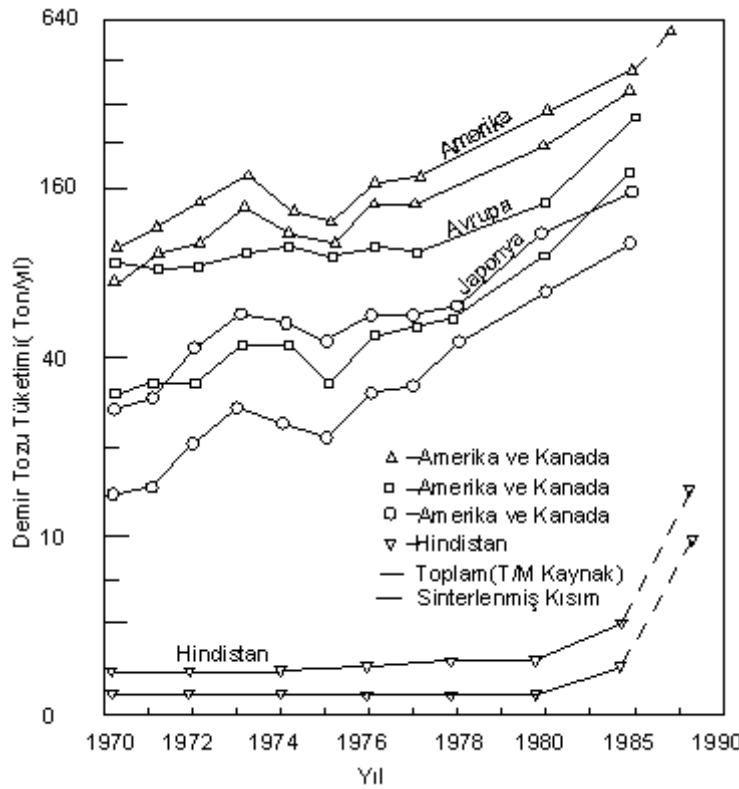


Şekil 1.3. Toz dövme bağlantı çubuğu yorulma testi sonuçları, sıcak dövme eğrisi üst üste bindirilmiş

Metal TMnin uygulaması şunları içerir.

- 1) Çimentolu Karbürler,
- 2) Kendinden Yağlamalı Yataklar,
- 3) Metalik Filtreler,
- 4) Takım Çelikleri,
- 5) Talaşlı İmalat Dışı Yapısal Parçalar,
- 6) Elektrik Kontak Malzemeleri,
- 7) Sürtünme Malzemeleri,
- 8) Manyetik Malzemeler ve
- 9) Yüksek Mukavemetli Tam Yoğunluklu Bileşenler.

Metalik tozlara olan talep, Şekil 1.4' de gösterildiği gibi sürekli artmaktadır. Demir tozu, TM endüstrisindeki en önemli toz haline gelmiştir. TM endüstrisindeki büyümeyi ölçmek için demir tozu sevkiyatına ilişkin istatistikler kullanılmıştır. 1986 yılı için sadece Kuzey Amerika'da demir tozu tüketimi 325 bin ton olup, bu da 650 milyar ABD doları piyasa değerine tekabül etmektedir.



Şekil 1.4. Dünyada demir tozu tüketiminin karşılaştırmalı eğilimi (Upadhyaya, 1986)

Bugün Türkiye'de TM bileşenleri üreten onlarca firma bulunmaktadır. Bu bileşenler genellikle otomotiv endüstrisi için üretilmektedir. Boyutları küçük ve güçleri düşüktür. Tam yoğunluklu işleme teknikleri henüz tanıtılmamıştır. Bu şirketlerin tümü ithal metal tozları kullanmaktadır. Tüketilen tüm metal tozların % 80 'den fazlası atomize tozları olduğundan dolayı atomize yöntemi seçilmiştir.

Metal tozları, küresel metaller endüstrisinin sadece küçük bir kesimini oluştursa da, otomobil ve tüketici elektroniği gibi yüksek profili sektörlerde önemli bir rol oynarlar. Metal tozu tüketiminin küresel değeri, 2000 yılından bu yana 3 milyar dolar civarından 3.7 milyar doların üzerine yükselmiştir. Bu artışın bir kısmı, yakın zamanda artan ana metal fiyatlarından kaynaklanmaktadır. Sevk edilen toplam tonajdaki artış yaklaşık %20 düzeyinde olup Tablo 1.2'de gösterilmiştir. Bu değerler yaklaşık olarak 2005' teki dolar kuruna dayanmaktadır (Capus, 2005).

Çizelge 1.2. 2005 Yılına Ait Metal Tozları İçin Tahmini Küresel Pazarlar

Malzeme	Ton	US\$ (Milyon)
Demir ve çelik	1060000	930
Alüminyum	110000	550
Bakır ve bakır tabanlı	65500	330
Nikel	50000	1000
Tungsten	37000	600
Kobalt	6000	300
Kalay	2600	32

Bu tonajın büyük çoğunluğu demir, çelik, alüminyum ve bakır oluşturmakta olup, demir tozları toplamın yaklaşık %80'ini oluşturmaktadır. Demir tozu genellikle dişli, kam mili, dişliler, rulmanlar, rulman kapakları ve biyel kolu gibi küçük otomotiv bileşenleri üretimi için kullanılır. Bu devasa büyüme, etkili maliyet, malzeme ve enerji tasarrufu sağlayan parça üretimindeki başarının etkisiyle olmaktadır. TM sürecinde, uygun şekilde formüle edilmiş metal toz karışımları bir matrise sıkıştırılır, ardından istenen şekle getirilir ve daha sonra yüksek sıcaklıkta bir fırında (sinterleme) ısıtarak sertliği ve dayanıklılığı istenen seviyeye çıkarılır. Ön şekillendirilmiş ve sinterlenmiş malzemeleri sıcak dövme yöntemiyle bağlantı çubuklarının üretiminde büyük başarı elde edilmiştir. Bu nedenle, metal tozu endüstrisinin demir kısmının beklentileri büyük ölçüde otomotiv endüstrisi ile bağlantılıdır ve en iyi şekilde otomotiv tedarik zincirinin bir bölümü olarak anlaşılır.

Sıkıştırılmamış veya yoğrulmamış durumdaki metal tozları için geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır. Ancak genellikle miktarlar çok daha küçüktür. Bu uygulamalar, roket yakıtlarından jet motoru kaplamasına, fotokopi toner taşıyıcısından metalürjik ve kimyasal üretime, boya ve pigmentlere kadar çeşitlenmektedir. Hatta ekmek ve kahvaltılık gevreklerde demir zenginleştirilmesi olarak bile kullanılmaktadır. Çoğu metal tozu, bir sıvı metal veya alaşımın atomize edilmesiyle yapılır. Atomizasyon, bir sıvı metal akışının yüksek basınçlı su, hava veya gaz jetlerine dökülerek yapılır. Tungsten ve molibden gibi yüksek erime noktalı metallerin tozları genellikle ince öğütülmüş oksitlerin indirgenmesi yoluyla elde edilir. Üretim yöntemi, tozun birçok özelliğini kontrol eder ve bu nedenle çeşitli uygulamalara uygunluğunu etkiler. Başka bir deyişle, bu, nispeten az sayıda değiştirilebilir sınıfa sahip özel bir ürün endüstrisi olup bir mal ticareti değildir.

1.5. Metal Toz üretimi

Metal tozu üretimi konusu çok geniş bir konudur. Bu bölümde, teknolojik öneme sahip olan en önemli prensip ve süreçlerin açıklamaları yer almaktadır. Önemli üretim yöntemleri kimyasal yöntemler, fiziksel yöntemler ve mekani yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Neredeyse herhangi bir malzeme, bu yöntemlerden biri veya birkaçıyla toza dönüştürülebilir. Seçilen kesin yöntem, uygulama türüne ve nihai ürünün istenen özelliklerine ve yapısına bağlı olmalıdır.

Tüm metal tozları, bireysel fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı aynı yöntemle üretilemez. Çeşitli işlemlerden elde edilen parçacıkların boyutları ve yapıları gibi prosedürler de büyük ölçüde değişir (Beddow, 1978). Toz malzemenin işlenmesi, boyut, şekil, kompozisyon ve yapı gibi özellikleri ve karakteristikleri göz önüne alarak başlar. Bu toz özellikleri, sonraki sıkıştırma, sinterleme ve yoğunlaştırma süreçlerinin tepkisini etkiler. Toz özellikleri ve karakteristikleri, üretim yöntemine ve koşullarına bağlıdır ve istenen toz özelliklerinin kontrolünü kolaylaştırmak için bu süreçlerin daha iyi anlaşılması için önemli çaba harcanmaktadır (Tallmadge, 1978).

Toz üretiminin çeşitli yöntemleri (Hirschhorn, 1969) şu şekilde sınıflandırılabilir.

1. Atomizasyon, erime özelliğine sahip herhangi bir metal veya alaşım sistem için kullanılabilir
2. Kimyasal indirgeme, demir üretimi sırasında demir yüzeylerinde oluşan oksit tabakasını veya demir oksitlerinden sünger demir üretiminde kullanılır
3. Mekanik kırılma, berilyum ve antimon gibi kırılman malzemeler için kullanılır
4. Elektroliz, yüksek saflıktaki tozların biriktirilmesinde kullanılır

Atomizasyon ve kimyasal indirgeme işlemleri genellikle yüksek tonajlı üretimde en yaygın olarak kullanılan işlemlerdir. Oysa mekanik ezme ve elektroliz genellikle küçük miktarlarda özel malzemelerin üretimi için kullanılır. En esnek süreç atomizasyondur. Çünkü alaşım tozları üretme yeteneği sağlar ve toz özellikleri üzerinde en büyük kontrolü sağlar.

Atomizasyon süreçlerinde tasarım ve kontrol değişkenleri, istenilen toz özelliklerini elde etmek için manipüle edilebilir. Bu parametreler eriyen metal özellikleri (viskozite, yüzey gerilimi, kompozisyon, aşırı ısınma), eriyen metal akış geometrisi (metal akış hızı, akış uzunluğu, uçuş yolu, manifold geometrisi), jet geometrisi (jetin çıkış açısı, jet sayısı, jet konumu) ve jet akışı (basınç, kütle akış hızı, viskozite, yoğunluk) içermektedir.

Metal tozu işleme sürecinde özellikle önemli olan, toz özellikleri ile atomizasyon parametreleri arasındaki ilişkilerdir. Birçok değişkenin parçacık boyutu üzerindeki nitel etkileri, (Gummesson, 1972) tarafından belirtilmiştir. Ancak çoğu parametrenin nicel etkisi hakkında çok az bilgi yayınlanmıştır.

1.5.1. Kimyasal yöntemler

Temel termodinamik ve kinetik yönlerin ayrıntılı bir açıklaması için okuyuculara, giriş rehberi olarak standart bir metni takip etmeleri önerilir. Bu yöntemler daha fazla olarak kimyasal indirgeme ve çözülme olarak sınıflandırılabilir (Lawley, 1978).

1.5.1.1 Kimyasal indirgeme

Kimyasal indirgeme, genellikle bir oksit, ancak bazen bir halojen veya metalin diğer tuzunu içeren bir kimyasal bileşimi içerir. Höganäs süreci (Höganäs, İsveç merkezli bir şirket olup, bu süreci geliştiren ve ticarileştiren şirkettir.) tarafından üretilen sünger demir tozu, bu üretim yönteminin tipik bir örneğidir. Zeminin indirgeme sırasında hareket etmediği, ancak diğer sürekli doğrudan indirgeme süreçlerinden farklı olarak statik olduğu bir kesik (batch) işlemidir. Höganäs süreci, kuzey İsveç'te bulunan oldukça saf manyetit (Fe_3O_4) cevherlerinin kullanımına dayanmaktadır. Demir cevheri, karbon içeren bir malzeme ile indirgenir. Cevher, her bir istenen demir tozu tarafından belirlenen bir parçacık boyutu dağılımına öğütülür. Cevher tozu, silikon karbürden yapılmış silindirik seramik kaplara ("saggers") yerleştirilir ve dışarıdan kireç ve kok karışımından yapılmış bir konsantrik tabaka ile

çevrilidir. Saggars, bir yakıtla çalışan tünel fırınından itilen arabalar üzerine katmanlar halinde yerleştirilir. Koktan üretilen karbon monoksit, cevheri demire indirger. Toplam indirgeme süresi, 1200°C indirgeme sıcaklığında yaklaşık 24 saattir. Kireçtaşı, koktaki kükürtü bağlamak ve demiri kirletmesini önlemek amacıyla kullanılır. Sünger demir, saggars'dan mekanik olarak çıkarılır, öğütülür ve elde edilen toz, magnetik yolla kirleticilerden ayrılır. Son indirgeme aşamasında, toz paslanmaz çelikten yapılmış bir bant üzerinde hidrojen atmosferinde sürekli bir fırından geçirilir (Upadhyaya, 1997).

1.5.2. Fiziksel yöntemler

1.5.2.1 Elektrolitik yöntem

Bu yöntem, bakır, berilyum, demir ve nikel tozlarının hazırlanmasında yaygın olarak kullanılır. Elektrodepozit sırasında kimyasal ve fiziksel koşulların ayarlanması, metalin hücrenin katoduna ya hafif bir pastamsı bir tabaka olarak ya da lamel formunda gevşek bir şekilde çökmesine neden olabilir. Her ikisi de kolayca bir toza öğütülebilir. Bu yöntem, geleneksel toz metalürji işlemleri için mükemmel özelliklere sahip yüksek saflıkta bir metal üretir. Bu süreç, birçok değişkenin kontrolünü ve manipülasyonunu içerir ve bazı durumlarda diğer tekniklere göre önemli ölçüde daha maliyetlidir. Bakır tozu için elektrolitik süreç, bakır rafinerisindeki gibi benzer bir süreçtir. Ancak, kirli dökme bakır anotlar yerine elektrolitik olarak saflaştırılmış bakır anotları kullanılır. Katot genellikle dökme antimon kurşundur. Elektrolit konsantrasyonu $\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ için 50 g/l'dir (rafine için 150 g/l'ye karşı), akım yoğunluğu 535 A/m²'dir (rafine için 107–215 A/m²'ye karşı). Bakır tozu yıkanır ve süzülür, son olarak 500–800°C arasındaki sıcaklıklarda kısmen yanmış hidrokarbon gazı atmosferindeki bir bant fırınında bir azaltma işlemine ve ısıl işleme tabi tutulur. Toz özellikleri, özellikle elektrolitik çökelti sonrasındaki azaltma işlemi tarafından kontrol edilir. Azaltılmış toz, bir çekiç değirmeni tarafından toza dönüştürülmelidir (Upadhyaya, 1997).

1.5.3 Atomizasyon

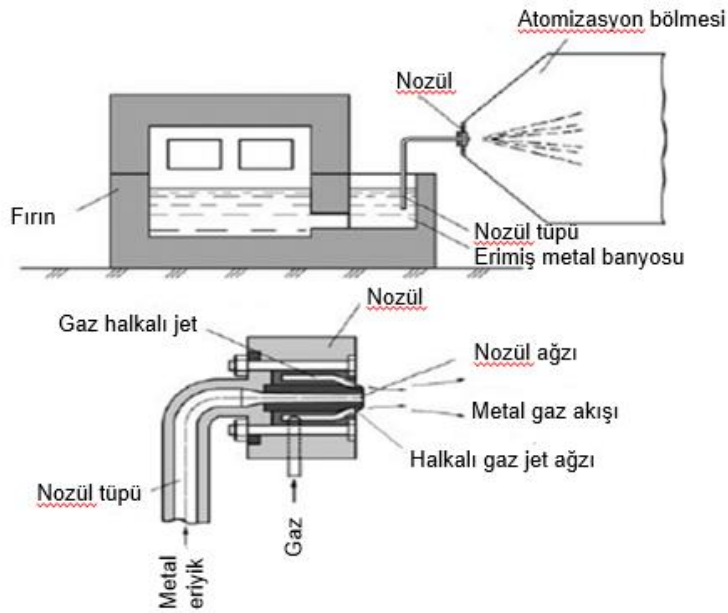
Erimiş atomizasyon, bir metal akışının püskürtülerek ardından katılaşıp toz partikülleri oluşturulan bir süreç olarak tanımlanabilir. Metal tozlarının üretimi için eritme atomizasyonu, göreceli olarak yeni bir alanı kapsar. Temel olarak, atomizasyon, eriyen metalleri tozlara ayırmak için uygulanan kuvvet moduna göre iki akışlı atomizasyon, vakum atomizasyon, santrifüj atomizasyon ve diğer yöntemler olarak gruplara ayrılabilir.

İki akışlı atomizasyonda, bir erimiş metal akışı, ikinci bir akıştan gelen çarpan kuvvetlerin uygulanmasıyla damlacıklara ayrılır. İkinci akış, su, yağ veya çeşitli gazlar olabilir. Benzer şekilde, tekniklere su atomizasyonu, yağ atomizasyonu ve gaz atomizasyonu adı verilir (Li, 1999). Ticari üretimde su, gaz, santrifüj, ultrasonik ve çözünebilir gaz atomizasyonu kullanılmaktadır. Ancak gaz (hava dahil) veya su ile iki akışkanlı atomizasyon yöntemleri dünya çapındaki atomizasyon kapasitesinin %95'inden fazlasını oluşturmaktadır (Lawley, 1992).

1.5.3.1. Gaz atomizasyonu

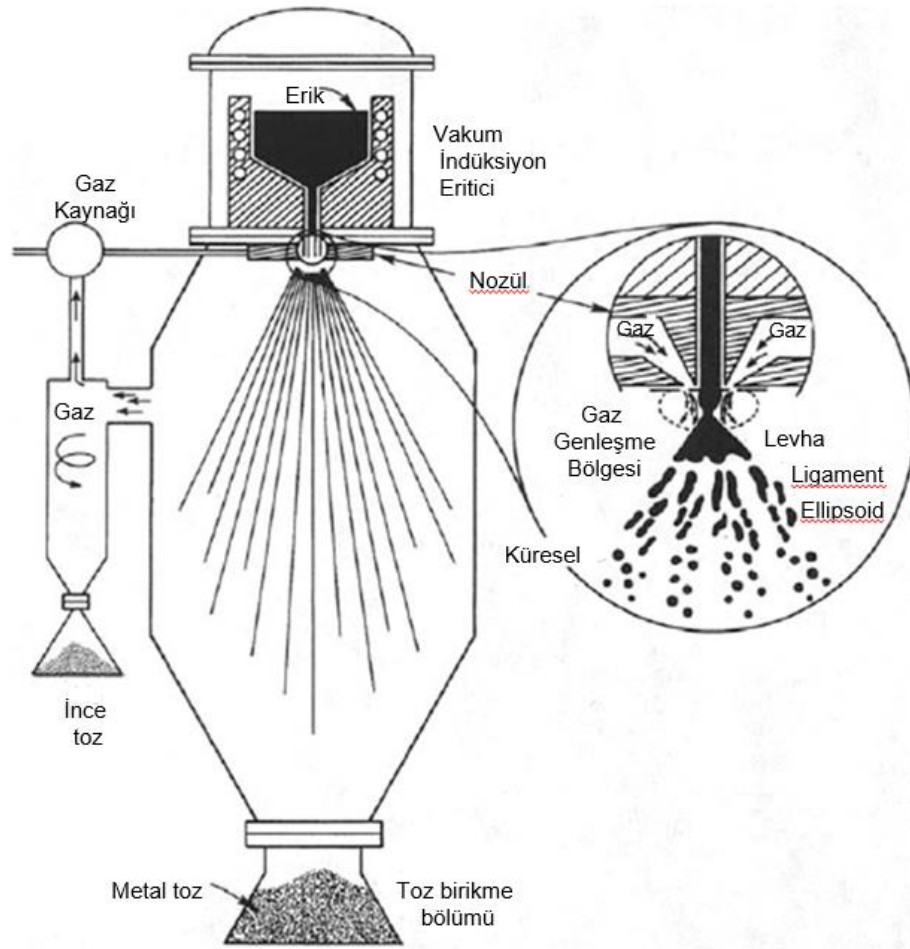
Gaz atomizasyon üniteleri, su atomizatörlerinden çok daha geniş bir tasarım yelpazesi ile önde gelir. En eski gaz atomizasyonu, 1872'de Huddersfield'lı Marriott tarafından patentlenen buhar ile gerçekleşmiştir. Atomizerin en basit tasarımı, bir metal akışının yatay bir gaz jetine düşmesine izin verilmiş ve bu tasarım çinko tozu üretimi için kullanılmıştır. Bu alandaki en eski bilimsel çalışmanın, Metals Disintegrating Co.'nun kurucusu Profesör Hall olduğu görünmektedir. 1920'lerin sonlarındaki patenti (US Patent, 1928), alüminyum atomizasyonu için bir tür yakın bağlantılı atomizeri temsil eder. Bu patente gösterilen temel tasarım hala kullanılmaktadır ve henüz temel bir şekilde geliştirilmemiştir. VAMI (Rus Ulusal Alüminyum-Magnezyum Enstitüsü) tarafından geliştirilen benzer bir ünite Şekil 1.6'da gösterilmiştir. Atomize edilen gaz, nozülün çevresindeki bir halka şeklindeki boşluktan koni açısında iletilir. Gaz akışı, nozülün ucunda emiş (aspirasyon) etkisi oluşturur ve erimiş metali nozüle çeker. Nozül tarafından iletilen gaz miktarı, hava boşluğunun boyutu ile gazın basıncı ve sıcaklığı tarafından kontrol edilir. Metal akış

hızı ve sonuçta oluşan toz parçacık boyutu, emme kuvveti, nozül metal açıklığı çapı ve nozül ile erimiş metal seviyesi arasındaki dikey mesafe tarafından etkilenir. Bu atomizer tasarımı, sıvı metal akışının gaz jet çıkış düzlemine veya yakınına temas etmeyi amaçlar ve bu noktada en yüksek jet hızları bulunur. Bu, sıvının etkili bir şekilde parçalanmasına yol açar, daha ince tozlar elde edilmesine neden olur ve alüminyum ve diğer düşük erime noktalı metaller için tercih edilen bir yöntemdir. Dikey olarak yukarı veya aşağı veya yatay pozisyonda çalıştırılabilir. Ancak, metalin gaz jeti tarafından dondurulmasını önlemek için atomizerin dikkatlice tasarlanması gereklidir. Çünkü bu durum nozül ucunda katılaşmaya yol açabilir.



Şekil 1.6. Yatay olarak erimiş metal akışına sahip VAMI aspirasyon nozulu tasarımı

Gaz atomizasyonunda, eritme işlemi genellikle reaktif bileşenlerin oksitlenmesini önlemek amacıyla koruyucu bir atmosfer veya vakum altında gerçekleştirilir. Bu tür sistemler, atomize edilmiş tozun kuru bir şekilde toplanması için tasarlanmıştır ve atomizasyon tankları genellikle oldukça uzundur. Tipik olarak 6 ila 10 metre (20 ila 33 fit) arasında, bu da toz partiküllerinin atomizasyon tankının altına ulaşmadan önce katılaşmasını sağlamak içindir. Böyle bir sistemin şematik bir gösterimi Şekil 1.7’de gösterilmektedir.



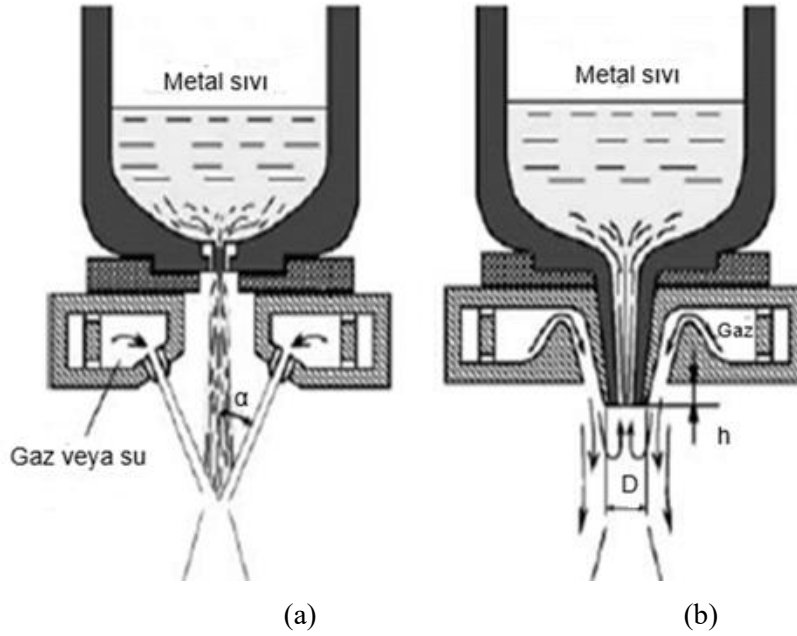
Şekil 1.7. İnert gaz atomizasyon sistemi şeması ve nozülü (German,1997)

Yatay tanklar kullanılarak yapılan yatay gaz atomizasyonu, aynı amaç için kullanılır. Yatay tasarımın dikey tasarıma göre daha ekonomik olduğu söylenmektedir. Erime işlemi açık havada gerçekleştirilir. Bununla birlikte, atomizasyon sırasında oksidasyon olmaması nedeniyle toz, genellikle ergiyenle neredeyse aynı kimyasal bileşime sahiptir ve oksijen içeriği oldukça düşük olup tipik olarak 200 ppm'den azdır. Düşük oksijen içerikli inert gaz atomizasyonu yapılan tozlar, yüksek oksijen affinitesi olan bileşenlerin yüzey zenginleşmesini gösterse de, bu oksit tabakaları sadece birkaç atom tabakası kalınlığındadır ve parçacık arası bağlanma üzerindeki olumsuz etkiler konsolidasyon sürecine kayma elemanları dahil edilerek minimize edilebilir veya ortadan kaldırılabilir. Ayrıca, geleneksel soğuk presleme ve sinterleme işlemlerinde kullanılanlardan çok daha iri tozlar, yüzeyle ilgili sorunları azaltır ve ekstrüzyon ve sıcak presleme için tercih edilir (Klar ve Samal, 2007).

Birçok gaz atomizer tasarımı bilinmektedir. Bunlar, 'serbest düşüş', 'sınırlı', veya kapalı nozullar (Şekil 1.8) ve 'içsel karışım' olarak sınıflandırılır. Kapalı nozul tasarımları aynı zamanda yakın eşleştirilmiş nozul tasarımları olarak da bilinir.

Serbest gaz atomizasyonu için Şekil 1.8-a'da, temel süreç değişkenleri su atomizasyonu ile benzerdir. Bu atomizerde, sıvı metal bir huniden bir akış olarak çıkar ve yerçekimi ile 100-200 mm düşer. Daha sonra, metal akışıyla buluşma noktasında bir noktasal veya halka şeklinde yönlendirilerek atomize edilir. Bu yöntem kolay işletilebilir ancak verimsizdir ve ince tozlar üretmek için uygun değildir. İçsel karışım ön-doldurma atomizer tipinde, gaz ve sıvı metal, atomize odasına genişlemeden önce bir araya getirilir (Wiggers ve ark, 2000).

Şekil 1.8-b'de gösterilen nozul tasarımı, gaz hızını ve yoğunluğunu metal akışıyla buluşmada maksimize ederek orta parçacık boyutlu tozun (40-60 μm) verimini artırmayı mümkün kılar (Dunkley,1991). Ancak, bu ünitelerin kullanımı, pota nozülünün sonunda erimiş metalin donmasına neden olabilir, bu da atomizasyonu hemen durdurur. Buna ek olarak, gaz akışının nozül ucuyla etkileşimi, basınç altında veya pozitif basınç altında olabilir ve bu durum, erime akış hızını önemli ölçüde artırabilen bir negatif basınçtan, onu durduran ve gazı potaya üfleyen yeterli bir ters basınçla değişebilir. Bu nedenle, kapalı nozulların kurulumu ve atomizasyon sırasında kontrolü için büyük bir özen gereklidir. Tasarım karakteristikleri: α , serbest düşen erimiş metal ve atomize edici ortam jeti tarafından oluşturulan açı; D, sınırlı erimiş metal nozül ucu çapı; h, erimiş nozülün taşma uzunluğu (Yule ve Dunkley, 1994).



Şekil 1.8. Atomizer tasarımı a) serbest düşme tasarımı (gaz veya su) b) sınırlı nozul tasarımı (yalnızca gaz)

Parçacık boyutu, boyut dağılımı, şekil ve yüzey morfolojisi gaz atomizasyonu ile ilgili işletme koşullarının toz özellikleri üzerindeki etkisi konusunda kapsamlı bir literatür bulunmaktadır (Seki ve ark, 1990; Small ve Bruce, 1968; Ünal, 2006). Gaz atomizasyonunda parçacık boyutunu kontrol eden en önemli tek parametre, özgül gaz tüketimidir. Bu, gazın metal akışına olan kütsel oranı veya gazın metal kütle oranına olan hacimsel oranı olarak ifade edilebilir. Birkaç metal ve alaşım için veriler, aşağıdaki gibi bir denkleme uyar.

$$d_m = KF^{-1/2} \quad (1.1)$$

Burada K bir sabit ve F m³/kg cinsinden özgül gaz tüketimidir. K'nın değeri, nozul tasarımı ve alaşım özelliklerine bağlı bir fonksiyonudur (Small ve Bruce,1968).

Özgül gaz tüketimi, ultrasonik gaz atomizasyonunda ortalama çapı kontrol etmede önemli bir işlem parametresidir (See ve Johnston, 1978; Rai ve ark., 1985). Sabit bir atomize gaz basıncında, bir alüminyum alaşımı için, gazın metal akış oranı 0.3'ten 2.0'ye çıktıkça, ortanca çap değeri yaklaşık 250 µ den 50 µ altına kadar değiştirilebilir. d_m bir azalma, artan gaz basıncı ile de öngörülmektedir.

Gaz atomize tozlar genellikle log-normal boyut dağılımına sahiptir ve standart sapma genellikle yaklaşık 2 ± 0.3 civarındadır. Genellikle, σ değerleri d_m azaldıkça düşer ve çoğu veri, bu formdaki empirik bir ilişkiyi gösterirken a ve b sabitleridir. (Klar ve Shafer, 1972; Lubanska, 1970).

$$\sigma = ad_m^b \quad (1.2)$$

(Lubanska, 1970),gaz atomize metal tozları üzerine literatürü karşılaştırarak ve (Wigg, 1960) tarafından geliştirilen bir ilişkiyi kullanarak, ortalama parçacık boyutu (d_m) için deneysel bir denklem türetmiştir. Boyutsuz formda, Lubanska'nın formülü şöyledir:

$$\frac{d_m}{d_o} = K \left[\frac{v_m}{v_g} \frac{1}{We} \left(1 + \frac{M}{A} \right) \right]^{1/2} \quad (1.3)$$

Weber sayısı (We), kütleli medyan parçacık çapı (d_m), metal akışının çapı (d_o), sıvı metalin kinematik viskozitesi (v_m), atomize eden ortamın kinematik viskozitesi (v_g), M / A kütleli akış oranı gazı (K sabiti hariç) olarak ifade edilen ve (Wigg,1960) tarafından geliştirilen bir ilişki kullanılarak türetilen bir deneysel denklemi temsil eder.

Miller ve Giles (1981), Modifiye edilmiş bir Weber sayısını tanımlayarak, çeşitli metallerin atomizasyonunu analiz etmiş ve yüksek gaz hızlarında, ivme dalgası parçalanmasının baskın olduğu sonucuna varmış ve bunu malzeme özellikleri ile gaz-metal kütleli debi oranına ilişkilendirmişler. İlişkinin fonksiyonel (boyutsuz) formu deneylerden elde edilmiştir.

$$d_{50,3} = C + K \frac{\sigma_m^{1/2} \mu_m^{1/3} d_i^{1/6}}{v_g^{4/3} \rho_m^{1/2} \rho_g^{1/3}} \left(\frac{M_g}{M_m} \right)^{-0,9} \quad (1.4)$$

Burada, $d_{50,3}$ kütleli medyan çapı, σ_m, μ_m ve ρ_m , T_s ergime sıcaklığındaki yüzey gerilimi, dinamik viskozite ve yoğunluğunu göstermektedir. Bunlar,(1 bar ve 244 K'de), sırasıyla, ρ_m , gaz yoğunluğu ve v_g , sonic gaz hızıdır, d_i eritme tüpün iç çapı, K, bir sabittir (=211) ve C, bir malzemeye ait sabittir.

Bazı deneysel ilişkiler, damlacık oluşumu için fiziksel modeller terimlerine dönüştürülebilir. Örneğin, maksimum stabilite kriteri olarak adlandırılan, yüzey gerilimi (σ), sıvı metalin gaz yoğunluğu (ρ) ve atomize eden ortamın hızı (v) fonksiyonu olarak maksimum damla boyutunu veren bir ilişki şöyle ifade edilebilir:

$$d_{kritik} = \frac{\sigma}{\rho g v^2} \quad (1.5)$$

Bu denklem, ligamentlerin parçalanmasına uygundur (See ve Johnston,1978). Kritik d_m 'den daha küçük parçacıklara ikincil ayrışma, gaz akış hızından kaynaklanan dinamik basıncın yüzey geriliminin yeniden başlatma kuvvetini aştığı durumlarda gerçekleşir. Genellikle sıvı metallerin daha yüksek yüzey gerilimine bağlı olarak, enerji gereksinimleri ve dolayısıyla metal atomizasyonu için kullanılan gaz basınçları tipik olarak 0.35 ile 2.75 MPa arasında olmaktadır.

1.5.3.2. Su atomizasyonu

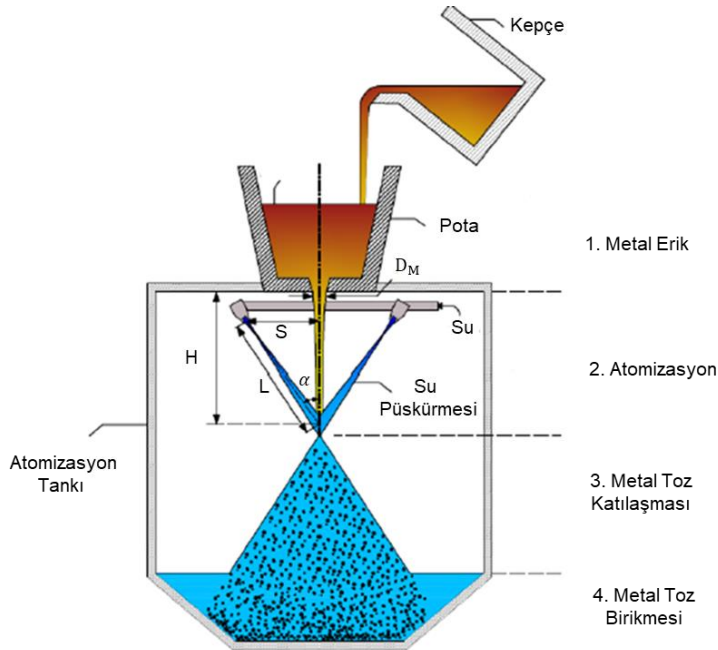
Su Atomizasyonu (SA), ticari olarak bakır, bakır alaşımları, nikel bazlı alaşımlar ve çinko tozlarının üretiminde kullanılır. Su atomizasyonu yöntemiyle elde edilen değerli metaller, diş tekniklerinde, sinterlenmiş elektrik kontaklarında ve lehim pastalarında kullanılır. SA, diğer atomizasyon yöntemlerine göre daha ekonomiktir. Tek bir püskürtme ağzı için 1 ila 500 kg/dak arasında geniş verim sınırlarında toz üretimine izin verir. SA'nın başlıca kısıtlamalarından biri, özellikle oksidasyona eğilimli metaller ve alaşımlar için toz saflığıdır. Ancak, SA tarafından eritilen malzemenin daha yüksek soğuma hızı nedeniyle, yüzey oksitlerinin ortalama kalınlığı gaz atomizasyonlu tozlarla benzerdir. Geleneksel bir SA sisteminin başlıca bileşenleri bir eritme ünitesi, bir huni, bir atomizasyon tankı, bir,güç ünitesi, bir su pompalama / geri dönüş sistemi ve suyun alınması ve kurutma üniteleridir ve Şekil 1.9'da gösterilmiştir.

Geleneksel deney düzeneği genellikle 5-20 MPa civarındaki su basıncı ile çalışır ve 30-50 μm kütlesi ortanca parçacık boyutlarına sahip tozlar üretir. Özellikle daha ince tozları üretmek için 50-150 MPa gibi önemli derecede yüksek su basınçları

kullanılır ve bu tozların kütlesi ortanca parçacık boyutları 1-20 μm arasındadır. Bu tozlar, enjeksiyon kalıplama işlemlerinde, elmas araçlarda bağlayıcılar, sinterlenmiş rulmanlarda, boyalarda, kaplamalarda ve pastalarda (ince tozları) kullanılır.

Toz metal eritme süreci değişkenleri, malzemenin bileşenleri, atmosfer ve erimenin aşırı ısınması gibi unsurları içerir. Atmosfer ve erimenin aşırı ısınması; ilgili atomizasyon aşama değişkenleri ise nozul çapı, metal akış uzunluğu, metal yoğunluğu, erimenin yüzey gerilimi, erimenin viskozitesi, su basıncı, jet geometrisi ve apex açısıdır. Parçacık katılaşma aşamasındaki önemli değişkenler ise erime noktaları, damla boyutu, ısı transferi, sönme ortamı, atomizasyon odasında askıdaki katıların sıcaklığı ve uçuş yoludur (Neikov ve ark, 2009). SA'daki tipik çalışma koşulları aralığı şu şekildedir.

1. Metal akış hızı (tek nozul), 1–90 kg/dk.
- 2 Su akış hızı, 20–380 L/dk.
- 3 Su hızı (nozul çıkışında), 10–500 m/s
- 4 Su basıncı (çıkışta veya manifold içinde), 5–150 MPa
- 5 Metal aşırı ısınma, 75–170 (erime noktasının üzerinde)

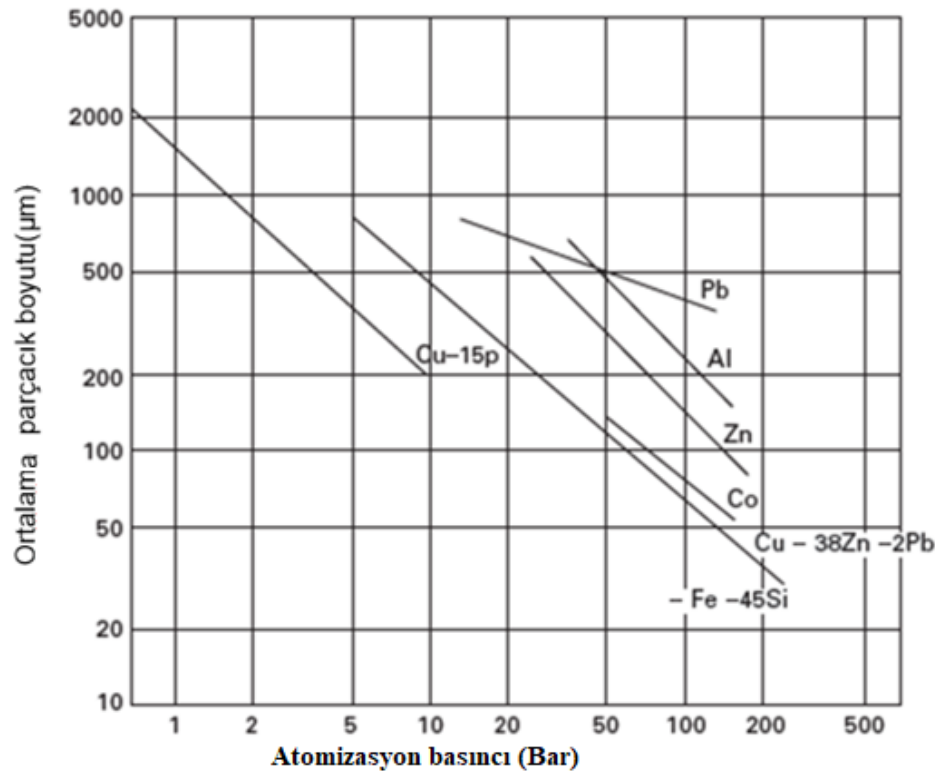


Şekil 1.9. Bir su atomizerinin şematik gösterimi (Asgarian, 2020)

Mükemmel sönme özelliklerine sahip olması nedeniyle, çok iri tozlar veya hatta birkaç milimetre büyüklüğünde saçmalar (küçük metal parçacıkları) üretilebilir. Genellikle 100-200 bar aralığındaki basınçların kullanımı, tipik olarak 50-100 mm aralığında tozları (D_{50}) ortaya çıkarır. Daha yüksek basınçlar, püskürtmenin ses bariyerini aştığı seviyelere kadar (yaklaşık 500 bar, 50 MPa), daha ince tozlara, 30 mm veya daha küçüğüne neden olur. Genellikle basıncın iki katına çıkması, parçacık boyutunu neredeyse yarı yarıya azaltır (Şekil 1.10).

$$D = KP^{-0,8} \quad (1.6)$$

Burada D, median parçacık boyutunu (D_{50}), K, cihaz ve metal ile ilgili bir sabit ve P, atomize su basıncını temsil eder.



Şekil 1.10. Su kullanılarak atomize edilen metal tozların parçacık boyutu ile basınç arasındaki ilişki

Japon yazarların raporlarına göre, 1-2000 bar (100-200 MPa) basınçlar kullanılarak 10 mm kadar ince tozlar üretilmiş ancak detaylar belirsizdir. Bu sürecin verimliliği, birkaç kilogramdan dakikada en az 500 kg'ye kadar (30 ton/saat)

değişmektedir. Bu, parçacık boyutu dağılımında pek az değişiklikle başarılabilmektedir. Bu nedenle, tek bir hattan yılda 250.000 tonun üzerinde devasa çıkışlar oldukça mümkündür ve bakır eritme ara ürünlerini işlemek için yılda 1 milyon ton ve saatte 180 tonluk tasarımlar yapılmıştır (Dunkley, 1998).

SA tozu üzerine yapılan araştırmalar 1960'lara kadar uzanmaktadır. Atomizerlerin işletme parametreleri ve eriyiklerin fiziksel özelliklerinin toz parçacık boyut dağılımı (PSD) üzerindeki etkilerini anlama konusundaki bilgi, geçen yıllarda olgunlaşmıştır. SA'da, yüksek basınçlı bir su akışı, püskürtme uçları aracılığıyla damlacıkların dağılmış bir fazını oluşturmak için zorlanır ve ardından bu damlacıklar metal akışına çarpar. Bu yöntemde, suyu yüksek basınçta sağlamak için büyük miktarlarda enerji gereklidir. Genel olarak SA, düşük ve yüksek alaşımlı çelikler için önemli bir üretim yöntemidir. Oksit oluşumu nedeniyle, SA'nın titanyum gibi yüksek reaktif metallerin ve süper alaşımların atomizasyonunda kullanılması muhtemel değildir. Genel olarak, SA ile üretilen tozlar, pürüzlü oksitlenmiş yüzeylere sahip, düzensiz şekilli olma eğilimindedir. Atomize tozların ve daha spesifik olarak yüksek basınçlı SA'nın avantajları özetlenmiştir (Upadhyaya, 1997). Bu avantajlar:

- Alaşım yapma özgürlüğü
- Tüm parçacıkların aynı homojen bileşime sahip olması
- Partikül şekli, boyutu ve yapısının kontrolü
- Daha yüksek saflık
- Düşük sermaye maliyeti

İnce parçacık boyutları ise şu faktörlere bağlıdır:

- Düşük metal viskozitesi
- Düşük metal yüzey gerilimi
- Aşırı ısınmış metal
- Küçük nozzle çapı, yani düşük metal besleme hızı
- Yüksek atomize basınç
- Yüksek atomize edici hacim
- Yüksek atomize edici hız

- Yüksek atomize edici viskozite
- Kısa metal akışı (F)
- Kısa jet uzunluğu (E)
- Optimum apex açısı (α)

1.5.3.3. Sıvı gaz atomizasyonu

Sıvı gaz atomizasyonu, Krupp Şirketi (Almanya), erimiş metalin $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kriyojenik sıvı gaz (argon veya azot) ile atomize edildiği yeni bir atomizasyon versiyonunu tanıtmıştır. Süreç sırasında, sıvı gazın basıncı 300 bar'a kadar artırılırken, bir soğutma ünitesi sıkıştırmaya rağmen sıcaklığın yükselmesini önler ve kriyojenik sıvının jet açıklığında anında buharlaşmasını engeller. Homojen bir akış oluşturulur ve bu da erimiş SA ile karşılaştırılabilir şekilde atomize eder ve hızlı bir şekilde soğur. Atomizasyon sıvısı tamamen buharlaştığı için gaz ve toz, siklon içinde kolayca ayrılabilir.

1.5.3.4. Santrifüj atomizasyonu

Santrifüj atomizasyon işlemi, genellikle ince tanecikler (spreyler), damlacıklar ve malzeme tozları üretmek için kullanılan bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu işlem sırasında malzeme eriği dönen diskin üzerine dökülür ve diskin kenarında bağlar (ligamentler) veya damlacıklar halinde parçalanır. Bu yöntemle farklı boyutlarda malzeme tozu elde etmek mümkündür ve bu da santrifüj atomizasyonun metal ve metal alaşımlarının ince tozlarının üretiminde önemli bir rol oynamasına neden olmaktadır. Ayrıca, diğer atomizasyon tekniklerine kıyasla daha yüksek üretim hızında hemen hemen aynı boyutta ve küresel şekilli tozlar üretebilme yeteneğine sahiptir (Xie ve ark., 2004; Sungkhaphaitoon ve ark., 2012).

