

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Toz Metalurjisi Yöntemi İle SiC Takviyeli Al 2014 Esaslı Kompozit Üretimi ve
Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Onur Fevzi KEVENLİK

EYLÜL 2013

*Ablamla öğretmen,
benimle mühendis,
kardeşimle doktor olan
en iyi arkadaşım
anneme...*

A.Kaan'a

ÖZET

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE SiC TAKVİYELİ AL 2014 ESASLI KOMPOZİT ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

KEVENLİK, Onur Fevzi

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Recep ÇALIN

Mayıs 2013, 118 Sayfa

Bu çalışmada Toz Metalurjisi (TM) yöntemi ile alüminyum 2014 (Al 2014) esaslı, ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 silisyum karbür (SiC) takviyeli ve takviye içermeyen Al2014 metal matrisli kompozitler (MMK) üretilmiştir. Matris malzemesi olarak kullanılan Al 2014 ortalama 92,53 µm toz boyutundadır. Takviye elemanı olarak kullanılan SiC tozunun ortalama boyutu ise 16 µm'dir. Bu tozlarla hazırlanan toz karışımı, 45 dakika süreyle Turbula cihazında karıştırılmış ve tek yönden etkili preste 500 MPa basınçla sıkıştırılarak 6,35 mm x 12,7 mm x 31,75 mm boyutlarında test numuneleri üretilmiştir. Sinterleme işlemi yapılmadan önce numunelerin ilk yoğunlukları Arşimet Metodu ile belirlenmiştir. Daha sonra kompozit numuneler, 575 °C, 600 °C, 625 °C sıcaklıklarda 2 saat süreyle sinterlenmiştir. Sinterleme esnasında koruyucu gaz olarak Argon (Ar) gazı kullanılmıştır. Arşimet Metodu ile test numunelerinin sinterleme sonrası yoğunlukları tespit edilmiştir. Numunelerin bir kısmı T6 yaşlandırma işlemine tabii tutulmuştur.

Yapılan çalışma neticesinde, sinterleme sıcaklığının artması ile üretilen kompozit malzemelerde yoğunluk, çapraz kırılma dayanımı, sertlik artmış bunun yanında gözeneklilik (porozite) azalmıştır. Takviye oranının artmasıyla ise; yoğunluk, gözeneklilik, sertlik artarken ve çapraz kırılma dayanımı azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Toz Metalurjisi, Al Matrisli Kompozitler, Al 2014, SiC,
Mekanik Özellikler

ABSTRACT

PRODUCTION OF SiC REINFORCEMENT Al 2014 MATRIX COMPOSITE BY POWDER METALLURGY METHOD AND INVESTIGATION OF ITS MECHANICAL PROPERTIES

KEVENLİK, Onur Fevzi

Kırıkkale University

Institute of Science and Technology

Department Of Mechanical Engineering, M.Sc Thesis

Supervisor: Assoc.Prof.Dr.Recep ÇALIN

May 2013, 118 Pages

In this study, weight percent of %0, %5, %10, %15, %20 SiC reinforcement aluminum 2014 (Al 2014) matrix composites were produced by powder metallurgy (PM) method. Al 2014 powders used as matrix materials have 92,53 μm of average particle size. SiC powders used as reinforcement material have the 16 μm of average average particle size. Prepared powder mixes had been mixed for 45 minutes by Turbula. Powders were compacted to 6,35 mm x 12,7 mm x 31,75 mm size at 500 MPa pressure by single action press. Then, the composite samples were sintered at 575 ° C, 600 ° C, 625 ° C sintering temperature for 2 hours. During sintering as a shielding gas Argon (Ar) was used. Concentrations of the test samples were determined by the method of Archimedes. Some of the samples were exposed to T6 aging process.

As a result of this study; by the increase of sintering temperature transverse rupture strength, hardness, as well as porosity decreased on the produced composite materials. By the increase of the rate of reinforcement, density,

porosity, hardness increased while the transverse rupture strength decreased.

Key Words: Powder Metallurgy, Al Matrix Composit, Al 2014, SiC, Mechanical Properties

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında büyük yardım gördüğüm en az benim kadar özveri gösteren, yüksek lisansa başladığım ilk günden beri çalışmalarına inanan, öğrencisi olmaktan gurur duyduğum tez yöneticisi hocam, Doç. Dr. Recep ÇALIN'a, en kalbi şükranlarımı sunarım.

Atölye çalışmalarım sırasında, her türlü konuda yardım gördüğüm hocam, Öğ. Gör. Hanifi ÇİNİCİ'ye teşekkür ederim.

Tezimi hazırlamamda bana her türlü desteği veren hocalarım Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ'a, Doç. Dr