Hidrodinamik kararsızlık genellikle levha, ligament ve doğrudan damla oluşumu olmak üzere üç farklı modda sınıflandırılır. Bu atomizasyon sürecinde, kesme ve merkezkaç kuvvetlerinin neden olduğu hidrodinamik kararsızlık, metal sıvısının ayrışmasına yol açar.

Levha modunda, disk yüzeyinde bir sıvı levha oluşur ve ardından ligamentlere ve damlacıklara ayrılır. Ligament modunda, sıvı ligamentler diskin kenarından dışarı çekilerek damlacıklara bölünür. Doğrudan damla modunda ise, damlacıklar doğrudan diskin kenarında oluşur. Sıvı disk üzerine yayıldığında, sıvının serbest yüzeyinde bir dalga deseni oluşur. Bu dalga deseni, akışkan tedirginliği nedeniyle dönme eksenine uzaklığındaki uzak mesafelerde azalır ve disk kenarında ince bir akışkan tabakası oluşturur. Bu ince tabaka, Rayleigh–Taylor belirsizlikleri nedeniyle bölünüp, ilk parçalama olarak bilinen ligamentlere dönüşür (Squire, 1953). Daha sonra, ligamentlerden damlacıklara geçiş başlar. Bu geçiş, yüzey geriliminden kaynaklı olduğu belirlenmiş ve bunun teorik olarak Rayleigh–Plateau belirsizliği ile formüle edilmiştir (Squire, 1953; Dombrowski ve Johns, 1963).

Genel olarak, taneciklerin bir şekilden diğer bir şekile dönüşmesi, atomizasyon mekanizmasını etkileyen parametrelerdeki değişimlerden kaynaklanır. Bu parametreler arasında akış debisi, diskin dönme hızı (Kamiya, 1972; Frost, 1981; Ahmed ve Youssef, 2014), damlaların parçalanma modu ve geçiş davranışları bulunmaktadır. Damla ve levha şekillerinin kararsız olduğunu, buna karşın ligament modunun atomizasyonun durumunun kararlı şekilleri olduğunu tespit etmişlerdir. Damlacık boyutu, sıvının fiziksel özellikleri, sıvının debisi ve disk dönme hızı ile belirlenir. Damlacıkla ilgili benzer bir çalışma (Plookphol ve ark, 2011; Ahmed ve Youssef, 2012) tarafından yapılmış ve damlacık boyutunun, disk çapının artmasıyla azaldığını gözlemlemiştir. Ayrıca, akış debisinin artmasıyla damla boyutunun arttığı bulunmuştur. Ancak, Parçacık Görüntüleme Hız Ölçüm Tekniği (PIV) deneyleri ve faz Doppler verileri doğrultusunda, yüksek kütle debilerinde, ince damlacıkların, disk üzerinde büyük halka şeklinde filmlerin oluşmaması durumuna bağlı olarak üretilebileceği gösterilmiştir (Kuhnhehn ve ark, 2018).

Damlacık boyutunun daha da azaltılması için, tasarlanan üç farklı disk ile (düz, kanatlı, tekerlek) test edilerek tekerlek diskinin daha ince damlacıkları üretmek için en etkili olduğu gözlemlenmiştir (Mizuochi ve Akiyama, 2003). Yüksek görüntüleme tekniğini kullanarak, diş şeklini göz önüne alınmadan, bir diskin kenarına takılan dişlerin ve dişlerin boyutunun damlacık boyutunu kontrol etmede önemli bir etkisi

olduğunu bulmuştur (Senuma ve Hilborn, 2002). Son zamanlarda, gelişmiş görüntüleme tekniğiyle düz disk, kanatlı disk, yay kenarlı disk ve bulged-block disk adlı disklerin yüzeyindeki akış modeli incelenmiş ve (Peng ve ark., 2018) açışal hızın artmasıyla ligament çapının azaldığı ve daha ince damlacık üretimi için diğer desenlere göre en iyi sonucun, yay kenarlı disk ile elde edildiğini bulmuştur.

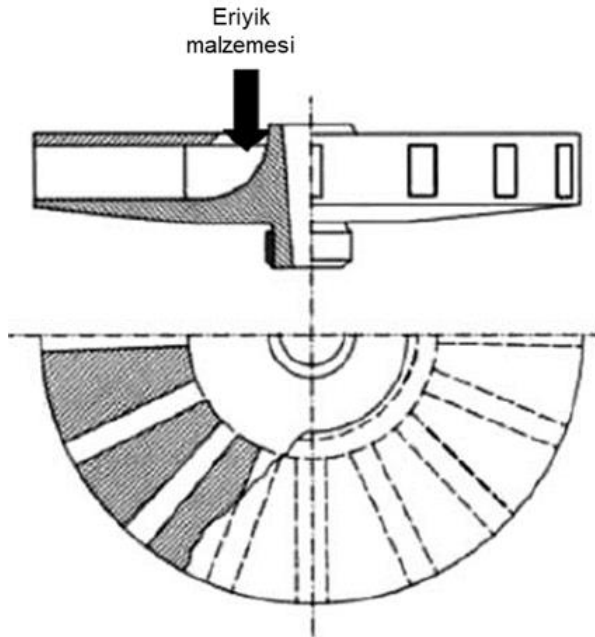
Buna ek olarak, damlacık boyutunu incelemek için, atomizasyon işletme parametreleri ve sıvının fiziksel özellikleri, disk çapı, disk dönme hızı, sıvının hacimsel debinin etkileri, hem deneysel ve hem de teorik çalışmalara dayanan korelasyonlar geliştirilmiştir (Hewitt, 1993; Teske ve ark., 2005). Dönen disk üzerindeki doğrudan damla, ligament ve levha modlarının geçişlerini tahmin etmek için Reynolds (Re), Ohnesorge (Oh) ve Weber (We) gibi bilinen bazı boyutsuz sayıları önermiştir (Frost, 1981). Sıvı film kalınlığını boyutsuz sayılarla, Reynolds (Re), Ohnesorge (Oh) ve Weber (We) ilişkilendirmek için bir korelasyon önerilmiştir (Mantripragada ve Sarkar, 2017). Korelasyonlar, farklı geçiş modlarını tahmin ederek granül boyutlarını ısı fırının cürufuna benzer, reçine ve parafin balmumu karışımı kullanarak geliştirilmiştir (Dhirhi ve ark., 2016).

Damlacık şekli ile ilgili olarak, en çok deneysel çalışma dönen-kup atomizasyon yöntemi üzerinde yapılmıştır (Dombrowski ve Lloyd, 1974; Champagne ve Angers, 1984; Liu ve ark., 2012, 2014). Literatürde bulunan ilgili korelasyonlar Tablo 1'de özetlenmiştir. Burada Q akış hızını, ρ yoğunluğu, ω dönme hızını, μ viskoziteyi, We Weber sayısını ve Oh Ohnesorge sayısını temsil eder. Benzer korelasyonlar daha önce Ahmed ve Youssef (2012) tarafından özetlenmiştir.

Dolayısıyla, damla oluşumunun geçiş özellikleri hala tam olarak anlaşılamamıştır ve mevcut korelasyonlar araştırmacıdan araştırmacıya farklılık gösterir ve genellikle tutarsızdır. Bu durum muhtemelen farklı işletme koşullarından, disk konfigürasyonlarından ve damla boyutunun kesin olarak ölçülmesindeki zorluklardan kaynaklanmaktadır.

Ayrıca, özellikle damla boyutundaki azalmaya odaklanarak, disk üzerindeki kanatın boyutunun damla boyutu üzerindeki etkisi sistemli bir şekilde araştırılamamıştır. Bu nedenle, yüksek hızlı görüntüleme teknikleri kullanılarak farklı geçiş modlarını yakalamak için deneyler gerçekleştirilmiştir. Farklı işletme koşulları için kanatlı diskin çözülme modu ve damla boyutu analiz edilmiştir. Ayrıca, kanatlı diskin daha ince damla oluşturma etkinliği, çeşitli Re ve We değerleri için araştırılmış ve damlanın ortalama çapıyla ilişkilendirilmiştir. Bu bağlantı, düz disk durumu ve farklı kanatlara sahip diskler için damla boyutunu tahmin etmek için geliştirilmiştir. Sıvı çözülme modunun geçişi, düz disk ve kanatlı disk için elde edilmiştir.

Eriyik malzemesi atomizasyonunda kullanılan cihazlar genellikle disk şeklinde olup yatay olarak monte edilen cihazlardır (Şekil 1.11). Disk, bağımsız bir elektrik motoru tarafından doğrudan veya çeşitli güç aktarma cihazları aracılığıyla hareket ettirilir. Diskin merkezine dökülen atomize olacak eriyik malzemesi, santrifüj kuvveti nedeniyle hemen diskin kenarına ve diskin sınırları dışına savrulur. Bu durum geniş bir damlacık ve parçacıklardan oluşan bir sis perdesi meydana getirir. Eriyik damlacıkların dağılma ve savrulma özelliklerini kontrol etmek için birçok disk atomizerin üzerinde oluklar veya kanallar açılmıştır.



Şekil 1.11. Disk atomizörü (Cal ve Sollohub, 2010)

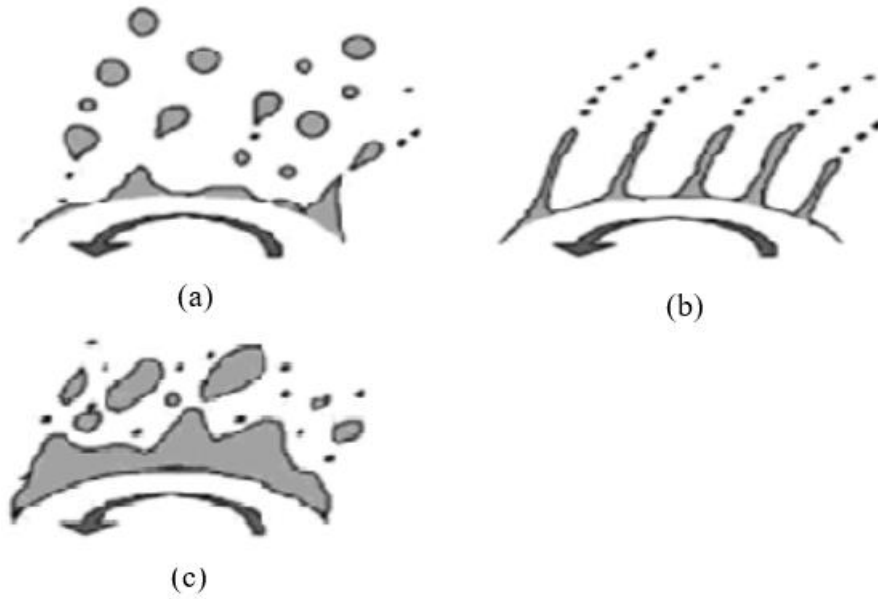
Atomizasyon diskin üzerindeki oluklar, kuru parçacık parametrelere bağlı olarak seçilir. Sıkıştırılmamış yoğunluğa sahip toz elde etmek için diskin üzerinde kavisli oluklar önerilirken (Mujumdar, 2006), buna karşın, iyi bir akışkanlık elde etmek için yani malzeme tozu kolay işlemesi için düz oluklu ve oluksuz disk tercih edilmektedir (Baker, 1997). Bir oluğun şekli ayrıca mevcut eriyik malzemesinin aşındırıcı özelliklerine bağlıdır (Masters, 2002).

Bilinen bir gerçek, aşındırıcı malzemelerle kullanılan döner atomizör cihazların kısa bir hizmet ömrüne sahip olduğu ve düzenli aralıklarla boşaltılması veya temizlenmesi gerektiğidir. Bu nedenle, birçok modifikasyon çabası bulunmaktadır (Heide ve Sonderby, 1994). Döner atomizörler, püskürtme kurutma teknolojisinde kullanılan en etkili atomizasyon yöntemidir. Ancak disk atomizerlerinin daha fazla disk cidarlarına yapışan tanecikler tespit edilmiştir. Yani, yapılan değişikliklerin maliyeti artırarak veya performansı düşürerek farmasötik ürünlerin (ilaç sektörü) üretiminde bu cihazların uygunluğu azalttığı anlaşılmaktadır (Huang ve 2006).

Düz Disk Atomizasyonu, düz pürüzsüz bir disk için, elde edilebilecek atomizasyon derecesi, pürüzsüz yüzey üzerinde kenara doğru besleme ivmesinin büyüklüğüne bağlı olacaktır. Nihai sıvı salma hızı, sıvı ile dönen yüzey arasındaki kaymaya bağlıdır. Kaymanın boyutu, besleme hızına ve sıvının fiziksel özelliklerine, yani viskoz sürtünmeye ve sıvının yüzeyi ıslatma yeteneğine bağlıdır. Sıvının dönen bir diskten damlacıklara parçalanması tarafından yönetilir (Masters, 1972).

Düşük disk çevre hızlarında, sıvı metal viskozitesi ve yüzey gerilimi baskın faktörlerdir. Disk hızı ne kadar yüksek olursa, damlacık oluşum mekanizmasına o kadar fazla atalet ve hava sürtünmesi katkıda bulunur. Sıvı metalin disk yüzeyi üzerinde kayması nedeniyle, sıvı metalin atalet değeri hiçbir zaman yüksek olmaz ve salınım hızları düşük olduğu için hava sürtünme etkileri de en aza indirilir. Yalnızca kanatsız disklerin ticari atomizer tasarımlarında atalet ve hava sürtünmesi, yüksek ilerleme hızlarında ve yüksek sıvı metal salım hızlarında baskın bir rol oynar.

Devam eden disk hızı artışı ve daha yüksek besleme hızları ile doğrudan damlacık mekanizması, bağ kopması mekanizmasına dönüşür. Doğrudan damlacık oluşumuna yol açan sıvının nokta konsantrasyonları, daha fazla sıvı içerir ve bağlar disk kenarından dışarı doğru uzanır. Bağlar, Şekil 1.12 b'de gösterildiği gibi, büyük ve küçük damlacıklarının spreylерinde tekrar parçalanır. Daha büyük ana damlacıklar, daha yüksek besleme viskoziteleri ve yüzey gerilimlerinden oluşur. Besleme viskozitesindeki artışlar, spreydeki küçük damlacıklarının oranını artırır. Yüzey gerilimi değerinden bağımsız olarak küresel damlacıklar oluşur. Şekil 1.12 a ve b'de gösterilen mekanizmalar, beslenen sıvı metalin fiziksel özellikleri tarafından kontrol edilir. Sıvı metal özelliklerinin baskınlığı ile atalet kuvvetleri arasındaki geçiş, sıvı metal bağlar disk kenarının ötesine uzanan bir sıvı metal levha oluşturmak üzere birleştiğinde gerçekleşir (Şekil 1.12 c).



Şekil 1.12. Atomizasyon mekanizmaları, a) Doğrudan damlacık oluşumu b) Ligament oluşumu, c) Sıvı levha Oluşumu (Champagne ve Angers, 1984)

Mekanizma, oldukça viskoz sıvılarla vurgulanır. Yaprak, geniş damlacık boyutu dağılımına sahip bir sprej vererek parçalanır. Sabit bir ilerleme hızında disk hızının daha da artmasıyla, sıvı metal levha disk kenarına doğru geri çekilir. İlerleme hızı disk hızıyla artırılırsa püskürtme hızı devam eder. Disk üzerindeki kayma en aza indirilir veya önlenirse, disk kenarından sıvı metal salma hızı, sıvı metal-hava arayüzündeki hava sürtünme etkilerinin kontrol edici atomizasyon mekanizması haline gelmesini sağlayacak kadar yüksek olur. Geri çekilen tabakanın parçalanma modu, tamamen homojen sprejlerin oluşumunu uzak bir ihtimal gibi gösterir. Yüksek viskozite ve yüzey gerilimi kullanımı, sabit besleme hızında disk çevresel hızının artması gibi geniş dağılımı azaltır. Dar bir dağılım elde etmek için, düşük disk yüklemelerinde yüksek hızlar gereklidir (Bauer ve Kruger, 1969; Philipson, 1973). Kanatsız disklerden atomizasyon mekanizmalarına ilişkin mevcut bilgiler ve disk üzerinden akış ve sıvı metalin disk kenarından salınmasına ilişkin teoriler tartışılmaktadır. İlgili mekanizmaların fotografik kanıtı, atomizasyon sürecinin görsel olarak takdir edilmesine yardımcı olmuştur. Damlacıklar disk kenarıyla temastan çıktıktan ve havayla taşındıktan sonra, disk yüzeyi üzerinde sıvı akışı sırasında sıvı içinde oluşan kayma gerilmelerinin yeniden ayarlanması nedeniyle daha fazla parçalanma gerçekleşebilir. Bu mekanizma ile damlacık parçalanmasının, damlacıklar havadayken damlacık bozulmasına da neden olan hava sürtünme etkisiyle parçalanmadan ayırt

edilmesi zordur. Santrifüj atomizasyonunda, hava sürtünme etkileri ana mekanizma olarak kabul edilir, ancak düşük vakumda atomizasyon, akış türbülanslı olduğunda sıvı meydana gelen kayma gerilimi yeniden ayarlama mekanizmasını göstermiştir.

Sıvı atomizasyonunun mekanizması, düz kanatsız disklerde yaygın olarak rapor edilmiştir. Sıvı ile yüzey arasındaki kaymaya bağlı olan sıvı salma hızına bağlı atomizasyon derecesi, (Denklem 1.7) bağıntısı ile ciddi kayma oluşumunu tanımlar (Fraser ve ark., 1957). Sıvı atomizasyonunun mekanizması, düz kanatsız disklerde yaygın olarak rapor edilmiştir. Sıvı ile yüzey arasındaki kaymaya ve sıvı salma hızına bağlı olan atomizasyon derecesi ile olduğu bağıntı ciddi kayma oluşumunu tanımlar.

$$\frac{M}{\pi \mu d} \geq 1440 \quad (1.7)$$

Burada;

M= kütle besleme hızı, lb/hr

μ = sıvı viskozitesi, cp

d= disk çapı, ft

Bir diskte oldukça yüksek ilerleme hızları elde edilebilir. Atomizasyonun düz diskleri zayıf olacaktır. Bu da hava sıvı sürtünme etkileri gibi sıvı tarafından parçalanmasını çok daha etkili hale getiren ek faktörleri gösterir. (Fraser ve ark,1957). Disk kenarındaki sıvı parçalanmasının neden olduğu ideal bir disk yüzeyi üzerindeki akış koşullarını ifade etmek için fonksiyonlar önerilmiştir. Ligament veya sıvı metal levha parçalanması, iki parçalanma mekanizması arasındaki geçiş, iki boyutsuz A^1 ve B^1 parametresinin bir fonksiyonu olarak ifade edilir.

$$A^1 = Nd \left(\frac{\rho d}{\sigma} \right)^{1/2} \quad (1.8)$$

$$B^1 = \frac{Q}{d} \left(\frac{\rho}{\sigma d} \right)^{1/2} \left(\frac{\mu}{(\rho \sigma d)^{1/2}} \right)^{1/6} \quad (1.9)$$

Burada;

Q: sıvı besleme hızı, $L^3 T^{-1}$

d: dönen disk çapı, L

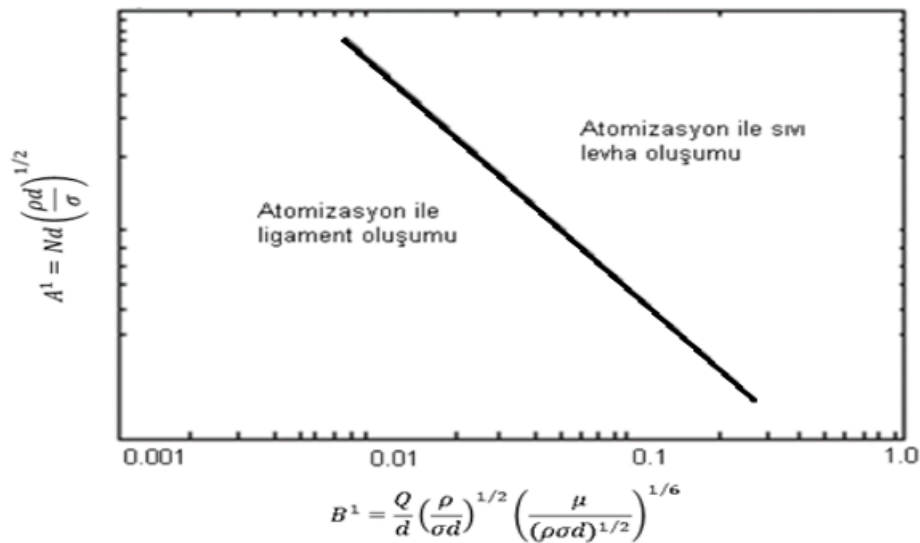
ρ ; sıvı yoğunluğu, ML^{-3}

σ : sıvı yüzey gerilimi, MT^{-2}

μ : sıvı dinamik viskozite, $\text{ML}^{-1} \text{T}^{-1}$

N: dönen atomize açısal hızı, T^{-1}

Parametreler, ortaya çıkan sıvı parçalanma koşulları üzerinde viskozite ve yüzey geriliminin oynadığı rolleri gösterir. Geçiş, Şekil 1.13'te bir ayırma çizgisiyle temsil edilmiştir.



Şekil.1.13 Dönen diskler için atomizasyon mekanizması (Fraser ve ark.,1957)

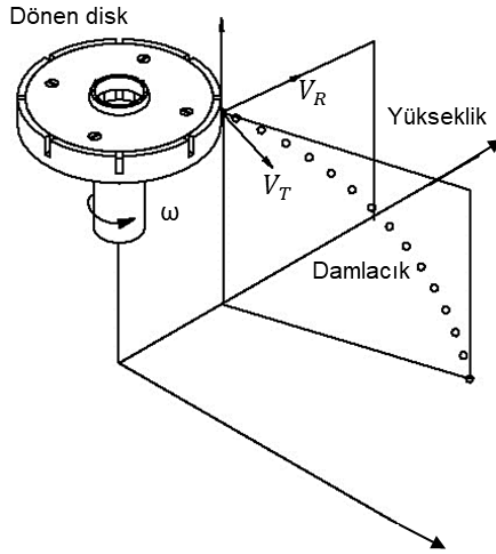
Çizelge 1.4. Düz diskler için damlacık boyutu tahmini

Atomizasyon mekanizması	Denklem	Araştırmacı	Denklem no
Doğrudan damlacık oluşumu	$D_{ort} = 7.6 \left(\frac{\sigma g}{F_R \rho} \right)^{1/2} \cdot 10^4$	Hege	(1.10)
	$D_{max} = \frac{64}{N} \left(\frac{\sigma}{d\rho} \right)^{1/2} \cdot 10^4$	Bar	(1.11)
Ligament oluşumu	$C_k=0.5-1$ $D_{ort} = 3 \left(\frac{\sigma g}{F_R \rho} \right)^{1/2} \left(\frac{C_k}{\vartheta} \right)^{1/12} \cdot 10^4$	Hege	(1.12)
	$D_{ort} = \frac{52.2}{N} \left(\frac{\sigma}{d\rho} \right)^{1/2} \cdot 10^4$	Walton ve Prewett	(4.7)
	$D_{smd} = \frac{2.67Q^{0.2}}{Nd^{0.3}}$	Oyama, Endou	(1.13)
Sıvı metal levha parçalanması	$D_{ort} = \frac{45.5}{N} \left(\frac{\sigma}{d\rho} \right)^{1/2} \cdot 10^4$	Fraser	(1.14)

Pürüzsüz düz kanatsız disklerden damlacık boyutunu tahmin etmek için altı denklem Tablo 1.4'de verilmiştir. D mikron, N devir/dak, d cm, σ din/cm, ρ g/cm³ ve Q cm³/sn'dir. Bu alandaki diğer denklemler (Lapple ve ark. 1967; Dombrowski ve Munday, 1968) tarafından verilmiştir. Hepsi, düşük viskoziteli sıvıların düşük besleme oranlarını içeren en basit sistemlere uygulanabilir. Yüzey gerilimi ve sıvı yoğunluğu olarak görünür. Sadece viskozite birinci derecede önemli olduğu için yanıltıcı olan sıvı etki özellikleri Denklem (1.11)'te gösterilmiştir. Burada düşük viskoziteli sıvılar için deneysel ve önceden belirlenmiş sonuçlar arasında yakın bir uyum olduğunu ancak yüksek viskoziteli sıvılar için olmadığını iddia etmiştir. Damlacık boyutu, bu basit sistemler için disk hızının birinci kuvvetiyle ters orantısal görünmektedir. Spreyler yüksek derecede homojendir (Masters, 1972). Bağımlı küçük damlacıklarının varlığı açık olmasına rağmen, deney koşulları tekdüze spreylere üretmiştir. (Bar, 1935) denklemindeki D_{max} değeri, ana damlacığa karşılık gelir. (Fraser ve ark, 1957; Walton ve Prewett, 1949; Hege, 1964) spreynin ortalama çapını verir. (Oyama ve Endou, 1953) Sauter ortalama çapını kullanır.

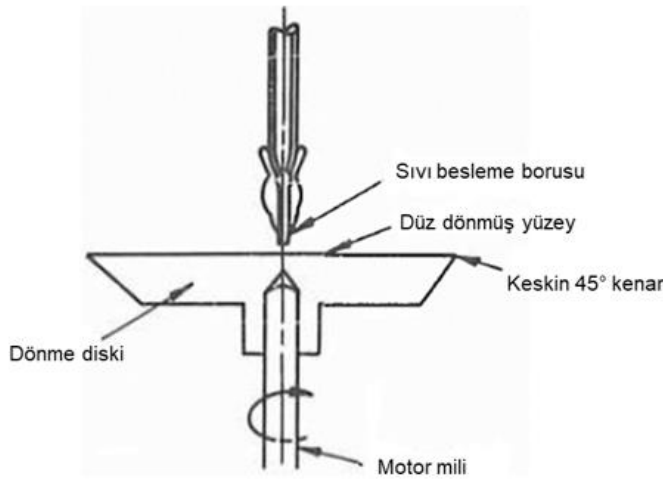
Kanatlı diskler için geçerli olan atomizasyon mekanizması, düz kanatsız disklerle benzer mekanizma (Marshall, 1954; Kurabayası, 1960) tarafından fotoğraflanarak gösterilmiştir. Düşük hızlarda ve besleme hızlarında, doğrudan damlacık oluşumu sağlamak için viskoz ve yüzey gerilimi kuvvetleri baskındır. Orta hızlar için, kanat kenarından dışarı uzanan sıvı bağların parçalanması merkezkaç ve daha az ölçüde yerçekimi kuvvetleri tarafından yapılır. Ticari koşullar aralığında (yüksek disk çevre hızlarında yüksek sıvı akışları), sıvı kanattan ince bir film olarak çıkarken, hava ve sıvı yüzeyi arasındaki sürtünme etkileri ile tekerlek kenarında sıvı ayrışması meydana gelir. Küçük damlacık boyutlarında spreylere üretilebilse de, mekanizma homojen spreynin oluşumunun oluşmasına uygun değildir. Sıvının viskozitesinin ve yüzey geriliminin artırılması, düşük ortalama damlacık boyutunun maliyetini, spreynin homojenliğini arttıracak şekilde hareket edecektir. Belirli bir besleme hızı için optimum damlacık boyutu homojenliği elde etmek için titreşimsiz disk dönüşü, yerçekimi kuvvetlerine kıyasla büyük merkezkaç kuvvetleri, pürüzsüz kanat yüzeyleri, üniforma sıvı besleme oranları, kanat yüzeyinin tamamen ıslanması ve kanatlı diske beslemenin eşit dağılımı olarak altı koşulu sağlanmaktadır.

Bir diskle beslenen sıvı, dönen kanat tarafından tutulana kadar yüzey boyunca hareket eder. Sıvı, merkezkaç kuvvetinin etkisi altında dışarı doğru akar ve kanat yüzeyini ince bir film olarak ıslatarak kanat üzerine yayılır. Çok düşük sıvı kanadı yüklemelerinde, ince film akışlara bölünebilir. Kanatlı disk atomizerin kenarından sıvı akışı ve hızları Şekil 1.14'te gösterilmiştir.



Şekil 1.14 Kanatlı disk atomizerin kenarından sıvı akışı ve hızları

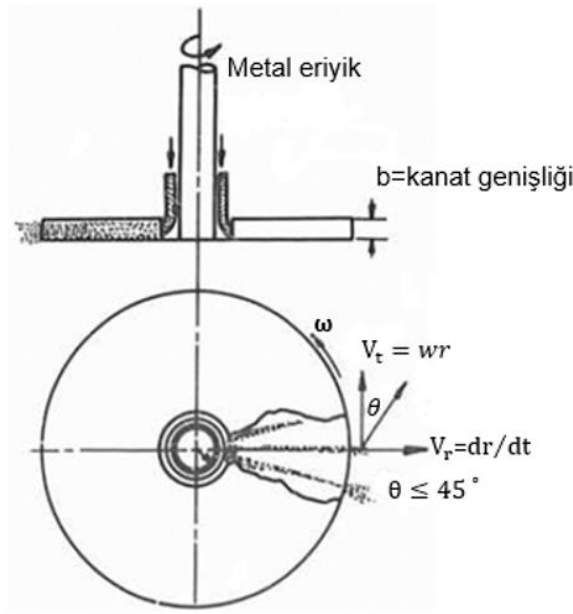
Walton ve Prewett (1949), döner diskler aracılığıyla sprey üretimi üzerine detaylı bir çalışma yapmışlardır. Bu yöntem, diğer atomizasyon yöntemlerden oldukça farklıdır. Çünkü neredeyse aynı boyutlarda sahip damlacıkları üretme yeteneğine sahiptir. Diğer atomizasyon yöntemleri, "damla ölçer" ve dar jetlerden düşük hızlı enjeksiyon istisnaları dışında, pratik önemi olmayan ve düzensiz veya tutarsız malzeme eriğin damlacıklarının parçalanmasına sebep olur. Döner disk atomizerin şekil 1.15'de göstermektedir. Metal eriyik, küçük çaplı bir boru içinden döner diski yüzeyin merkezine dökülür ve ince bir film halinde yüzeyin merkezinden çeperine doğru yayılır. İnce borudan dökülen metal eriği, döner diskin tam merkezine ve düzenli bir şekilde akması gerekir ve diskin yüzeyinin sıvı ile tamamen ıslanmış olduğundan emin olunmalıdır. Aksi takdirde düzensiz bir film, düzensiz bir eriyik dağılım ortaya çıkabilir.



Şekil 1.15. Döner disk atomizörü (Walton ve Prewett, 1949)

May (1949), döner disk atomizasyon yöntemi ile sıkıştırılmış hava ile çalışan yüksek hızda dönen topaç başlı bir disk kullanarak yüksek yüzey gerilimi nedeniyle su, yağlardan daha zor püskürtülebilir tespiti ile döner disk yüzeyinden tüm yağın temizlenmesi gerekmekte ve döner diskin yüzeyinin 'parkerize' edilmesi önerilmektedir. Döner diskin üzerinde iyi bir malzeme dağılımının sağlanması için, ıslak malzemelerin kullanımı yardımcı olunabilir. Döner diskin etrafında bir emme alanı uygulayarak ince damlacıkları diskin yüzeyinde tutulabilir, ancak çapraz hava akışı iri damlacıkları diskin yüzeyinden sürüklenmesi ile 6 mikrona kadar küçük homojen, yağ buhar damlacıkları üretmesini sağlamıştır. Döner disk yüzeyini kolayca ıslatan maddeler, ince sıvılar, yağlar veya organik çözücüler gibi püskürtürken, tüm damlacıkların %90'ı genişlikteki ortalama büyüklüğün %5'i içinde düşerken ve gözlemlenen en küçük damlacık, ortalama damlacıktan sadece %6 daha küçüktür.

Marshall ve Seltzer (1950), sıvıların atomize edilmesi için çeşitli döner disk yöntemlerinin kullanılabileceğini belirtmiştir. Bu yöntemler arasında, döner düz disk yöntemi ve kanatlı döner disk yöntemi bulunmaktadır. Döner düz disk yöntemi, en basit döner disk yöntemlerinden biri olmasına rağmen, ikinci yöntem olan kanatlı döner disk yöntemi, sıvının diskin yüzeyinde kaymasını önlediği için tercih edilmektedir. Marshall ve Seltzer, Delaware Üniversitesi'nden R. L. Pigford ile işbirliği yaparak, sıvının disk yüzeyine ulaşması için geçen zamanı ifade eden denklemleri hem düz diskler hem de kanatlı diskler için geliştirmişlerdir. Sıvının disk yüzeyindeki kanatlara karşı nasıl hareket ettiğini Şekil 1.16'da gösterilmiştir.



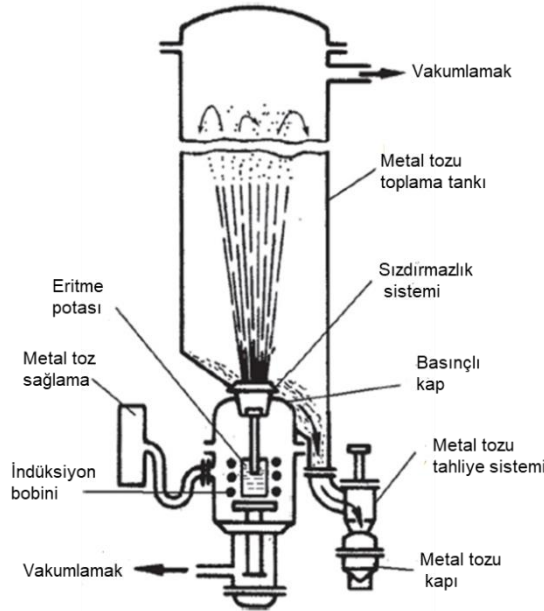
Şekil 1.16. Kanatlı diskin üzerindeki metal eriğin akışı

Su jeti parametrelerinin toz şekli üzerindeki etkisine ilişkin çok az sayıda sistematik ve nicel çalışma yayınlanmıştır. Birkaç kişiden biri, şekli içeren faktörler üzerinde keşif çalışması yapan (Grandzol, 1973)dir. Bu ve diğer numunelerde iki farklı şekil tipinin (düz ve küresel, pürüzlü ve düzensiz) ortaya çıktığı, dolayısıyla bu şekillerin daha önce kullanılan küresellik veya boy-çap oranı gibi şekil karakterizasyon parametrelerine uygun olmadığı kaydedilmiştir. Şeklin pürüzsüz ve küresel olanların aksine pürüzlü ve düzensiz olan parçacıkların fraksiyonu (F_i) ile tanımlanmıştır. Pürüzlü yüzey, belki de parçacıkların birleşmesinden kaynaklanan bazı düzensizlikler ile hızlı bir söndürmenin göstergesidir.

1.5.3.5. Vakum atomizasyonu

Vakum veya çözünür gaz atomizasyonu, bir ticari parti işlemidir ve bu işlem, basınç altında gazla doyurulmuş erimiş metalin aniden bir vakuma maruz bırakılması prensibine dayanır. Bu durumda gaz genişler, çözültiden çıkar ve sıvı metali atomize eder. Nikel, bakır, kobalt, demir ve alüminyum gibi alaşım tozları, hidrojen ile vakum atomizasyonu ile üretilebilir. Tozlar, diğer işlemlerle üretilen tozlara kıyasla küresel, temiz ve yüksek saflıktadır. Süreç, homojen metal, Inc.(U.S.A Patent 3 510 546), tarafından geliştirilmiş ve patentlenmiştir. Vakum atomizasyon işlemi için

kullanılan ekipmanın şematik bir gösterimi Şekil 1.17’de gösterilmiştir. Vakum atomizasyonu ile üretilen tozların başlıca kullanımı, enjeksiyon kalıplama ile gaz türbini diskleri ve karmaşık parçaların üretimidir (Fox,1984).



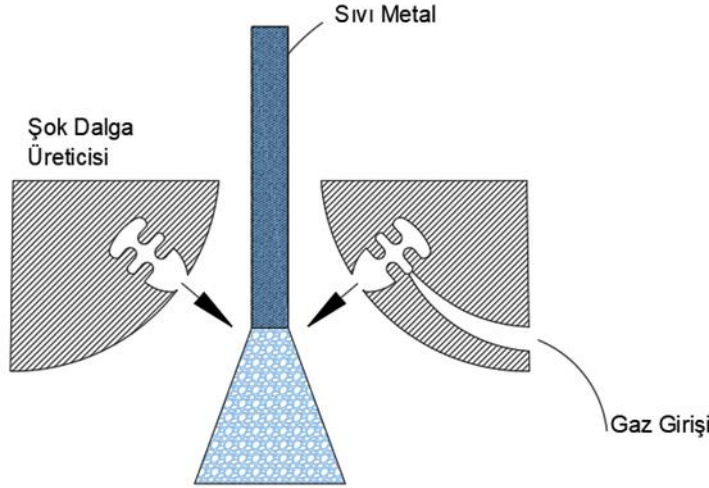
Şekil 1.17. Vakumlu gaz atomizasyon sistemi

1.5.3.6. Ultrasonik atomizasyon

Sıvıların ultrasonik atomizasyonu uzun zamandır bilinmektedir ve daha yakın zamanlarda, diğerlerinin yanı sıra, 1000 °C'ye kadar erime noktalarına sahip metallerin lehimleri ve lehimleme pastaları için yüksek kaliteli tozların üretimi için kullanılmıştır (Sheikhaliev ve Popel, 1983). Bununla birlikte, geniş ölçekli bir endüstride ultrasonik atomizasyonun benimsenmesi, şimdiye kadar verimliliğini belirleyen sürecin temel parametrelerine ilişkin yeterli bilginin olmaması nedeniyle engellenmiştir.

Ultrasonik atomizasyon, gazlı bir ortamda konveksiyonla hızla soğutulan ultra ince atomize erimiş damlacıkların üretimini içerir. Bir sıvı akışı, çok sayıda yüksek hızlı gaz darbesiyle çarparak parçalanır veya atomize edilir. Gaz, 60 ila 120 kHz arasında değişen frekanslarda Mach 2'ye kadar hızlarda bir şok dalgası tüpü tarafından hızlandırılır. Darbeli dalgalarda son derece yüksek hızlarda hareket eden gaz parçacıkları metalik akıma çarpar (Şekil 1.18). Darbe anında, gaz darbeleri sıvı metal

akışını genellikle 30 μm 'den daha küçük olan ince damlacıklara ayırır. İnce Sıvı damlacıkları, yüksek soğutma hızlarında konvektif olarak katılaşır. Ultrasonik atomizasyon, alüminyum alaşımları gibi düşük erime noktalı alaşımların üretimi için ticari olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte, yüksek erime sıcaklığı alaşımlar (paslanmaz çelikler ve nikel ve kobalt bazlı alaşımlar) için yalnızca laboratuvar ve pilot ölçekli işlemler rapor edilmiştir.



Şekil 1.18. Ultrasonik gaz atomizasyonunun şeması

1.5.4. Mekanik yöntemler

Bu işlemler, metal tozlarının üretimi için birincil yöntemler olarak pek fazla kullanılmamaktadır. Mekanik öğütme, etki, aşınma, kesme ve sıkıştırma gibi yöntemlerle mümkündür. Metal tozlarının mekanik yöntemlerle oluşturulması, bu dört temel mekanizmanın çeşitli kombinasyonlarına dayanır. Yaygın bir yöntem, sert aşınmaya dayanıklı bilyeler içeren dönen bir tamburdan oluşan bir bilye değirmeninin kullanılmasıdır. Kritik faktör tamburun dönme hızıdır. Çok yüksek bir hız, malzemenin ve topun santrifüj kuvvetlerden dolayı tamburun duvarlarına bastırılmasına neden olacak ve malzeme ile toplar arasındaki göreceli hareketi önleyecektir. Çok düşük bir hız, tamburun alt kısmında önemsiz bir hareket miktarına neden olacaktır. Optimum hız, bir miktar top ve malzemenin tamburun üstüne kaldırılıp geri kalan malzeme üzerine düşmesine karşılık gelir.

Başka bir değirmen türü, öğütülmek istenen malzemelerin parçacıklarının karşılıklı temas veya çarpışma ile kırıldığı bir vortex değirmenidir. Bu tür değirmenler, değirmen muhafazası içindeki iki veya daha fazla çok hızlı dönen pervane ve istenen boyutta parçacıkları uzaklaştıran gaz akış sistemlerinden oluşur. Toz üretimi için mekanik yöntemin bir dezavantajı, bilyelerden ve değirmen duvarlarından potansiyel kontaminasyon olasılığıdır. Lamel metal tozları, başka bir yöntemle üretilen eşeksiz partiküllerin düzleştirilmesiyle elde edilir. Bu yöntemler bilye, çekiç veya makara değirmenlerini içerebilir. Orijinal partikülleri öğütürken, kaynaşmayı veya birbirine yapışmayı önlemek için onlara gres katılır. Alüminyum, bakır, bronz, gümüş, altın, demir ve paslanmaz çelik lamel tozları, endüstriyel olarak öğütme yöntemiyle üretilmektedir (Upadhyaya, 1997).

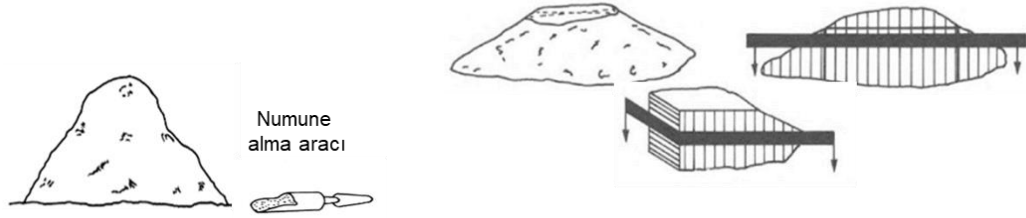
1.6. Metal Tozlarının Karakterizasyonu ve Testleri

TM işleme tekniğinin başarısı, metal tozlarının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin hem tek tek parçacık olarak hem de toplu formda, anlaşılması ve değerlendirilmesine büyük ölçüde bağlıdır. Bu toz özellikleri ile işleme sırasındaki davranışları arasındaki ilişkiler çoğunlukla nitel karakterdedir. Bununla birlikte, toz özelliklerinin iyi bir açıklaması toz davranışının anlaşılmasını artırmak, özellik spesifikasyonlarında toleransları belirlemek ve işleme sırasında toz davranışının tekrarlanabilirliğini sağlamak önemlidir. Bir tozun bir kompakt haline getirilmesi ve bu işlemin sonucunda oluşan TM parçalarının özellikleri, parçacık boyutu, parçacık boyut dağılımı, parçacık şekli ve yapısı gibi fiziksel özelliklerden etkilenir (Doğan, 1989).

1.6.1. Metal toz malzemesinden numune alma

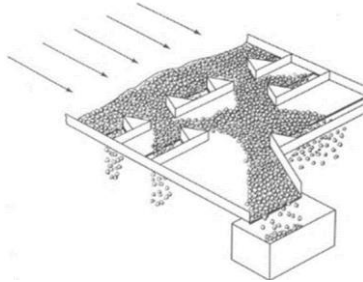
Verilen bir toz lotunun özellikleri, o lotun alınan bir örneği üzerinden belirlenir. Örneklerin özellikleri, lotun özelliklerini temsil etmelidir. Bitmiş toz lotlarını örneklemek için standart yöntemler, ASTM Standart B215 ve MPIF1-61'de bulunabilir. Mekanik olarak karıştırılmış lotlardan örnek alındığında toz karıştırıcıdan çıkarılırken hareket eden akışın tam kesitinden alınmalıdır. 5000 g karıştırıcı yarı dolu olduğunda ilk konteynerin doldurulması sırasında ve son konteynerin doldurulması

sırasında alınmalıdır. Üç örnek karıştırılmalı ve bir numune bölme cihazı ile doğru numune boyutuna bölünmelidir. Konteynerlerden numune alırken, her bir konteynerden bir kepçe alınmalı ve bir elekten geçirilerek bir örnek konteynerine konulmalıdır. Örnek, konteynerin merkezi ile duvarı arasındaki noktadan ortalananmalıdır. Yüzeyin altındaki örnekleri almak için bir örnek alıcı cihazı kullanmak tercih edilir. Elde edilen örnekler karıştırılmalı ve istenen boyuta bölünmelidir. İstenen örnek boyutuna düşürmek için birkaç teknik ve cihaz bulunmaktadır. En yaygın kullanılanlar arasında kepçe ve koni ile bölme teknikleri, şute, ayırma cihazı ve döner riffler bulunmaktadır (Şekil 1.19).

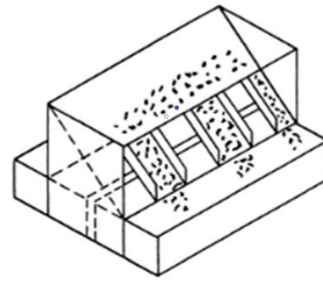


(a) Temiz ve örnek alınan malzeme

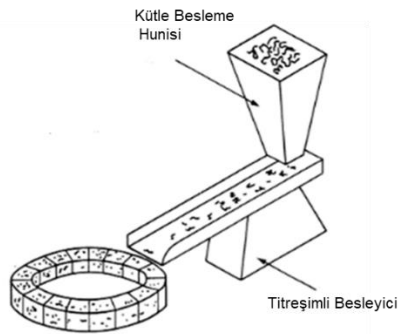
(b) Homojen olmayan malzemelerden numune alma



(c) Numune masası



(d) Şut ayırıcı cihazı



(e) Numune bölme cihazları

Şekil 1.19. Numune bölme işlemi (Allen, 2013)

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Hinze ve Milborn (1950), bir sabit tüp aracılığıyla bir iç kısma sağlanan sıvı, kenarına doğru genişleyen dönen bir kupa diski içinde viskoz bir şekilde ince bir tabaka halinde akar ve ardından tamamen santrifüj etkisi ile savrulmaktadır. Bu tabaka yüzeyindeki akış ve kenarın dışında meydana gelen parçalanma olayları deneysel olarak ve teorik olarak incelenmiştir. Kupa diskin yüzeyinde sıvı tabakasının kalınlığı ve radyal hızı için bir formül türetilmiş ve bu teorik tahminler deneysel sonuçlarla oldukça iyi uyum sağlamıştır. Kenarın etrafında ve dışında üç temel farklı parçalanma türü gerçekleşebilmektedir. Deneysel sonuçlar, ilgili boyutsuz gruplar arasındaki ilişkilerle ifade edilmiştir. Ligament oluşumu durumu için kupanın çalışma koşullarını belirleyen boyutsuz gruplar arasında yarı deneysel bir ilişki türetilmiştir. Ligament oluşumu durumu için yapılan damla boyutu ölçümleri ile film oluşumu durumu için yapılan sonuçlar, kupanın basit dönmesiyle elde edilen atomizasyonun, basınçlı püskürtücülerle genellikle elde edilenden çok daha homojen olduğunu göstermektedir. Bir döner kupa sıvının akışı ilk analiz edilmiştir. Boyutsal analitik yöntemi kullanarak, teorik ve deneysel olarak ligament sayısını ve atomizasyon sırasında ligament oluşumundan levha oluşumuna geçiş koşullarını belirtilmiştir.

Heidmann ve Humphrey (1952), iki su jetinin çarpışmasından kaynaklanan spreyn özelliklerini belirlemek için araştırma yapılmıştır. İki jetin çarpışması sonucunda, iki jetin düzlemine dik olarak kırışık bir sıvı tabakası olduğu gözlenmiştir. Sıvı tabaka aralıklı olarak parçalamaya maruz kalınmaktadır ve yığın bir şekilde damlalar oluşturarak, çarpışma noktasından yayılan dalgalar olarak ortaya çıkmaktadır. Sıvı tabakanın aralıklı parçalanması, dalgalar arasında düzensiz bir boşluk ve değişken dalga yoğunluğu ile gerçekleştirmiştir. Ancak, dalga oluşum frekansı sabit işletme koşulları altında belirli bir zaman aralığında sabit kalmaktadır. Belirli bir dalga yoğunluğu seviyesinde, başka bir deyişle, birim alanda veya bir belirli zamanda daha fazla dalga yoğunluğu olduğunda, her bir dalga grubunun içindeki tek tek dalgaların sayısı azaldığı görülmektedir. Elde edilen fotoğraf ve frekans verilerinden, sıvı tabakanın kırışıklığının hem jetlerdeki düzensizliklerden hem de havayla etkileşimden kaynaklandığı görülmektedir. Sıvı tabakanın kırışıklığı,

tabakanın parçalanma noktasına kadar devam etmekte ve dalga oluşumunun frekansını belirler. Fotoelektrik bir teknikle elde edilen frekans ölçümleri, jet hızlarının 20 ila 80 feet/saniye, çarpma açılarına kadar 100 derece ve jet çaplarının 0.025, 0.040 ve 0.057 inç olduğu ve test koşulları için dalga frekansının 1000 ila 4000 devir/saniye arasında değiştiği gösterilmiştir. Frekansın, jet hızıyla yaklaşık doğru orantılı bir şekilde arttığı bulunmuştur. Çarpma açısındaki bir artış, 500 ila 1000 arasındaki çarpma açıları için dalga frekansında bir azalmaya neden olmuş ve azalma, çarpma açısının yarısının kosinüsünün azalması tarafından yaklaşık olarak belirlenmiştir. Hem jet çaplarının hem de çarpma öncesi jet uzunluklarının, jet hızı ve çarpma açısının etkisiyle karşılaştırıldığında dalga frekansı üzerinde ihmal edilebilir etkileri var olmaktadır.

Grey ve Beddow (1969), toz kütle yoğunluğu ile görünür yoğunluğu arasındaki orana "Hausner Oranı" denir. Bu oranın değerleri, üç farklı türde kuru toz ve iki farklı türde yağlı bakır tozu için karşılaştırılmaktadır. Sonuçlar, Hausner Oranı'nın hareket eden bir toz kütle içindeki sürtünme durumunu ölçülebildiğini gösterilmektedir. Hausner Oranı'nın, akma süresi ve akma açılarıyla birlikte bir tozun karakteristiği olduğu sonucuna varılmaktadır. Hausner Oranı'nın bilinmesi, elekten geçirme mekanizması ve tozların ilk aşama sıkıştırılmasının temel anlayışını kazanmada kullanışlı olmaktadır. Bu oranın değerleri, üç farklı kuru toz türü ve iki farklı yağlı bakır tozu türü için karşılaştırılmıştır. Bu oran, akma süreleri ve akma açıları ile birlikte incelenmiştir. Sonuçlar, Hausner Oranı'nın bir toz kütledeki sürtünme koşullarını ölçtüğünü gösterilmektedir. Hausner Oranı'nın, akma açısı ve akma süresine ek olarak, bir tozun karakteristiği olduğu sonucuna varılmıştır. Hausner Oranı'nın bilinmesi, tozların elekten geçirme mekanizmalarını ve tozların sıkışmanın ilk aşamasını anlamak için temel bir anlayış kazanmada kullanışlı olmaktadır.

Grandzol ve Tallmadge (1973), tarafından yapılan çalışmada toz ile ilgili veriler elde edilmiş ve iki su jeti tarafından atomize edilmiş olan metal eriğin parçacık boyut dağılımını tanımlamak için bir model türetilmiştir. Su jeti parametrelerinin boyut dağılımı ve ortalama boyut üzerindeki etkileri, temel nicelikler ve model tahminleri açısından rapor edilmiş ve tartışılmıştır. Fan-püskürtme jetleri kullanılarak Tip 4620 çeliği atomize etmek için 60°'ye dik olarak çarpan jetler kullanılarak elde edilen

veriler, ortalama boyutun esas olarak su jeti hızının bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir.

Matsumoto ve ark. (1973), bir polinom yaklaşımı kullanarak, bir dönen diske uygulanan viskoz sıvı film kalınlığı için önceki teorik çözümleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Dördüncü veya beşinci dereceye kadar olan bir polinom yaklaşımının deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğunu tespit edip kayıt altına alınmıştır.

Lawley (1981), özellikle özel alaşımlara odaklanarak sıvı metalin atomizasyonunu içeren toz üretim yöntemlerini gözden geçirmiştir. Toz üretme yöntemleri ticari, pilot ölçekli ve laboratuvar ölçekli olarak sınıflandırılmıştır. Toz karakteristikleri ve özellikleri, var olan işlem parametreleri ile bağlantıları hesaba katarak; sıvı metal akışının veya levhasının parçalanma mekanizmaları analiz etmiştir. TM özel alaşımları, genellikle yüksek sıcaklık, aşındırıcı maddelerin varlığı, yüksek basınç veya diğer zorlu çalışma koşullarını kapsamakta ve işleme maliyetleri, mikro yapısal homojenlik ve özellikler konusunda dökme metalürjisi uygulamalarına karşı avantajlar sağlamaktadır. Bu alaşımlar için toz, atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir. Baskın ticari işlemler, soy gaz ve çözünür (vakumlu) gaz atomizasyonunu içermekte ve döner elektrot süreci takip edilmektedir. Santrifüj atomizasyon pilot ölçekte gerçekleştirilmektedir ve toz boyut dağılımının ve yüksek parçacık soğutma hızlarının kontrolü ile birlikte hızlı donma işleme yeni teknolojisini bünyesine alınmaktadır. Ultrasonik atomizasyon esasen pilot ölçek aşamasındadır ve sınırlı gözlemlere dayanarak toz özellikleri açısından çekici görülmektedir.

Acosta (1985), özellikle tasarlanmış bir atomizer kullanılarak hava püskürtme atomizasyonu üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu atomizerde, sıvı önce bir sıçrama plakasına çarpar, ardından radyal yönde yönlendirilmiş ve iki iç içe geçmiş, kanatlı pervaneye çarpan hava tarafından atomize edilmektedir. Bu pervaneler, havayı zıt yönlerde çevirerek döndürülmektedir. Akış koşulları, hava kütlesi hızı (birim alan başına kütleli debi, $\rho_A U_A$) ve sıvı-hava oranının ortalama damla boyutu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yakıtın fiziksel özelliklerindeki değişiklikleri taklit etmek için yedi farklı etanol çözeltisi kullanılmıştır. Atomize edilen hava

hızlarının aralığı 30 ila 80 m/s arasında yer almaktadır. Ortam sıcaklığında (295 K) ve atmosfer basıncında ortalama damla çapı ölçülmüştür.

Guo ve ark. (1985), parçacık şekli etkilerinin üç dökme katı özelliği üzerindeki nispi büyüklüklerine ilişkin bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan dökme katılar, düzenli şekil ve boyutlarda küçük plastik peletlerdir. Deneysel sonuçlar, parçacık normali ve teğetsel yuvarlak olmamadaki varyasyonların, dökme katıların görünür yoğunluğu, akış hızı ve Hausner Oranı üzerinde belirgin etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Yuvarlak olmama, parçacık profilinin radyal dağılımının standart sapmasıdır. Morfolojik analizden elde edilen bir parçacık şekli özelliğidir. $P(\text{yığın özellik}) = P(\text{ideal}) + P(\text{sapma})$ şeklinde basit bir ilişki önerilmiş ve test edilmiştir. Burada P, test edilen özelliği göstermektedir. P(ideal), mükemmel küreler için özelliğin değerini gösterir ve P (sapma), parçacık şeklinin etkisini açıklar.

Beddow (1986), Iowa Üniversitesi, Partikül Malzeme İşleme Bilimleri Merkezi'nde son 20 yıl boyunca gerçekleştirilen orijinal temel mühendislik araştırmasının morfolojik analizine odaklanan kısa bir derlemedir. Tartışılan konular arasında, parçacık malzemenin boyutu, şekli ve dokusuyla ilgili tanımlar, teori, ölçüm cihazları ve deneysel yönler bulunmaktadır.

Doğan ve ark. (1989), su atomizasyon yöntemi ile metal toz üretmek için yeni bir çeşit pülverizatör tasarlayıp inşa etmişlerdir. Deney seti yüksek hızla dönen kanatlı diske dikey olarak monte edilmiştir. Diski besleyen suyun dışarıya atılmadan önce yüksek hıza çıkmak için merkezkaç olarak ivmelenmiştir. Yüksek hızlı su jeti disk etrafında dikey olarak aşağıya doğru dökülen ergimiş metala çarpılması ile toz haline gelir. Pulverize olmuş metal tozlar ve püskürtülen su tankın içinde birikir. Bu yöntem tarafından üretilen tozların karakter özellikleri ticari su pulverize yöntemi ile üretilen tozlara çok benzerlik arz eder. Dahası, bilinen pahalı yüksek basınçlı su pompası ve su jet ünitelerin yerine kurulum ve işletim masrafları düşürüldüğünden dolayı kanatlı disk ve yüksek hızlı elektrik motor standart seri çeşitleri kullanılmaktadır.

Hwang ve Ma (1989), santrifüjlüme nedeniyle ince sıvı filmlerin azalmasını ele almıştır. Bir ince viskoz film akışını açıklayan denklemler, ya analitik ya da sayısal bir yöntemle çözülmüştür. Yüzeydeki düzensiz çıkıntıların düzenli desenlerini içeren durumlar için film azalma geçmişleri verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün, ince bir sıvı

filmi dönen bir diskte muhafaza etmeyi belirgin bir şekilde artırdığı bulunmuştur. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğünün farklı topografik yapıları, sıvı muhafazasının farklı asimptotik limitlere yol açtığını not edilmiştir.

Bégin ve ark. (1991), biyokatalizörlerin aljinat jel içinde mobilize edilmesi için döner düz disk atomizer kullanımı araştırılmıştır. Viskozitenin (0,28 ila 1,53 Pa.s), disk çapının (5 ila 20 cm), akış debisi (0,5 ila 2 lt/dk.) ve dönme hızının (1,6 ila 5 dev/dk.) damla oluşum mekanizmaları, küresel tanecik çapı ve dağılımları üzerindeki etkisi incelenmiştir. 1 ila 3 mm arasında değişen küresel tanecik çapları elde edilmiştir. Akış debisi ve viskozite artışları daha yüksek küresel tanecik çaplarına neden olmuştur. Ancak disk çapının ve dönme hızının artması azaltıcı bir etkiye sahip olmuştur. 0,65 Pa viskozitesi, iyi boyut dağılımı ve mekanik dayanıklılığa sahip küresel taneciklerin üretimi için en uygun olduğunu kanıtlamıştır. Ortalama hacimsel damlacık çapı için öngörülen denklemler belirlenmiştir.

Tadano ve ark. (1994), soğuk cıva kazanı, metallerin temas olmadan eritilmesi için faydalı bulunmaktadır. Metaller ve alaşımlar, soğuk cıva kazanları ile yüksek saflık derecelerine rafine edilebilmektedir. Bir kazanın yapısı, erimiş metalin erime koşullarını güçlü bir şekilde etkilenmektedir. Bu çalışmada, kazan yapısı deneysel araştırmalarda ve elektromanyetik analizlerde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, birçok oyuga sahip bir kazanın metalleri eritmek için iyi olduğunu ve iç kısmı koni şeklinde olan, kazandaki erimiş metalden eşit uzaklıkta bobinlere sahip bir kazanın levitatif erime için en iyi olduğunu göstermektedir. Geliştirilmiş bir kazan ile 2.3 kg Ti'yi iki ila üç dakika içinde başarıyla levitasyonlu bir şekilde eritmesi sağlanmıştır.

Kaczmar ve ark. (2000), dispersiyon parçacıkları, levhacıklar ve sürekli (uzun) ve sürekli olmayan (kısa) liflerle güçlendirilmiş metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ve özellikleri tartışılmaktadır. Kompozit malzemelerin ve kompozit parçaların üretimi için en yaygın uygulanan yöntemler, sıvı metal alaşımlarla gözenekli seramik ön kalıpların sıkıştırılması gibi döküm tekniklerine dayanmaktadır ve toz metalurji yöntemlerini içermektedir. Kompozit malzemelerin mükemmel fiziksel, mekanik ve gelişme özelliklerine sahip olmaları nedeniyle, bu malzemeler geniş bir şekilde uçak teknolojisinde, elektronik mühendisliğinde ve son zamanlarda ise binek otomobil teknolojisinde uygulanmaktadır.

Ferraris ve ark. (2004), parçacık boyutlarının dağılımı veya parçacık boyutu dağılımı (PSD), çimento tozunun temel bir özelliği olmaktadır. Doğru PSD'ler, hidrasyon sürecini modellemek için hesaplamalı çabalarda gerekli bir hal almakta ve çimento endüstrisi için önemli bir pratik konu olmuştur. Şu anda çimentonun PSD'sini ölçmek için mevcut olan tek standart yöntem, yani ASTM C115, kapsam açısından sınırlı bir durumda yer almakta ve 7.5 µm altında bir boyut tespit limitine sahip olmuştur. Portland çimento tozu ile ilişkilendirilen geniş parçacık boyutu aralığını yeterince kapsayan standart prosedürler olmadığından, endüstri içinde farklı ölçüm tekniklerinin uygulanması geniş bir şekilde değişmeye maruz kalmaktadır. İki ASTM destekleyicisi karşılıklı test, çimento endüstrisinde şu anda kullanılan teknikleri ve yöntemleri belirlemek ve bir standart yöntem veya yöntem geliştirmek ve iyileştirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, lazer saçılma tekniğine dayanan en iyi uygulama yöntemi olarak entegre edilmiştir. Bu çalışmanın amacı, karşılıklı testler sırasında üretilen verilere dayanarak bulguları özetlemek ve çimento PSD'sini ölçmek için mevcut çeşitli yaklaşımları özetlemektir. Test sonuçlarının istatistiksel analizinin özeti açıklanmıştır.

Neikov ve ark. (2004), gelişmiş alüminyum alaşımlarının imalatı için eriyiğin yüksek-basınçlı su atomizasyonu esasına dayanan yeni hızlı katılaşma işlemi bir örnek işletme alanında gerçekleştirilmiştir. Alüminyum alaşımı tozu üretim sırasında güvenli çalışma sorunları ve toz kalitesi engelleyici sulu çözeltilerin kullanımı ile sıcaklığı askıya alma ve hidrojen iyonu üs kuvvet katsayı kontrolü (pH) ile atomize olmuş ürünlerin hidrolik sınıflandırılması ve kuruma prosedürü optimizasyonu ile çözülmüştür. Toz-su etkileşimi oranı etkili olarak pH değerine bağlıdır. Oda sıcaklığı reaksiyonların hızı pH 3,0-4,0 çok düşük olmasına karşın, pH 6,0 artışı ile yoğun bir toz oksitlenmeyi sağlamaktadır. Çeşitli uygulamalar için bir takım TM alaşımları su ile atomize edilmiş tozlar temelinden üretilmiştir. Bu tür alaşımların gerilme mukavemeti özellikleri esas olarak benzer alaşımların döküm malzemelerin gerilme mukavemetine göre daha fazla özelliklere sahiptir.

Xie ve ark. (2004), santrifüj yöntemi ile atomize edilmiş kalay tozunun morfoloji ve boyut dağılımı üzerinde atomizer tasarımı ve işleme parametrelerinin etkilerini araştırmıştır. Atomizer üzerinde metal eriyiğin erken katılaşması ve eriyik tarafından atomizerın yetersiz ıslatılması, başarısız atomizasyonun başlıca nedenleri olarak

belirlenmiştir. Tozların parçacık boyut dağılımları log-normal bir dağılımı takip edilmektedir. Medyan parçacık boyutu, atomizer dönme hızının azalması ve erime akış hızının artmasıyla birlikte arttığı görülmüştür. Aynı işletme koşulları altında, yüksek iç açılı kupalar, düz disklerden belirgin şekilde daha ince tozlar üretilmiştir.

Teunou ve Poncelet (2005), bir sıvının dönen bir disk tarafından parçalanması, sıvının kurutulmadan veya dondurulmadan önce ince damlacıklara atomizasyon için püskürtme kurutma, soğutma veya dondurma alanında yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu teknik bugün mikroenkapsülasyon için uygulanmakta olup çekirdek malzemeyi korumak ve ürün özelliklerini ve işlevselliğini iyileştirmek için umut verici bir yöntem olarak bilinmektedir. Aslında, gıda endüstrilerinde mikroenkapsülasyon için ekonomik olarak uygulanabilen az sayıdaki yöntemden biri olmuştur. Bu amaçla, bu çalışmanın odak noktası olan kapsülün yolunu belirlemek amacıyla, sıcak sıvı parafin kullanılarak parçalanmış parafin mikro küresel tanecik (1-1000 μm çapında) üretilmiştir. Parçacığın izlediği yolu ölçülmüştür. Sabit hava içinde hareket eden bir kapsülün teorik modeli, parçacıkların izdüşümü mesafesini tahmin etmek için türetilmiştir. Bu disk modeli, gerçekçi bir şekilde geliştirip tasarlandığı için, küresel parçacık oluşumu, parçalanma mekanizması, sıvının yüzeyde kayması ve diskin kenarında oluşan damlanın radikal hızı gibi değişkenler dikkate alınmıştır. Çevresel hava tarafından püskürtülen sıvı ile dönen disk özellikleri arasındaki etkileşimler, tüm çeşit dönen disk modellere uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Disk tarafından üretilen küresel parçacıkların ve püskürtülen sıvının yolunu tahmin etmek için kullanılabilir. Bu disk modeli, büyük ölçekte uygulandığında sistemin yüzey üretkenliği üzerinde bilgi sağlama yeteneğine sahip olmaktadır. Yani, endüstriyel boyutta, bu teknikle üretilen materyallerin verimliliği, üretkenliği veya performansını değerlendirmede yardımcı olabilmektedir.

Dong ve ark. (2007), nitrojen gaz atomizasyon yöntemi kullanılarak $\text{Al}_{85}\text{Ni}_{15}\text{Y}_6\text{Co}_2\text{Fe}_2$ tümüyle amorf ve kısmi amorf tozları hazırlanmıştır. Toz büyüklüğünün bir fonksiyonu olarak Mikroyapı ve ısıl kararlılık incelenmiştir. Tozların çoğunluğu 45 μm altında olmakta ve amorf fazı içeriği <25 μm büyüklük aralığında %97,3 kadar yüksek değere sahip olmaktadır. Tane büyüklüğün artması ile faz bileşeni amorfтан amorf+fcc-AI, sonra fcc-AI+AlNiY+Al₃(Ni; Fe) ve en sonunda fcc-AI+Al₃CO₂ + Al₃Y +Al₃(Ni; Fe)' ye değişmektedir. DSC eğrilerinde bütün

tozların üç ısıveren tepkimeleri göstermektedir. $<25\mu\text{m}$ boyut sınırı, 25K geniş aşırı soğutulmuş sıvı bölgesi ve 580K temel kristalizasyon sıcaklığını göstermiştir. $\text{Al}_{85}\text{Ni}_{15}\text{Y}_6\text{Co}_2\text{Fe}_2$ alaşım tozları 384 Hv ye yakın yüksek mikrosertliği gösterir, onun yapısal uygulamaları için iyi bir potansiyel önerilmektedir.

Li ve Deng (2007), metal eritme maddelerinin dönen bir disk kullanılarak santrifüj atomizasyonu, toz üretimi ve püskürtme tabakalama için önemli bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Toz parçacık boyutlarının teorik olarak tahmin edilmesi, atomizer tasarımı için arzu edilen gerçekliktir. Bu çalışmada, dalga teorisi, dönen bir disk kullanılarak gerçekleştirilen santrifüj atomizasyon yöntemi ile metal eritmenin film parçalanma rejimindeki çözülmesini analiz etmek için uygulanmıştır. Püskürtme parametrelerini tahmin etmek için matematiksel bir model önerilmiştir. En hızlı büyüyen dalga sayısı için yönetici denklem geliştirilmiş ve sayısal olarak çözülmüştür. Film uzatma sırasında film kalınlığındaki değişimin etkisi göz önüne alınmıştır. Film uzunluğu ve toz parçacık boyutu hesaplanmış ve literatürdeki mevcut deneysel verilerle karşılaştırılmış ve iyi bir uyum sağlandığı tespit edilmiştir. Parçalanma parametresinin etkisi incelenmiş ve parçalanma parametresinin tahmin edilen toz parçacık boyutuna duyarlı olmadığı gösterilmiştir. Hem simülasyon sonuçları hem de deneysel veriler, disk hızını artırarak ince tozların üretilebileceğini göstermiştir.

Cheetham ve ark. (2008), tane boyutu dağılımı, biriktirme sistemleri içindeki sedimanter birimleri yorumlamak için temel bir araçtır. Bu çalışmada değerlendirilen teknikler, kum-ağırlıklı sedimanlar için tane boyutu dağılımlarını belirlemek için yaygın olarak kullanılan yöntemlerdendir. Ancak kum-ağırlıklı akarsu sedimanları için tane boyutu yöntemlerinin kombinasyonu kullanıldığında sistemli olarak ne kadar tutarlılık ve farklılık olduğu henüz değerlendirilmemiştir. Lazer difraksiyonu, X-ışını soğurma ve taramalı elektron mikroskobu tane boyutu analiz teknikleri ile geleneksel elek/hipsometre yönteminden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu, temsilci örnekler elde etme zorlukları nedeniyle tane boyutu dağılımları için doğru bir nicel analiz sağlamamıştır. X-ışını soğurumu yöntemi, sadece 300 mikrometrelik üst boyut aralığı nedeniyle kum-ağırlıklı sedimanlar için uygun olmadığı tespit edilmiştir. Lazer difraksiyon sonuçları ile elek/hipsometre sonuçları arasındaki sürekli güçlü korelasyon, bu yöntemlerin kum-ağırlıklı akarsu sedimanları için karşılaştırılabilir olduğunu gösterilmektedir. Örnek hazırlığı tutarlı

olduğu sürece, sonraki iki yöntem, bu sedimanların bir çalışmasında birlikte kullanılabilir ve yüksek doğruluk derecesini koruyabilmektedir. Bu sonuçlar, uzun süredir kullanılan elek/hipsometre yöntemi ile elde edilen verilerin, lazer difraksiyon tekniklerini kullanarak modern çalışmalarla güvenle karşılaştırılabileceğini gösterilmektedir.

Huang ve Mujumdar (2008), püskürtmeli kurutma yöntemi, endüstride büyük ölçekte toz üretmek için en yaygın kullanılan yöntemdir. Püskürtmeli kurutma sürecindeki önemli sorunlardan biri, ürün parçacık boyut dağılımının kontrol edilmesi işlemidir. Çünkü bu, birçok endüstri için çok önemli olmaktadır. örneğin, katalizörler, kimyasallar, gıdalar, ilaçlar, seramikler vb. Bu çalışmanın amacı, atomizer dönme hızının ürün boyut dağılımına etkisini incelemektir. Gerekli ürünün tipik parçacık boyut dağılımını elde etmek için, özel olarak tasarlanmış bir atomizer disk bu çalışmada kullanılmıştır. Atomizer dönme hızları arasında (9,000-10,000 devir/dakika aralığında) ölçülen ve tartışılan parçacık boyut dağılımları bulunmuştur. Özel olarak tasarlanmış bir döner disk atomizer ile yapılan deneysel sonuçları, atomizer hızı azaldıkça maksimum parçacık boyutunun arttığı gözlenmiştir. Ancak, tüm testlerde parçacık minimum boyutu neredeyse aynı geometrik şekle sahip olmaktadır. Test edilen atomizer için önerilen atomizer hızı, gerekli boyut dağılımını elde etmek için 9000 ila 10.000 devir/dakika arasında olmaktadır. Atomizer devir sayıları 9000 ve 10.000'de yapılan parçacık boyutu dağılımı ölçümlerinden, parçacıkların nereye toplandığına bakılmaksızın, kurutma odasında veya siklondan alındığında, parçacık boyut dağılımlarının normal dağılıma uyduğu gözlemlenmiştir. Gelecekteki çalışmalarda, bu tür bir disk tasarımı diğer malzemelerle test edilecektir.

Sheikhali ve ark. (2008), tarafından bir alüminyum üretim tesisi, tasarlayıp inşa edilmiştir. santrifüj atomizasyon yöntemi ile kupa diski kullanarak, alüminyumun üretilmesini, daha güvenli toz elde etmeyi sağlamış ve üretim maliyetlerini azaltmıştır. Atmosferik oksijen içeriğinin alüminyum toz parçacıklarının boyutu ve şekli üzerindeki etkisini inceleyen bir araştırma yapılmış ve bazı şaşırtıcı sonuçlar elde edilmiştir. Parçacıkların ortalama çapının, kupa diskin dönme hızın bir fonksiyonu olduğu açıktır. Boyut dağılımının sıklığı oksijen azaldıkça iyileşir. Ortalama parçacık boyutu için gözlemlenen korelasyon belirlenmiş ve teorik korelasyondan farklı olduğu tespiti yapılmıştır. Bu fark, eriyiğin kupa diskin yüzeyinde kayması ve aynı zamanda

son derece uzun parçacık şekilleri tarafından açıklanabilir. Oksijen içeriği azaldıkça, parçacıkların şekli daha küresel hale gelir. Bu nedenle tozun görünür yoğunluğu katı maddenin %20'sinden %50'sine kadar artışı görülmüştür.

Liu ve ark. (2011), su atomizasyonu ile Fe-Si-B-C-P amorf tozları başarılı bir şekilde imal edilmiştir. Morfoloji, kimyasal bileşim, faz yapısı ve yumuşak manyetik özellikler bu çalışmada öğrenilmiştir. Sonuçlar, tozların doğada tamamıyla amorf yapıda olduğunu göstermektedir. DSC analizleri, tozlar yaklaşık 768K de cam geçiş sıcaklığı (T_g) ve yaklaşık 816K kristalleşme sıcaklığına (T_x) sahip olmaktadır. Bunlar ise yığın haldeki tozlarla yaklaşık olarak boyutlara sahip olduğunu kanıtlanmaktadır. Tozların morfolojisi, su atomizasyon parametrelerin ayarlanması ile değiştirilebilmektedir. Hem dentrik tanecikler hem de küresel tanecikler üretebilmektedir. Gaz atomizasyon tozları ve dökümden yapılmış yığın formlarla kıyaslandığında, su ile atomize edilmiş tozlar yüksek miktarda oksijen içermekte (yaklaşık 1800ppm) ve aynı zamanda daha yüksek miktarda Fe(demir) içermektedir. Fazla oksijen çözeltisinin içermesi, cam şekillendirme yeteneğini daha da artırılabilmekte ve daha fazla Fe içermesi malzemenin doygunluk miktatsızlığı artırılabilirliği önerilmektedir. Su ile atomize edilmiş tozlar yığın formlar içerisine kolayca yoğunlaşabilmektedir.

Chegini ve ark. (2012), sprey kurutucu döner püskürtücülerin pompalanan hava karakteristikleri, tasarım ve işletme değişkenlerine bağlı olmaktadır. Tekerlek vakum basıncını ve gerekli güç pompa havasını ölçerek, bir sprey kurutucu döner püskürtücünün hava pompalama karakteristiği araştırılmıştır. Deneyler kanatlı, iğne tipi ve çoklu delikli olmak üzere üç farklı püskürtücü tekerleği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Pompalanan hava parametreleri, üç tekerlek için farklı hava boşlukları ve püskürtücü hızları için ölçülen kayma gücü, hava pompalama gücü ve diferansiyel basınç içermektedir. Döner püskürtücü hız aralığı 7000 ila 27,000 devir/dakika arasında değişmekte ve hava boşluğu 0.5 ila 1.5 mm arasında değişmektedir. Sonuçlar, tekerlek hızının arttıkça, kayma gücü, hava pompalama gücü ve diferansiyel basıncın tüm tekerlekler için arttığını göstermiştir. Ayrıca, hava boşluğunu artırarak, kayma ve hava pompalama gücünün arttığını ve diferansiyel basıncın tüm tekerlekler için azaldığını göstermektedir.

Liu ve ark. (2012), döner kupa diski atomizasyon yöntemi ile ergitilmiş cüruf granülasyonu için su soğutma yerine çekici bir alternatif olmaktadır. Ancak, ergitilmiş cürufun ayrışma mekanizması değerlendirilmesi bir ihtiyaç olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, bir gliserol/su karışımı, ergitilmiş cüruf yerine kullanılarak, bir döner kupa diski içinde ligament oluşumunun mekanizması, yüksek hızlı bir kamera tarafından çekilen fotoğraflar kullanılarak araştırılmıştır. Döner kupa açısai hızı ve iç derinliğinin ligament ayrışması üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, yüksek sıcaklıktaki yüksek fırın cürufunun granülasyonunu yönlendirmek için kullanılabilir. Bu sonuçlar, ilki belirli bir sıvı akış debisi ve döner kupa için, döner kupa açısai hızı arttıkça doğrudan damla oluşumu ligament oluşumuna dönüşebilmektedir. Yüksek açısai hızda, ligamentler birleşmekte ve damlalar levha oluşumuyla üretilmektedir. Ergitilmiş cüruf granülasyonu için en uygun ayrışma durumu olan ligament oluşumu ile gerçekleşmektedir. Diğer iki süreçten daha homojen damlalar üretebilmekte ve bu da yüksek sıcaklıkta cüruf damlasının ısı geri kazanımına fayda sağlanmış olmaktadır. En son sonucu ise granülasyon için iç derinliği 30 mm olan bir döner kupa en uygun olarak kabul edilmesidir. Bu döner kupa alanı tam olarak kullanılabilir, yüksek hızda sıvı damlalar üretilmekte ve bu da sıvı damlaların soğumasına fayda sağlanmıştır.

Sungkaphaitoon ve ark. (2012), çinko metal tozu üretimi için bir santrifüj atomizerin ön tasarımı incelenmiştir. Tasarım sürecinde, tüketilen güç ve atomizör diski boyutları ilk olarak tahmin edilmiştir. Atomizer diski kenarından savrulan metal eriğin damlacıkların savrulma yörüngesi ve sıcaklık profili, atomizer odasının boyutunu hesaplamak için harici akışta ısı transferi kavramı kullanılarak tahmin edilmiştir. Basit bir laboratuvar ölçekli atomizer inşa edilmiştir. Atomizerin performansı, model malzemesi olarak saf çinko metal kullanılarak incelenmiştir. Atomizer disk hızlarının 10.000 ila 30.000 devir/dakika arasında değiştirildiği atomizasyon işlemi, grafit 40 mm çaplı düz diski, erime dökme sıcaklığı, ön ısıtma diski sıcaklığı ve erime hızı sırasıyla, 550 °C, 300 °C ve 50 kg/saat olarak ayarlanarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlardan, çinko metal tozu ortalama parçacık boyutunun ve standart sapmasının disk hızının artmasıyla azaldığı görülmüştür. Üretim veriminin, dönme hızının artmasıyla artma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. SEM görüntüleri, çoğu çinko metal parçacıkların düzensiz, uzunlamasına yapraklar

olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmada üretilen çinko tozu, otomotiv parça endüstrisinde fren balatası üretimi için sürtünme malzemesi olarak kullanılmak üzere uygun olabilmektedir.

Froes (2013), titanyum ve alaşımlarının daha yaygın kullanılmamasının temel nedeni yüksek maliyetli olmasıdır. Bu çalışmada, toz metalurji, titanyum bileşenlerinin üretimine en az maliyet yaklaşımındaki gelişmeler, bu teknolojinin çeşitli yönlerine göre tartışılmıştır. Bu yönler, harmanlanmış element yaklaşımı, ön-alaşımlı teknikleri, katkı katman imalatı, metal enjeksiyon kalıplama, sprey biriktirme, çok uzak denge işleminden (hızlı katılaşma, mekanik alaşımlama ve buhar biriktirme) ve gözenekli malzemelerdir. Titanyum tozu kullanımı püskürtme hedefler, kaplama, alüminyum alaşımları ve havai fişek de tane incelticisi olarak ele alınmamıştır.

Danninger ve Gierl-Mayer (2013), demir TM tonaj bakımından toz metalurji ürünlerinin çoğunluğunu oluşturmaktadır. Preslenmiş ve sinterlenmiş parçalar için ana eğilim, özellikle krom ve mangan gibi etkin -maliyet alaşım elementlerinin performansı iyileştirilme özelliğine sahip olmaktadır. Bu nedenle, özenle hazırlanmış ikincil operasyonlar ile çok miktarda demir tozu elde edilebilmektedir. Metal enjeksiyon kalıplama (MEK) ürünlerinde, giderek daha karmaşık şekillere ve küçük boyutlu parçalara doğru açık bir eğilim var gibi görünmektedir. Mükemmel uygulama özelliklerine sahip, TM takım çeliklerin çok daha ince ve tamamen izotropik mikroyapı önermesi, işlenmiş benzerlerine göre karbür içeriği çok daha yüksek olabilmektedir.

Dunkley (2013), bu çalışmada son gelişmeleri (2000 yılından bu yana) gözden geçirmeyi amaçlamakta ve okuyucuya geçmiş yüzyılda geliştirilen çeşitli atomizasyon tekniklerine dair bir giriş sunmayı hedeflenmektedir. Gaz, su ve santrifüj atomizasyonun temel prensipleri ele alındıktan sonra, her bir alandaki sorunlar ve ilerlemeler tartışılmış ve detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Chawla ve Williams (2013), sinterlenmiş demir toz TM bileşenleri, arzulanan şekle yakın işlenebilir kabiliyeti olması, düşük maliyeti ve yüksek performans sayesinde, birçok uygulamada işlenmiş alaşımların yerini almaktadır. Bu malzemelerin kırılma ve yorulma davranışları çok önemli olmaktadır. Bu bölümde

mikro yapılı sinterlenmiş çeliklerin gerilme ve yorulma davranışları gözden geçirilmiştir.

Dhokey ve ark. (2014), parçacık boyut dağılımı ve şekli, parçacık boyut aralığı ve bunlara bağlı olan işletim değişkenleri, tasarım parametreleri, işlem parametreleri, metal ve su termofiziksel özelliklerin değiştirilmesi ile metal tozunu verimli olarak üretmek için su atomizasyonu kullanılabilmektedir. Sıvı bakır laboratuvarında imal edilen püskürtücü ile toz haline getirilmiştir. Değişik su jet basıncı kullanılarak bakır tozu üretmek için birkaç deney yapılmıştır. Bu mevcut çalışmada, işletim değişkenleri ve bakır parçacık büyüklüğü arasındaki ilişkiyi bulmak için matematiksel model önerilmiştir. Deney sonuçlarıyla bulunan ve farklı parametrelerden etkilenen parçacık boyutunu tahmin etmek için önerilen matematiksel model geliştirilmiştir. Değişik su basıncı ve tepe açısı ile 3-D yüzey etkilenme analiz edilmiştir.

Gadpayle ve Baxi (2014), elektrikli fırınlar, çeşitli endüstriyel üretim süreçlerinde ısınma amacıyla kullanılmaktadır. Elektrikli fırınlar, daha hassas sıcaklık kontrolü gerektiği yerlerde kullanılması bir gerçeklik olmaktadır. Metallerin, camın ve diğer malzemelerin eritilmesi, birkaç bin yıldır hayati bir üretim süreci olmuştur. Bu süreç, dökülebilen ve kullanışlı şekillerde katılaştırılabilen sıvılar üretilmiştir. Temel süreç aynı kalsa da, döküm ürünlerin kullanım alanı uzun bir yol kat edilmiştir. Metal üretimi, dökümhanelerde ve tüm insan hayatlarında genel bir uygulama haline getirilmiştir. Farklı enerji kaynaklarıyla farklı eritme teknikleri uygulanmaktadır. Bu konu, öncelikle fırın üretimi için mekanik ve elektriksel gereksinimlere odaklanmıştır. Elektrikli fırınlar, özellikle metal eritmek veya şekillendirmek gibi endüstriyel işlemlerde kullanıldıklarında, enerji verimliliği ve hassas kontrol yetenekleri nedeniyle tercih edilmektedir. Bu fırınlar, çeşitli endüstrilerde metal üretiminden seramik imalatına kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahip olmuştur. Yüksek fırın, temel olarak demir cevherinin eritilmesi işlemlerinin gerçekleştirilmesiyle ham demir elde edilmektedir. Kupalı fırın, dökme demir elde edilmesi için ve elektrik ark fırını, çeliğin yeniden eritilmesi için kullanılmaktadır.

Wu ve ark. (2015), Çeşitli su/gliserol karışımlarını çalışma ortamı olarak kullanarak sıvı viskozitesinin merkezkaç granülasyon üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılması için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Granülasyon evrimi detaylı bir

şekilde tartışılmış ve analiz edilmiştir. Bu granülasyon evrimi, genellikle çeşitli faktörlerin etkisi altında olan bir dizi aşamayı içermektedir. Bunlar, çeşitli sıvı özellikleri, disk dönme hızı, sıvı akış hızı ve diğer işletme parametrelerinin etkileşimleriyle belirlenmiştir. Damla boyutu ve dağılımı, ligament sayısı ve uzunluğu ile granülasyon modu çevirisinin kritik akış debisi gibi temel parametrelerin sıvı viskozitesi ile değişimi incelenmiştir. Boyutsuz sayıları, Reynold sayısı (Re), Ohnesorge sayısı (Oh) ve Weber sayısı (We) kullanarak, üretilen damlaların Sauter Ortalama Çapı'nı (SMD) ve Yüksek Fırın (BF) cürufu için kritik akış debisi yaklaşık olarak hesaplanmıştır.

Pasupathy ve ark. (2016), bu çalışmada, su atomizasyonlu tozların ortalama parçacık boyutunu tahmin etmek için mevcut olan empirik korelasyonların (iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi ifade eden matematiksel ifadeler) belirli bir atomizer ve alaşım ailesiyle sınırlı bir geçerliğe sahip olunmasıdır. Şöyle ki, mevcut korelasyonlar sadece belirli bir atomizer tipi ve belirli bir alaşım ailesi için geçerli ve doğru sonuçlar vermektedir. Yani, bu korelasyonlar, farklı atomizer tipleri veya alaşım grupları için geçerli olmamakta veya tahminlerde daha fazla belirsizlik sebep olmaktadır. Bu kısıtlamaların üstesinden gelmek amacıyla, çalışma, ısı transfer katsayısının etkisini ve dolayısıyla katılma süresinin ortalama parçacık boyutu üzerindeki etkisini hesaba katan yeni bir matematiksel fonksiyon önermiştir. Bu yeni model, mevcut korelasyonların sınırlamalarını genişleterek, daha geniş bir alaşım yelpazesinde geçerli olabilirliliği artırmayı hedeflemiştir.

Sungkhaphaitoon ve ark. (2017), zinc tozu üretimini incelemek için deneysel bir santrifüj atomizer kullanılmıştır. Eritme sıcaklığı, eritme akış hızı, dönme hızı ve atomizer disk çapı değişken işletme parametreleri olarak kullanılmış ve bunların toz kalitesi ve verim üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Ortalama parçacık boyutu ve parçacık boyut dağılımı, dönme hızının, eritme sıcaklığının ve atomize disk boyutunun artmasıyla daha iyi, yani daha küçük ve dar, olma eğiliminde olduğu görülmüştür. Eritme akış hızı azaldıkça, ortalama parçacık boyutu azalırken parçacık boyut dağılımı benzerliği ortaya çıkmıştır. Tüm eğriler neredeyse üst üste binmiş bir profil gibi gözükmemektedir. Çinko tozu verimi, dönme hızı ve disk boyutu artmakta ve eritme akış debisi azalmaktadır. Çinko tozunun görünür yoğunlukları 1.65 ila 2.51 g/cm³ arasında olduğu tespit edilmiştir. SEM mikrografilerinde çoğu çinko parçacığı düzensiz

şekilleri olmakta ve optik görüntüleme sonrasında parlatılmış bir yüzeyin oyulmasıyla temel olarak hücresel bir yapıya dönüşmektedir.

Wu ve ark. (2017), santrifüj granülasyon, yüksek sıcaklıktaki ergitilmiş yüksek fırın cürufundan atık ısıyı geri kazanmak amacıyla bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Uygun bir püskürtücü, santrifüj granülasyonun parçacık üretimi için daha maliyet etkin bir süreç haline gelmesini sağlamıştır. Bu nedenle, granülasyon üzerindeki atomizer konfigürasyonunun etkisi üzerine önemli tespitler yapılmıştır. Bu çalışmada, üç grup atomizer özel olarak tasarlanmış ve her atomizerin granülasyon performansı soğuk deneyler sırasında deneysel olarak test edilmiştir. Atomizer konfigürasyonlarının granülasyon modları ve damla özellikleri üzerindeki etkileri görsel olarak araştırılmıştır. Veri uyumu kullanılarak granülasyon damla boyutunu tahmin etmek için iki modifiye korelasyon önerilmiştir. Sonuçlar, döner kupa atomizerlerin film oluşumunu, döner disk atomizelere karşı ihmal edebileceğini göstermiştir. Ayrıca, 90 derecelik dış açılı atomizerlerin daha küçük damlaları üretebildiği gerçekliği kanıtları ile birlikte ortaya çıkartılmıştır. Revize edilmiş korelasyon ve atomizer konfigürasyonlarının etkisini içeren yeni geliştirilen korelasyon, deney verileri ile iyi bir uyum içerisinde olduğu kanıtlanmıştır. Ek olarak, bir atomizer tasarım analizi, endüstrileşmeye dair iyi bir anlayış sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Granülasyon için ince parçacıklar üretebilme yeteneği nedeniyle kupa benzeri bir atomizerin benimsenmesi önerilmiştir.

Barot ve ark. (2019), alaşımların eritilmesi için enerji verimli bir fırın, sürdürülebilir büyüme için endüstri için kritik bir ihtiyaç olarak ortaya çıkmaktadır. Malzemenin metallerin erimesi için çok yüksek sıcaklıklara ısıtılabilceği kapalı bir yapıda olunmalıdır. Bu çalışmada yazarlar, alüminyum alaşımlarının eritilmesi için enerji verimli bir elektrikli muf fırını tasarlamaya ve geliştirmeye çalışılmıştır. Bu fırın, silindirik şekilli bir muf kullanarak fırın içinde homojen ısı dağılımı sağlanmaktadır. Muf, odanın duvarlarındaki bir elektrik direnç tel bobini ile birlikte kullanılmakta ve malzemenin ısınan tarafının alevle teması olmadan tüm yüzeyinden radyant şekilde ısınması sağlanmıştır. Muf fırının tasarımı, eritilecek malzeme ve erime sıcaklığına dayanmaktadır. Son zamanlarda, çoğu muf fırını kare veya dikdörtgen şekilli muf içermekte ancak bu tür bir muf formunda homojen ısı dağılımı sağlanamamaktadır. Önerilen tasarımla hedeflenen elektrik tüketimi, tasarlanan

özellik ortamında yaklaşık 2.5 kW'dir ve bu, ticari fırınlardan daha az olunmaktadır. Bu nedenle, metalin ısınma süresi ve bu tür muf fırınların maliyeti, mevcut piyasada bulunan fırınlara göre önemli ölçüde azaltılmıştır. Aynı ısı çıkışı için daha az enerji tüketimi, dökümün sürdürülebilmesi bir şekilde üretilmesi yolunun açılmasına vesile olmuştur. Ocaklar genellikle istenen sıcaklığa iletim, konveksiyon ve bir elektrik direnç ısıtma elemanı aracılığıyla siyah cisim ısıtmasının bir kombinasyonu ile ısıtılmıştır. Bu nedenle, daha yüksek bir sıcaklığa ulaşmak için hiçbir yanma işlemi gerekmemekte, bu da sıcaklık homojenliği üzerinde çok daha büyük bir kontrol sağlamış ve aynı zamanda yakıtın yanmasıyla ortaya çıkan yan ürünlerden ısınan malzemenin izolasyonunu korumuştur. Bu çalışmada fırının tasarımı ve geliştirilmesinde, silindirik şekilli muf ile homojen ısı dağılımı sağlanmıştır. Ayrıca eritme sırasında ısı kaybını azaltmaya ve 3 kg alüminyum alaşımını eritmek için gereken toplam 2.5 saatlik bir süreyi azaltmaya yardımcı olur. Isı transferi hesaplaması, tasarlanmış ısı çıkışına sahip bir fırın için gereken optimum 2.5 kW gücü verilmektedir ki bu da ticari fırınlardan daha az olmuştur. Mevcut ve direnç uzunluğuna dayalı olarak, telin optimum ağırlığı seçilmiştir. Bu nedenle, metalin ısınması için gereken enerji ve maliyet, mevcut piyasada bulunan fırınlardan %30 daha azdır ve enerji verimli ve sürdürülebilir bir gelişim sağlamıştır.

Kumar ve Sarkar (2019), bu deneysel çalışmada, yüksek hızlı görüntüleme tekniğinin yardımıyla, sıvının dağılma modu (levha, ligament ve doğrudan damla oluşumu) dönen disk üzerinde araştırılmıştır. Farklı yuvaların (5 mm ve 3 mm) düz disk yüzeyine tasarlandığı ve performanslarının deneylerle ortalama damla boyutu ve dağılımları açısından damla boyutları elde etmek için test edilmiştir. Damlaların görüntüsü, dönen diskin ön yüzünden çekilmiştir. Bu, diskin kenarındaki damla oluşum mekanizmasını yakından gözlemlemek için gerçekleştirilmiştir. Atomizer konfigürasyonunun sıvı dağılma modları üzerindeki etkisi, düz ve kanallı disk durumları için analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Disk üzerindeki yuvanın dağılma modu geçişine ve damla boyutundaki azalmaya önemli bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, ortalama damla boyutunu Reynolds sayısı (Re), Weber sayısı (We) ve Ohnesorge sayısı (Oh) gibi boyutsuz gruplar açısından tasarım ve işletme değişkeninin bir fonksiyonu olarak tahmin etmek için korelasyonlar önerilmiş ve yuvalı disk için düz disk ile karşılaştırılmıştır.

Moghadam ve ark. (2019), grafiksel boyut dağılımı, tozlar, damlacıklar, kabarcıklar ve gözeneklerle ilgili bilim ve çalışma alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bazı durumlarda boyut dağılımını nicel olarak ifade etmek de gerekebilmektedir. Literatürde boyut dağılımını nicel olarak ölçmek için birkaç önerilen yöntem olmasına rağmen, bu yaklaşımlardan bazıları birçok yönetime uygulanmazken, geri kalanları da diğer eksikliklere sahip olmaktadır. Bu çalışma önce bazı nicel boyut dağılımı yöntemlerini (örneğin polidispersite indeksi gibi) ve bunların eksiklikleri tartışılmıştır. Partikül boyut dağılımının genişliği (SPAN) yöntemi, genel olarak en uygun yöntem olarak kabul edilmiş ve parametreleri kümülatif boyut dağılım verilerinden belirlenmiştir. Bu çalışmada sunulmuş olan yeni bir ölçüt olarak Mono-boyut dağılımı indeksi (MSDI), SPAN yönteminin eksiklikleri giderilmiştir. MSDI, herhangi bir parçacık örneğine kolayca uygulanabilmektedir. Yalnızca boyut dağılım verilerine ihtiyaç duymaktadır. Değeri sıfır ile bir arasında sınırlandırılmıştır. Sıfır değeri tamamen polidispers bir örneği temsil etmekte ve bir değeri tamamen monodispers bir örneği göstermektedir. Ayrıca, MSDI, bu çalışmada sunulmuş olan üç tipik örneğin PSD verilerini doğru bir şekilde nitelendirilmişken SPAN yanıltıcı sonuçlar sunmaktadır.

Shrestha ve Paudyal (2019), bu çalışma, 2017-2019 döneminde Nepal'ın Mahakali Nehri'nden çıkarılan ince agregaların özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Mahakali Nehri, Nepal'in batı bölümü ile Hindistan arasında uluslararası bir sınır görevi olarak görülmektedir. Bu çalışma için Mahakali Nehri'nin farklı bölgelerinden kum örnekleri alınmış ve bu örnekler Kailali'deki Dhangadhi Far Western Sulama Direktörlüğü laboratuvarında test edilmiştir. Mahakali Nehri'nin ince agregalarının D50 değerinin 0.32 mm, incelik katsayısını ise 1.88 olduğu bulunmuştur. Bu da parçacıkların ince olduğunu ve iyi derecede derecelendirilmediğini gösterilmiştir.

Dobrzański ve ark. (2020), bu çalışmada, metal tozları ve alaşımları ile seramiklerin üretiminde kullanılan 47 teknoloji belirtilmiştir. Tüm bu teknolojiler, potansiyelleri ve çekicilikleri açısından karşılaştırılmış ve gelişme eğilimlerine işaret edilmiştir. Odak sadece toz üretim yöntemlerine yönelik bir çalışma olmuştur. Analiz edilen teknolojileri karşılaştırmak için bilgi mühendisliği metodolojisi kullanılmıştır

ve büyük bir teknoloji setini karşılaştırmalı analiz için görselleştirilmiş bir matriste sunma yöntemi de dâhil olmak üzere kendi bağlam matrisi yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada bulunan en ilginç zihinsel başarılar, orijinal kavramları içermektedir. Malzeme işleme teknolojileri, bunlar arasında toz mühendislik teknolojileri, bu modelde önemli bir yer tutmaktadır. Toz mühendisliğinde en çekici ve umut verici gelişme teknolojileri olarak belirlenmiştir. Toz mühendisliğini analiz etme yaklaşımının yeniliği ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, teknolojiler arasından sadece eklemeli teknolojilerin anahtar bir rol oynadığı doğru olmamaktadır. Bilgi mühendisliği alanında öncü analizler kullanılmış, toz mühendisliğinin en yenilikçi teknolojileri belirtilmiştir. Çeşitli teknolojilerde metal tozları, alaşımları ve birçok seramik türünün kullanılmasıyla ilgili olarak, bu mühendislik alanının geleneksel anlayışı olan TM uzun süre varlığını sürdürülmüş ve şu anda sadece kısmen yeterli hale gelmiştir. Mühendislerin ve bilim adamlarının yenilikleri, sürekli büyüyen iş dünyası, bu tozların tamamen veya kısmen kullanıldığı birçok küresel pazarın bileşik yıllık büyüme oranlarında önemli artışların ortaya çıkmasını gerektirilmektedir. Bu tozların şu anda bilinen, kullanılmış olan ve bu çalışmada tartışılan konulara tamamen uygun olan daha genel bir kavramın tanıtılma ihtiyacı giderilmiştir. Görünüşe göre, toz mühendisliği şu anda bu karmaşık teknoloji alanı için daha uygun bir isim almaktadır.

Keshavarz ve ark. (2020), Newtonian akışkanları ve viskoelastik sıvıların döner atomizasyondaki fragmentasyon dinamikleri incelenmiştir. Bu yaygın endüstriyel yöntemle, merkezkaç ivmesi, dönen bir kupa veya diskin kenarında oluşan sıvı halkası, Rayleigh-Taylor kararsızlığı nedeniyle tedirgin bir hale gelmektedir. Oluşan ligamentler, sıvı halkasını, dönme hızının tersine orantılı olarak ölçeklenen oldukça tekrarlanabilen bir aralıkta bırakılmaktadır. Bu sıvı iplikleri belirli bir geometrik yol boyunca hareket edilmekte ve bu yol, bir çemberin üzerinde dönerken izlediği yol belirlenmektedir. Bu olayın geometrisini bildiğinden, bu sürecin detaylı kinematikini türeterek deneysel gözlemlerle karşılaştırılmaktadır. Ligamentlerin çemberin izlediği eğri boyunca teğet olarak uzadığını ve kupa diski ile ayrıldıkça radyal olarak incelendiğini görülmüştür. Bu akışkan ipliğinin belirli bir konumda nasıl hızlandığı veya yavaşladığı, yani hızının uzay boyunca nasıl değiştiği tespit edilmiş ve dönen kupa diskten uzaklaştıkça azaldığı gösterilmiştir. Ligamentler, kupa diskten yeterince

uzaklaştıklarında, kritik kırılma hızını aşacak kadar hızlı gerilmemekte ve dolayısıyla kendi kendine parçalanarak damlalar oluşturmıştır. Bu kinematik düşünceleri, birkaç Newtonian ve viskoelastik test sıvısının bilinen özellikleriyle birleştirerek, deneysel gözlemlerle detaylı olarak karşılaştırılabilen bu ticari öneme sahip parçalanma sürecinin nicel bir anlayışı geliştirilmektedir. Ayrıca, ortaya çıkan damla boyutu dağılımları araştırılmış ve sıkıştırma süreci sırasında küçük damlalarının ortaya çıkmasının ve ikili damla boyutu dağılımlarının ortaya çıkmasına neden olduğu görülmüştür. Bu ikili dağılımlar, ana ve küçük damlalarının ayrışmaları sürecinin fiziksel özelliklerini yakalayan iki ayrı Γ dağılımının toplamı tarafından iyi bir şekilde açıklanmıştır. Dahası, daha viskoz Newtonian sıvılar veya zayıf viskoelastik test sıvıları göz önüne getirilmiş ve sıvı viskozitesinde veya viskoelastiklikteki değişikliklerin ortalama damla boyutu üzerinde ihmal edilebildiği bir etkisi olduğu gösterilmiştir. Ancak, viskoz/viskoelastik etkilerin ligamentlerde incelleme dinamiklerini geciktirdiğini ve bu nedenle daha geniş damla boyutu dağılımlarına neden olduğunu göstermektedir. Büyük ile küçük damla boyutu arasındaki oran, viskozite ve viskoelastisite ile monoton bir şekilde artmaktadır. Gözlemlenen deneysel eğilimleri rasyonelleştiren ve hem Newtonian hem de zayıf viskoelastik sıvılar için döner fragmentasyonun temel dinamik özelliklerini daha iyi anlamamasına yardımcı olan basit bir fiziksel model olarak geliştirilmiştir.

Feng ve ark. (2021), demir ve çelik endüstrisinde ana yan ürünlerden biri olan erimiş yüksek fırın cürufu, önemli miktarda yüksek sıcaklık enerjisi ve kullanılmamış kaynakları içermekte olup, bu nedenle enerji tasarrufu ve emisyon azaltıcı için ısı enerjisi geri kazanımı ve kaynak kullanımı hayati önem taşımaktadır. Su kullanımı ve verimlilik sorunları nedeniyle, geleneksel suyla soğutma atık ısı geri kazanma yönteminin, kuru son işleme teknolojileri tarafından değiştirilmesi beklenilmektedir. Bu derlemede, basit bir yapıya sahip ve büyük atık ısı geri kazanım potansiyeline sahip olan santrifüj granülasyon - fiziksel ısı geri kazanımı - kaynak kullanımı sürecine odaklanılmıştır. Santrifüj granülasyon sürecinin mekanizması, fenomeni ve etki faktörleri analitik, deneysel ve sayısal simülasyon yönlerinden tartışılmaktadır. Sıvı film kalınlığı, ligament sayısı ve damla çapı ile ilgili geliştirilmiş korelasyonlar özetlenmektedir. Santrifüj granülasyon sonrası fiziksel atık ısı geri kazanım süreci, bir akış yatağı veya hareketli yatak aracılığıyla yapılan sürekli bir soğutma işlemi

içermekte ve bu süreç sırasında cüruf taneciklerinin katılaşması ve faz evrimi her zaman eşlik emektedir. Bu da daha fazla kullanımlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Farklı fiziksel ısı geri kazanım yöntemlerinin geliştirilmesi ve soğuma sürecinde faz evrimi üzerine yapılan araştırmalar sunulmaktadır. Ayrıca cüruf taneciklerinin çimento, seramik ve kompozit faz değişim malzemeleri olarak daha ileri kullanımları özetlenmektedir.

Karastoyanov ve ark. (2022), bu çalışma, metal tozlarını erimiş ve sert metalden elde etmek için kullanılan modern teknolojik yöntemleri ve takımları göstermektedir. Metal tozu üretimi için en yaygın kullanılan atomizasyon yöntemleri gözden geçirilmekte ve tartışılmaktadır. Sonuç olarak, şu ana kadar tartışılan atomizasyon yöntemlerinin kısa bir karşılaştırması verilmiştir. Eritme yoluyla metal tozu üretimi için yöntemlerin avantajları ve dezavantajları gösterilmektedir. Bu yöntemler kullanılarak farklı boyutlarda ve şekillerde metal parçacıklarının farklı verimlilik ve fiyatlarla elde edilebileceği görülmektedir. TM teknolojilerinden herhangi biri ile parça üretme seçeneği sunulmakta ve bu seçim, teknolojinin gereksinimlerine bağlı olarak yapılabilmektedir.

Zhou ve ark. (2022), bu çalışmada, ticari 316L paslanmaz çelik (SS) tozu, ciddi oksidasyonun toz özellikleri ve bu süreçte, bir lazer ışını metal tozlarını bir yatak üzerinde eritmekte ve katmanlar halinde bir üç boyutlu nesne oluşturulmaktadır. Yani metal tozlarının lazer tarafından ısınarak erimesi ve ardından katmanlar halinde malzemenin şekillendirilmesi sürecini kapsamaktadır. Bu davranışlar, malzemenin erime sıcaklığı, soğuma hızı, katman birleşimi ve diğer faktörlerden etkilenebilmektedir. Bu tür bir üretim süreci, karmaşık geometrilik parçaların üretimi için kullanılmakta ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir metal 3D baskı yöntemi kabul edilmektedir. Ham ve oksitlenmiş tozların morfolojisi, yüzey durumu ve lazer absorpsiyonu sistemli bir şekilde karakterize edilmiştir. Bu tozların akışkanlık ve toz yatak kalitesi üzerindeki etkileri, özel olarak tasarlanmış recoating deneyleri ve toz kesme testleri ile izlenmiştir. İn situ ısılatma analizi ve mikroyapı değerlendirmesi sonuçları, toz özellikleri ile lazer füzyonu arasında bir korelasyon kurmak için karşılaştırılmıştır. Toz oksidasyonu, L-PBF işlenebilirliğini iyileştirerek tozun yayılmasının homojenliğini ve istikrarlı, ardışık lazer küresel taneciklerin oluşumunu artırarak güçlendirmiştir. Ciddi oksitlenmiş tozların LPBF işlemesi ile

düzgün bir şekilde kaplanmış ince seramik tabakalı SS alaşımı, homojen (Si, Mn) tabanlı oksitlerle takviye edilmiştir. Bu alaşımın mekanik dayanımının, ham tozlar kullanılarak işlenmiş olanına benzer olduğu bulunmuştur. Ancak uzama muhtemelen amorf oksit özelliği ve mekanik oksit-Fe ara yüzeyi nedeniyle biraz azaltılmıştır. Bu çalışma, toz geri dönüşünün sistemli bir anlayışını sunmakta ve toz oksidasyonu ve L-PBF işleminin olumlu kullanımıyla yüksek performanslı parçaların ekonomik olarak geliştirilme potansiyeli hakkında yeni bir bakış açısı sağlamaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deney Düzeni Tasarımı ve Yapılışı

Su atomizasyonla üretilen metal tozlarının karakteristik özelliklerini etkileyen değişkenler aşağıda verilmiştir;

- Metal eriğin sıcaklığı
- Metal eriğin debisi
- Motor milline monte edilmiş olan dönen su fanın hızı
- Atomize edici su fanın şekline ve kanat sayısına
- Metal tozların soğuma hızına
- Metal eriğin cinsi
- Metal eriğin, su fanından püskürtülen su ile olan yüksekliği
- Metal eriğin potanın çıkış çapı
- Metal eriğin pota içindeki eriğin yüksekliği.

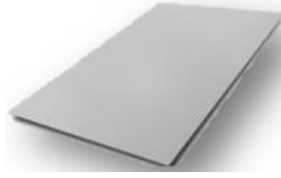
Bu çalışma, bu parametrelerin metal tozlarının özellikleri üzerindeki etkisini araştırmayı ve santrifüj atomizasyon yöntemini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu nedenle, tasarlanan kurulum bu parametreleri çeşitli aralıklarda kontrol etmelidir. Toz özellikleri üzerindeki etkilerini analiz etmek için birçok çalışma yapılmalıdır. Bu çalışma sırasında tasarlanan ve inşa edilen deney düzeneği, aşağıdaki bölümlerden oluşmaktadır:

- Isıl fırın
- Pota
- Motor ve motor milin üzerinde monte edilen su fanı (diskler)
- Eriğin metal toz haline getirilmesi ve soğutulması

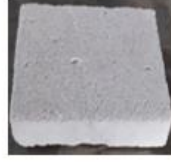
3.1.1 Isıl fırın tasarımı

Metal tozunu elde etmek için toz haline getirilmesi gereken metalin eritilmesi için ısı fırını tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu ısı fırının imal edilmesinde kullanılan malzemeler ise Şekil 3.1’de gösterildiği gibi ince demir sac, gazbeton, kanallı fırın

taşları, nikrom elektrik tel direnci, ısıl fırın elektrik bağlantısı için antigron kablo, ısıya dayanıklı porselen klemens ve izole boncuktur.



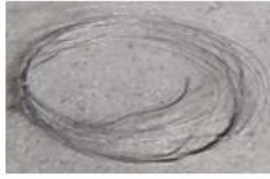
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



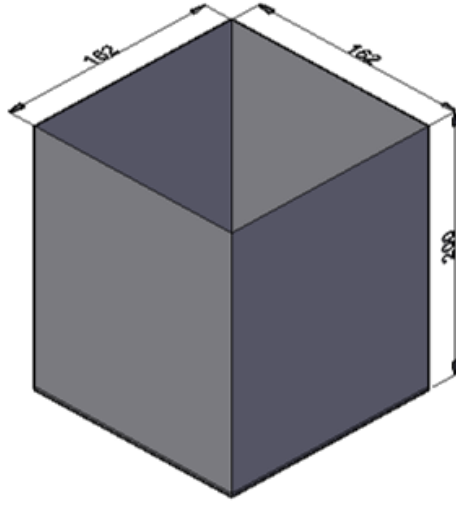
(f)



(g)

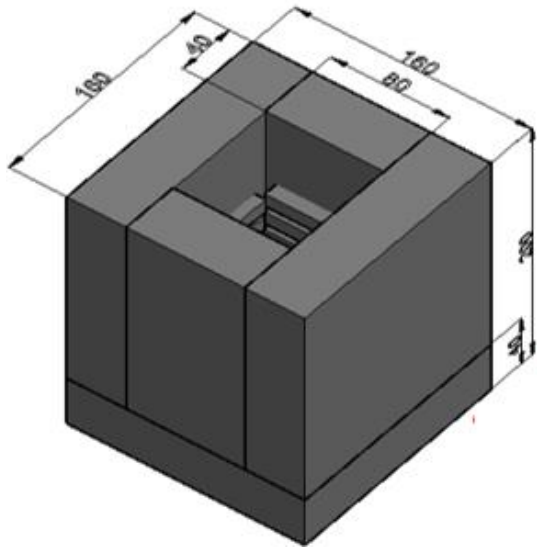
Şekil 3.1. Isıl fırın imalatında kullanılan malzemeler a) Demir sac, b) Gazbeton, c) Kanallı taşlar, d) Elektrik direnç tel, e) Isıya dayanıklı klemens, f) Isıya dayanıklı izole boncuk, g) 3x6 antigron kablo

Şekil 3.1 'de gösterilen elektrikli ısıl fırının tüm elemanları diyagramda gösterilmiştir. Metallerin ergitilmesi için silindirik demir potaların kullanılması amacıyla ısıl fırının imalatında ve tasarımında kullanılan bu malzemelerin boyutlandırılması işlemi yapılmıştır. Bu işlemler malzemelerin gerçek resimleri ve teknik çizimleri yapılarak teknik resimleri üzerine boyutlandırma çalışması yapılmıştır. Ebatları 810x200x2 olan demir sacı ebatları 162x200x2 olan dört adet sac plaka için metal sacı dört yerde büküm makinesi ile bükülmüş ve kabın taban kısmında ise ebatı 162x162x2 olan bir sac plaka kullanmıştır. Kabın yan tarafında kullanan plakanın bükülmeyen kısımlarını ve kabın tabanı için kullanılan metal sacı kaynak makine ile plakaları birleştirme işlemi gerçekleştirilmiş ve şekil 3. 2. gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Isıl fırının dış sac metal kabin boyutları

Gazbeton malzemesi ucuz, kolay işleme özelliği, ısı yalıtımı çok yüksek olması, gözenekli ve hafif oluşu, hacim olarak yaklaşık %.75 gözenekli, yoğunluğu düşük, ısı iletkenliği çok düşük olması nedeniyle bu metal tozu üretiminde yalıtım malzemesi olarak kullanılmıştır. Isıl fırın kabını imal edildikten sonra ısıl fırın kabının tabanı ve duvarları yalıtım malzemesi (gazbeton) ile kapatılmıştır. Ebatları 160x160x40 olan 3 adet gazbeton plaka ısıl fırın iki kenarına ve taban kaplanmasından kullanılmış ve kaplanamayan ısıl fırın kabının diğer kısımlarını ise ebatları 80x160x40 olan gazbeton plakaları ile kapatılmıştır. Gazbeton plakların bir araya getirilmesi ve boyutlandırması Şekil 3.3’ te gösterilmiştir.

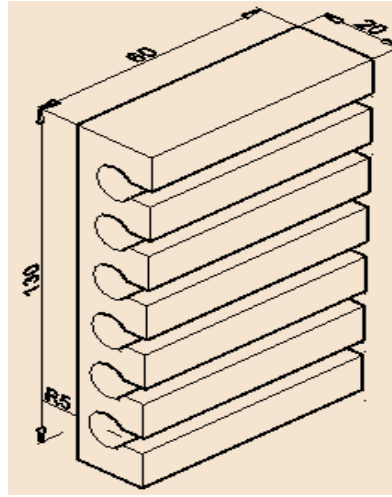


Şekil 3.3. Gazbeton plakların bir getirilmesi ve boyutlandırması

Isıya dayanıklı tuğla (ateş tuğlası), ısıf fırının tasarlanmasında kullanılan bir refrakter seramik malzeme plakasıdır. Bu tuğlaların düşük ısı iletkenliğine sahip olması, ısıyı fırında tutması ve yüksek sıcaklıklara dayanmasından dolayı bu çalışmada kullanılmıştır. İmal edilmiş olan elektrikli fırın için kullanılan ateş tuğlaları 60 x 130 x 20 mm boyutlarında ve Şekil 3.4’te gösterilmiştir.



a)



b)

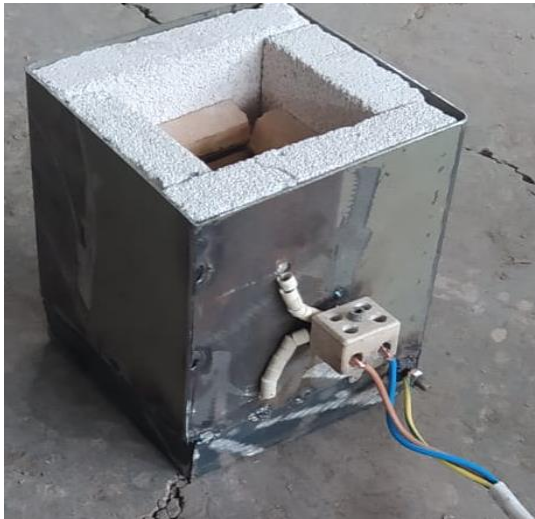
Şekil 3.4. Isıya dayanıklı fırın taşı, (a) resmi ve (b) teknik çizimde boyutları

Ateş tuğlalar ısıf fırında kullanılmak üzere temin edilmiştir. Bu ateş tuğlalar, dikdörtgen ısıtma odasını elde etmesi şeklinde düzenlenmiştir. Ateş tuğlalarından açılan kanallarda ısıtma telini yukardan aşağıya doğru altı tur döndürmesi ile gerçekleşmiştir. Dikdörtgen ısıtma odası oluşturmak için toplam dört ateş tuğlası kullanılmıştır. Isıtma telinin hazne içinde altı tur olacak şekilde döşenmesini kolaylaştırmak için Şekil 3.5’te gösterildiği gibi üst üste gelecek şekilde dairesel kanallar açılmıştır.



Şekil 3.5. Elektrik direnç tellerinin taş fırını kanallarına geçirme ve hacim oluşturma getirme

Isıl fırın taşların kanallarından elektrik direnç teli geçirilme işlemi gerçekleştirildikten sonra fırın taşlarını dikdörtgen şekline dönüştürülüp sıkı geçme yöntemi ile gazbeton plakaları arasına yerleştirilmiş ve gazbeton plakalarını ısıl fırın kabın içeresine konumlandırılıp, elektrik bağlantısı yapılmış ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Bu elektrik bağlantısında nikrom tel direncini 2 mm çaplı izole seramik boncuklardan geçirilip elektrik çarpması önlenmiş ve ısıl fırının dış tarafında monte edilen seramik klemens ile bağlantısı sağlanarak elektrik bağlantısı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6. Elektrik bağlantısı yapılmış ısıl fırını

Bu çalışmada imal edilen ısıl fırın 1200°C sıcaklığa kadar dayanma kapasitesine sahiptir. Metal erime noktası 1200°C düşük olan metalleri eritmektedir. Bu sıcaklığa

dayanabilen ısıtıcı eleman seçimi olarak nikrom ısıtıcı direnci kullanılmıştır. Bu nedenle elektrikli fırın için ısıtma teli olarak nikrom teli seçilmiştir. Nikrom bir nikel-krom alaşımıdır. 1200°C'ye kadar ısıtmak için kullanılabilen rezistans esaslı elektrikli ısıtma telidir. Nikrom, yüksek elektrik direncine ve çok iyi oksidasyon direncine sahiptir. Isıl işlem, seramik, cam, çelik ve elektronik endüstrileri için yüksek sıcaklık fırınlarında elektrikli ısıtma elemanı olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Isıl fırında kullanılan nikrom teli 1.5 mm çapında olup Şekil 3.7'de gösterilmiştir. 2500 W güç kapasiteli fırını yapmak için elektrik direncine göre aşağıdaki hesaplamalar yapılmıştır. 2500 W'lık bir fırın için, ısıtıcı için bir ısıtıcı elemanın tasarımı yapılmıştır. Isıl elemanın tasarımı limite gitme şartı ile tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarımın hedefi seçilecek olan ısıtıcı direncinin çapı ve uzunluğu hesaplanmaktadır. Isıl elemanın hesaplanmasından kurulu elektrik güç (P) ve elektrik gerilimi (V) ısıtma teli boyunca gereken toplam akım düşüşü miktarı bilinirse, ısıtıcı elemanın sıcaklığı (T) ve ısıtıcı elemanın öz direnci (ρ) termodinamik tablolardan alınır. Bu hesap için elektrik direnci tarafından üretilen enerjinin tümünü ışıma ile olan ısı enerjisiye dönüştürüldüğünü kabul edilmiş yaklaşımı ile hesaplanmıştır. Bu çalışmada ısıtıcı direnç telin malzemesi olarak nikrom elektrik teli seçilmiştir. Isıtıcı direnç tel sürekli hal sıcaklığına ulaştığında, elektrik kaynağından ürettiği elektrik güç miktarını hepsini ısı olarak yayar. Yani bu tasarım tüm ürettiği elektrik enerjisini ısı olarak dışarı verir. Isıtıcı direnç telin sıcak yüzeyi tarafında yayılan ısı ışıma ile yayılan ısıdır.

Isının üretildiği elektrik gücü;

$$P = V \cdot I \quad (3.1)$$

Denklem (3.1) deki P(watt) elektrik V(volt) elektrik gerilimi ve I(amper) elektrik akımını gösterir. Bilinen güç ve gerilimden elektrik akımı bulunur.

$$I = \frac{P}{V} \quad (3.2)$$

Elektrik gerilimi ve akımı bilinen ısıtıcı elemanın direnci

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.3)$$

Şekil 3.5 deki ısıtıcı elemanın direnci

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3.4)$$

Burada, R direnç (Ω), ρ ısıtıcı direnç telinin öz direnci ($\Omega.m$), l iletken uzunluğu (m) ve A ısıtıcı elemanın kesit alanı (m^2)'dır.

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (3.5)$$

d ısıtıcı elemanın çapıdır (m).

Denklem 3.4'tü değişkenler cinsinden aşağıdaki gibi yazabiliriz;

$$R = \frac{4\rho l}{\pi d^2} \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)'da R bulunur, ρ bilinir. Ancak d ve l bilinmiyorsa. Denklem (3.6) bilinmeyenler cinsinden yazılması (Çengel,2011).

$$\frac{l}{d^2} = \frac{\pi R}{4\rho} \quad (3.7)$$

Isıtıcı elemanın gerilimi

$$V = I \cdot R \quad (3.8)$$

Denklem(5.1), Denklem(5.4) ve Denklem (5.6)' dan yeni ısıtıcı elemanın güç eşitliği elde edilir.

$$P = \frac{\pi d^2 V^2}{4\rho l} \quad (3.9)$$

Elde edilir.

Isıtıcı yüzeyinde yayılan ısı;

$$q_r = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \sigma (T^4 - T_\infty^4) \quad (3.10)$$

Denklem (3.10) Stefan-Boltzman olarak bilinir. (q_r), ışınlama olan ısı geçişi (W/m^2), (ε_1) Işınlama (neşretme) katsayısı, (ε_2) ışınlama verimliliği ve (σ) Stefan-Boltzman katsayısıdır.

Isıtıcı elemanın yanal alanı

$$A_{\text{yanal}} = \pi d l \quad (3.11)$$

Denklem (3.9), Denklem (3.10) ve Denklem (3.11)'den

$$\frac{d}{l^2} = \frac{4\rho q_r}{V^2} \quad (3.12)$$

elde edilir.

Denklem (3.7) ve Denklem (3.12)'in çözümünde ısıtıcı elemanının çapı (d) ve ısıtıcı elemanın uzunluğu (l) hesaplanır. Bu ısıtıcı için seçilen nikrom tel direncin termofiziksel özellikleri (ε_1) Işınım (neşretme) katsayısı $\varepsilon_1 = 0.9$, (ε_2) ışıyım verimliliği $\varepsilon_2 = 0.6$, ρ ısıtıcı direnç telin öz direncidir. $\rho = 1.016 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ve (σ) Stefan-Boltzman katsayısı ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} (W/(m^2 \cdot K^4))$).

Nikrom termofiziksel tabloda dayanabileceği maksimum sıcaklık $1200^\circ C$, çevrenin hava sıcaklığı $25^\circ C$, elektrik gücü $P = 2500W$ ve elektrik gerilimi $V = 220 volt$ olarak bilinmektedir. Bu verilen eşitliklerle Denklem (3.7) ve Denklem (3.12)'nin çözümünde, ısıtıcı elemanının çapı (d) ve ısıtıcı elemanın uzunluğu, $d = 1mm$ ve $l = 17300mm$ olarak bulunur.

Bu direnç telden bükme için bir spiral dönüş sayısı hesaplamak gerekir. Bu telin bir dönüş uzunluğu,

$$l_1 = \pi(D + d/2) \quad (3.13)$$

Bir trans tele bükülen dönüş sayısı (Krestovnikov ve ark,2020).

$$N = l/(\pi/(D + d/2)) \quad (3.14)$$

Burada l ve d telin uzunluğu ve çap, D spiral üzerine sarılacağı trans telin çapıdır. Bu teli 9 mm'lik bir demir trans çubuğa sardığımızdan Denklem (3.13) ve Denklem (3.14)'den yararlanarak telin sarım sayısının 580 olduğu bulunmuştur. Şekil 5.7a'da gösterilen 1.5 mm nikrom tel direnci, torna tezgahına bağlanmış 9 mm çapında ve 170 mm uzunluğunda trans demir çubuğa sarılarak spiral haline getirilmiştir.



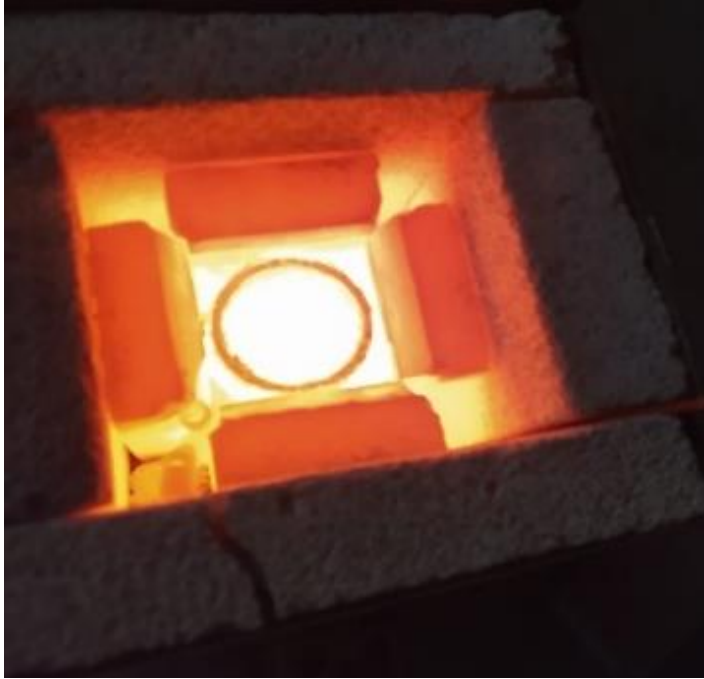
a)



b)

Şekil 3.7. a) Nikrom teli, b) Nikrom telin spiral durumuna getirilmesi

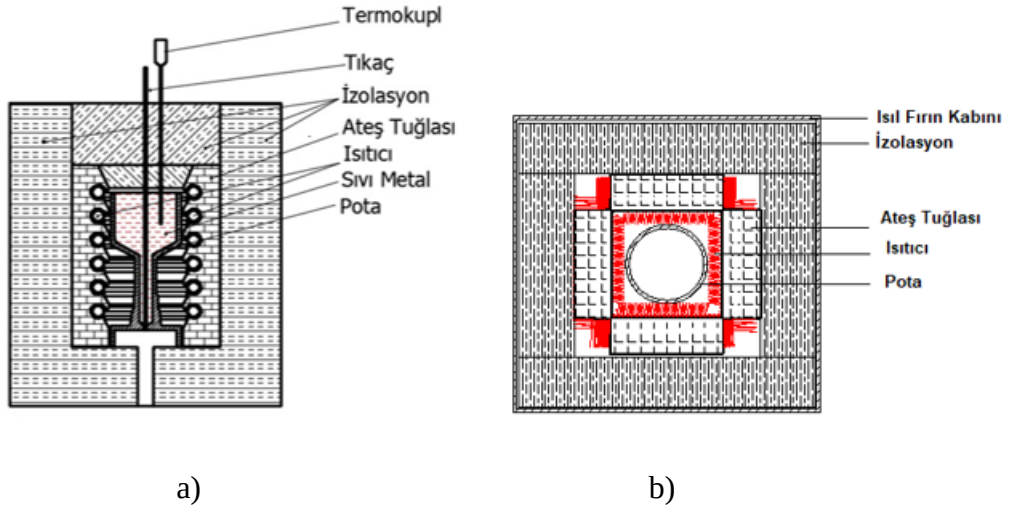
Isıl fırının elektrik bağlantısı gerçekleştirildikten sonra ısıl fırının çalıştırıldığı durum Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Isıl fırının aktif olduğunda iç görünümü

Isıl fırını önde ve üste görünüşleri şekil 3.9.’da gösterilmiştir. Burada ısıl fırın üzerinde bulunan malzeme ve cihazlar detaylandırılmıştır. Bu malzeme ve cihazlar; pota, tıkaç, termokupl ve termokupl sıcaklığını ekranında dijital olarak gösteren zaman ve sıcaklık ölçme cihazıdır. Kullanılan pota metal eriğin erimesine kullanmak için demir metalinde silindirik şeklinde imal edilmiş olan bir kaptır. Tıkaç ucu potada açılmış olan değişik çaplardaki deliklerde erimiş olan metal eriğin pota dışına çıkmasını önlenmek için ucu sıvrılmış demir bir çubuktan imal edilmiştir. Sıcaklığı ölçmek için kullanılan termokupl K-tipli bir termokupldur.

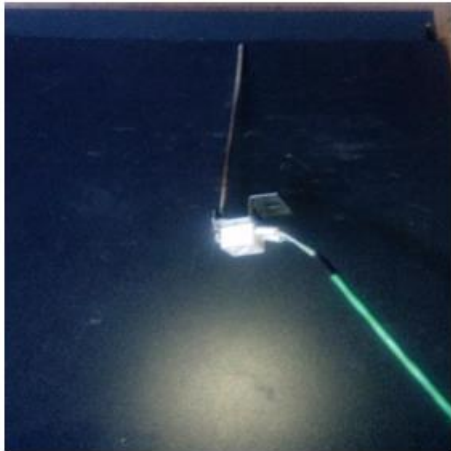
Isıl fırının tasarımında zaman ve sıcaklık önemli bir role sahiptir. Bunun için termokupl sıcaklık sensörlü kontrol ve ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 3. 10).



Şekil 3.9. Isıl fırının a) ön, b) üst görünüşleri

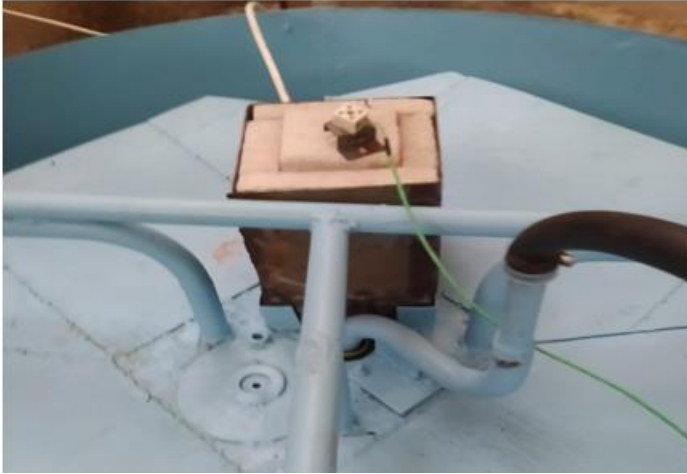


Şekil 3.10. Sıcaklık kontrol ve ölçüm cihazı



Şekil 3.11. Termokupl ve kullanılan prob

Sıcaklık probu, 1200 °C sıcaklığa kadar ölçüm yapabilmekte ve gazbeton kapakta açılan bir delikten metal eriğinin bulunduğu potanın içine yerleştirilmiştir. Potanın içindeki ortam sıcaklığını kontrol etmek amacıyla Şekil 3.11’de görüldüğü gibi prob montajı yapılmıştır. Bu ortamda okuduğu sıcaklık değerlerini dijital olarak cihaz üzerinde bulunan ekranda gösterilir. Burada kullanılan termokupl ve sıcaklık-zaman ölçeri Nabertherm firması tarafından imal edilmiştir. Tamamen imal edilmiş olan ısı fırını Şekil 3.12’de gösterilmektedir. Isıl fırını ilk kez kullanmadan önce fırının kurutulması 800°C’ye kadar ısıtılarak yapılmıştır. Daha sonra normal olarak oda sıcaklığına soğumaya bırakılmıştır. Bu işlem ateş tuğlalardaki su içeriğini veya nemi gidermek, ısıtma elemanını sertleştirmek ve ateş tuğlaların şeklini kalıcı olarak sabitlemek için yapılmıştır.



Şekil 3.12. İmal edilen ısı fırının deney düzeniği üzerinde montajı

3.2. Pota Tasarımı

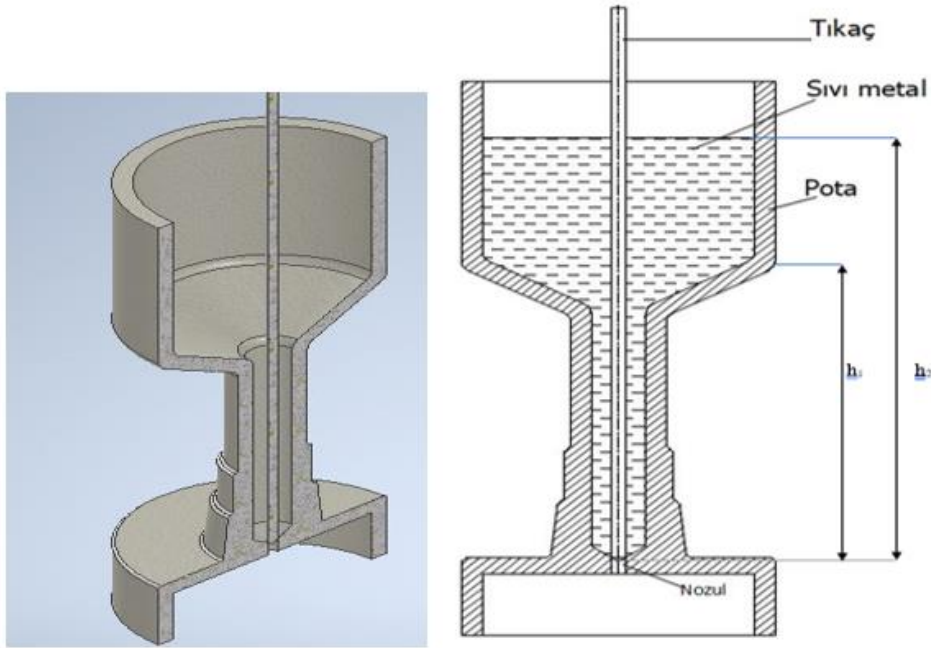
Su atomizasyon yöntemi ile metal tozu üretimini gerçekleştirmek için önemli bir unsur da metal malzemenin eritilmesidir. Metal eritmek için demir malzemedan farklı çap ve boyutlarda potalar tasarlanarak üretilmiştir. Bu çalışmada kullanılan bazı potalar Şekil 3.13’de gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Farklı boyutlarda imal edilmiş potalar

Öncelikle potanın malzemesi seçilmiş, daha sonra potanın ebatlama işlemi yapılmış ve potanın üretimine geçilmiştir. Bu çalışmada ısıyı iyi iletmesi ve yüksek sıcaklıklara (1500°C) dayanabilmesi nedeniyle pota, demir malzemesinden imal edilmesi tercih edilmiştir.

Boyutlandırma sürecinde iki durum dikkate alınmıştır. Öncelikle pota duvarı mümkün olduğunca ince bir et kalınlıkta olması arzulanmış ve direkt olarak ısıl fırından gelen ısı enerjisinin pota duvarlarından hızlı bir şekilde geçerek malzemeyi kısa sürede eritmesi sağlamaktır. İkinci boyutlandırmada dikkate alınan ölçüt, metal eriğin akışını etkileyen parametrelerden biri olan pota giriş ve çıkışı arasındaki yükseklik farkıdır. Pota tasarımında dört önemli değişken dikkate alınmıştır. Birincisi ısıl fırının hacmi, ikincisi potadaki eriğin akışkan özellikleri (viskozite, yüzey gerilimi, ısı iletimi ve ısı dağılımı), üçüncüsü akışı etkileyen pota duvarlarının pürüzlülüğüdür. Eriğin miktarı, potanın enine kesitindeki ani büzülme ve genleşme, potanın pota giriş ve çıkışındaki çapları ve dördüncüsü potanın mekanik özellikleridir. Potanın bir özelliği olan potanın mukavemeti ve ağırlığı dikkate alınmış ve pota içerisindeki metal eriğin yüksekliğinden dolayı metal eriğin basıncını ve debisini kontrol etmeye elverişli bir şekilde tasarlanmıştır. Pota, ısıl fırının hacim ölçülerine göre boyutlandırılmıştır. Potanın boyutlandırması Şekil.3.14’de gösterilmiştir.



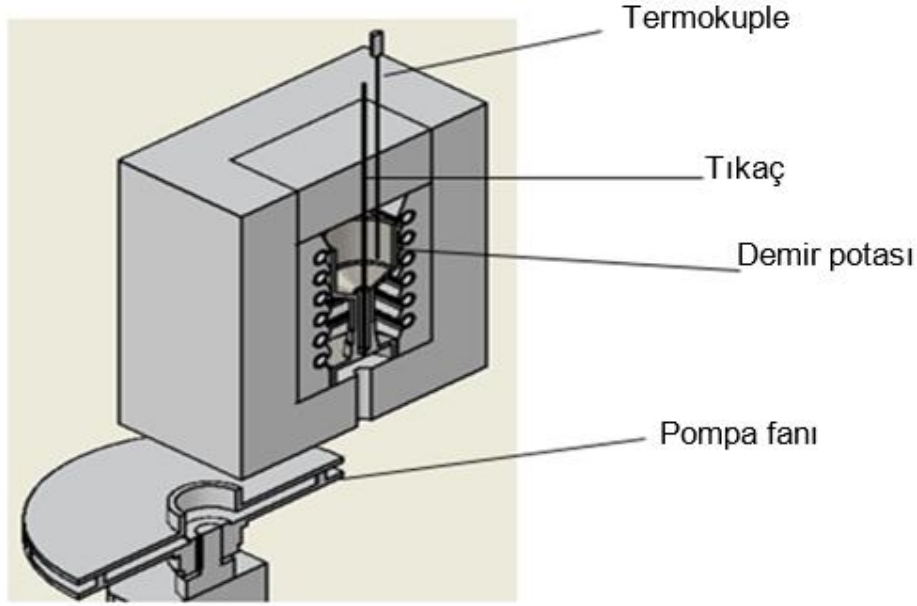
Şekil 3.14. Demir potanın iki ve üç boyutlu kesitleri

Potanın boyutlandırılması ve imalatı için pota çapı 50 mm ve uzunluğu 130 mm olan trans-demir malzemeden imal edilmiştir. Bu malzeme torna aynasına takılarak gerekli işlemler yapılmıştır. Söz konusu malzemede iç çapı 40 mm ve derinliği 35 mm olan silindirik bir oyuk kazılmış ve bu silindirik deliğin devamı konik delik olarak yapılmıştır. Bu konik oyuk, üst kısmın iç çapı 40 mm olan ve derinliği 35 mm olana kadar oyulmuş ve alt kısmın iç kısmı 11 mm olana kadar sürekli daraltılmıştır. Bu gediğin dış çapı 15 mm, iç çapı 11 mm ve derinliği 45 mm olup, gediğin en alt kısmının ortasına 1,5 mm'lik bir delik açılarak potadan metal eriğin pota dışına akması sağlanmıştır. Pota tabanındaki farklı çıkış delik çaplarında eriğin akış hızını incelemek için ayrı parçadan yapılmış bir nozul potaya kolayca sökülüp takılabilmesi için tasarlanmıştır. Ucu sivriltilmiş bir tıkaç ile metal eriğin nozuldan dışarı akması önlenmiştir. Metal eriğinin potadan kısa sürede dışarı akabilmesi için eriğin basıncını artırmak gerekir. Bu, eriyik basıncını artırmak ve metal eriğin giriş ve çıkış yüksekliği mümkün olduğunca yüksek tutulmuştur. Erime sıcaklığına ulaşıldığında, tıkaç elle çıkarılarak eriğin nozulun çıkış deliğinden akması sağlanmıştır. Metal eriğinin akış davranışını etkileyen viskozite, eriğin sıcaklığı arttıkça azalır. Bu nedenle, metal eriğinin akış direnci artan sıcaklıkla azalır. Ek olarak, metal eriğinin aşırı ısınma sıcaklığı, eriğin yüzey gerilimini büyük ölçüde azaltmıştır. Metal

eriyiğinin sıcaklık ve akış hızının metal tozlarının karakteristik özellikleri üzerindeki etkileri deney tezgâhında farklı sıcaklık ve akış hızlarında çalıştırılarak incelenmiştir.

Metal eriyiğindeki ısı kaybının neden olduğu sıcaklık düşüşü, metal eriyiğinin daha fazla ısıtılması ve düşen eriyiğin sıcaklığının yükseltilmesiyle telafi edilmiştir. Bu ısı kaybı, metal eriyiğinin fiziksel özelliklerine, ortam sıcaklığına, ısı geçişinin türüne ve metal eriyiğinin boyutuna bağlıdır. Metal eriyiğinin yüzey alanı-ağırlık oranı azaldığından, metal eriyiği miktarı azalırsa ısı kaybı artar. Bu nedenle, metal eriyiğinin sıcaklık kontrolü, az miktarda metal eriyiğinin miktarını azalmasıyla kaybedilen ısı nedeniyle kararsız hale gelir.

Bu çalışmada 150 g erime kapasitesi, taneciklerin tüm özelliklerini gösteren metal tozlarından numune almak için yeterli bir miktar olarak kabul edilmiştir. Metal eriyiğinin dökülmesi sırasındaki sıcaklık düşüşü çok yüksektir. Metal eriyiğinin sıcaklığındaki küçük değişiklikler, metal tozu özelliklerini etkileyen önemli değişkenler olan metal eriyiğinin viskozitesinde ve yüzey geriliminde büyük değişikliklere yol açar. Bu nedenle erime noktası 1200°C'nin altında olan malzemeler demir potada eritilmiştir. Bu çalışmada ısıtılma fırın ve demir potası aynı sistem içerisinde. Isıtılma fırın ve pota sistemi püskürtme diski üzerine monte edilmiştir. Düşük ergime sıcaklığına sahip sıvı metalleri belli bir yükseklikte ergime potasından aşağıya dökülmek suretiyle yüksek devirli motorun miline monte edilen pompa fanın merkezine su akıtıp döner pompa fanın kanallarından tazyikli bir şekilde püskürtülmüştür. Dökülen sıvı metale çarpıp sıvı metali çok ince metal tozu haline getirme işlemi için düzenek imal edilmiş ve bu durum şekil 3.15'de gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Demir pota ve pompa fanının kesiti

Pota, 70 dakikada 1200°C sıcaklığa ulaşabilen 2500 watt elektrik gücüne sahip ısıtıl fırında ısıtılmaktadır. Metal eriyiğinin sıcaklığını düzenlemek ve izlemek için sıcaklık kontrolörü (termokupl) kullanılmıştır. Termokupl metal eriyiğinin sıcaklığını ölçmek için ısıtıl fırının sıcaklığı doğrudan demir potaya yerleştirilmiştir. Karşılaştırma, metal eriyiğinin sıcaklığını $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ 'lik bir doğrulukla kontrol etmek için başka bir dijital elektronik termokupl ile yapılmıştır. Potanın alt kısmında bir nozul bulunur. Nozulun çıkışı, potanın akışını ve metal eriyiği kontrol etmek için bir tıkaç ile kapatılmıştır. Pota içindeki metal eriyince tıkaç çekilir ve nozulun çıkışı ağzından metal eriyik akması sağlanmıştır. Metal eriğin herhangi bir andaki akış debisi

$$Q = C_d \frac{\pi d^2}{4} (\sqrt{2gh}) \quad (3.15)$$

Bu çalışmada 150 g erime kapasitesi, taneciklerin tüm özelliklerini gösteren metal tozlarından numune almak için yeterli bir miktar olarak kabul edilmiştir. Metal eriyiğinin dökülmesi sırasındaki sıcaklık düşüşü çok yüksektir. Metal eriyiğinin sıcaklığındaki küçük değişiklikler, metal tozu özelliklerini etkileyen önemli değişkenler olan metal eriyiğinin viskozitesinde ve yüzey geriliminde büyük değişikliklere yol açar. Bu nedenle erime noktası 1200°C'nin altında olan malzemeler demir potada eritilmiştir. Bu çalışmada ısıtıl fırın ve demir potası aynı sistem

içerisindedir. Isıl fırın ve pota sistemi püskürtme diski üzerine monte edilmiştir. Bu sistemde metal malzeme eritilir, sıcaklığı istenilen sıcaklıkta tutulur ve daha sonra eriyiğin akış hızında dönen püskürtme diskine istenilen metal dökülür. Pota, 70 dakikada 1200°C sıcaklığa ulaşabilen 2500 watt elektrik gücüne sahip termik fırın sisteminde ısıtılmaktadır. Metal eriyiğinin sıcaklığını düzenlemek ve izlemek için sıcaklık kontrolörü (termokupl) kullanılmıştır. Termal fırının sıcaklığı doğrudan demir potaya sokularak C_d memenin katsayısı, d memenin çapı ve h metal eriyiğinin toplam yüksekliğidir. Atomizasyon sırasında akış hızı sabit tutulmalıdır. Akış hızı, memenin çapı değiştirilerek ve metal eriyiğinin toplam kafasının etkisi azaltılarak ayarlanabilir. Bu nedenle nozul ayrı bir parça olarak yapılır. Memeyi, farklı meme çapına sahip yenisiyle değiştirerek çıkarmak kolaydır. Metal eriyiğinin akış hızı üzerindeki kafa etkisi, Şekil 3.15'de gösterildiği gibi demir pota çapının küçültülmesiyle azaltılır. Pota boyutuna bağlı olarak, başlık h_1 'den h_2 'ye düştüğünde memedeki basınç değişimi %10'dur. C_d değerleri nozul geometrisine ve erime hızına bağlıdır. C_d değerleri metal eriyiğinin azalan akış hızı ile artar. Bu nedenle, basma yüksekliğin etkisi ve C_d etkisi birbirini dengelemelidir ve metal eriyiğinin akış hızı sabit kabul edilebilir.

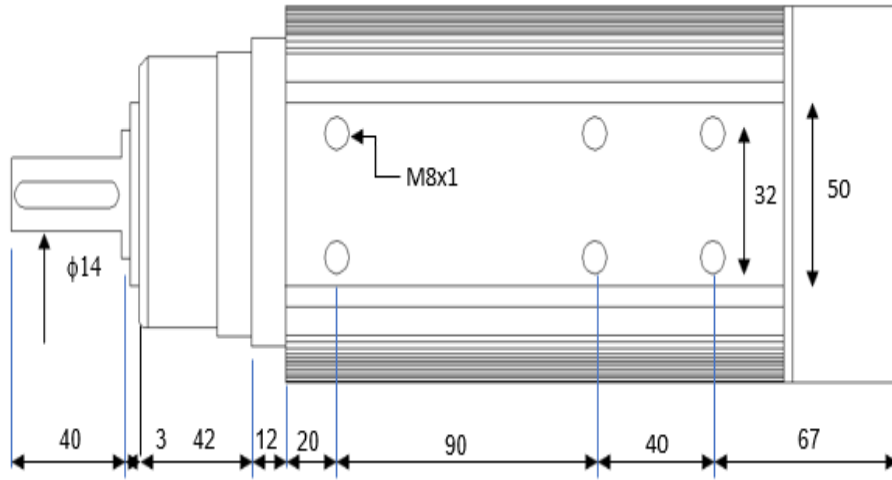
3.3. Pompa Fanı Sürücü Sisteminin Tasarımı

Su atomizasyon yöntemiyle üretilen metal tozların karakteristik özellikleri etkileyen en önemli değişkenlerden biri su püskürtülmek için motor miline monte edilen pompa fanın hızıdır. Metal tozu üretilmek için hazırlanan deney düzeneğinde kullanılan motor ve motor miline monte edilmiş olan pompa fanın su püskürtme hızı çok yüksek olmalı ve metal tozların farklı hızlarda incelemek için de motor bir sürücü ile ayarlanabilir olmalıdır (Doğan, 1989). Hız kontrollü yüksek hızlı elektrik motor bu çalışmada kullanılmıştır (Şekil 3.16).



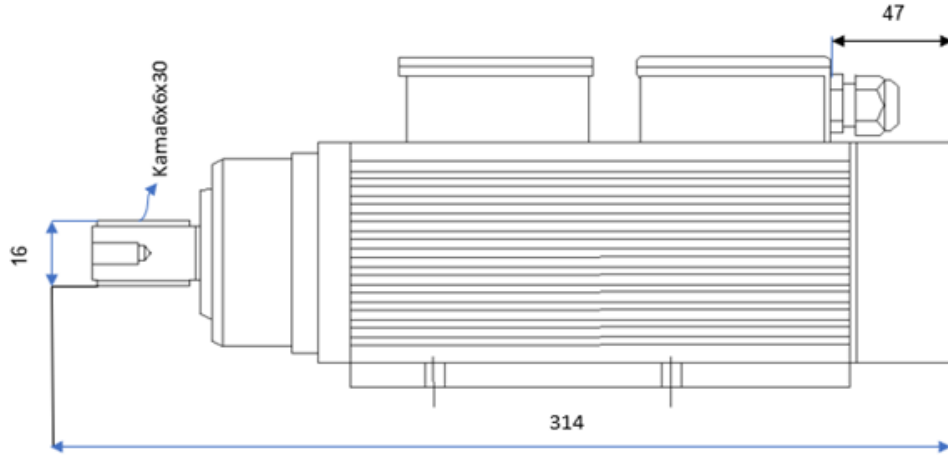
Şekil 3.16. Su püskürtmede kullanılan yüksek devirli motor

Motorun yan tarafı dikdörtgen şeklindedir ve üzerinde 6 adet cıvata yuvası vardır. Bu dikdörtgen şekli üzerine aynı büyüklükte ve cıvata yuvalarını hizasında gelecek şekilde bir demir plaka monte edilmiştir ve demir plaka üzerinde cıvata yuvaların çapına eşit büyüklükte 6 delik açılarak motorun montajı sağlanmıştır. Motorun yan tarafı üzerinde montaj için açılan cıvata yuvaları Şekil 3.17’de gösterilmiştir.



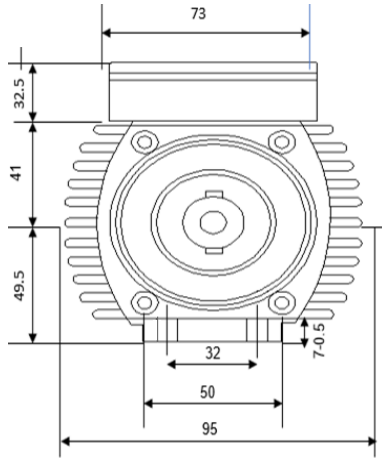
Şekil 3.17. Motor üzerindeki cıvata yuvaları

Yüksek devirli motorun elektrik bağlantısı ve motor mili üzerinde kama yeri teknik çizimi üzerinde şekil 3.18.’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Motorun elektrik bağlantısı ve mil üzerindeki kama

Motorun üste görünüşünün teknik çiziminde görüldüğü gibi motorun üzerinde açılan 4 adet cıvata yuvasına metrik 10 cıvatalarla uçayak üzerinde montajı gerçekleştirilmiş ve motorun üst görünüşünü şekil 3.19’da gösterilmiştir.



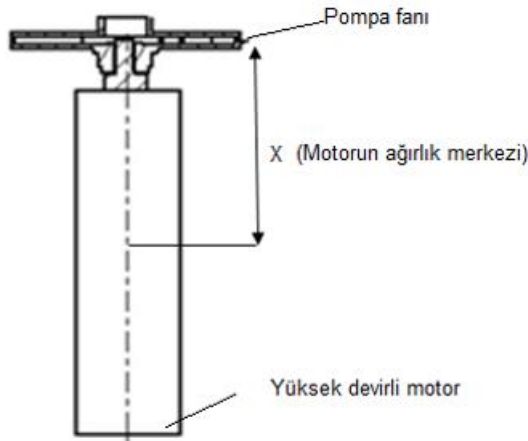
Şekil 3.19. Motorun üst görünüşü

Kullanılan yüksek devir motor hertz firması tarafından üretilen bir motordur. Bu motorun gücü 3000 Watt, gerilimi 400 volt, frekansı 300 hertz ve devri 18000 rpm. Bu devir motor sürücü tarafında 24000 rpm yükseltmektedir. Yüksek devirli motorun sürücüsü şekil 3.20.de gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Yüksek devirli motorun sürücüsü ve kontrol kutusu

Yüksek devirli motoru üreten firma tarafında geliştirilen bir grafikte motor devir sayısının motor ağırlığı ve motorla birlikte dönen aletlerin ağırlığı merkezi Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Yüksek devirli motora etkiyen değişkenlerin ağırlık merkezi

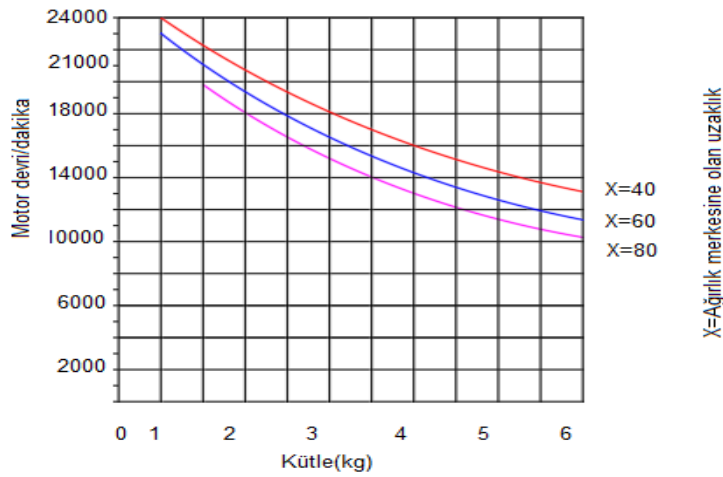
- X mesafesi hesaplanması için burada motor artı motor miline monte edilen pompa fanının ağırlık merkezi, bağlantı elemanı kullanılan kama ve cıvata ağırlık merkezi ile hesaplanmıştır.

- X ölçüsü takımın tam boyu değildir. Alet tutucu ile hesaplanması gereken ağırlık noktasıdır.

Bu deneyde farklı disk (pompa fanı) kullanılması durumları incelenmiştir. Bu durumlar, pompa fanının içinde hiç su bulunmadığı durum için devir sayısının 25000 devir/dakika olduğu motor sürücüsü ekranında tespit edilmiş ve pompa fanının tam debi ile çalıştığında 10000 devir/dakika olduğu motor sürücü ekranında gösterilmiştir.

Pompa fanın maksimum- minimum su debilerin farklı durumları için motor devir sayıları 10000-25000 devir/dakika arasında değerler görüldüğü saptanmıştır. Deney esnasında yüksek devirli motorun çalışmasına belirgin bir şekilde etki ettiğini not edilmiştir. Yani yüksek devirli motor üzerinde kıyas edilen sonuçlar grafikte gösterilmiştir. Deney esnasında motora etki eden ağırlık değişkenleri pompa fanı, pompa fanın yüksek devirli motora montaj için kullanılan bağlantı elemanları, kama ve cıvata, püskürtme değişkeni için kullanılan suyun ağırlığıdır. Bu ağırlıkların yüksek devirli motor devrine etkisi Şekil 3.22’de gösterilmiştir. Motor devrinin metal eriğin daha küçük taneciklere dönüşmeye yol açmıştır.

Satın alınan yüksek devirli hertz motor kılavuzunda alınan devir-ağırlık değişimi Şekil 3.22’de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Yüksek devirli motorun devrinin motora etkiyen ağırlıkla değişimi

Bu deneyde kullanılacak motorun montajını yapabilmek için öncelikle Şekil 3.23’de gösterildiği gibi üç bacaklı bir düzenek oluşturulmuştur. Üç bacak üstüne ortasına motor girebilecek şekilde 5 mm kalınlığında sacdan kesilmiş bir kare kullanılmıştır. Bu düzeneğin üç bacaklı olarak tasarlanmasının amacı ise motorun çalışması esnasında oluşacak kuvvetlerin dengelenmesidir. Bu üçayak pabuçlarına üç adet plastik takoz takılarak yüksek devirli motora gelen titreşimleri sönmünlmesine çalışılmıştır. Bu tür yüksek devirlerde çalışan motorların kendi kendini parçalayana kadar çalışma özelliklerine sahip olduğundan dolayı motorun çalışma koşulları için uygun bir yataklama ve bağlanma sistemi geliştirilmiştir. Motorun yan taraflarında

dikdörtgen şeklinde bulunan altı adet civata yuvasına altı adet civata ile deney düzeneği üzerine tutturulmuştur. Şekil 3.17’de gösterilen motor düzenek üzerine yataklanmıştır.



3.4. Metal Eriğin Toz Haline getirilmesinde Kullanılan Pompa Fanı ve Kanatlı diskler

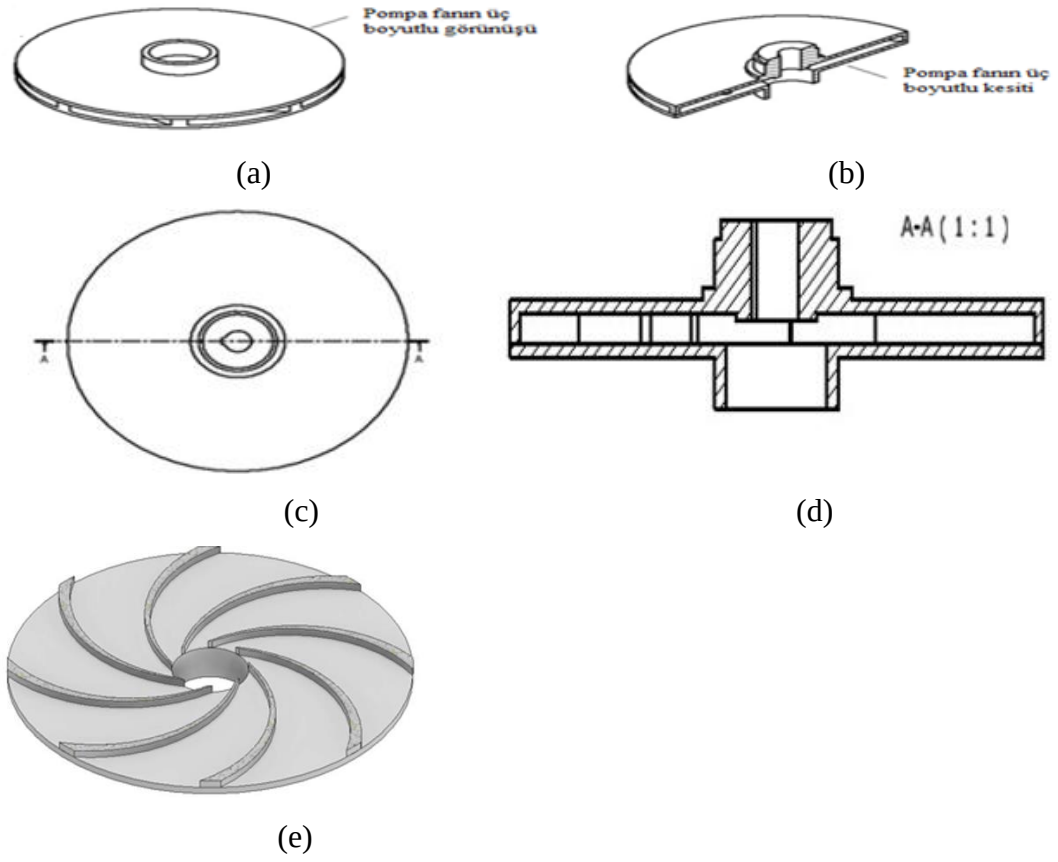
Bu çalışmanın amacı, düşük ergime sıcaklığına sahip sıvı metalleri belli bir yükseklikte ergime potasından aşağıya döktürmektir. Yüksek devirli motorun miline monte edilmek için, farklı boyutlarda, kanallı döner disk ve pompa fanları makine fabrikasında imal edilmiştir. Sözü edilen kanallı diskler ve pompa fanların merkezine su akıtıp döner diskin kanallarından tazyikli bir şekilde püskürtüp, dökülen sıvı metalle çarpıp sıvı metalli çok ince metal tozu haline getirme işlemidir.

Bu çalışmada farklı büyüklüklerde pompa fanları kullanılmıştır. Bu kanatlı diskler ve pompa fanların merkezi çapları aynıdır. Çünkü merkezi çapı ile yüksek devirli motorun mil çapı eşit olduğundan dolayı merkezi çapları eşit büyüklüktedir. Fakat bu dişler ve pompa fanların dış çapları farklı büyüklükte imal edilerek metal tozların üretimi üzerinde etkileri incelenmiştir. Bu pompa fanları kanat sayıları, kanatların yüksekliği ve kanatların genişliği toz boyutlarına olan etkileri incelenmiştir. Bu incelemeleri yapmak için Şekil 3.25 ve Şekil 3.26’da gösterildiği gibi makina fabrikasında dönen kanatlı disk ve pompa fanları tasarlanmış ve imalatları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.25. Su püskürtülmesinde kullanılan pompa fanların resmi

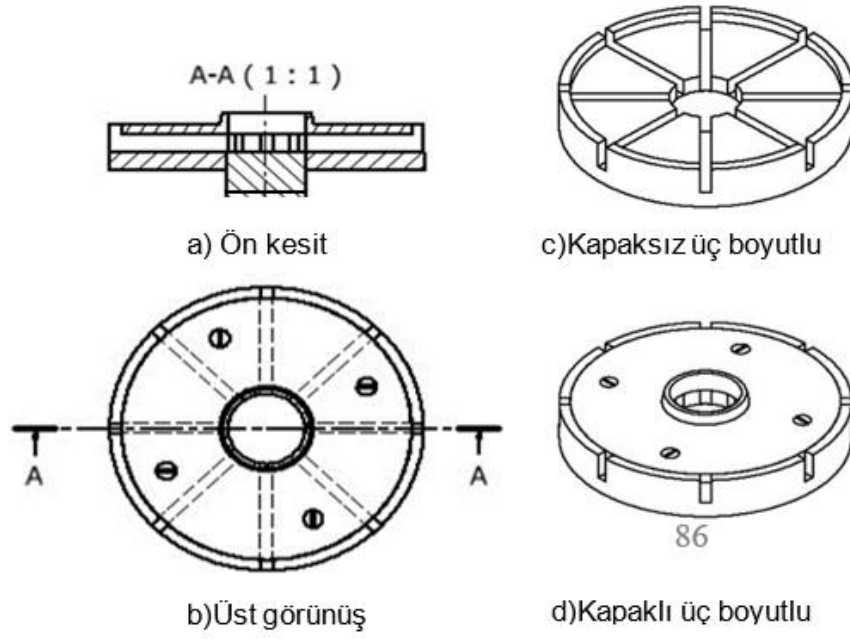
Bu pompa fanların teknik çizimleri ve detayların Şekil 3.26.'da gösterilmiştir.



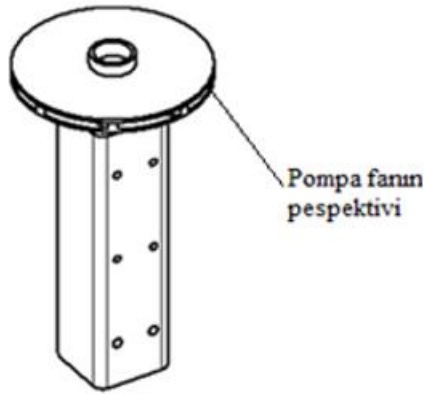
Şekil 3.26. Pompa fanının (a,e) üç boyutlu, (b,d) ön kesit ve (c) iç yapısı görünüşleri



Şekil 3.27. Kanatlı disk üst, ön kesit ve üç boyutlu iç yapısı

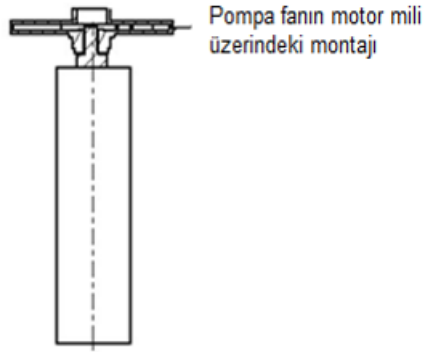


Şekil 3.28.Kanatlı diskleri değişik görünüş çizimleri



Şekil 3.29. Yüksek devirli motor ve pompa fanı

Şekil 3.26a'da teknik resmi gösterilen pompa fanının Şekil 3.29'da teknik resmi gösterilen yüksek devir motor üzerine cıvata ile kama bağlantı elemanları ile montajı sağlanmıştır. Bir başka görünüşte motor ve üzerine montaj yapılmış pompa fanının kesiti Şekil 3.30'da gösterilmiştir.



Şekil 3.30. Yüksek devirli motor ve üzerinde monte edilen pompa fanının kesiti

Bu çalışmada, düşük ergime sıcaklığına sahip sıvı metalleri belli bir yükseklikte ergime potasından aşağıya döktürmek için yüksek devirli motorun mili Şekil 3.30'da gösterilmiştir. Monte edilen pompa fanının merkezine su akıtıp döner pompa fanının kanallarından tazyikli bir şekilde püskürtüp, dökülen sıvı metallerle çarpıp sıvı metali çok ince metal tozu haline getirme işlemidir. Yeni tip dönerli pompa fanı motorun miline monte edilmiştir. Yüksek devirlerde çalışan motorların çalışması esnasında yük ile devir ters orantılı bir şekilde değişmektedir. Bu çalışmada gerekli olan yüksek devri elde etmek için pompa fanının ağırlığı mümkün oldukça düşük tutulmaya çalışılmıştır. Pompa fanının balansı kaymaması için gerek tornadaki işlemler gerekse frezedeki işlemler tek işlenerek gerçekleştirilmiştir.

3.5. Deney Düzenekinin Tasarımı ve İmalatı

Santrifüj atomizasyonu yöntemi yardımı ile düşük ergime noktasına sahip metallerin eritilerek metal tozu elde edilmesi gerçekleştirilmiştir. Daha önce imalatı ve tasarımı yapılmış olan yüksek devirli motor, yüksek devirli motorun miline monte edilen su fanı, ısıtıl fırın, demir potası gibi deney düzenek parçaları bir araya getirilerek deneylerin yapılacak konuma getirilmiş ve genel deney düzenekinin resmi Şekil 3.31'de gösterilmiştir.



Şekil 3.31. Metal toz üretimi için deney düzeneği

Bu deney düzeneği bir sistem olarak kabul edilirse deney sisteminde bulunan cihazlar ise yüksek devirli motor sürücüsü, debi ölçer ve termokupldur. Metal toz deney düzeneğinde kullanılan cihazların resmi aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Şekil 3.32’de gösterilmiş olan yüksek devirli motorun 10000-24000 d/dk. aralığında motor devrini dijital olarak ekranında gösteren bir cihazdır. Şekil 3.33’da gösterilen debi cihazı metal eriğin toz haline getirilmesi ve soğutulması için kullanılan suyun debisini dijital olarak ölçen bir cihazdır.



Şekil 3.32. Yüksek devirli motor sürücüsü



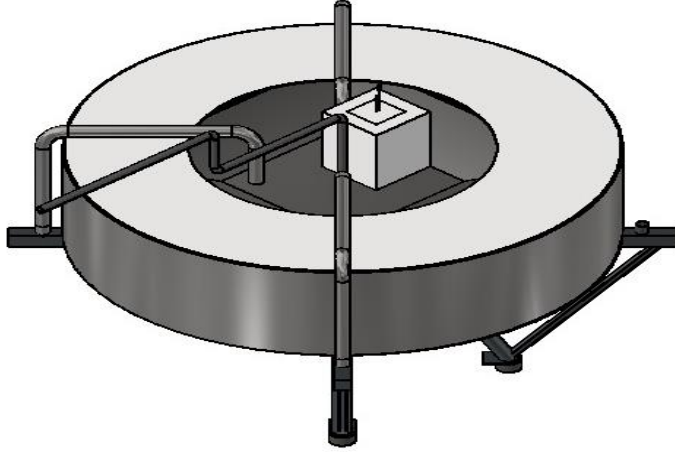
Şekil 3.33. Su debi ölçeri

Şekil 3.34’da gösterilen çalışma grafiğinde iki sıcaklık kademesi ve beş sıcaklık aralığı mevcuttur. Termokupl sıcaklık ve zaman ayarları isteğe bağlı olarak bir bekleme süresiyle başlar. Daha sonra t_1 zaman aralığı cihaza tanıtılır. Bekleme ve t_1 zaman aralığı boyunca sıcaklık artar. Bu sıcaklık değeri, t_1 olarak ayarlanan süre boyunca verilen sıcaklık değerine kadar artar. Bu t_1 süresi ve T1 sıcaklık değeri sırasıyla cihaza tanıtılır. t_2 zaman aralığında T1 sıcaklığı sabit kalır. t_3 zaman aralığı ile T2 sıcaklık kademesi sırasıyla girilir. Bu değerlerin girilmesiyle fırının sıcaklığı t_3 süresinde artarak T2 sıcaklık değerine ulaşır. t_4 zaman aralığı boyunca T2 sıcaklığı sabit kalır.

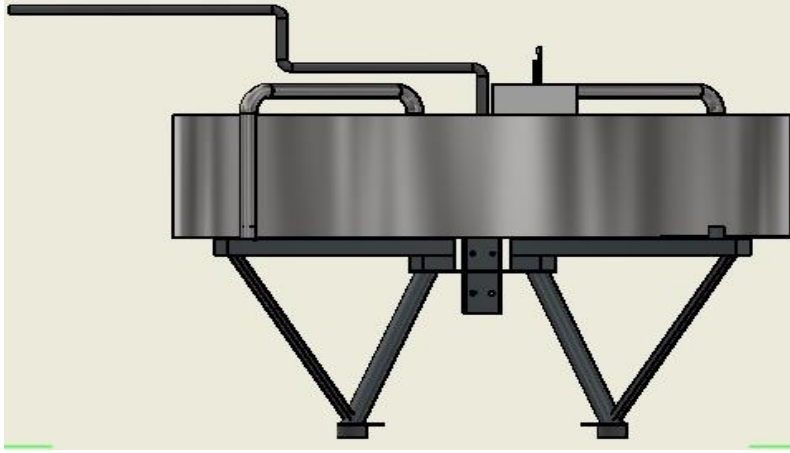


Şekil 3.34. Metal eriğin sıcaklığı ve zamanı gösteren ölçüm ve kontrol cihazı

Deney düzeneği teknik resminin detayları Şekil 3.35 ve Şekil 3.36’da gösterilmiştir. Can güvenliği sağlamak için deney düzeneğinin üçayak üzerinde montajı yapılmış ve metal tozların toplanacağı silindirik bir davlumbaz monte edilmiştir. Silindir davlumbazın üstü ince saç levha ile kapatılmıştır. Bu kaplama yüksek devirli motor üzerinde monte edilen pompa fanında püskürtülen suyun davlumbaz dışına çıkması önlenmiştir. Isıl fırın saç levha üzerinde monte edilmiştir. Bununla metal eriğin belli uzaklıkta getirilmesi esnasında erikte meydana gelen soğutma önlenmiştir.

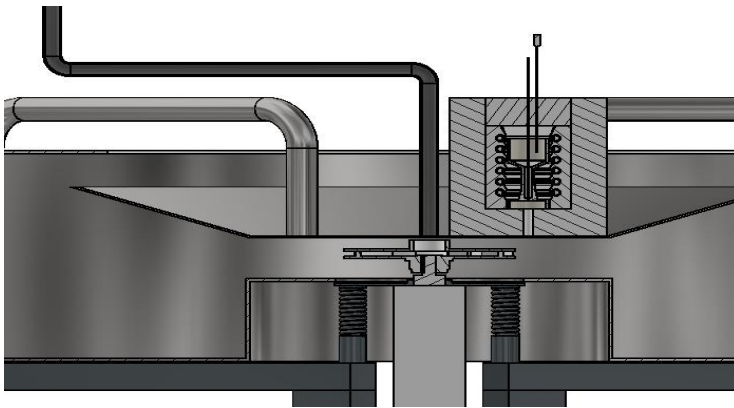


Şekil 3.35. Metal toz üretimi için deney düzeneği



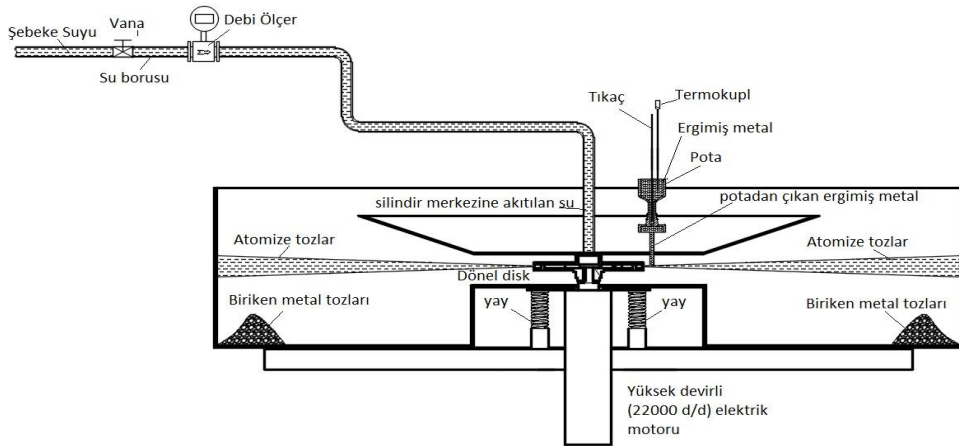
Şekil 3.36. Deney tezgâhın ön görünüşü ve silindir metal saç

Tüm parçaların ayrıntılı bir şekilde detaylandırmak için deney tezgâhının üzerinde monte edilen su fanı ile ısıtıl fırının bir kesiti alınmış ve Şekil 3.37’da gösterilmiştir.



Şekil 3.37. Deney tezgâhı üzerinde monte edilen pompa fanı ile ısıtıl fırının kesiti

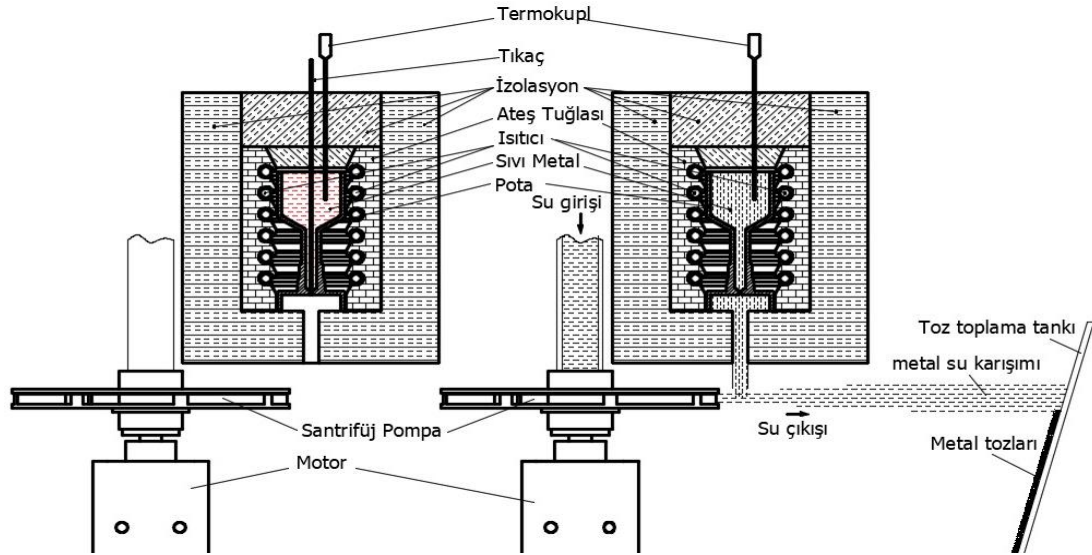
Motor üzerine yerleştirilen diskin yüksek devirlerde çalışması esnasında, diskin yerinden fırlaması ihtimaline karşılık hem çevreyi, hem de deney yapacak elemanların güvenliğini sağlamak amacıyla metal davlumbaz Şekil 3.35 ve Şekil 3.36'da gösterilmiştir. Motor etrafına 1300 mm yarıçapında 2 mm kalınlığında saç metal silindirik haline getirilerek motoru çevreleyecek şekilde yerleştirilmiş ve aynı zamanda toz haline getirilen metal tozların birikildiği yer olarak kullanılmaktadır. Motordaki titreşimleri azaltmak için yüksek devirli motor deney tezgâhı üzerine bağlanmış yaylar bulunmaktadır. Erimiş metalin motorun dönmesi esnasında aşağıya doğru dökülmesi için ısıtıl fırın ve merkezine yerleştirilen pota deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Potada açılan delik ile ısıtıl fırının alt kısmında açılan delik aynı doğrultudadır. Böylece potadan akacak metal eriğin ısıtıl fırının merkezinden açılan delikten geçerek ve su fanında püskürtülen su çarparak metal tozu haline getirilmiştir. Deney tezgâhının tümü Şekil 3.38.'de detaylandırılmıştır.



Şekil 3.39. Deney tezgâhı tüm detayları

Şekil 3.40'da gösterildiği gibi bir elektrik motoru vasıtasıyla yüksek devirde döndürülen kanallı su fanının merkezinden giren su, merkezkaç kuvvetinin etkisiyle hızla savrulmaktadır. Düşey olarak akıtılan metal eriğin yatay doğrultuda hızla savrulan suların çarpmasıyla atomize edilmektedir. Suyu yüksek hızda santrifüj yöntemiyle savrulabilmek için elektrik motoru tarafından döndürülen kanallı bir disk kullanılmıştır. Bu amaç için yüksek devirli (0-18000 dev/dk. 400 Volt, 3000 Watt) seri tip elektrik motoru kullanılmıştır. Kanallı disk iki parça olarak yapılmıştır. Su, su fanının

üst parçasının merkezinde bulunan dairesel kanaldan girmektedir. Suyun girişte kanallara eşit olarak dağılmasını sağlamak için alt parçanın merkezine konik bir parça yerleştirilmiştir. Bu şekilde giren su kanallara eşit olarak dağılarak merkezkaç kuvvetiyle yatay olarak savrulmaktadır.



Şekil 3.40. Deney tezgâhında ısıf fırın ve yüksek devirli motorun bir başka görünüşü

Motor düşey doğrultuda monte edilerek kanallı su fanı, bir ara bağlantı parçası(kama) ile motor miline bağlanmıştır. Ara bağlantı parçası motor miline sıkı geçirilerek cıvata ile tespit edilmiştir. Alt parça ara bağlantı parçasına iki kademeli bir saplama ile bağlanmıştır. Motor saat yönünün tersi istikametinde döndüğü için çalışma esnasında parçaların kütleli ataleti, bağlantılara sıkıştırma yönünde etki yapmadığından ek bir bağlantıya ihtiyaç duyulmamıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1.Deneysel Sonuçlar

Deneyde kullanılan ve demir malzemesinden yapılan farklı potaların kapasiteleri 50 gram ile 75 gram arasındadır. Söz konusu potaların alt kısmına farklı çaplarda nozüller takabilme özelliği vardır. Demir pota ısıtılma fırının içine monte edilmiş ve potanın içine düşük ergime sıcaklığına sahip metal çubukları eritilip metal erime işlemi gerçekleştirilmiştir. Metal eritme işlemi gerçekleştirildikten sonra metal eriğin toz haline getirilmesi için farklı boyutlarda demir diskler tasarlanıp imal edilmiştir. Bu disklerin döndürülmesi ve atomize işlemi için yüksek devirli elektrik motoru temin edilmiştir. Bu motorun miline dönen atomizer disk montajı sağlanmıştır. Tüm imalat işlemleri, pota, nozül ve farklı ebatlardaki diskler Harran üniversitesi bünyesinde faaliyetini sürdüren Makine Fabrikası'nda üretilmiştir. Bu metal eriği, metal tozuna dönüştürülmesi esnasında, metal tozun karakterine etki eden bazı parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler şu şekilde sıralanabilir;

- a) Sıvı malzemelerin sıcaklığına bağlı olan viskozitesi ve yüzey gerilimi
- b) Atomize diskinin dönme hızı
- c)metal eriğin debisi
- d) Atomize diskinin tasarımı
- e) Atomize tozların soğutulması

Deneylerde, düz kanatlı ve kavisli kanatlı atomizer diskler kullanılmıştır. Yeni kanatlı tip diskler farklı boyutlarda tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu iki farklı diskler kullanılarak metal tozlarının özelliklerini belirlemek amacıyla çeşitli koşullarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, ana değişkenler olarak disk türü, eriyik malzemesinin sıcaklığı ve debisi, su debisi ve atomizer diskin dönme hızı seçilmiştir.

4.1.1 Toz üretimi ve ortalama parçacık hesaplanması

Toz parçacık ürünlerinin karakterizasyonu genellikle toz parçacık boyut dağılımı (PSD) ve gözeneklilik ölçümünü kapsamaktadır. Aynı zamanda toz yığının yoğunluğu

ve toz yığın ürünün reolojik davranışı (genellikle malzemenin viskozite, elastisite, akışkanlık ve diğer özelliklerini içermektedir) gibi özellikleri de değerlendirilmektedir. Toz minerallerin seçmeli üretimi için, yüzey özelliklerinin iyi bilinmesi büyük önem arz etmektedir.

Tozdan elde edilen toz kalite ihtiyaçları genellikle ürün özelliklerinde belirtilmektedir. Parçacık boyutu nanometre, mikrometre, milimetre veya hatta santimetre aralığında olabilmektedir. Tipik olarak, ürün özellikleri parçacık boyutu ve boyut dağılımı ile ilgili bir gerçeklik olmaktadır. Bazı parçacık ürünlerin dar bir boyut dağılımına sahip olduğu görülmektedir. Kristal şeker, 1 mm civarında dar bir boyut dağılımına sahip olan ve bu nedenle kolay akışa izin veren iyi bir örnektir, bu, 1 µm civarındaki partiküller içeren toz şekeriyle karşılaştırıldığında ortaya çıkar. Ancak, çoğu endüstriyel malzeme genellikle geniş bir boyut dağılımına sahiptir. Eğer tüm parçacıklar bir ürünün davranışına ve performansına katkıda bulunuyorsa, o zaman bir tür ortalama boyut, sayı, alan veya hacim temelli özelliklerle ilişkilendirilmelidir. Ancak bazı ürünlerde bu daha az anlamlı olabilmektedir. Bu durumda, büyük veya küçük parçacıkların yığın halinde bulunması durumunda performansın kötüleştiği durumlar olmaktadır. Örneğin, taşlama tozundaki birkaç büyük parçacık, alt tabakada çiziklere neden olabilmekte ve çikolatada tane hissi yaratabilmektedir. Diğer yandan, küçük miktarlarda bulunan oldukça küçük parçacıklar, büyük parçacık sayılarına karşılık geldiğinde, filtrenin tıkanmasına neden olarak filtrasyonu engelleyebilmekte veya insanlar için sağlık sorunlarına veya toz patlamalarına neden olabilmektedir. Parçacıkların inceliği ve parçacık boyutu dağılımlarının genişliği farklı uygulama alanlarında farklı şekillerde tanımlanmakta ve standartlaştırmış şekli aşağıdaki Çizelge 4.1. ve Çizelge 4.2’de gösterilmiştir (Merkus ve Meesters, 2016).

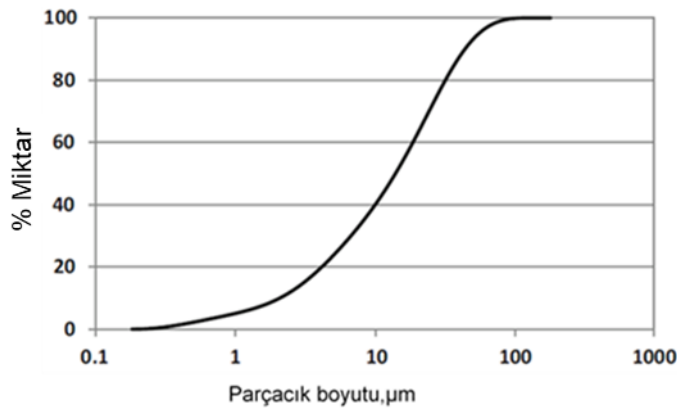
Çizelge 4.1. Parçacıkların inceliği ve parçacık boyutu dağılımlarının genişliği

Parçacık inceliği(D ₉₀)		Parçacık boyut dağılımı PSD)(D ₉₀ /D ₁₀)	
Nanoparçacıklar	<0.1µm	Tek boyutlu	<1.02 (ideal=1.00)
Son derece ince	0.1-1 µm	Son derece dar	1.02-1.05
İnce	10-100 µm	Dar	1.05-1.5
Orta	10-1000 µm	Orta	1.5-4
İri	1-10mm	Geniş	4-10
Çok iri	>10mm	Çok geniş	>10

Çizelge 4.2, farklı parçacık boyut aralıklarındaki parçacıklar için kullanılan toz terimleri

Malzeme tozu	Boyut aralığı	Örnekler
İri kuru toz	5-100mm	Kömür, agregalar, vb
Granüller kuru toz	0,3-5 mm	Granüller şeker, pirinç
İri toz	100-300µm	Sofra tozu
İnce toz	10-100µm	Pudra şekeri
Aşırı ince toz	1-10µm	Yüz pudrası
Nano parçacık	1-100nm	Kuantum noktaları

Bir örnek olarak, Portland (sıvı bağlayıcı madde)çimentosunun boyut dağılımı Şekil 4.1'te gösterilmiştir. Portland çimentosu, tektip parçacık dağılımına sahip olduğu görülmektedir. $D_{10,3}=2\mu\text{m}$, $D_{50,3}=14\mu\text{m}$, $D_{90,3}=45\mu\text{m}$. Bu dağılımın hacmi %90'ı, 2 µm'den büyük ve %10 hacimce 45 µm'den büyüktür. Ayrıca, PSD küçük boyutlu uca doğru bir miktar uzama eğilimi göstermektedir.



Şekil 4.1. Portland çimentosunun kümülatif boyut dağılımı (lazer difraksiyon sonuçları)

Çoğu endüstriyel malzemenin parçacık şekli neredeyse eşit uzunluk, genişlik ve kalınlıkta gösterilmektedir. Yani bir en-boy oranına yakın olan bir yön oranına sahip olmaktadır. Bu parçacıklara izomerik veya düzenli parçacık denir. Bazı parçacıklar ise hava veya emülsiyondaki damlacıklar gibi hatta küresel olabilmektedir. Ancak, fiberler, iğneler veya plakalı parçacıklar gibi aşırı şekillere sahip istisnalar da bulunabilmektedir. Örneğin, birçok ilaç iğnelerde kristal hiline gelebilmektedir. Bu durumda, parçacık şeklinin etkisi, örneğin özel optik etkileri, akış kabiliyetini azaltmak veya azaltılmış (iğneler) veya artırmış (fiberler) ürün dayanıklılığı sağlama yoluyla, boyuttan daha belirgin olabilmektedir. Başka bir özellik, parçacıkların gözenek içermesi durumu olmaktadır. Bu, görünür parçacık yoğunluğu azaltılmakta ve erişilebilirse, özellikle kataliz için büyük ölçüde yüzey alanını artırmaktadır. Bu özellik, örneğin kataliz için önemli olmaktadır.

Bir kürenin boyutu genellikle çapı üzerinden kolayca belirlenmektedir. Düzlemsel olmayan parçacıklar için, boyut genellikle eşdeğer bir kürenin çapı olarak verilmektedir. Bu da ölçüm prensibine ve kullanılan enstrümana bağlıdır. Çizelge 4.3’de bazı eşdeğer çap örnekleri verilmektedir. Sadece basit veya daha az aynı geometriye sahip olan parçacıklar ve diğer nesneler için, temsil için uzunluk, genişlik ve/veya kalınlık kullanılmaktadır (Merkus ve Meesters, 2016).

Çizelge 4.3. Eşdeğer çaplar veya parçacık boyutları

Aerodinamik parçacık boyutu	1000 kg/m ³ yoğunluğa sahip, parçacıkla aynı aerodinamik özelliğe sahip olan bir kürenin (Stokes çapı) çapı.
Eşdeğer ışık yayılma çapı	Aynı ışık yayılma özelliklerine sahip olan bir kürenin (veya kürelerin) çapı
Eşdeğer izdüşümü alan çapı	Partikülün izdüşümü ile aynı alanı olan bir dairenin çapı.
Eşdeğer elek çapı	Aynı ortalama elek açıklığından geçen parçacıkların eşdeğer hacim çapı (yakın-mesh boyutu)
Eşdeğer hacim çapı	Parçacık ile aynı hacme sahip bir kürenin çapı.
Hidrolik parçacık boyutu	Stokes çapı, 2650 kg/m ³ yoğunluğunu varsayarak bir (sediment) parçacık çapı.
Stokes çapı.	Stokes kanunu (viskoz akış koşulları) altındaki yoğunluk ve çökme hızına sahip olan bir kürenin çapı

Parçacık boyutu dağılımları ve şekli ölçmek için farklı prensiplere dayanan birçok araç bulunmaktadır (Merkus, 2009). Eğer parçacık şekli genellikle küresel olmaktan saparsa, eşdeğer küre çaplarının kullanılması, farklı prensiplere dayalı tekniklerden gelen parçacık boyut dağılımı (PSD) ölçüm sonuçları arasında önemli farklara neden olabilmektedir. Ayrıca, PSD sonuçlarının temeli de farklılık gösterebilmekte, bazen parçacıklar birer birer ölçülmekte, PSD sayılar üzerine dayanmakta (örneğin, mikroskopi durumunda), bazen parçacıklar boyut fraksiyonlarına ayrılmaktadır. Bu fraksiyonların kütleleri ölçülür (örneğin, elemeli tarama), bazen ise kolektif davranış bir model aracılığıyla hacim (örneğin, lazer difraksiyon) veya dalgalanarak saçılan ışık yoğunluğu (örneğin, dinamik ışık saçılma) prensiplerine dayalı olarak yorumlanmaktadır. Bu farklılıklar, geniş dağılımlar için PSD eğrileri arasında büyük farklara neden olabilir. Çünkü sayı, vb. birim kütleye parçacık boyutuna büyük ölçüde bağlı olmaktadır.

Örneğin, Parçacıkların sayıya dayalı ve hacme dayalı parçacık boyut dağılımı (PSD) sonuçları arasındaki büyük farklar Şekil 1.4'te gösterilmiştir. Bu üründe, küçük parçacıkların %1 hacmi içinde %50'den fazlası yer almaktadır ve üst %10 hacmin sadece yaklaşık %0.2'sini temsil etmektedir. Ölçülen sonuçlar arasındaki daha fazla fark, ölçüm tekniğinin büyük en-boy oranına sahip parçacıkların yönelimi konusunda bir tercih içermesi veya aynı prensibi kullanan ancak donanım veya yazılım açısından farklı olan enstrümanlar kullanıldığında ortaya çıkabilmektedir.

Tipik şekil karakterizasyonu genellikle sadece bir veya iki ana şekil özelliğine odaklanmaktadır. Genellikle, uygulama için yüzey alanı, porozite ve gözenek boyutu dağılımı gibi nicel özellikler kullanılmamaktadır. Diğer şekil özellikleri çoğunlukla nitel veya yarı nicel bir şekilde açıklama verilmektedir, örneğin (kısa) lifler veya keskin, açılı parçacıklar gibi (Merkus ve Meesters, 2016).

Parçacık şekillerin karakteristikleri şunları içermektedir.

-Makro-şekil özellikleri: Parçacıkların 3-boyutlu formuyla ilişkili özellikler (uzunluk, genişlik ve kalınlık gibi). Örneğin en-boy oranı olarak ifade edilen özellikler olmaktadır.

-Meso-şekil özellikleri: Yuvarlaklık ve köşelilik gibi genel görünümlele ilişkilendirilmiştir.

-Mikro-şekil özellikleri: Parçacıkların pürüzlülüğü, düzlüğü, porozite, gözenek boyutu dağılımı ve diğer yapısal heterojenliklerle ilişkilendirilmiştir.

Bir malzemenin parçacık boyutu ve şekil özellikleri için belirlenen temel özelliklerle bağlantılı kalitesi şu şekilde ifade edilebilmektedir:

- PSD tipi, yani monomodal, bimodal, multimodal
- Parçacık boyutu aralığı, genellikle D_{10} ve D_{90} olarak ifade edilir (PSD temeline bağlı olarak sayı, alan, hacim vb. ile ilişkilendirilen ek bir altsimge)
- Ağırlıklı ortalama boyutu
- Belirtilen bir boyutun üzerindeki aşırı (fazla) miktarın veya belirtilen bir boyutun altındaki eksik (az) miktarın maksimum izin verilmiş olan miktarı veya bir veya daha fazla belirlenmiş olan boyut sınıfındaki minimum ve/veya maksimum miktarı
- Normal, log-normal, Rosin-Rammler veya Gaudin-Schumann gibi modellendirilmiş bir dağılımın parametreleri
- Birim hacim veya kütle başına yüzey alanı
- Gözeneklilik ve gözenek boyutu dağılımı
- Belirli bir parçacık şekli ve şekil homojenliği, örneğin, küreler, küpler, yuvarlatılmış, köşeli, lifler, bazen en-boy oranı, uzama, yapraklık, yuvarlaklık gibi bir parametre ile birlikte

En uygun tanımlayıcılar ve ölçüm yöntem(leri), tercihen literatüre, standartlar veya kendi araştırmalarınıza dayanmalıdır. Genellikle, ek özellikler de şu şekilde belirtilmelidir: yığın yoğunluk, renk, kontaminasyon derecesi, akışkanlık ve çözünme süresi gibi.

Sıkça kullanılmakta olan ortalama boyut D_{50} , ürün kalitesi ile doğrudan bir ilişkisi olmayan bir PSD istatistiksel parametresidir. Örneğin, parçacık şekli ve PSD genişliği dikkate alınmamaktadır.

PSD (Parçacık Boyutu Dağılımı) parametreleri, ürün performansı ile ilişkilendirilmesi ve karakteristik, boyutsuz sayılar içinde temsil edilmesi için (iyi bir

neden olmaksızın) sıklıkla seçilmektedir. Bu sayıların içinde Reynolds veya Weber sayısı gibi. Unutulmamalıdır ki, eğer açıkça belirtilmiyorsa, bu sayılarda PSD parametresinin tipi gizlenmiştir. Yukarıda bahsedilen ortalama boyut, böyle bir yanlış kullanımın bir örneği olmaktadır. Dahası, eğer parçacıklar düzensiz bir şekle sahipse, eşdeğer küre tipi belirtilmemişse bu sayılarda PSD parametresinin tipinin belirtilmediği bir durum söz konusu olabilmektedir ki bu durum büyük ölçüde ölçüm prensibine ve enstrümana bağlı olabilmektedir. Bu bağımlılık hakkında, verilen bir ürünün optimum PSD özelliklerini belirlemek için en uygun ölçüm tekniği ve enstrümanın seçilmesi önemli olmaktadır. Optimum ürün performansı ile bağlantı güçlü olmaktadır ve bu nedenle ölçüm aracının hassasiyeti, çözünürlüğü, duyarlılığı ve kararlılığı, ürün kalite gereksinimleri ile uyumlu bir şekil olunmalıdır.

Bu sorun, süreç kontrolü durumunda çok daha az ciddi olunmaktadır. çünkü bu, üretim yerinde tek bir enstrümanla gerçekleştirilirken, süreç beslemesi oldukça sabit ve süreç koşulları dar marjlar içinde tutulmaktadır. Bu koşullarda, neredeyse herhangi bir PSD parametresi, PSD kaymalarına karşı küçük süreç değişimlerine karşı daha az daha benzer cevaplar gösterilecektir. Burada, ayrıca ortalama boyut başarıyla kullanılabilir. PSD'nin simetrik genişlemesi, ortalama ve ortalama boyutta görülememektedir.

İstatistiksel momentler, parçacık boyutu dağılımlarının ortalama boyutlarını, standart sapmalarını ve şekil özelliklerini tanımlamak için kullanılabilir. Genel olarak, x rastgele değişkenin köken etrafında l 'inci momenti, x^l 'nin beklenen değeri olmaktadır.

$$E(x^l) = \sum(x_i^l \cdot f(x)) \quad (4.1)$$

Burada, $f(x)$, x_i 'nin olasılık yoğunluğunu temsil ederken ağırlık olarak kullanılır ve x 'in içinde yer alan kuvveti ifade eder; alt indis i , ilgili boyut sınıflandırılmasını göstermektedir. Bu momentler bir tane üst simge (prime) M' ile gösterilmektedir. Sıfırıncı moment, M'_0 olarak gösterilen, x 'in toplam olasılık yoğunluğunu temsil etmektedir. Geleneksel olarak, olasılık normalleştirilmektedir ($\sum(f(x))=1$). Eğer

dağılım tam popülasyondan değil, o popülasyonun N ögesi içeren bir numuneden geliyorsa, örneğin birinci momentin M'_1 olarak gösterildiği normalleştirme, momenti N ile bölünerek yapılmaktadır.

$$M'_1 = E(x)/N = \sum(x_i) f(x)/\sum(n_i) \quad (4.2)$$

Bu nedenle, $E(x)$, $x(= < x >)$ 'in aritmetik ortalama değerine eşittir.

Merkezi momentler, x' 'in ortalama değer civarındaki dağılım ile ilgili olmaktadır. Ortalama değer civarlarındaki dağılımın şekli hakkında bir gösterge vermekte ve bir üst simge olmadan gösterilebilmektedir. Örneğin, ikinci merkezi moment, dağılımın varyansını (standart sapma karesi), yani genişliğini göstermektedir.

$$M_2 = E(x - < x >)^2 = \sum(x_i - < x >)^2 \cdot f(x) \quad (4.3)$$

Yüksek mertebede merkezi momentler, dağılımın şekli ile ilgili bilgi vermektedir. Üçüncü moment istatistiksel çarpıklık (veya asimetri) ile ilgiliyken, dördüncü moment istatistiksel basıklık (veya düzlük/dağılım içi pik seviyesi) ile ilgilidir.

Parçacık boyutu dağılımları durumunda momentlerin önemi kolayca tanımlanabilmektedir:

$M'_0 = \sum(n_i)$, numunelerin içindeki toplam parçacık sayısına eşittir ($N = \sum n_i$).

$M'_1 = \sum(n_i D_i)$, numunelerin içindeki parçacıkların toplam uzunluğuna eşittir.

$M'_2 = \sum(n_i D_i^2)$, numunelerin içindeki parçacıkların toplam alanını göstermektedir ($= \sum(n_i \pi D_i^2)$).

$M'_3 = \sum(n_i D_i^3)$, numunelerin içindeki parçacıkların toplam hacmini göstermektedir. Moment oranı notasyonunda, ortalama parçacık boyutları iki momentin oranından türetilmiştir (Alderliesten, 2004,2005,2005; Hlobil ve ark,2022).

$$< D_{p,q} > = (M'_p / M'_q)^{1/(p-q)} = \{ \sum(n_i D_i^p) / \sum(n_i D_i^q) \}^{1/(p-q)} \quad (4.4)$$

Burada;

D=parçacık boyutu (yani, adlandırılmış bir eşdeğer boyut)

D_i =boyut sınıfı i içindeki ortalama parçacık boyutu

n_i = i boyut sınıfındaki parçacık sayısı

p, q =gerçek sayılar ($p \neq q$); bunlar, miktarın türü ile ilgilidir. Örneğin: 0 sayı, 1 uzunluk, 2 alan ve 3 hacmi göstermektedir.

Nümeratördeki moment, ilgi duyulan parçacık miktarının ve ağırlık miktarının çarpımını ifade etmekte ve paydaki moment ise ağırlığı vermektedir.

Ortalama parçacık boyutlarının bazı örnekleri aşağıda verilmiştir:

$$\langle D_{1,0} \rangle = M'_1 / M'_0 = \sum(n_i D_i) / \sum(n_i) \quad (4.5)$$

Aritmetik ortalama boyut; diğer bir deyişle, sayısal olarak örnek büyük bir kısmını oluşturan parçacıkların boyutunu temsil edilmektedir.

$$\langle D_{3,0} \rangle = (M'_3 / M'_0)^{1/3} = (\sum(n_i D_i^3) / \sum(n_i))^{1/3} \quad (4.6)$$

Ortalama hacim boyutu; diğer bir deyişle, bir boyut dağılımının ortalama hacmini veya küp boyutunu (D^3) temsil edilmektedir.

$$\langle D_{3,2} \rangle = M'_3 / M'_2 = \sum(n_i D_i^3) / \sum(n_i D_i^2) \quad (4.7)$$

Yüzey-ağırlıklı ortalama boyut veya Sauter ortalama çap (aynı zamanda SMD olarak da adlandırılır) (Sauter,1926); diğer bir deyişle, tüm örnek ile aynı hacim/yüzey oranına sahip olan boyutu temsil edilmektedir; bu nedenle, hacim özgül yüzey alanı ile ters orantılı olmaktadır.

$$\langle D_{4,3} \rangle = M'_4 / M'_3 = \sum(n_i D_i^4) / \sum(n_i D_i^3) \quad (4.8)$$

Hacim-ağırlıklı ortalama boyut veya De Brouckere ortalama boyut; örnek hacminin büyük bir kısmını belirleyen (büyük) parçacıkların boyutunu temsil edilmektedir.

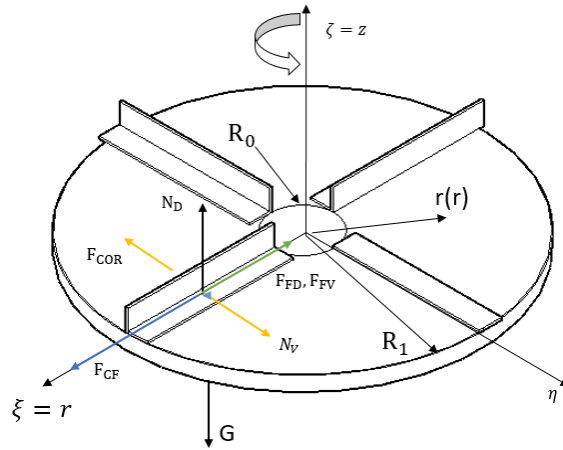
$$\langle D_{6,5} \rangle = M'_6/M'_5 = \sum(n_i D_i^6) / \sum(n_i D_i^5) \quad (4.9)$$

Gerekli düzenlemelerden sonra Denklem (4.7), Denklem(4.10) haline getirilmiştir. Bu çalışmada ortalama parçacık çapı için denklem(4.10) kullanılacaktır.

$$\begin{aligned} \langle D_{3,2} \rangle &= M'_3/M'_2 = \sum(n_i D_i^3) / \sum(n_i D_i^2) \\ \langle D_{3,2} \rangle &= M'_3/M'_2 = \frac{\sum(n_i D_i^3)}{\sum(n_i D_i^2)} = (\sum x_i) / (\sum x_i / D_i) = (1) / (x_i / D_i) \end{aligned} \quad (4.10)$$

4.2. Teorik Yaklaşımlar

Patterson ve Reece (1962), yatay döner bir diskin merkezine yakın beslenen bir parçacığın teorisi tartışılmıştır. Disk, diske dik olan birkaç düz radyal kanatla donatılmıştır. Parçacığın şekline bağlı olarak, iki ana hareket formu mümkün olmaktadır. Parçacık, kanat ve disk boyunca kayabilir. Ayrıca, hem kayan hem de yuvarlanan parçacık da dikkate alınmıştır. Kayma durumu sürekli sürtünme ile birlikte düşünüldüğünde, bir yaklaşım hareket diferansiyel denklemlerini azaltmıştır (Koch, 1978).



Şekil 4.2. Döner disk sistemine etki eden kuvvetler

Bir su damlacığının hareketi, vektörel diferansiyel denklemle gösterilmesi Denklem(4.11) ile verilmiştir.

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{F}_{FD} + \vec{F}_{FV} + \vec{F}_{CF} + \vec{G} + \vec{N}_D + \vec{N}_V + \vec{F}_{COR} \quad (4.11)$$

Burada,

R_0, R_1 Su damlacığının giriş yarıçapı ve dönen diskin dış yarıçapı (m)

$r(r)$ dönen(bağıl) O $\xi\eta\zeta$ sistemine göre disk merkezinden her hangi bir r mesafası

x, y, z suyun eylemsizlik koordinat sistemdeki koordinatları (m)

$\vec{F}_{FD}, \vec{F}_{FV}$ Su damlacığı ile disk ve kanat arasındaki sürtünme kuvvetleri (N)

$\vec{F}_{CF}$, Su taneciğine etki eden santrifüj kuvveti(N)

$\vec{F}_{COR}$ Su damlacığına etki eden Coriolis kuvveti(N)

$\vec{G}, \vec{g}$ Su damlacığının kütle çekimi kuvveti (N) ve ivmesi (ms^{-2})

m su damlacığının kütlesi (kg)

$\vec{N}_D, \vec{N}_V$ diskin ve kanatın parça üzerine etki eden normal kuvvetleri (N);

ξ, η, ζ diske sabitlenmiş olan atalet sistemine göre koordinatlar (m);

ω dönen diskin açısal hızı [$rad.s^{-1}$]

O $\xi\eta\zeta$ göre bağıl koordinat sisteminde üç skaler denklemlerle temsil edilmektedir

$$\xi \equiv r(r): m \frac{d^2 r(r)}{dt^2} = -F_{FD} - F_{FV} + F_{CF} \quad (4.12)$$

$$\eta: 0 = N_V - F_{COR} \Rightarrow N_V = F_{COR} \quad (4.13)$$

$$\zeta \equiv z: 0 = N_D - G \Rightarrow N_D = G \quad (4.14)$$

Denklemler (4.12), (4.13) ve (4.14), damlacığının bağıl hareketini temsil etmektedir. Çözülebilmesi için, damlacığa etki eden bilinmeyen kuvvetlerin şiddetlerini önceden değerlendirilmesi gerekir.

Damla ağırlığı, kütle m ve yerçekimi ivmesinin g [$m s^{-2}$] çarpımıdır(N). Dikey olarak hizalanmıştır. Ancak O ξ eksenine ters yönlü olarak aşağıya yönlendirilmiştir.

$$\vec{G} = m \cdot \vec{g} = -m \cdot g \cdot \vec{\zeta}_0 \quad (4.15)$$

Coriolis kuvveti, dönen koordinat sistemdeki birleşik parça hareketinden kaynaklanmaktadır. Bu, taşıyıcı açısal hız, $\vec{\omega}_C$, disk açısal hızı $\vec{\omega}_D$ ve damlacığının kanat boyunca olan bağıl lineer hızı $\vec{v}(r)$ ye bağlı olmaktadır.

$$\vec{F}_{COR} = 2m \cdot (\vec{\omega}_D \times \vec{v}(r)) = -2m \cdot v(r) \cdot \omega_D \cdot \vec{\eta}_0 \quad (4.16)$$

$\vec{\eta}_0$, Oñ ekseni yönünü tanımlayan bir birim vektördür.

Su damlacığının üzerindeki normal kanat kuvveti $\vec{N}_V$ damlacığının kanata karşı olan Coriolis kuvveti $\vec{F}_{COR}$ 'nin etkisine karşı olan tepkisi olmaktadır. Bu nedenle, bu iki kuvvet karşılıklı doğrultu olmaktadır ancak zıt yönlüdürler. Denklemler (4.13) ve (4.16) tarafından takip edildiğinde, bu kuvvetin (Şekil 2) şu şekilde olduğu görülmektedir.

$$\vec{N}_V = -\vec{F}_{COR} = -(-2 \cdot m \cdot v(r) \cdot \omega_D \cdot \vec{\eta}_0) = 2 \cdot m \cdot v(r) \cdot \omega_D \cdot \vec{\eta}_0 \quad (4.17)$$

Benzer şekilde, vektör $\vec{N}_D$, su damlacığı üzerindeki ağırlığın (etkin kuvvet) neden olduğu bir yayılma diski üzerindeki normal bir kuvvettir. Bu nedenle, bu iki kuvvet karşılıklı doğrultuludur ancak zıt yönlüdür. Denklemler (5.14) ve (4.15) ile ilgili olarak, bu kuvvet vektörü Şekil 2a'da görülmektedir.

$$\vec{N}_D = -\vec{G} = m \cdot g \cdot \vec{k} = m \cdot g \cdot \vec{\zeta}_0 \quad (4.18)$$

Santrifüj kuvvet.

$$\vec{F}_{CF} = m \cdot \omega_D^2 \cdot r(r) \cdot \vec{\xi}_0 \quad (4.19)$$

Santrifüj kuvvet, parçacık kütlesi m [kg], mevcut yarıçapı $r(r)$ [m] kanat boyunca disk dönme eksenine $O\zeta \equiv Oz$ 'den uzaklık ve disk açısal hızı ω_D 'ye [rad/s] bağlı olmaktadır. Sürtünme kuvvetleri F_{FD} ve F_{FV} , damlacığının savrulma diski ve kanat üzerinde eş zamanlı kaymasından kaynaklanmaktadır. Bunlar, dinamik sürtünme katsayıları $\mu_D(-)$, $\mu_V(-)$ ve normal kuvvetler $F_{FD}(N)$, $F_{FV}(N)$ fonksiyonlarıdır.

$$F_{FD} = \mu_D \cdot m \cdot g \quad (4.20)$$

$$F_{FV} = 2\mu_V \cdot m \omega_D \cdot v(r) \quad (4.21)$$

Denklem (4.12) içine denklemler (4.19), (4.20) ve (4.21) eklenirse, sabit katsayılara sahip ikinci dereceden lineer homojen olmayan bir diferansiyel denklem elde edilmektedir. Bu denklem, bağıl damlacık hareketini tanımlanmaktadır.

$$\frac{d^2 r(r)}{dt^2} + 2 \cdot \mu_V \cdot \omega_D \cdot \frac{dr(r)}{dt} - \omega_D^2 \cdot r(r) = -\mu_D \cdot g \quad (4.22)$$

Homojen diferansiyel denklemin çözümü r_h ve inhomojen denklemin özel bir çözümü r_p toplamı olarak çözülmektedir.

$$r = r_h + r_p \quad (4.23)$$

Bu basit diferansiyel denklemin homojen kısmı aşağıdaki çözüm gibi olmaktadır.

$$\frac{d^2 r(r)}{dt^2} + 2 \cdot \mu_V \cdot \omega_D \cdot \frac{dr(r)}{dt} - \omega_D^2 \cdot r(r) = 0 \quad (4.24)$$

Çözümü şöyledir:

$$r_h = C_1 \cdot y_1(t) + C_2 \cdot y_2(t) = C_1 e^{\omega_D(-\mu_V + \sqrt{1+\mu_V^2}) \cdot t} + C_2(t) \cdot e^{\omega_D(-\mu_V - \sqrt{1+\mu_V^2}) \cdot t} \quad (4.25)$$

Burada C_1 ve C_2 bilinmeyen entegrasyon sabitleridir.

Denklem (4.22) inhomojen diferansiyel denklemin özel bir çözümü, belirsiz bir sabitin yöntemiyle bulunabilmektedir.

$$r_p = C \quad (4.26)$$

Denklem (4.26) türetilip denklem (4.22) içine ekledikten sonra, inhomojen diferansiyel denklemin özel çözümü ortaya çıkarmaktadır.

$$r_p = \frac{\mu_D \cdot g}{\omega_D^2} \quad (4.27)$$

Diferansiyel denklem (4.22)'ün genel çözümü verilmektedir, bu da su damlacığının bağlı radyal konumunu göstermektedir.

$$r = C_1 e^{\omega_D(-\mu_V + \sqrt{1+\mu_V^2}).t} + C_2(t).e^{\omega_D(-\mu_V - \sqrt{1+\mu_V^2}).t} + \frac{\mu_D.g}{\omega_D^2} \quad (4.28)$$

Bu denklemin türetilmesi, parçacığın göreceli radyal hızını verilmektedir.

$$\begin{aligned} \dot{r}(t) = v(t) = & \\ \omega_D \left(-\mu_V + \sqrt{1+\mu_V^2} \right) \cdot C_1 e^{\omega_D(-\mu_V + \sqrt{1+\mu_V^2}).t} + \omega_D \left(-\mu_V - \right. & \\ \left. \sqrt{1+\mu_V^2} \right) C_2(t).e^{\omega_D(-\mu_V - \sqrt{1+\mu_V^2}).t} & \end{aligned} \quad (4.29)$$

Entegrasyon sabitleri C_1 ve C_2 , analiz edilen su dönen diskli savrulucu tasarım ve işletme koşullarından kaynaklanan başlangıç koşullarından belirlenmiştir.

$$t_0 = 0 \Rightarrow r(t_0 = 0) = r(r) = R_0 \quad (4.30)$$

$$t_0 = 0 \Rightarrow \dot{r}(t_0 = 0) = \dot{r}(0) = \dot{r}_0 = v_0 = 0 \quad (4.31)$$

Yani, her her su parçacığı, bağlı hareketine kanatın iç kenarından başlar ve sıfır radyal hızdan itibaren hızlanmaktadır. Denklemler (4.28), (4.29), (4.30) ve (4.31) birleştirilerek sabitler C_1 ve C_2 bulunmuştur. Bu sabitlerin denklemlere tanıtılması, parçacığın pervane boyunca göreceli konumunu ve hızını tanımlayan nihai ifadeleri sağlamıştır.

$$\begin{aligned} r(t) = \frac{\left(R_0 - \frac{\mu_D.g}{\omega_D^2} \right)}{2.\sqrt{1+\mu_V^2}} \cdot \left[\left(-\mu_V + \sqrt{1+\mu_V^2} \right) \cdot e^{\omega_D(-\mu_V - \sqrt{1+\mu_V^2}).t} - \left(-\mu_V - \right. \right. & \\ \left. \left. \sqrt{1+\mu_V^2} \right) \cdot e^{\omega_D(-\mu_V + \sqrt{1+\mu_V^2}).t} \right] + \frac{\mu_D.g}{\omega_D^2} & \end{aligned} \quad (4.32)$$

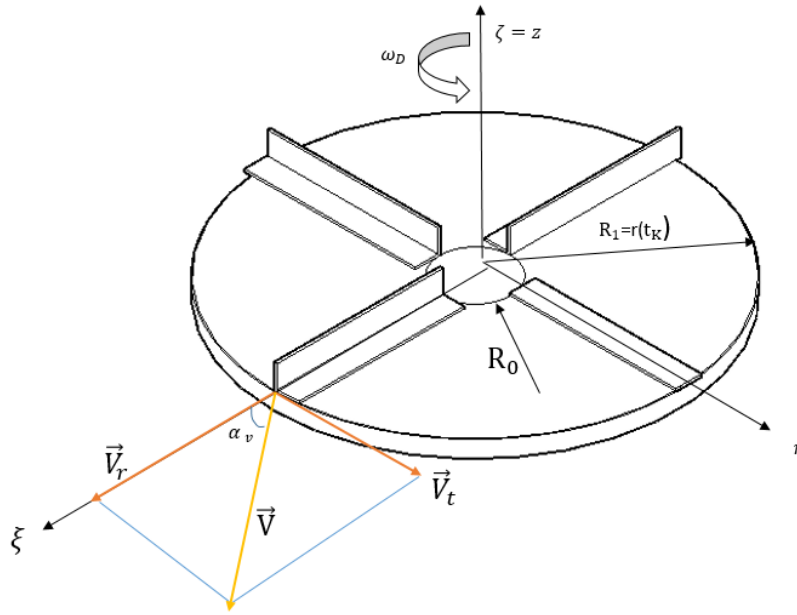
$$\dot{r}(t) = V_r = \frac{-\omega_D}{2.\sqrt{1+\mu_V^2}} \cdot \left(R_0 - \frac{\mu_D.g}{\omega_D^2} \right) \left[e^{-\omega_D(\mu_V + \sqrt{1+\mu_V^2}).t} - e^{-\omega_D(\mu_V - \sqrt{1+\mu_V^2}).t} \right] \quad (4.33)$$

Su damlacığı püskürtme (başlatma) zamanı t_K , bir su damlacığını santrifüj diskli püskürtülmesi kanat boyunca süresini temsil etmektedir, yani $r(t_K)=R_1$.

$$r(t_K) = R_1 = \frac{\left(R_0 - \frac{\mu_D \cdot g}{\omega_D^2}\right)}{2 \cdot \sqrt{1 + \mu_V^2}} \cdot \left[(-\mu_V) + \sqrt{1 + \mu_V^2} \cdot e^{\omega_D(-\mu_V - \sqrt{1 + \mu_V^2}) \cdot t_K} - \left((-\mu_V) - \sqrt{1 + \mu_V^2} \cdot e^{\omega_D(-\mu_V + \sqrt{1 + \mu_V^2}) \cdot t_K} \right) \right] + \frac{\mu_D \cdot g}{\omega_D^2} \quad (4.34)$$

Damlacığın mutlak hız vektörü $\vec{V}$, taşıma hızı $\vec{V}_t$ ile kanat ve disk dönmesi tarafından oluşturulan ve kanat boyunca olan bağıl hız $\vec{V}_r$ (Şekil 4.2.) vektörünün toplamı olmaktadır.

$$\vec{V} = \vec{V}_t + \vec{V}_r \quad (4.35)$$



Şekil 4.3. Düz kanatlı disk için su damlacığının bileşke hız bileşenleri (Cerović ve ark,2018)

İlişkisel hız vektörü, Oξ eksenini pozitif yönde ve taşıma hızı eksenini Oη'nin pozitif yönlendirmesi ile hizalanmıştır. Zamanın bir fonksiyonu olarak ilişkisel hızın büyüklüğü, Denklem (4.33) tarafından tanımlanmıştır. Bu nedenle, damlacığın püskürtme noktasındaki büyüklüğü, Denklem(4.33)'de $t=t_K$ 'nin yerine konularak hesaplatılmaktadır.

$$\dot{r}(t) = V_r(t_K) = \frac{-\omega_D}{2\sqrt{1+\mu_V^2}} \cdot \left(R_0 - \frac{\mu_D g}{\omega_D^2}\right) \left[e^{-\omega_D(\mu_V + \sqrt{1+\mu_V^2}) \cdot t_K} - e^{-\omega_D(\mu_V - \sqrt{1+\mu_V^2}) \cdot t_K} \right] \quad (4.36)$$

Püskürtme zamanı t_K , Denklem (4.34) formülü tarafından tanımlanmış bir değerdir.

V_t , damlacık taşıma hızının büyüklüğü, hız vektörünün parçacık yarıçapı r ve açısal hız ω_D 'nin çarpımıdır.

$$V_t = \omega_D \cdot r(t) \quad (4.37)$$

Püskürtme noktasında bir su damlacığının dış disk yarıçapına ulaşır $r(t_K)=R_1$. Bu nedenle, püskürtme noktasında çizgisel hızının büyüklüğü V_t şu değere sahip olmaktadır.

$$V_t(t_K) = R_1 \cdot \omega_D \quad (4.38)$$

$$\omega_D = \frac{\pi N}{30} \quad (4.39)$$

Bu nedenle, mutlak hız vektörünün büyüklüğü (Şekil 4.3), Pisagor teoremi kullanılarak değerlendirilmiştir:

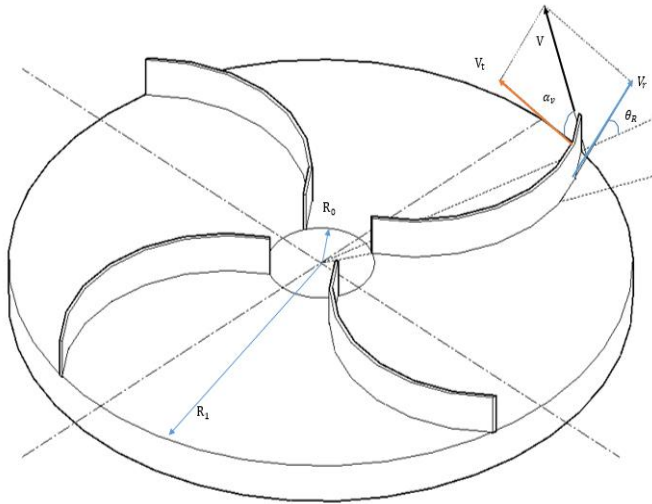
$$V(t) = \sqrt{(V_t(t))^2 + (V_r(t))^2} \quad (4.40)$$

$$V(t_K) = \sqrt{(V_t(t_K))^2 + (V_r(t_K))^2} \quad (4.41)$$

Yönü, polar açı ile tanımlanmıştır (Şekil 4.3.)

$$\tan\{\alpha_v(t_K)\} = \frac{V_t(t_K)}{V_r(t_K)} \quad (4.42)$$

$$\alpha_v = \tan^{-1} \left\{ \frac{V_t(t_K)}{V_r(t_K)} \right\} (rad) = \frac{360}{2\pi} \cdot \tan^{-1} \left\{ \frac{V_t(t_K)}{V_r(t_K)} \right\} (^\circ). \quad (4.43)$$



Şekil 4.4. Kavisli kanat disk için su damlacığının hız bileşenleri

Yukarıda düz kanatlı disk için kullanılan tüm denklem kavisli kanat disk içinde geçerli olmaktadır. Ancak , ayrıma açısı biraz farklılık oluşturmaktadır. Kavisli kanat veya düz kanat olsun, damlacık ayrılma açısı, α_v , hızın iki bileşeni tarafından belirtilmekte ve kanada göre hız V_r , ve çizgisel disk hızı, $\omega_D R$. Sinüs yasasını kullanarak, Cunningham aşağıdaki formülü geliştirmiştir (Cunningham,1963).

$$\alpha_v = \text{Arc Cot} \left[\frac{\omega_D R}{V_r \cos \phi_R} + \tan \phi_R \right] \quad (4.44)$$

Kavisli kanatların, düz kanatlara göre daha fazla ivme ve daha pozitif bir etki geliştirebileceğini ifade edilmiştir. Kavisli kanatlar için kanata göre damlacık hızının diferansiyel denklemi şu şekilde olmaktadır: Burada $\mu_v = \mu_D$ eşit olduğu kabul edilmiştir. G,H ve φ değişkenlerini aşağıda gösterildiği tanımlanmıştır. Ya da

$$G = \cos \phi_R - \mu_v \sin \phi_R \quad (4.45)$$

Eğer kanatlar geri kavisli ise

$$G = \cos \phi_R + \mu_v \sin \phi_R \quad (4.46)$$

ϕ_R = Kanadın disk yarıçapına göre açısı, radyan

$$H = \sqrt{\mu_v^2 + G \cos \phi_R} \quad (4.47)$$

$$\cosh \varphi = \frac{R_1}{R_0} \quad (4.48)$$

$$V_r = G \left[\frac{r_0 - \mu_v \frac{g}{G\omega^2}}{2H} \right] [e^{(H-\mu_v)\varphi} - e^{-(H-\mu_v)\varphi}] \quad (4.49)$$

4.2.1. Kurşunun düz kanatlı disk atomizasyonu

Bu deney grubunda, kurşun, düz disk atomizer kullanılarak atomize edilmiştir. 18000 dev/dk. ve 25000 dev/dk. disk hızlarında çeşitli metal eriyik debisi ve sıcaklıklarında on sekiz deney gerçekleştirilmiştir. Diskler, demirden yapılmıştır ve Şekil 4.4'de gösterildiği gibi disk çapı 13,5 mm olarak seçilmiştir. Metal, toz özelliklerinin sıcaklık ve metal eriyik akış debisi üzerindeki etkisini belirlemek için üç farklı sıcaklıkta (750, 850 ve 1000 °C) ve üç farklı debide (0.1, 0.125 ve 0.150 l/s) test edilmiştir. Her deney için yaklaşık 50gram-75 gram arasında kurşun eritilmiştir.

Üretilen tozların ağırlıkça kümülatif boyut dağılımı, bu metal tozları, Harran üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde temin edilen elek setinde elenmesiyle belirlenmiştir. 710, 500, 355, 250, 180, 125, 90 ve 63 µm, 50 gram ile 75 gram metal tozu elekten geçirilmiştir. Daha sonra, her elek içindeki toz miktarı miligram hassasiyetine sahip bir terazide tartılarak kaydedilmiştir. Her elek içindeki tozun yüzdesi ve ortalama toz boyutu hesaplanmıştır. Ortalama toz boyutu, Sauter ortalama çap (SMD) yaklaşımı formülü ile hesaplanmıştır. SMD, bir parçacık dağılımının ortalama boyutunu ifade etmektedir ve genellikle sıvı veya toz halindeki malzemelerin analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. SMD, parçacık hacimlerinin karesi ile orantılıdır ve Sauter ortalama çap, bir malzemenin parçacık boyut dağılımını değerlendirirken büyük parçacıkların etkisinin göz önünde bulundurulması için tercih edilebilmektedir.

Her elek içindeki tozun yüzdesi ve her çalışma için hesaplanan ortalama toz boyutu, sırasıyla 18000 rpm ve 25000 rpm disk hızları için Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'de gösterilmiştir.

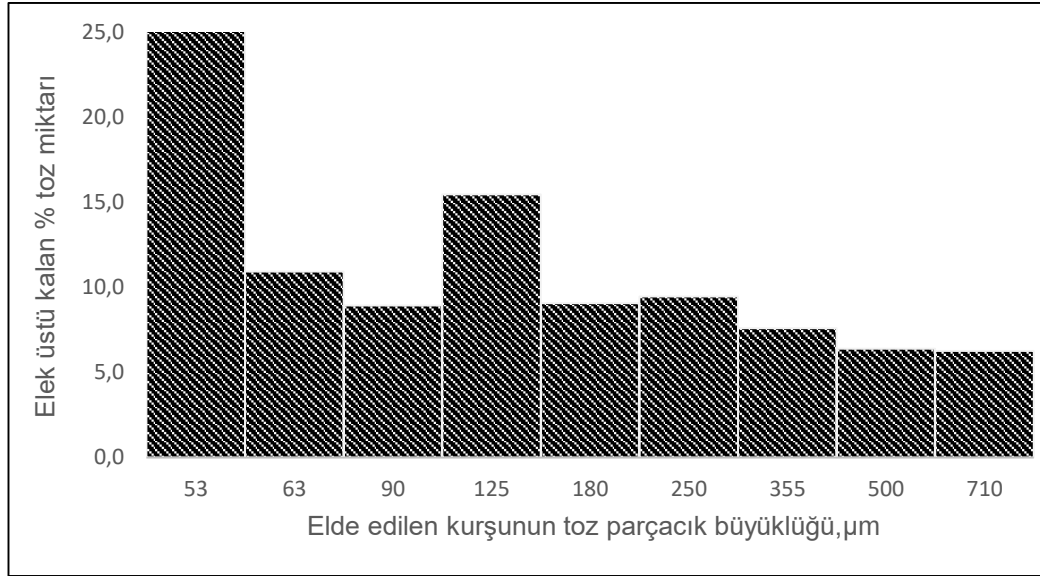
Çizelge 4.4. Düz kanatlı disk ile atomize edilmiş kurşunun toz boyut dağılımı (disk hızı= 18000 (devir/dk.), disk çapı=13.5cm, kanat sayısı=4)

	Kullanılan Elek Takımı ve Elek Büyüklükleri (µm)									SMD	Debi	Sıcaklık
Deney No	710	500	355	250	180	125	90	63	Tava	D ₃₂	lt/s	°C
	Her Yapılan Deney için Elek Üstünde Kalan Toz Miktarı(gr)									µm		
1	6,2	9,2	9,5	10,2	8,7	9,4	7,5	6,1	8,2	122	0,1	750
2	5,4	9,2	10,6	10,9	8,2	10,1	5,5	5,7	9,6	119	0,1	850
3	4,7	4,8	5,7	7,1	6,8	11,6	6,7	8,2	19,4	83	0,1	1000
4	2,9	5,4	7,0	8,0	7,4	10,9	6,7	8,3	18,0	85	0,125	750
5	4,5	5,6	8,4	9,7	9,2	10,5	6,2	6,7	14,2	98	0,125	850
6	3,3	8,3	9,1	10,7	8,0	10,3	5,7	6,5	13,4	102	0,125	1000
7	3,5	4,8	5,8	10,8	8,4	14,4	7,3	8,1	11,6	100	0,150	750
8	3,5	7,2	7,6	9,6	9,4	11,4	7,4	7,8	10,8	105	0,150	850
9	4,5	8,7	9,2	10,8	9,4	8,8	5,6	5,8	12,2	109	0,150	1000

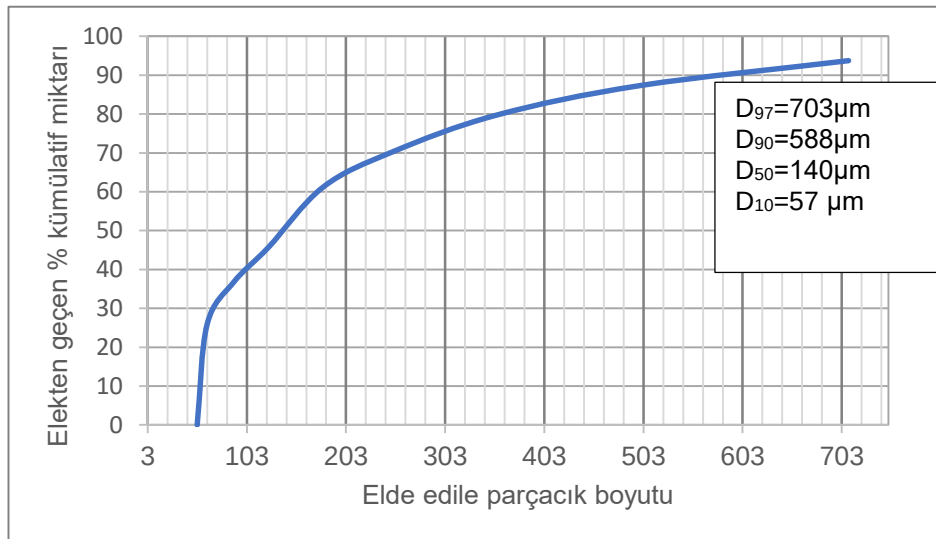
Tozlar çok ince olduğundan ($83 < D_{32} < 126$) ve kullanılan en küçük elek 63 µm olduğundan tozların yaklaşık %10'si tavana toplanmıştır. Disk hızı, N = 18000 d/dk. metal eriyik debisi, Q = 0,1 lt/s ve sıvı koşullarında minimum toz boyutu $d_m = 81$ µm olarak elde edilmiştir. Metal sıcaklığı T = 1000°C. . Elek üstü kalan toz miktarı ile metal toz boyutu Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Toz boyutu ile elekten geçen yüzdelik miktarın detaylı bir bir şekilde Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Bu grafikte, minimum toz boyutunun yüksek disk hızında ve yüksek erimiş metal sıcaklığında elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 4.5. Düz kanatlı disk ile atomize edilmiş kurşunun toz boyut dağılımı (disk hızı= 18000 devir/dk., debi 0,1 lt/s ve 1000°C)

Elek Analizi				
Elek açıklığı	Elek üstü kalan miktar (gr)	Elek üstü (%)	Kümülatif elek üstü (%)	Elekten geçen (%)
710	4,7	6,3	6,3	93,7
500	4,8	6,4	12,7	87,3
355	5,7	7,6	20,3	79,7
250	7,1	9,5	29,7	70,3
180	6,8	9,1	38,8	61,2
125	11,6	15,5	54,3	45,7
90	6,7	8,9	63,2	36,8
63	8,2	10,9	74,1	25,9
38	19,4	25,9	100,0	0,0



Şekil 4.5. Düz kanatlı disk atomizasyon yöntemiyle elde edilen kurşunun toz büyüklük dağılımı, $D_{32}=83\mu\text{m}$, $N=18000\text{ rpm}$, $T=1000^\circ\text{C}$, $Q=0,1\text{ lt/s}$.



Şekil 4.6. Kümülatif Partikül Boyut Dağılımı ($D_{32}=83\mu\text{m}$, $N=18000\text{ rpm}$, $T=1000^\circ\text{C}$, $Q=0,1\text{ lt/s}$)

$\frac{D_{90}}{D_{10}} = 10,3$, Bant aralığı, çizelge 4.1 karakterize edilen band aralığına göre geniş bir bant (4-10) aralığın sınırları içersine yer almaktadır. Parçacığın inceliği($D_{90}=588\mu\text{m}$) orta değer(10-1000 μm) aralığında yer almaktadır. Ortama Sauter parçacık boyutu (D_{32}) 83 μm , çizelge 4.2'ye göre elde edilen ortalama toz boyut ince toz boyutu sınırları(100-300 μm), ince toz boyut sınırlar (10-100 μm), bu göre elde edilen metal tozu ince toz sınırları içersinde yer almaktadır. İri ve ince toz kesiri için bulunana eşitliklik aşağıda gösterilmiştir (Gemci ve Chigier, 2016).

İri toz kesiri için

$$\frac{D_{50}}{D_{97}} = 0.2$$

İnce toz kesiri

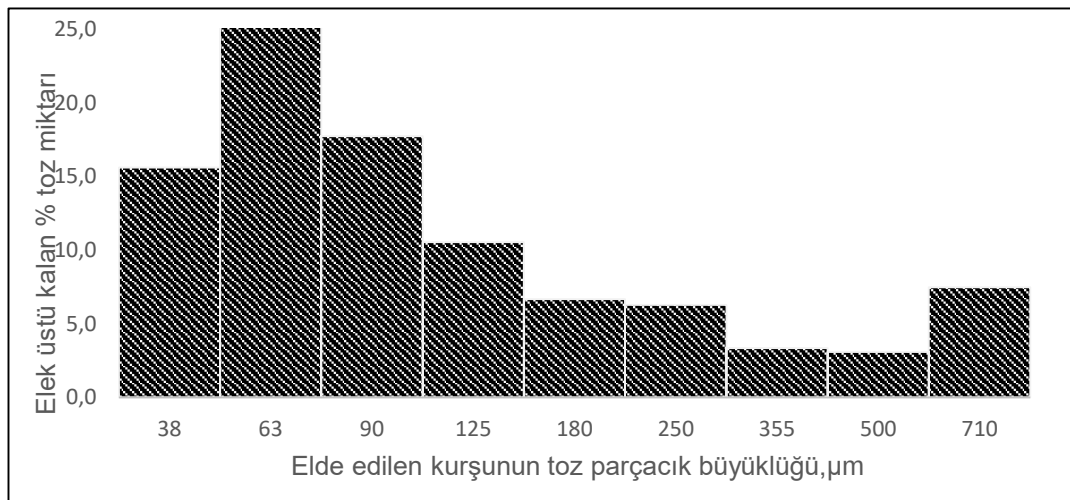
$$\frac{D_{10}}{D_{50}} = 0.4$$

Çizelge 4.6.Düz kanatlı disk ile atomize edilmiş kurşunun toz boyut dağılımı (disk hızı= 18000 (devir/dk.), disk çapı=13.5cm, kanat sayısı=4)

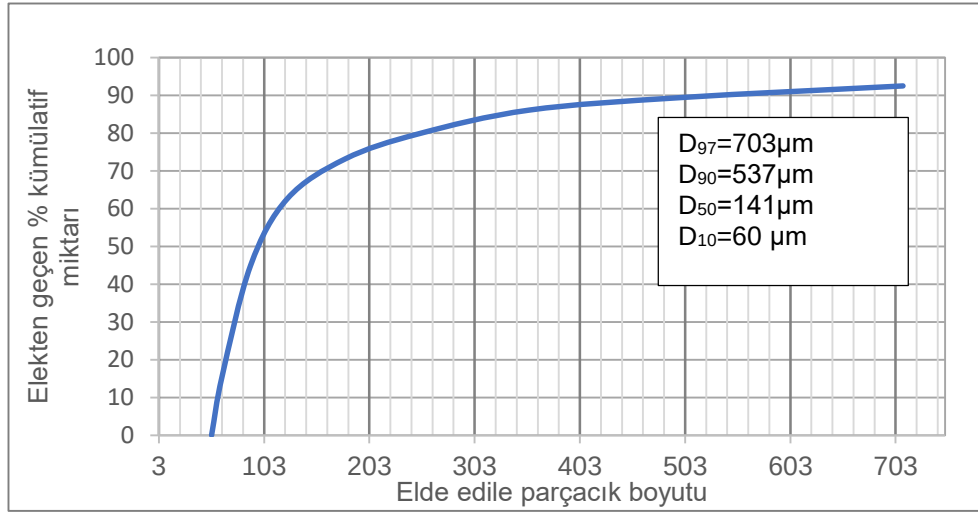
Deney	Kullanılan Elek Takımı ve Elek Büyüklükleri (µm)									SMD	Debi	Sıcaklık
No	710	500	355	250	180	125	90	63	Tava	D ₃₂	lt/s	°C
	Her Yapılan Deney için Elek Üstünde Kalan Toz Miktarı(gr)									µm		
1	1,5	3,6	5,6	7,2	8,6	15,6	9,8	10,2	12,9	90	0,1	750
2	2,5	5,7	7,8	9,5	8,3	11,7	6,9	8,3	14,3	94	0,1	850
3	3,7	6,1	8,1	10,2	8,2	12,6	7,2	7,5	11,4	103	0,1	1000
4	3,2	4,7	7,1	9,0	7,7	11,7	6,8	8,1	16,8	88	0,125	750
5	6,0	8,3	9,8	10,3	7,1	9,3	5,4	6,3	12,5	108	0,125	850
6	6,5	10,5	11,4	11,1	7,8	8,8	4,4	5,2	9,3	126	0,125	1000
7	5,6	2,3	4,5	5,2	5,8	7,9	13,4	19,5	10,8	85	0,150	750
8	4,5	8,9	9,2	9,3	6,5	8,1	4,7	6,1	17,7	93	0,150	850
9	5,7	10,4	11,7	11,3	8,1	8,7	4,5	5,4	9,2	125	0,150	1000

Çizelge 4.7.Düz kanatlı disk ile atomize edilmiş kurşunun toz boyutu dağılımı (fan dönme hızı 18000 (d/dk) fan çapı = 13.5 cm, kanat sayısı = 4)

ELEK ANALİZİ				
Elek açıklığı	Elek üstü kalan miktar(gr)	Elek üstü (%)	Kümülatif Miktarı (%)	Elekten Geçen Miktar (%)
710	5,6	7,5	7,5	92,5
500	2,3	3,1	10,5	89,5
355	2,5	3,3	13,9	86,1
250	4,7	6,3	20,1	79,9
180	5	6,7	26,8	73,2
125	7,9	10,5	37,3	62,7
90	13,3	17,7	55,1	44,9
63	22	29,3	84,4	15,6
Tava	11,7	15,6	100,0	0,0



Şekil 4.7. Düz kanatlı disk atomizasyon yöntemiyle elde edilen kurşunun toz büyüklük dağılımı, $D_{32}=83\mu\text{m}$, $N=18000\text{ rpm}$, $T=1000^\circ\text{C}$, $Q=0,1\text{ lt/s}$



Şekil 4.8. Kümülatif Partikül Boyut Dağılımı, $D_{32}=83\mu\text{m}$, $N=18000\text{ (rpm.)}$ $T=1000^\circ\text{C}$, $Q=0,1\text{ l/s}$

$\frac{D_{90}}{D_{10}} = 9,76$, Bant aralığı, Çizelge 4.1’de karakterize edilen band aralığına göre geniş bir bant (4-10) aralığın sınırları içersine yer almaktadır. Parçacığın inceliği ($D_{90}=537\mu\text{m}$) orta değer (10-1000 μm) aralığında yer almaktadır. Ortama Sauter parçacık boyutu (D_{32}) 60 μm , Çizelge 4.2’ye göre elde edilen ortalama Sauter toz boyutu, iri toz boyutu sınırları (100-300 μm), ince toz boyut sınırlar (10-100 μm). Bu verilere göre ortalama elde edilen Sauter toz boyutu, ince toz katagorisi içersinde yer almaktadır. İri ve ince toz kesiri için bulunan eşitliklik aşağıda gösterilmiştir (Gemci ve Chigier, 2016).

İri toz kesiri için

$$\frac{D_{50}}{D_{97}} = 0.20$$

İnce toz kesiri

$$\frac{D_{10}}{D_{50}} = 0.42$$

4.2.1. Kavisli kanatlı disk atomizasyonu

4.2.2.1. Kurşunun kavisli kanatlı disk atomizasyonu

16 mm çapında pompa fanı kullanılmıştır. Metal, toplamda dört farklı metal akış debisinde (0,1, 0,125 ve 0,150 lt/s) ve üç farklı sıcaklıkta (750, 850 ve 1000 $^\circ\text{C}$) sıcaklık ve metal eriyik akış debisinin toz özellikleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi

amacıyla test edilmiştir. Her deney için yaklaşık 75 g kurşun eritilmiş ve iki farklı disk hızı (18000 ve 25000 rpm) kullanılmıştır.

• 25000 rpm Atomizasyon

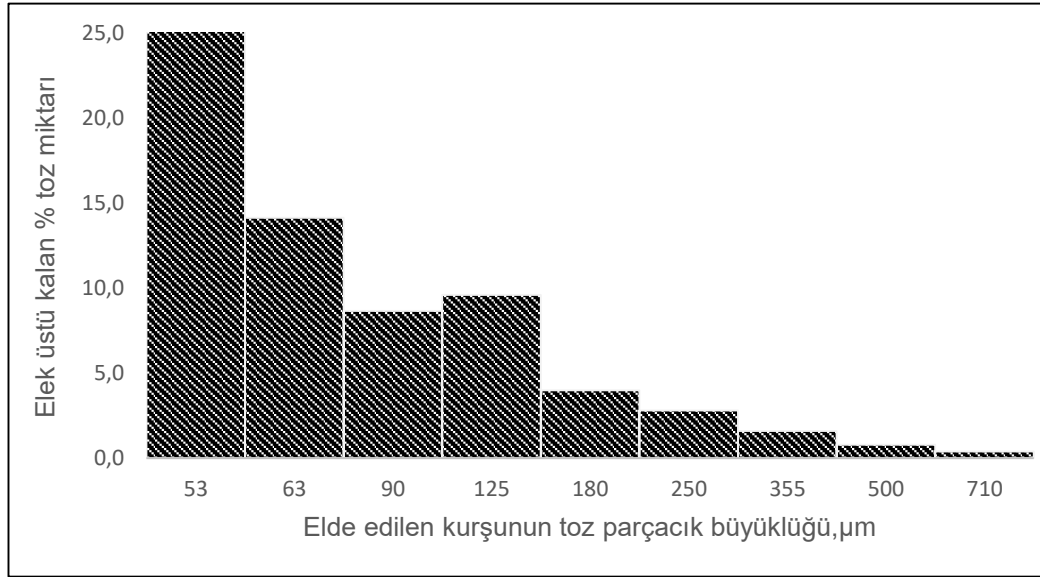
Yukarıda açıklanan koşullar altında on iki deneme gerçekleştirilmiştir. Elek analizi ile belirlenen tozların ağırlık yüzdesi ve hesaplanan ortalama toz boyutları Çizelge 4.8'de gösterilmiştir. Tozlar çok ince olduğu için ($51 < d_m < 115\mu m$), tozların yaklaşık %30'u tavaya toplanmıştır. Ortalama toz boyutunun sıcaklık ve metal eriyik akış debisi değerlendirilmiştir. Elek üstü kalan toz miktarı ile metal toz boyutu Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Toz boyutu ile elekten geçen yüzdelik miktarının detaylı bir bir şekilde Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Bu grafikte, minimum toz boyutunun yüksek disk hızında ve yüksek erimiş metal sıcaklığında elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 4.8. Kavisli kanatlı disk ile atomize edilmiş kurşunun toz boyutu dağılımı (disk hızı = 24000 (d/dk) , disk çapı = 16 cm, kanat sayısı = 4)

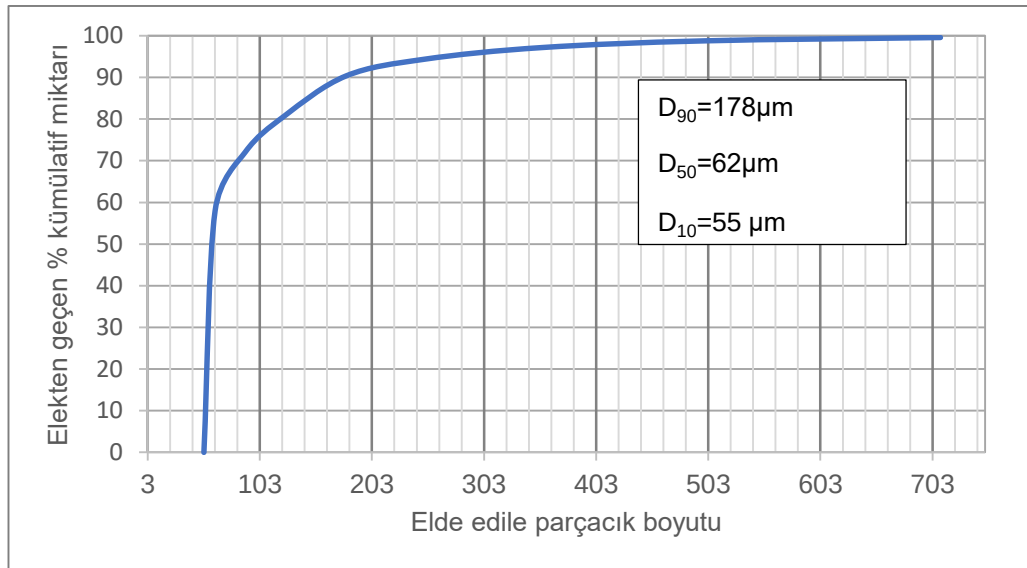
Dene y	Kullanılan Elek Takımı ve Elek Büyüklükleri (μm)									SMD	Debi	Sıcaklık
No	710	500	355	250	180	125	90	63	Tava	D ₃₂	(Lt/sn)	(°C)
	Her Yapılan Deney için Elek Üstünde Kalan Toz Miktarı(gr)									μm		
1	0,6	0,9	2,3	7,1	8,2	13,5	8,4	14,9	19,1	73	0,1	750
2	0,5	0,8	1,2	4,5	8,3	14,3	9,8	12,3	23,3	68	0,1	850
3	0,3	0,9	1,5	3,9	6,3	13,5	9,3	12,5	26,8	64	0,1	1000
4	0,2	0,4	0,5	2,9	5,4	15,5	10,4	13,5	26,2	63	0,125	750
5	0,2	0,5	0,6	1,7	9,2	2,6	10,5	17,3	32,4	57	0,125	850
6	0,2	0,6	0,8	1,5	2,6	8,6	8,3	13,1	39,3	53	0,125	1000
7	0,5	0,9	1,4	4,7	9,6	12,9	9,2	11,6	24,2	68	0,150	750
8	0,3	0,8	1,5	3,8	8,1	8,6	10,8	12,8	28,3	62	0,150	850
9	0,3	0,6	1,2	2,1	3,0	7,2	6,5	10,6	43,5	51	0,150	1000

Çizelge 4.9. Kavisli kanatlı disk ile atomize edilmiş kurşunun toz boyutu dağılımı (disk hızı = 24000 (d/dk) , disk çapı = 16cm, kanat sayısı = 4)

ELEK ANALİZİ				
Elek açıklığı	Elek üstü kalan miktar(gr)	% Elek üstü(gr)	%Kümülatif Miktarı(gr)	% Elekten Geçen Miktar(gr)
710	0,3	0,4	0,4	99,6
500	0,6	0,8	1,2	98,8
355	1,2	1,6	2,8	97,2
250	2,1	2,8	5,6	94,4
180	3,0	4,0	9,6	90,4
125	7,2	9,6	19,2	80,8
90	6,5	8,7	27,9	72,1
63	10,6	14,1	42,0	58,0
53	43,5	58,0	100,0	0,0



Şekil 4.9. Kavisli kanatlı disk atomizasyon yöntemiyle elde edilen kurşunun toz büyüklük dağılımı, D32=83µm, N=18000 (rpm.) T=1000°C, Q=0,1 l/s



Şekil 4.10. Kümülatif Partikül Boyut Dağılımı, D32=83µm, N=18000 (rpm.) T=1000°C, Q=0,1 l/s

$\frac{D_{90}}{D_{10}} = 3,24$, Bant aralığı, Çizelge 4.1’de karakterize edilen band aralığına göre orta bir bant(1.5-4) aralığın sınırları içersine yer almaktadır. Parçacığın inceliği ($D_{90}=178\mu\text{m}$) orta değer(10-1000 μm) aralığında yer almaktadır. Ortama Sauter parçacık boyutu (D_{32}) 60 μm , Çizelge 4.2’ye göre elde edilen ortalama Sauter toz boyut, iri toz boyutu sınırları(100-300 μm), ince toz boyut sınırlar (10-100 μm). Bu verilenlere göre

ortalama elde edilen Sauter toz boyutu, ince toz katagorisi içerisinde yer almaktadır. İri ve ince toz kesiri için bulunan eşitlik aşağıda gösterilmiştir (Gemci ve Chigier, 2016).

İri toz kesiri için

İnce toz kesiri

$$\frac{D_{50}}{D_{97}} = 0.02$$

$$\frac{D_{10}}{D_{50}} = 0.42$$

• 18000 rpm Atomizasyon

Bu deney grubunda testler, 18000 rpm disk hızında tekrarlanmıştır. Her çalışmanın eleme analizi ve hesaplanan ortalama toz boyutları Çizelge 4.10'da gösterilmiştir.

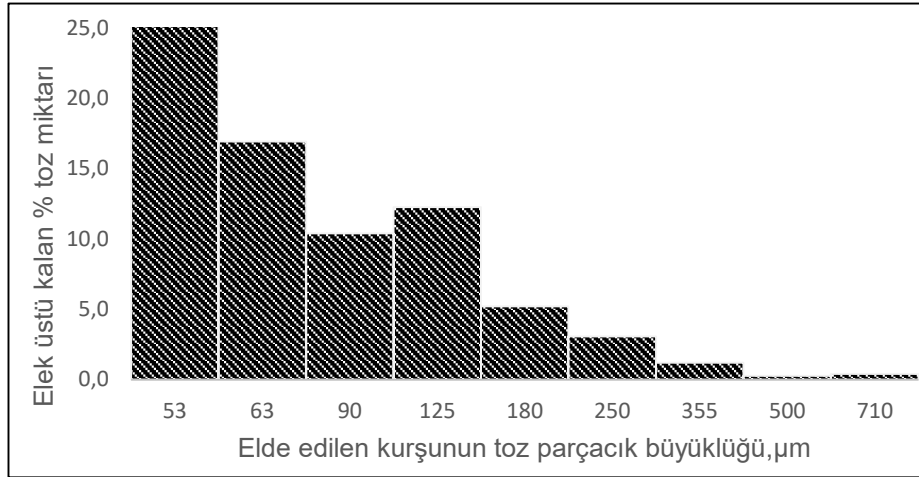
Yukarıda açıklanan koşullar altında dokuz deneme gerçekleştirilmiştir. Elek analizi ile belirlenen tozların ağırlık yüzdesi ve hesaplanan ortalama toz boyutları Çizelge 4.8'de gösterilmiştir. Tozlar çok ince olduğu için ($52 < d_m < 115\mu m$), tozların yaklaşık %30'u tavaya toplanmıştır. Ortalama toz boyutunun sıcaklık ve metal eriyik akış debisine değerlendirilmiştir. Elek üstü kalan toz miktarı ile metal toz boyutu Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Toz boyutu ile elekten geçen yüzdelik miktarın detaylı bir bir şekilde Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Bu grafikte, minimum toz boyutunun yüksek disk hızında ve yüksek erimiş metal sıcaklığında elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 4.10 Kavisli kanatlı disk ile atomize edilmiş kurşunun toz boyutu dağılımı (fan dönme hızı = 19000 rpm, fan çapı = 16 cm, kanat sayısı = 4)

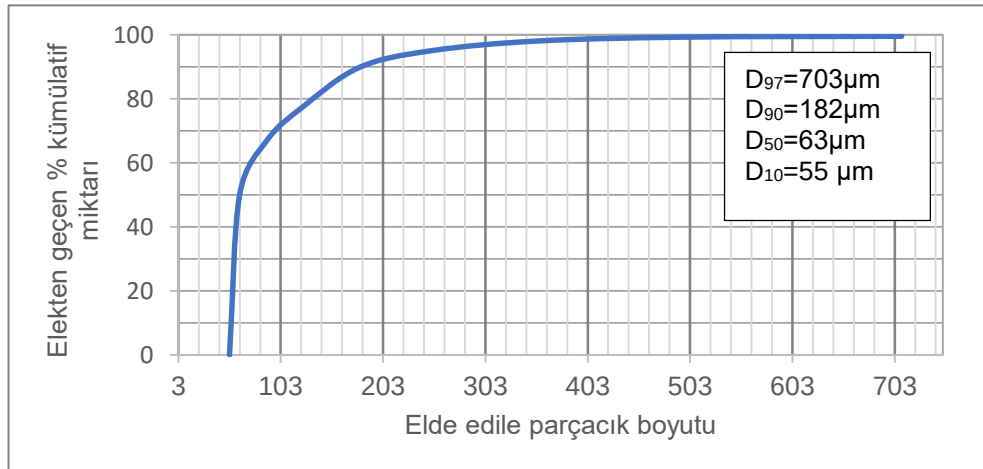
Deney	Kullanılan Elek Takımı ve Elek Büyüklükleri (µm)									SMD	Debi	Sıcaklık
No	710	500	355	250	180	125	90	63	Tava	D ₃₂	(lt/sn)	(°C)
	Her Yapılan Deney için Elek Üstünde Kalan Toz Miktarı(gr)									µm		
1	0,9	1,4	3,0	5,1	6,8	14,3	10,1	12,3	21,1	72	0,1	750
2	0,3	1,2	2,1	1,3	2,3	9,1	10,2	17,3	31,2	57	0,1	850
3	0,3	0,5	1,1	2,4	8,1	9,5	16,7	9,5	26,9	64	0,1	1000
4	0,3	1,1	6,9	11,9	11,6	15,2	7,7	8,1	12,2	95	0,125	750
5	0,3	0,2	0,9	2,3	3,9	9,2	7,8	12,7	37,7	54	0,125	850
6	0,2	1,5	2,0	3,5	4,2	9,0	7,8	12,6	34,2	58	0,125	1000
7	0,2	0,3	6,8	16,2	12,6	17,1	8,6	7,8	5,4	115	0,150	750
8	0,2	0,3	1,2	6,6	12,9	16,2	10,6	12,1	14,9	80	0,150	850
9	0,2	0,2	0,9	5,3	12,4	17,0	10,9	13,2	14,9	78	0,150	1000

Çizelge 4.11.Kavisli kanatlı disk ile atomize edilmiş kurşunun toz boyutu dağılımı (fan dönme hızı = 18000 (d/dk) disk çapı = 16cm, kanat sayısı = 4)

Elek açıklığı	Elek Analizi				Geçen
	Elek üstü kalan miktar (gr)	Elek üstü (%)	Kümülatif Miktarı(%)	Elekten Miktar(%)	
710	0,3	0,4	0,4	99,6	
500	0,2	0,3	0,7	99,3	
355	0,9	1,2	1,9	98,1	
250	2,3	3,1	4,9	95,1	
180	3,9	5,2	10,1	89,9	
125	9,2	12,3	22,4	77,6	
90	7,8	10,4	32,8	67,2	
63	12,7	16,9	49,7	50,3	
53	37,7	50,3	100,0	0,0	



Şekil 4.11. Kavisli kanatlı disk atomizasyon yöntemiyle elde edilen kurşunun toz büyüklük dağılımı, D32=83µm, N=18000 rpm, T=1000°C, Q=0,1 l/s



Şekil 4.12. Kümülatif Partikül Boyut Dağılımı, D32=83µm, N=18000 rpm, T=1000°C, Q=0,1 l/s

$\frac{D_{90}}{D_{10}} = 3,31$, Bant aralığı, Çizelge 4.1 'de karakterize edilen band aralığına göre orta bir bant(1.5-4) aralığının sınırları içersine yer almaktadır. Parçacığın inceliği($D_{90}=182\mu\text{m}$) orta değer(10-1000 μm) aralığında yer almaktadır. Ortama sauter parçacık boyutu (D_{32}) 60 μm , Çizelge 4.2'ye göre elde edilen ortalama Sauter toz boyut, iri toz boyutu sınırları(100-300 μm), ince toz boyut sınırlar (10-100 μm) . Bu verilere göre ortalama elde edilen Sauter toz boyutu, ince toz katagorisi içersinde yer almaktadır. İri ve ince toz kesiri için bulunana eşitliklik aşağıda gösterilmiştir (Gemci ve Chigier, 2016).

İri toz kesiri için

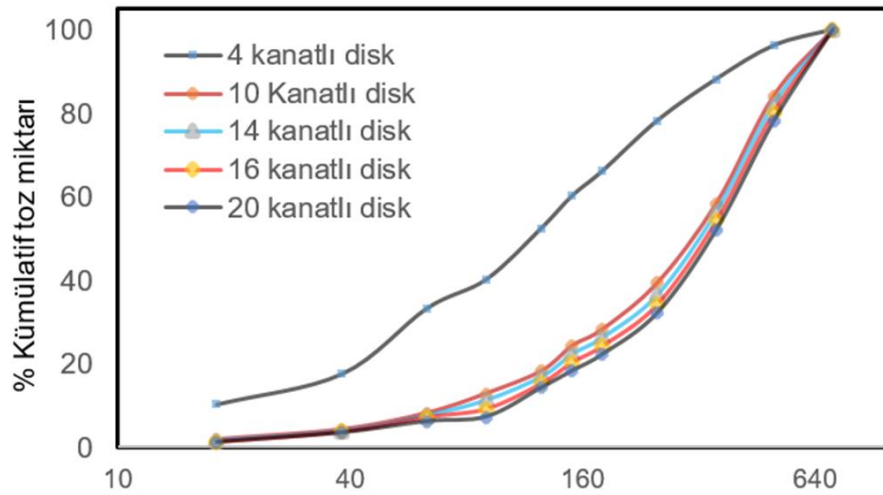
$$\frac{D_{50}}{D_{97}} = 0.09$$

İnce toz kesiri

$$\frac{D_{10}}{D_{50}} = 0.87$$

4.2.2. Kanat sayısının metal toz üzerindeki etkisi

Şekil 4.13’de görüldüğü gibi kanat sayısı 10,14,16,20 olan diskler benzer bir grafik seyri izlemektedirler. Kanat sayısı 4 olan disk daha optimal bir seyir izlemektedir. Ancak kanat sayısı metal eriğin soğutulması çok önemli bir role sahip olmaktadır. Normalde kanat sayısı ile daha eşit bir su dağılması işlemi gerektirmesi gerekir. Ama bir birine yakın püskürme işlemi ile yakın metal eriyik ile çarpışmasında akış ortamında düzensizliğe yol açmaktadırlar. Bunun için tüm deneylerde 4 kanallı disk kullanılmıştır. Şekilden çok kanallı disk kullanımının toz üretim miktarında önemli bir parametre olmadığını göstermektedir.



Şekil 4.13 Metal toz boyutunun kanalı disk sayısına göre dağılımı

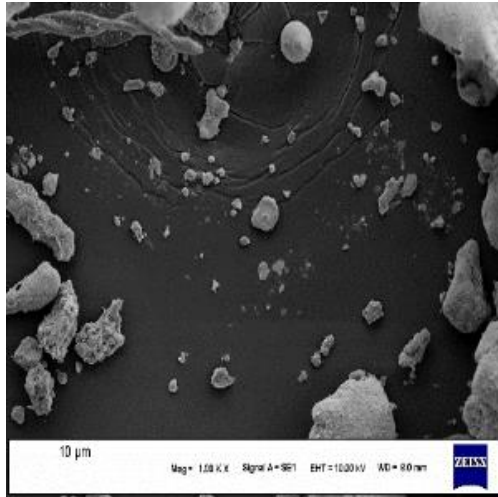
4.3. Tozların Şekli ve Mikro Yapısal Analizi

Her atomizasyon durumu için birkaç gram toz alınmıştır. Bu tozları bir toplama kabın içine alıp karıştırılmıştır. Daha sonra bu tozların şekil analizi ve mikro yapısını incelemek için Harran üniversitesi merkezi laboratuvarına götürüp incelenmiştir. Bu incelemede Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. SEM malzeme biliminde, biyolojide, jeolojide ve çeşitli diğer alanlarda yüzey yapılarının yüksek çözünürlüklü görüntülenmesi için kullanılan güçlü bir tekniktir. Optik mikroskopların görüntüleri büyötmek için görünür ışığı kullandığına karşın, SEM, çok daha yüksek

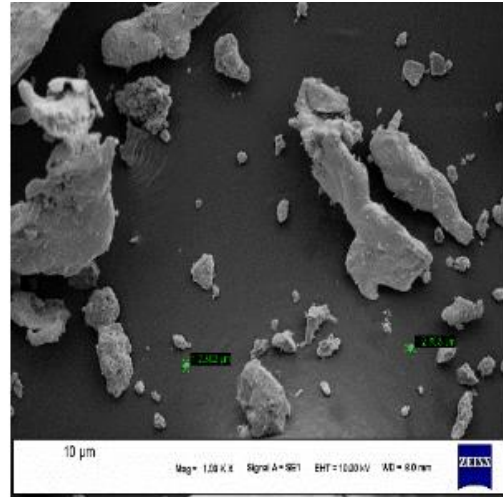
çözünürlük elde etmek için odaklanmış bir elektron demeti kullanmaktadır. SEM'in birçok avantajı vardır. Bunlar arasında yüksek çözünürlük (nanometre ölçeğine kadar), üç boyutlu görüntüleme yetenekleri ve iletken ve iletken olmayan örnekleri analiz etme yeteneğine sahip olmaktadır. Ancak SEM'in bir vakum ortamına ihtiyaç duyması ve elektron demeti nedeniyle numunelere zarar verebilme özelliği gibi bazı dezavantajları vardır. Bu dezavantajlara rağmen, SEM, bilimsel araştırma ve endüstriyel uygulamalarda vazgeçilmez bir araç olarak yerini almaktadır.

4.3.1. Tozların şekil analizi ve tozların mikro yapısı

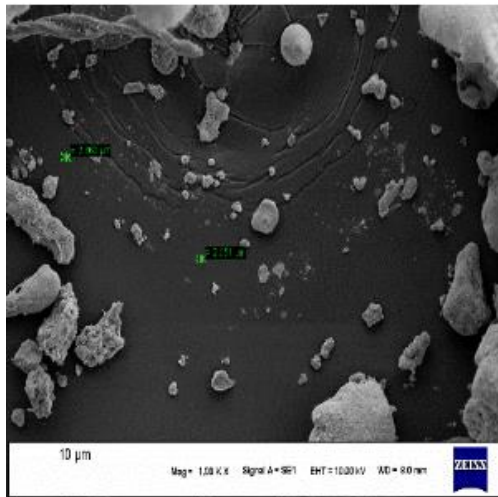
Mikroskobik gözlem, tozların şeklinin kurşun için su atomize tozlara benzer olduğunu göstermektedir. Yani su atomizasyonda elde edilen toz parçacıkları gibi heterojen bir yapıya sahip olmaktadır. Yüksek eritme sıcaklığı ve toz boyutu arttıkça şekillerin karmaşıklığı artmıştır. Kurşun tozlarının tane boyutu çok incedir. Elde edilen tozların genel görünüşleri, şekil ve mikro yapı analizi aşağıda şekil 4.14'de gösterilmiştir. Bu SEM ile çekilen resimlerde farklı boyut ve şekille sahip toz dağılımları görülmektedir. En küçük toz boyutları 2µm ile 13µm arasında tespit edilmiştir.



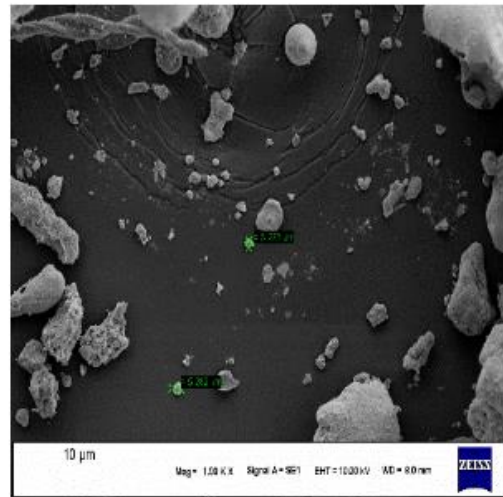
(g)



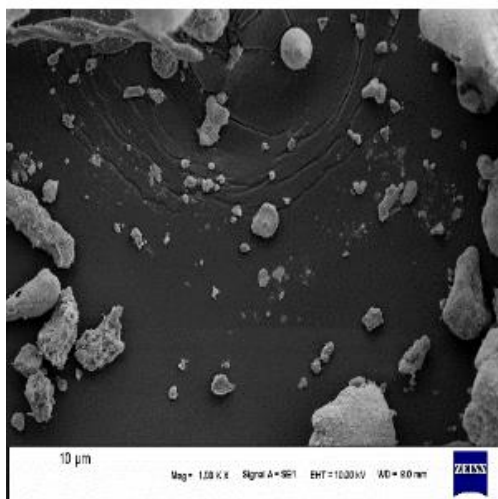
(h)



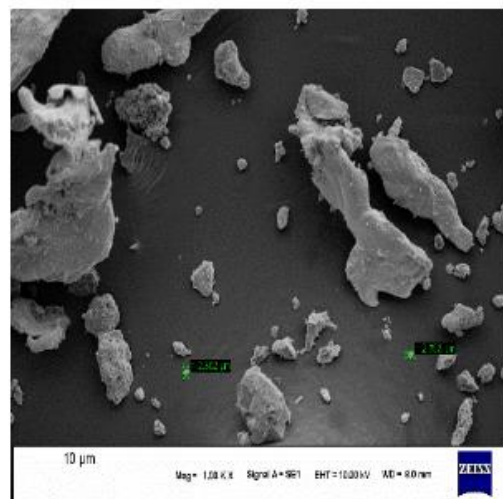
(i)



(j)



(k)



(l)

Şekil 4.14.Elde edilen tozların genel görünüşleri, şekil ve mikro yapı analizi

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

TM endüstrisinde en yaygın kullanılan metal tozu elde etme yöntemi olan su atomizasyonu ile ilgili deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Yüksek maliyetli yüksek basınçlı su pompaları ve pompa için kullanan araç ve gereçler nedeniyle, santrifüj atomizasyon yöntemi seçilmiş ve su atomize tozların özelliklerine sahip tozlar üreten özgün bir tasarım ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada, santrifüj atomizasyon ile metal tozu üretimi için düz kanallı disk ve kavisli kanallı disk geometrileri kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, kavisli kanatlı diskin çok daha yüksek oranlarda ince toz üretimi yapabileceğini göstermiştir. Ekonomik olması ve metalin kolay erimesinden dolayı metal tozu üretimi için ana metal olarak kurşun seçilmiştir. Üretilen tozların özelliklerine göre düz kanatlı disklerin ve kavisli kanatlı performansı tartışılmıştır.

Tüm deneylerde eriyik malzemesi kurşundur. Kanatlı disk atomizasyonda, su diskin yüzeyine dikey olarak dökülmüştür. Su dönen disk merkezine dökülmesi ile disk döndükçe santrifüj kuvvet tarafından dışa doğru yönlendirilmektedir. Dönen diskin üzerindeki kanatlar, suyu disk yüzeyine daha homojen bir şekilde dağıtmak için kullanmaktadır. Bu suyun disk yüzeyine eşit bir şekilde ulaşmasını sağlamaktadır.

Disk, yüksek devirli bir elektrik motor tarafından döndürülmektedir. Diskin dönmesi, santrifüj kuvveti oluşturmaktadır. Bu kuvvet, disk yüzeyine dökülen suyu dışa doğru itmektedir. Metalin eritildiği pota nozulünden döktürülmektedir. Santrifüj kuvvet tarafından dışa doğru itilen su, erimiş metal ile hava ortamında çarpışması sağlanmıştır. Bu çarpışma ve etkileşim sonucunda, metal eriği su tarafından parçalanmakta ve atomize edilmektedir. Bu, küçük metal damlacıklarının oluşmasını sağlamaktadır.

Su damlacıkları ve erimiş metal partiküllerinin atomizasyon sürecinde çarpıştığı sırada çeşitli mekanizmalar devreye girer. Özellikle damlacıkların ve partiküllerin hızı, boyutu ve özellikleri gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak belirli mekanizmalar ortaya

çıkılmaktadır. İşte su damlacıkları ile erimiş metal partikülleri arasındaki çarpışmanın bazı ana mekanizmaları, metal eriyik parçalanma veya küçük taneciklere ayrılmasıdır. Su damlacıkları ile erimiş metal partikülleri arasındaki çarpışma, daha büyük erimiş metal damlacıklarının daha küçük parçalara veya partiküllere ayrılmasına neden olmaktadır.

Bu süreç, çarpışma sırasında transfer edilen yüksek kinetik enerjiden kaynaklanmaktadır. Metal eriyiği, erimiş metal partiküller, soğuk su damlacıklarıyla temas ettiklerinde katılaşabilmektedir. Metal eriyik hızlı bir şekilde katılaşması gerçekleşebilmekte ve bu da katı metal partiküllerin oluşmasına yol açmaktadır. Çarpışma sırasında erimiş metalden su damlacıklarına ısı transferi gerçekleştirmektedir. Bu ısı transferi, erimiş metali katılaştırmakta ve su damlacıklarını buharlaştırabilmektedir. Büyük erimiş metal damlacıkları, genellikle bir toz formunda, daha küçük partiküllere parçalanmaktadır. Metal eriyik parçalanma, katılaşma ve ısı transferinin birleşimi, erimiş metalin atomizasyonuna katkıda bulunmaktadır. Metal eriyik soğuması ve sertleşmesi, metal eriyik su ile çarpışması, erimiş metal partiküllerini hızla soğutulmakta ve katılaştırılmaktadır. Bu soğuma ve sertleşme süreci, elde edilen metal tozunun mikroyapısını ve özelliklerini etkileyebilmektedir. Metal eriyik-su emülsiyonu oluşumu, çarpışma, ince metal partiküllerinin su ortamında dağıldığı bir emülsiyonun oluşmasına neden olabilmektedir. Bu mekanizmalar, merkezkaç atomizasyon yoluyla metal tozu oluşumuna katkıda bulunmaktadır. Sonuç olarak, atomizasyon sürecinin parametrelerine, yani dönme hızı, akış hızları, sıcaklıklar ve kurşun malzemesinin özelliklerine bağlı olmaktadır.

Santrifüj atomizasyon yönteminde atomizasyon mekanizmasına bir dizi zorluk ve olumsuz etki getirebilmektedir. Su akışı üzerindeki etkileri, yüzey pürüzlülüğü, suyun diskin yüzeyinde düzgün akışını bozabilmekte ve suyun disk yüzeyinde eşit dağılmasına engel olabilmektedir. Bu düzensiz akış, tutarsız atomizasyona yol açmaktadır. Atomizasyon verimliliği, pürüzlü yüzeyler, akışkan su içinde türbülanslara neden olabilmekte ve atomizasyon sürecini etkileyebilmektedir. Etkili atomizasyon için suyun kontrol edilmiş ve homojen bir akışa sahip olması

gerekmektedir. Partikül boyut dağılımı, yüzey düzensizlikleri, atomize edilmiş partiküllerin boyutlarında değişikliklere neden olabilmektedir. Pürüzlülük, daha büyük damlacıklara veya erimiş metalin düzensiz parçalanmasına yol açmakta ve bu da nihai toz özelliklerini etkileyebilmektedir. Aşınma ve Yıpranma, zamanla, pürüzlü yüzeyler dönen diskte hızlı aşınma ve yıpranmaya neden olabilmektedir. Bu, araç ve gereçlerin dayanıklılığını tehlikeye atabilmekte ve bakım sorunlarına yol açabilmektedir. Malzeme yapışması, yüzey pürüzlülüğü, atomize edilmiş partiküllerin diske yapışmasını teşvik edebilmekte, bu da atomizasyon sürecinin verimliliğini azaltmakta ve üretilen tozun kalitesini düşürmektedir. Bu sorunları ele almak için, dönen diskin yüzeyinin düzgün ve tutarlı olması önemli olmaktadır. Düzenli bakım, diskin malzeme seçimi ve pürüzlülüğü azaltmaya yönelik yüzey işlemleri, atomizasyon verimliliğini artırmaya ve genel sistem performansını iyileştirmeye katkıda bulunabilmektedir. Kirlenme, metal eriyik veya su partiküllerinin farklı tanecikler arasında karışması, toz karakteristikleri üzerinde istenmeyen etkilere neden olabilmektedir. Su giriş sıcaklığı, sisteme giren suyun sıcaklığı, özelliklerini ve dolayısıyla atomizasyonu etkileyebilmektedir.

Yüzey gerilimi, bir sıvının, bu durumda suyun, yüzeyini ince, elastik bir film gibi davranmaya sebep olan kohezif kuvvetlerden kaynaklanmaktadır. Bu, sıvı-hava arayüzünde su molekülleri arasındaki çekici kuvvetlerin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Yüzeydeki su molekülleri, suyun özgül özellikleri nedeniyle belirli bir yüzey gerilimi ve minimum yüzey alanı eğilimi göstermektedir. Sonuç olarak, su yüzeyindeki moleküller, iç kısımdaki moleküllerle daha az çekim etkileşimine maruz kaldıkları için birbirlerine daha fazla çekilmektedir. Bu durum, su yüzeyinin bir elastik zar gibi davranmasına ve belirli bir direnç olmaksızın minimum enerji durumunu elde etme eğilimine yol açmaktadır.

Su viskozitesi, suyun akışa karşı direncini ifade etmektedir. Basit bir ifadeyle, bir akışkanın ne kadar "yoğun" veya "sıvı" olduğunun bir ölçüsü olmaktadır. Su, düşük viskoziteli bir akışkan olarak kabul edilmektedir. Yani relatif olarak düşük akış direncine sahiptir. Su viskozitesi, sıcaklık gibi faktörlerden etkilenebilmektedir. Su viskozitesi gerçekten akış karakteristiklerini etkileyebilmekte ve atomizasyon gibi

işlemleri etkileyebilmektedir. İşte bu etkiler, su molekülü, bir oksijen atomu ile iki hidrojen atomundan oluşmaktadır. Oksijen atomu, hidrojen atomlarına kıyasla daha elektronegatif olduğundan, su molekülü polar bir yapıya sahiptir. Bu polarite, su moleküllerinin birbirine hidrojen bağlarıyla bağlanmasına neden olmaktadır. Akış karakteristikleri, viskozite, suyun ne kadar kolay akabileceğini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Düşük viskozite, daha düzgün ve daha zahmetsiz akışa izin verirken, yüksek viskozite daha fazla dirence neden olmaktadır. Santrifüj atomizasyon süreci, suyun bir malzemeyi ince parçacıklara ayırmak için kullanıldığı durumlarda, örneğin püskürtme nozullarında veya santrifüj atomizasyonda, viskozite damlacıkların oluşumunu ve boyutunu etkileyebilmektedir. Düşük viskoziteli su, daha verimli atomizasyona katkıda bulunmaktadır. Sıcaklık etkisi, viskozite genellikle sıcaklığa bağlı olmaktadır. Su sıcaklığı değiştikçe, viskozitesi de değişebilmektedir. Daha sıcak su genellikle daha soğuk suya göre daha düşük viskoziteye sahiptir.

Su kendisi birçok diğer akışkanla karşılaştırıldığında relatif olarak düşük viskoziteye sahip olsa da, sıcaklık değişiklikleri ve katkı maddeleri veya kirleticilerin varlığı hala viskozitesi üzerinde fark edilebilir etkilere sahip olabilmektedir. Su viskozitesini anlamak ve kontrol etmek atomizasyon süreçlerinde kesin akış özellikleri gerektiren durumlarda çok önemli olmaktadır.

Santrifüj atomizasyon mekanizmasını olumsuz etkileyebilecek başka değişkenler ise sıcaklık, aşırı yüksek veya düşük sıcaklıklar, erimiş metal ve suyun viskozitesini etkileyerek atomizasyon sürecini etkileyebilmektedir. Çevresel koşullar, nem ve hava basıncı gibi çevresel faktörler, atomizasyon sürecini etkileyebilmektedir. Nozül tasarımı, suyun yönlendirildiği nozülün tasarımı ve durumu, atomizasyon verimliliğini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Metal alaşım bileşimi, eritilen metal alaşımının özellikli kompozisyonu, atomizasyon sırasında davranışını etkileyebilmektedir. Potada oluşan çalkantılar, eritilmiş metal potasındaki herhangi bir dalgalanma veya hareketlilik, metal akışının tutarlılığını etkileyebilmektedir. Malzeme saflığı, su veya metaldeki kirlilikler, atomizasyon sürecine müdahale edebilmekte ve üretilen tozun kalitesini etkileyebilmektedir.

Su diske merkezden temas eder ve daha sonra su dönen diskle yüksek hıza hızlandırılmaktadır. Su, hareket ettikçe incelen merkezden dışa doğru ince bir film olarak düzgün bir şekilde dağılmaktadır. Dönme nedeniyle oluşan kuvvetlerin teğetsel ve radyal bileşenleri nedeniyle su spiral bir yol izler. Teğetsel bileşen radyal bileşenden çok daha büyüktür. Bu şekilde püskürtülmüş su damlacıklarının üzerine belli bir yükseklikte dökülen metal eriyik ile çarpışması ile dökülürülerek metal eriyiğini atomizasyonu sağlanmaktadır.

Disk ile su arasındaki sürtünme atomizasyon için hayati önem taşımaktadır. Sürtünme yoksa diskin dönüşü önemli değildir. Su, sarmal bir hareket yapmaksızın, dışarı doğru düzgün bir şekilde akacaktır. Su ile disk yüzeyi arasındaki sürtünme iki farklı kaynağa bağlıdır. Bunlar su viskozitesi ve disk malzemesinin yüzey pürüzlülüğü ve metal cinsine bağlı olmaktadır.

Temas alanında diskten savrulan su, kurşunun katılma sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıktadır. Böylece metal eriyik ile temas eden bölgelerde sürekli olarak soğur ve daha viskoz hale gelmektedir. Böylece su temas eden sıvı filmin hızı, disk su hızı ile aynı değere sahip olmaktadır. Sıvı filmdeki hız profili, filmin üst kısmına doğru azalmaktadır.

Atomizasyon sırasında katılan filmin kalınlığı sürekli olarak artmıştır. Daha sonra bu plaka dengesizlik kuvvetleri ve titreşim etkisi ile atılmış ve bazen de merkezkaç kuvveti nedeniyle levha halinde kesilmiştir. Daha sonra disk yüzeyinde yeni bir film büyümekte ve atomizasyon bitene kadar aynı olay tekrar etmektedir. Bu, sıvı maddenin sıcaklığı ve akış hızı ile diskin dönme hızı ile ilgilidir. Yüksek sıcaklıklar ve yüksek hızlar için (1000 °C ve 25000 rpm) metal eriyik yaklaşık %20'si bir levha halinde katılmıştır. Bu değer 1000 °C sıcaklıkta ve 18000 rpm disk hızında %75'e kadar çıkmaktadır. Bu hızın altında levha oluşumu daha yüksek değerlere çıkarmaktadır. Bu nedenle deneyler 18000 rpm ve 750 °C'nin üzerinde yapılmıştır.

Suyun viskoz etkisinden dolayı dönme hızı, disk yüzeyinden suyun serbest yüzeyine doğru parabolik olarak azalır. Bu nedenle, suyun disk kenarını terk ederken

hızı, diskin çevresel hızından çok daha düşüktür. Suyun bu kayması çoğunlukla viskozite ile ilgilidir. Suyun viskozitesi sıcaklık arttıkça azaldığından, sıcaklık arttıkça tozlar irileşir.

Düz kanatlı disk atomizasyonda su yerçekimi kuvvetinin etkisiyle disk yüzeyi ile temas halindedir. Su hacminin merkezkaç kuvveti, viskozite, yüzey gerilimi ve sürtünmeden üretilen kuvvetten büyükse, disk yüzeyinden ayrılmaktadır. Bu noktadan sonra suyun dağılması başlamaktadır. Bir parçacık üzerindeki merkezkaç kuvveti aynı zamanda suyun yoğunluğu ile ilgili olmaktadır. Metal eriğin santrifüj atomizasyonu, yukarıdaki koşul sağlandığında diskin dışında herhangi bir noktada başlamaktadır. Sıvının herhangi bir noktasındaki enerji, gerekli minimum atomizasyon enerjisinden büyükse, atomizasyon o noktada başlayacaktır.

Düz kanatlı disk için kullanılan tüm denklem kavisli kanat disk içinde geçerli olmaktadır. Ancak, ayrılma açısı biraz farklılık oluşturmaktadır. Bu ayrılma açısı kavisli kanatların radyal hızını bir miktar atırmaktadır. Radyal hızdaki artış mitarı disk göbeğine daha büyük bir ivme ve daha pozitif bir etki meydana getirmektedir. Bu hızdaki artış, metal erylkle çarpılmasında daha küçük taneciklerin elde edilmesine katkısı olmaktadır. Diğer bir fark ise disk malzemeleridir. Kavisli kanatlı diskler alimiyum malzemesinden imal edilmiştir. Düz kanatlı diskler ise demir malzemesinden imal edilmiştir. Bu malzeme farklılığı malzemelerin yoğunluğunda ötürüdür. Demir malzemedan imal edilmiş olan diskler ağır olduğundan dönen motor milini bir miktar dönmesine engel olunmaktadır. Bu durum santrifüj atomizasyonda elde edilen toz taneciklerin boyutunu düşürmektedir.

Suyun dönme hızı, radyal hızdan birkaç kat daha büyüktür. Böylece, su disk üzerinde dışa doğru daha fazla dönmeye çalışır. diskin çevresel hızı 20 m/s ile 100 m/s arasında değişmektedir. Bu çevresel hız, farklı büyüklerde santrifüj ivmeleri üretilmektedir. Bu nedenle, su üzerindeki kuvvetin merkezkaç bileşeni, yerçekimi kuvveti ile kıyaslanamaz. Sonuç olarak, su disk yüzeyini terk ederken ve kanat yüzeyinde birikmektedir. Suda herhangi bir kayma meydana gelmez. Disk ile su dönmesini engeller ve suyun yönünü 90° değiştirmektedir.

Bu tür bir diskle, deney koşullarını kontrol etmek çok daha kolay olmaktadır. Akış adeta bir oluk içinde gerçekleşmektedir. Disk hızı, akış hızı ve sıcaklıktaki değişikliklerin ortalama parçacık boyutu üzerinde doğrudan etkileri var olmaktadır. Deneysel sonuçlar çok daha güvenilir ve tekrarlanabilir. Kavisli kanatlı disk ile ilgili tek sorun, diskin fan etkisidir. Diskin kendisi bir fan gibi çalışıyor ve sürekli temiz hava üflüyor.

Düz ve kavisli kanatlı deneysel çalışma ile elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

a) Sıvı metalin viskozitesi ve yüzey gerilimi azaldıkça toz boyutu küçülür. Bir sıvı metalin viskozitesi ve yüzey gerilimi sıcaklık arttıkça azaldığından, sıvı metalin aşırı ısınma sıcaklığı arttıkça toz boyutu küçülür.

b) Düz kanatlı diskte kayma olmadığı için sıvı metale verilen enerji dönen diskin hızı ile orantılıdır. Bu nedenle, disk hızı artırıldığında toz daha ince hale gelir.

c) Sıvının film kalınlığı arttıkça toz irileşir. Bu, suyun akış hızı artırılırsa toz boyutunun arttığı anlamına gelmektedir.

Atomizasyon sırasında metal eriğin katılaşması ve kanatlı diskin fan etkisi oluşturması genel kurallardan sapmanın iki önemli nedeni olarak değerlendirilmiştir. Kavisli kanatlı diskte katılaşma, düz kanatlı disk için benzer şekilde gerçekleşmektedir. Sistemin güvenliği nedeniyle Daha sonra sıvı metalin üzerinden aktığı katılaşmış film üzerindeki su akışı çok yüksektir. Bu zayıf yüzey kalitesi, sıvı metalin kanattan akışını engeller. Bu nedenle suyun radyal hızı düşüktür. Bu, sıvının kanat yüzeyi ile temas süresini artırır. Sıvı metal soğur ve ardından yüzey gerilimi artar ve bu da atomlaşmayı geciktirmektedir.

Ancak yüksek sıcaklıklarda ve yüksek akış hızlarında fan etkisi çok küçüktür. Kurşunun 24000 rpm disk hızında kanatlı disk atomizasyonunun deneysel sonuçları toz boyutunun sıcaklık arttıkça küçüldüğü, metal akış hızının artmasıyla ise arttığı görülmektedir. Minimum ortalama toz boyutu, yüksek sıcaklıkta (1000°C) ve düşük akış debisinde (0,15 lt/s) 51 µm olarak elde edilmiştir. Düşük metal eriyik akış debisinde (0,10 lt /s), kanattaki su film kalınlığı çok küçük olduğundan metal erikle bu

şekilde çarpılması metal eriğin katılaşmış filmi üzerindeki akış direnci artırmaktadır. Bu nedenle metal eriğin radyal hızı azalır. Suyun kanatlı yüzey ile temas süresi uzadığı için metal eriğin ısı kaybı artmaktadır.

Genel olarak atomizasyonla üretilen tozların şekli, yüzey gerilimi ve soğuma hızının fonksiyonudur. Aynı zamanda toz boyutuyla da biraz ilişkilidir. Toz boyutu artarsa tozun şekli karmaşık hale gelir ve toz incelirse küresel veya küresel hale gelir.

Tozların ortalama parçacık boyutunun şunlara bağlı olduğuna dikkat çekildi:

- a) malzeme türleri (yoğunluk, erime sıcaklığı)
- b) aşırı ısınma derecesi
- c) atomizer diskinin dönme hızı
- d) diskin tasarımı
- e) metal debisi

Yüzey geriliminin etkisiyle damlacıklar yüzey alanlarını küçültmeye çalışırlar. Bu, kompleks şekilli bir su damlacık belirli bir süre halde tutulursa damlacığın şeklinin küresel bir forma dönüşmesi gerçekleşir. Soğutma ortamı olarak hava veya gaz kullanılırsa, düşük soğuma hızına sahip olduğu için damlacıklar sıvı halde yeterli süre kalır. Bu nedenle, yüzey geriliminin etkisiyle tozlar küresel veya küresel şekiller alır. Atomize parçacıkların hızı çok yüksek olduğundan başlangıçta havanın sürtünme ve sürüklenme kuvveti de şekli küresel olarak değiştirme eğilimindedir. Bu nedenlerden dolayı, soğutma ortamı olarak hava veya bir gaz kullanılırsa, tozların şekli küresel veya küresel tip olmaktadır

Soğuma hızı artırılırsa damlacıklar hızla katılaşmaktadır ve bu nedenle damlacıkları küre haline getirmek için yeterli zaman yoktur. Yüzey geriliminin toz şekli üzerindeki etkisi soğuma hızı belirli bir değere çıkarıldığında düşük değerlere inmektedir.

Damlacık soğuma hızı yüksek değerlere çıkarsa, damlacıktaki yüksek sıcaklık gradyanı nedeniyle tozun şekli çok düzensiz hale gelir. Herhangi bir sıvı katılaştığında büzülmenin gözlemlendiği bilinmektedir. Yüksek soğuma hızlarında sıvı ve katı olmak

üzere iki faz aynı anda gözlenebilir. Bu sebeplerden dolayı yüksek soğuma hızlarında tozların şekilleri karmaşık hale gelmektedir.

Sistemimizde su santrifüj kuvveti ile mekanik olarak atomize edilmekte ve bu esnada potadan döktürülen metal eriyik ile çarpışma gerçekleşmektedir. Metal eriyik bu çarpışma sonucu daha küçük parçacıklara dönüşmesi gerçekleşmektedir. Daha küçük parçalara dönüşmekle birlikte yaklaşık 15 cm savrularak toplama kabında biriken suda soğutulmaya başlamaktadır. Küçük damlacıklar bir kısmı oluşan hava akımı ile havada asıl kalması ile katılaşmaya havada başlamakta ve büyük damlacıklar su ile çarpışarak katılaşmaya başlamaktadır. Bu çarpışma ile elde edilen metal tozlar su atomizasyonu ile üretilen toz taneciklere benzer özellikler göstermektedir.

Kavisli kanatlı disk atomize yönteminde kurşun tozlarında gözlenen damlacıkların ve tozların birkaç kez çarpışmaya maruz kalmaktadır. Kavisli kanatlı disk atomizasyonunda, radyal hız bileşeni teğet bileşenden çok daha küçüktür ve salım hızı çevresel disk hızına yaklaşır. Kavisli kanatlı disk atomizasyonunda kayma olmadığı için çeşitli boyutlardaki tozların salınım hızı yaklaşık olarak diskin teğetsel hızına eşit ve aynı hız değerlerine sahip olmaktadır. Bu nedenle, diskin verdiği kinetik enerji, su damlacıkların kütleleriyle ilişkili olmaktadır.

Hava direncinden kaynaklanan sürüklenme kuvveti, hareket yönünün tersine etki etmektedir. Suyun damlacık hızı 35- 100 m/s arasında değişmektedir. Sürüklenme kuvvetinin etkisi, tozun şeklinin bir küre olduğu varsayılarak analitik olarak hesaplanabilmektedir. Tozların çapı çok küçük olduğundan ($2-500 \mu\text{m}$) $V=35\text{m/s}$ hızında Reynolds sayısı- Hava için 100'den küçüktür. Reynolds Sayısı, küresel ve silindirik şekiller için sürüklenme kuvveti katsayısı ile ters orantılıdır. Bu, bir parçacığın sürüklenme kuvvetinin kinetik enerjiye oranının parçacık boyutu arttığında azaldığı anlamına gelir. Bu nedenle büyük parçacıklar havadaki küçük parçacıklardan daha hızlı hareket eder. Öte yandan, yüzey alanı/ağırlık oranı artırılırsa bir damlacığın soğuma hızı da artar. Bu nedenle, daha küçük parçacıklar daha büyük parçacıklardan (genellikle havada) daha erken katılaşır. Havada kalma süresi içinde, büyük sıvı damlacıkları veya kısmen katılaşmış pelte gibi damlacıklar küçük küresel tozlara

dönüşmektedir. Bu, en yaygın çarpışma türüdür. Bazen, çarpışan iki lapa gibi damlacık ve katı toz arasındaki bağıl hızlar o kadar yüksektir ki, toz damlacığı mermi gibi delip geçmektedir. Ancak bazı durumlarda, katı tozlar pelte gibi damlacıkların içine nüfuz eder ancak içinden geçemezler ve içlerinde sıkışıp kalmaktadır. Bu nedenle, iki katı toz çok yüksek bağıl hızlarda çarpışıyor olmalıdır. Bu çarpışma ya çatlaklara neden olur ya da tozlarda hasara yol açar. Daha sonra, toplama kabındaki su ile söndürme sırasında hasar ve çatlakların oluşması için hızlanabilmektedir. Bazı parçalanmış tozlarda çarpışma gözlenmemektedir.

KAYNAKLAR

- ACOSTA, W. A. 1985. Experimental study of the spray characteristics of a research airblast atomizer (Vol. 79399, p. V002T06A036). American Society of Mechanical Engineers.
- ADLER, C. R. and MARSHALL, W. R. 1951. Performance of spinning disk Atomizers. 1. Chemical Engineering Progress, 47(10), 515-522.
- ADLER, C. R. and MARSHALL, W. R. 1951. performance of spinning disk atomizers. 2. Chemical Engineering Progress, 47(12), 601-608.
- ADLER, C.R. AND MARSHALL, W.R.1951.Chem. Eng. Prog.47,515,601.
- AHMED, M. and YOUSSEF, M. S. 2012. Characteristics of mean droplet size produced by spinning disk atomizers.
- AHMED, M. and YOUSSEF, M. S. 2014. Influence of spinning cup and disk atomizer configurations on droplet size and velocity characteristics. Chemical Engineering Science, 107, 149-157.
- ALDERLIESTEN, M. 2004. Mean particle diameters. Part IV: Empirical selection of the proper type of mean particle diameter describing a product or material property. Particle and Particle Systems Characterization: Measurement and Description of Particle Properties and Behavior in Powders and Other Disperse Systems, 21(3), 179-196.
- ALDERLIESTEN, M. 2005. Mean particle diameters. From statistical definition to physical understanding. Journal of biopharmaceutical statistics, 15(2), 295-325.
- ALDERLIESTEN, M. 2005. Mean particle diameters. Part V: Theoretical derivation of the proper type of mean particle diameter describing a product or process property. Particle and Particle Systems Characterization, 22(4), 233-245.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (FILADELFIA, PENNSYLVANIA). 2020. ASTM E11-20: Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves. ASTM.
- ANGELO, P. C. SUBRAMANIAN, R. and RAVISANKAR, B. 2022. Powder metallurgy: science, technology and applications. PHI Learning Pvt. Ltd.
- ARNOLD, N. A. 1992. P/M Bearings. Metals Handbook, th edition, 704, 709.
- BAKER, C. G. (ED.). (1997). Industrial drying of foods. Springer Science and Business Media.
- BALKE, C. C., Kents Mechanical Engineers Handbook, Wiley Engineering HANDBOOK SERIES, New York, 1950, Section 19, pp.45-50.
- BAR, P. V. 1935. Doctoral engineering thesis. Technical College, Karlsruhe, Germany.
- BAROT, R. AYAR, M. and BERAVALA, D. H. 2019. Energy Efficient and Sustainable Design and Development of Muffle Furnace for Melting Alloys. Advances in Power Generation from Renewable Energy Sources (APGRES).
- BAUER, H. AND KRUGER, R. 1969. Verfahrens Technik, 3, No.3, 107.
- BEDDOW, J. K. (1978). Production of Metal powders by atomization. Heyden and Son Inc. Philadelphia, Pa. 1978, 100 p.
- BEDDOW, J. K. 1986. Size, Shape, and Texture Analysis.
- BÉGIN, A. CASTAIGNE, F. and GOULET, J. 1991. Production of alginate beads by a rotative atomizer. Biotechnology techniques, 5(6), 459-464.

- BOCKSTIEGEL, G. and CA, B. 1976. The Influence Of Slag Inclusions And Pores On Impact Strength And Fatigue Strength Of Powder Forged Iron And Steel. T
- BROWN, G. T. and STEED, J. A. 1973. The Fatigue Performance of Some Connecting Rods Made by Powder Forging. *Powder Metallurgy*, 16(32), 405-415.
- BROWN, G. T. and STEED, J. A. 1974. A comparison of the mechanical properties of some powder-forged and wrought steels. *Powder Metallurgy*, 17(33), 157-177.
- CAL, K. and SOLLOHUB, K. 2010. Spray drying technique. I: Hardware and process parameters. *Journal of pharmaceutical sciences*, 99(2), 575-586.
- CAPUS, J. M. 2005. *Metal Powders: A Global Survey of Production, Applications and Markets 2001-2010*. Elsevier.
- CEROVIĆ, V. B., PETROVIĆ, D., RADOJEVIĆ, R., BARAĆ, S., and VUKOVIĆ, A. 2018. On the fertilizer particle motion along the vane of a centrifugal spreader disc assuming pure sliding of the particle. *Journal of Agricultural Sciences (Belgrade)*, 63(1), 83-97.
- CHAMPAGNE, B. and ANGERS, R. 1984. REP atomization mechanismus. *PMI. Powder metallurgy international*, 16(3), 125-128.
- CHAMPAGNE, B. ANGERS, R. and FISET, M. 1984. Characteristics of powders produced by the rotating electrode process. *Met. Powder Rep.* 39(5), 267-270.
- CHAWLA, N. and WILLIAMS, J. J. 2013. Fatigue and fracture of powder metallurgy steels. In *Advances in Powder Metallurgy* (pp. 455-490). Woodhead Publishing.
- CHEETHAM, M. D. KEENE, A. F. BUSH, R. T. SULLIVAN, L. A. and ERSKINE, W. D. 2008. A comparison of grain-size analysis methods for sand-dominated fluvial sediments. *Sedimentology*, 55(6), 1905-1913.
- CHEGINI, G. R. BASHIRI, B. and MESBAHI, M. H. 2012. Comparison of Pumped Air Characteristics From a Rotary Atomizer With Three Types of Wheels. *Experimental Techniques*, 36(6), 63-68.
- CSN, E. 2012. Tests for geometrical properties of aggregates—Part 1: Determination of particle size distribution—Sieving method. Czech Office for Standards, Metrology and Testing, Prague. 933-1.
- CUNNINGHAM, F. M. 1963. Performance characteristics of bulk spreaders for granular fertilizer. *Transactions of the ASAE*, 6(2), 108-0114.
- ÇENGEL, A. YUNUS. 2003. *Heat transfer: A practical Approach* MacGraw Hill, New York.
- DANNINGER, H. and GIERL-MAYER, C. 2013. Advanced powder metallurgy steel alloys. In *Advances in Powder Metallurgy* (pp. 149-201). Woodhead Publishing.
- DIRHI, R. PRASAD, K. SHUKLA, A. K. SARKAR, S. RENGANATHAN, T.
- DHOKEY, N. B. WALUNJ, M. G. and CHAUDHARI, U. C. 2014. Influence of water pressure and apex angle on prediction of particle size for atomization of copper powder. *Advanced Powder Technology*, 25(2), 795-800.
- DOBRZAŃSKI, L. A. DOBRZAŃSKI, L. B. DOBRZAŃSKA-DANIKIEWICZ, A. D. and KRASZEWSKA, M. 2020. Manufacturing powders of metals, their alloys and ceramics and the importance of conventional and additive technologies for products manufacturing in Industry 4.0 stage. *Archives of Materials Science and Engineering*, 102(1).
- DOMBROWSKI, N. and LLOYD, T. L. 1974. Atomisation of liquids by spinning cups. *The Chemical Engineering Journal*, 8(1), 63-81.

- DOMBROWSKI, N. and MUNDAY, G. 1968 "Spray Drying," Chapter 16 in Biochemical and Biological Engineering Science, Vol. 2, ed. N. Blakebrough, Academic Press, London.
- DOMBROWSKI, N. and JOHNS, W. R. 1963. The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets. Chemical Engineering Science, 18(3), 203-214.
- DONG, P. HOU, W. L. CHANG, X. C. QUAN, M. X. and WANG, J. Q. 2007. Amorphous and nanostructured Al₈₅Ni₅Y₆Co₂Fe₂ powder prepared by nitrogen gas-atomization. Journal of alloys and compounds, 436(1-2), 118-123.
- DUNKLEY, J. J. 2013. Advances in atomisation techniques for the formation of metal powders. In Advances in Powder Metallurgy (pp. 3-18). Woodhead Publishing.
- FENG, Y. H. ZHANG, Z. GAO, J. FENG, G. P. QIU, L. FENG, D. L. and ZHU, X. 2021. Research status of centrifugal granulation, physical heat recovery and resource utilization of blast furnace slags. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 157, 105220
- FERRARIS, C. F. HACKLEY, V. A. and AVILÉS, A. I. 2004. Measurement of particle size distribution in Portland cement powder: analysis of ASTM round robin studies. ASTM International.
- FRASER, R. P. P. EISENKLAM, and N. DOMBROWSKI. 1957. Liquid atomization in chemical engineering. British Chemical Engineering, Aug: 414-420; Sept. 496-500; Oct. 536-543; Nov. 610-612.
- FRASER, R. T. and EISENKLAM, P. 1956. Liquid atomization and the drop size of sprays. Trans. Inst. Chem. Eng, 34(4), 294.
- FRAZER, R. P. EISENKLAM, E. P. and DOMBROWSKI, N. 1957, Brit. Chem. Eng.2.No.9.196.
- FRIEDMAN, S. J. 1952. Centrifugal disk atomization. Chem. Eng. Progress, 48, 181-191.
- FRIEDMAN, S.J. GLUCKERT, F.A. and MARSHALL, W.R.JR. "Centrifugal Disc Atomization," Chemical Engineering Progress, Vol. 48, No. 4, Apr. 1952,pp. 181-191.
- FROES, F. H. EYLON, D. WIRTH, G. AND SMARSLY, W.1983. "Fatigue Properties of Hot Isostatically By Pressed Ti-6AL-4V powders", Metal Powder Report, Vol.38, No.1, pp.36-41.
- FROST, A. R. (1981). Rotary atomization in the ligament formation mode. Journal of Agricultural Engineering Research, 26(1), 63-78.
- GADPAYLE, S. P. and BAXI, R. N. 2014. Electric melting furnace-a review. International Journal of Emerging Science and Engineering, 2(5), 80-83.
- GEMCI, T. and CHIGIER, N. 2016. Production, Handling and Characterization of Particulate Materials; Merkus, HG, Meesters, GMH, Eds.
- GRANDZOL, R. J. (1973). Water atomization of 4620 steel and other metals. Drexel University.
- GRANDZOL, R. J. and TALLMADGE, J. A. 1973. Water jet atomization of molten steel. AIChE Journal, 19(6), 1149-1158.
- GREY, R. O. and BEDDOW, J. K. 1969. On the Hausner ratio and its relationship to some properties of metal powders. Powder Technology, 2(6), 323-326.
- Gummeson, P. U. 1972.Modern atomizing techniques. Powder Metallurgy, 15(29),67-94.

- Gummeson, P. U. 1972. P/M for High Performance Applications (Burke and Weiss Ed.) Syracuse, U.S.A. pp.231-254,
- GUO, A. BEDDOW, J. K. and VETTER, A. F. 1985. A simple relationship between particle shape effects and density, flow rate and Hausner ratio. *Powder Technology*, 43(3), 279-284.
- HAYNESS, R. P/M, Vol.13, No.26, pp.465-507. 1974.
- HEGE, H. 1964. Flüssigkeitsauflösung durch schleuderscheiben. *Chemie Ingenieur Technik*, 36(1), 52-59.
- HEIDE, M. and SONDERBY, H. 1994. U.S. Patent No. 5,356,075. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- HEIDMANN, M. F. and HUMPHREY, J. C. 1952. Fluctuations in a spray formed by two impinging jets. *Journal of the American Rocket Society*, 22(3), 127-131.
- HEWITT, A. J. 1993. Droplet size spectra produced by air-assisted atomizers. *Journal of aerosol science*, 24(2), 155-162.
- HINZE, J. O. and MILBORN, H. 1950. Atomization of liquids by means of a rotating cup.
- HINZE, J. O. AND MILBORN, H. 1950. Atomization of liquids by means of a rotating cup.
- HLOBIL, M. KUMPOVÁ, I. and HLOBILOVÁ, A. 2022. Surface area and size distribution of cement particles in hydrating paste as indicators for the conceptualization of a cement paste representative volume element. *Cement and Concrete Composites*, 134, 104798.
- HUANG, L. X. and MUJUMDAR, A. S. 2008. The effect of rotary disk atomizer RPM on particle size distribution in a semi-industrial spray dryer. *Drying Technology*, 26(11), 1319-1325
- HUANG, L. X. KUMAR, K. and MUJUMDAR, A. S. 2006. A comparative study of a spray dryer with rotary disc atomizer and pressure nozzle using computational fluid dynamic simulations. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 45(6), 461-470.
- HWANG, J. H. and MA, F. 1989. On the flow of a thin liquid film over a rough rotating disk. *Journal of applied physics*, 66(1), 388-394.
- ISO, I. 2008. 9276-3 Representation of Results of Particle Size Analysis—Part 3: Fitting of an Experimental Cumulative Curve to a Reference Model. ISO, Geneva.
- JAMES, W. B. 1985. Overview of high density P/M forming processes. *The International journal of powder metallurgy and powder technology*, 21(3), 163-182.
- KACZMAR, J. W. PIETRZAK, K. and WŁOSIŃSKI, W. 2000. The production and application of metal matrix composite materials. *Journal of materials processing technology*, 106(1-3), 58-67.
- KAMIYA, T. 1972. An analysis Of The Ligament-Type Disintegration Of Thin Liquid Film At The Edge Of A Rotating Disk. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 5(4), 391-396.
- KARASTOYANOV, D. MONOV, V. and PENCHEV, T. 2022. Metal Powder Production by Atomization Methods. In 2022 7th International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and Industry (MCSI) (pp. 190-195). IEEE.

- KESHAVARZ, B. HOUZE, E. C. MOORE, J. R. KOERNER, M. R. ve MCKINLEY, G. H. 2020. Rotary atomization of Newtonian and viscoelastic liquids. *Physical Review Fluids*, 5(3), 033601.
- KOCH, N. F. 1978. Design and development of a slurry spinner
- KRESTOVNIKOV, K. CHERSKIKH, E. and BYKOV, A. 2020. Approach to choose of optimal number of turns in planar spiral coils for systems of wireless power transmission. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 26(6), 17-24.
- KUHN, H. A. and LAWLEY, A. *Powder Metallurgy Processing*, Academic Press, New York, U.S. A, 1978.
- KUHNHENN, M. LUH, M. F. JOENSEN, T. V. RECK, M. ROÏSMAN, I. V. and TROPEA, C. 2018. Modelling of the breakup process of viscous fluids by a high-speed rotary atomizer. *Experiments in Fluids*, 59, 1-14.
- KUMAR, P. and SARKAR, S. 2019. Experimental investigation of liquid disintegration on slotted disc in centrifugal atomization process. *Chemical Engineering Research and Design*, 145, 76-84.
- KUMAR, P. ve SARKAR, S. 2019. Experimental investigation of liquid disintegration on slotted disc in centrifugal atomization process. *Chemical Engineering Research and Design*, 145, 76-84.
- KURABAYASI, T. 1960. *Bulletin of JSME*, Vol. 3, No. 11, p.352.
- LAPPLE, C. E. HENRY, J. P. and BLAKE, D. E. 1967. Atomization-A survey and critique of the literature.
- LAWLEY, A. 1981. Atomization of Specialty Alloy Powders. *JOM*, 33, 13-18.
- LAWLEY, A. 1992. Atomization: the production of metal powders. *Metal Powder Industries Federation*, 1105 College Rd. East, Princeton, New Jersey 08540-6692, USA, 1992. 159.
- LENEL, F. V. *Powder Metallurgy Principles and Applications*. 1980. *Metal Powder Industries Federation*. [2] S. Ozsever, *P/M Friction Materials*, *ASM Handbook*, 15, 701-703.
- LI, H. and DENG, X. 2007. Prediction of powder particle size during centrifugal atomisation using a rotating disk. *Science and Technology of Advanced Materials*, 8(4), 264.
- LI, Y. SISOEV, G. M. and SHIKHMURZAEV, Y. D. 2018. Spinning disk atomization: Theory of the ligament regime. *Physics of Fluids*, 30(9).
- LIU, J. YU, Q. LI, P. and DU, W. 2012. Cold experiments on ligament formation for blast furnace slag granulation. *Applied thermal engineering*, 40, 351-357.
- LIU, J. YU, Q., DUAN, W., and QIN, Q. 2014. Experimental investigation on ligament formation for molten slag granulation. *Applied thermal engineering*, 73(1), 888-893.
- LIU, Q. and CLEM, R. J. 2011. Defining the core apoptosis pathway in the mosquito disease vector *Aedes aegypti*: the roles of iap1, ark, dronc, and effector caspases. *Apoptosis*, 16, 105-113.
- MANTRIPRAGADA, V. T. and SARKAR, S. 2017. Prediction of drop size from liquid film thickness during rotary disc atomization process. *Chemical Engineering Science*, 158, 227-233.
- MARSHALL, W. R. and SELTZER, E. 1950. *Principles of spray drying*. American Institute of Chemical Engineers.
- MARSHALL, W. R. 1951. PERFORMANCE OF SPINNING DISK ATOMIZERS. 1. *Chemical Engineering Progress*, 47(10), 515-522.

- MARSHALL, W. R. 1954. Atomization and spray drying. American Institute of Chemical Engineers, 68-73.
- MASTERS, K. "Spray Draying", 2nd, Ed. John Wiley and Sons, New York, 1972.
- MASTERS, K. 1972. Spray Drying. Chemical and Process Engineering Series.
- MASTERS, K. 2002. Spray drying in practice. SprayDryConsult.
- MATSUMOTO, S. SAITO, K. ve TAKASHIMA, Y. 1974. The Thickness of A viscous Liquid Film on a Rotating Disk. Journal of Chemical Engineering of Japan, 6(6), 503-507.
- May, K. R. 1949. An improved spinning top homogeneous spray apparatus. Journal of Applied Physics, 20(10), 932-938.
- MERKUS, H. G. and MEESTERS, G. M. (EDS.). 2016. Production, handling and characterization of particulate materials (Vol. 25). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- MERKUS, H. G. 2009. Particle size measurements: fundamentals, practice, quality (Vol. 17). Springer Science and Business Media.
- MIZUOCHI, T. and AKIYAMA, T. 2003. Cold experiments of rotary vaned-disks and wheels for slag atomization. ISIJ international, 43(9), 1469-1471.
- MIZUOCHI, T. AKIYAMA, T. SHIMADA, T. KASAI, E. and YAGI, J. I. 2001. Feasibility of rotary cup atomizer for slag granulation. Isij International, 41(12), 1423-1428.
- MOGHADAM, H. ZAKERI, M. ve SAMIMI, A. 2019. Mono-Size Distribution Index (MSDI): A new criterion for the quantitative description of size distribution. Journal of Particle Science and Technology, 5(2), 71-76.
- MUJUMDAR, A. S. 2006. Handbook of industrial drying. CRC press. Handbook of industrial drying. CRC press.
- NEIKOV, O. D. VASILIEVA, G. I. SAMELJUK, A. V. and KRAJNIKOV, A. V. 2004. Water atomised aluminium alloy powders. Materials Science and Engineering: A, 383(1), 7-13.
- OYAMA, Y. AND ENDOU, K. 1953. On the Centrifugal Disk Atomization and Studies on the Atomization of Water Droplets. Kagaku Kagaku, 17, 256-260.
- PASUPATHY, M. MARTIN, J. M. RIVAS, A. ITURRIZA, I. and CASTRO, F. 2016. Effect of the solidification time on the median particle size of powders produced by water atomisation. Powder Metallurgy, 59(2), 128-141.
- PATTERSON, R. J. 1984. Rotating Disk Atomization. *Metals Handbook*, 9th ed. Volume, 7.
- PENG, H. SHAN, X. LING, X. WANG, D. and LI, J. 2018. Ligament-type granulation of molten slag in different rotary disk configurations. Applied Thermal Engineering, 128, 1565-1578.
- PHILIPSON, K. 1973. On the production of monodisperse particles with a spinning disc. Journal of Aerosol Science, 4(1), 51-57.
- PLOOKPHOL, T. WISUTMETHANGOON, S. and GONSRANG, S. 2011. Influence of process parameters on SAC305 lead-free solder powder produced by centrifugal atomization. Powder Technology, 214(3), 506-512.
- PUSHPAVANAM, S. and Kaza, M. 2016. Experimental study of rotating dry slag granulation unit: operating regimes, particle size analysis and scale up. Applied Thermal Engineering, 107, 898-906.

- R. W. Stevenson, Cemented Carbides, Metals Handbook, Powder Metallurgy Volume 7, 9th Edition, 1984, ASM, Metals Park, Ohio, U.S.A. p.773-783. Goetzel, C.G. "Cermets" *ibid*, pp 789-815.
- RAO, P. 1970. M.S. thesis, Dept. Chem. Eng., Drexel University, Philadelphia, Pennsylvania.
- RAO, P. 1973. Shape and other properties of gas atomized metal powders. Drexel University.
- SAM, F. F. 2013. Powder metallurgy of titanium alloys. In *Advances in powder metallurgy* (pp. 202-240). Woodhead Publishing.
- SARITAS, S. 1979. Mechanical Properties Of Two Low Alloy Powder Forged Steels. The University of Manchester (United Kingdom).
- SARITAŞ, S. Çelik Toz Dövmecilik, ODTÜ Uygulamalı Araştırmalar Dergisi, Cilt 3. Sayı:11, 1-26, 1985.
- SAUTER, J. 1926. Die Grössenbestimmung der im Gemischnebel von Verbrennungskraftmaschinen vorhandenen Brennstoffteilchen (Mitteilung aus dem Laboratorium für technische Physik der Technischen Hochschule München). (No Title).
- SCHUMACHER, E. E. and SOUDEN, A. G. 1944. Some aspects of powder metallurgy. *The Bell System Technical Journal*, 23(4), 422-457.
- SENUMA, Y. and HILBORN, J. G. 2002. High speed imaging of drop formation from low viscosity liquids and polymer melts in spinning disk atomization. *Polymer Engineering and Science*, 42(5), 969-982.
- SHEIKHALIEV, S. M. SHEIKHALIEVA, Z. I. and DUNKLEY, J. J. 2008. Spin atomisation makes tighter, safer aluminium. *Metal Powder Report*, 63(2), 28-30.
- SHRESTHA, S. and PAUDYAL, S. 2019. Particle Size Distribution of Fine Aggregate of Mahakali River, Nepal.
- SILBEREISEN, H. "Sintering and Economical Process for the manufacture of Metallic Precision Parts, Proc. of Con. Non-Machining Production Methods", VDI Education Centre, W. Germany, .1988
- SINGER, A. R. E. and ROCHE, A. D. 1976. Roller atomization of molten metals for the production of powder. In *Transactions of an International Powder Metallurgy Conference*, Chicago.
- SISOEV, G. M. MATAR, O. K. and LAWRENCE, C. J. 2006. The flow of thin liquid films over spinning discs. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 84(6), 625-642.
- SQUIRE, H. B. 1953. Investigation of the instability of a moving liquid film. *British Journal of Applied Physics*, 4(6), 167.
- SUNGKHAPHAITOON, P. PLOOKPHOL, T. and WISUTMETHANGOON, S. 2012. Design and development of a centrifugal atomizer for producing zinc metal powder. *International Journal of Applied Physics and Mathematics*, 2(2), 77.
- SUNGKHAPHAITOON, P. PLOOKPHOL, T. and WISUTMETHANGOON, S. 2012. Design and development of a centrifugal atomizer for producing zinc metal powder. *International Journal of Applied Physics and Mathematics*, 2(2), 77.
- SUNGKHAPHAITOON, P. WISUTMETHANGOON, S. and PLOOKPHOL, T. 2017. Influence of process parameters on zinc powder produced by centrifugal atomisation. *Materials Research*, 20, 718-724.

- TADANO, H. FUJITA, M. TAKE, T. NAGAMATSU, K. and FUKUZAWA, A. 1994. Levitational melting of several kilograms of metal with a cold crucible. *IEEE Transactions on Magnetics*, 30(6), 4740-4742.
- TESKE, M. E. THISTLE, H. W. HEWITT, A. J. KIRK, I. W. DEXTER, R. W. and GHENT, J. H. 2005. Rotary atomizer drop size distribution database. *Transactions of the ASAE*, 48(3), 917-921.
- TEUNOU, E., and PONCELET, D. 2005. Rotary disc atomisation for microencapsulation applications—prediction of the particle trajectories. *Journal of food engineering*, 71(4), 345-353.
- UPADHYAYA, G. S. 1997. Powder metallurgy technology. Cambridge Int Science Publishing.
- UPADHYAYA, G. S. 2008. Powder Metallurgy in India. *International journal of powder metallurgy* (1986), 44(4), 37-42.
- US Patent 1,659,291, 1917, February 1928
- WALTON, W. H. AND PREWETT, W. C. 1949. The production of sprays and mists of uniform drop size by means of spinning disc type sprayers. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 62(6), 341.
- WALTON, W. H. ve PREWETT, W. C. 1949. The production of sprays and mists of uniform drop size by means of spinning disc type sprayers. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 62(6), 341.
- WILLAUER, H. D. ANANTH, R. HOOVER, J. B. MUSHRUSH, G. W. and WILLIAMS, F. W. Chemical Methods for Decreasing Jet Fuel Flammability.
- WU, J. J. WANG, H. ZHU, X. LIAO, Q. and DING, B. 2015. Centrifugal granulation performance of liquid with various viscosities for heat recovery of blast furnace slag. *Applied Thermal Engineering*, 89, 494-504.
- WU, J. J. WANG, H. ZHU, X. LIAO, Q. and LI, K. 2017. Cold experiment of slag centrifugal granulation by rotary atomizer: Effect of atomizer configuration. *Applied Thermal Engineering*, 111, 1557-1564.
- XIE, J. W. ZHAO, Y. Y. and DUNKLEY, J. J. 2004. Effect of processing parameters on powder size distribution and morphology in centrifugal atomization of tin. *Powder Metall*, 47, 168-72.
- XIE, J. W. ZHAO, Y. Y. and DUNKLEY, J. J. 2004. Effects of processing conditions on powder particle size and morphology in centrifugal atomisation of tin. *Powder metallurgy*, 47(2), 168-172.
- ZHOU, W. TAKASE, N. DONG, M. WATANABE, N. GUO, S. ZHOU, Z. and NOMURA, N. 2022. Elucidating the impact of severe oxidation on the powder properties and laser melting behaviors. *Materials and Design*, 221, 110959.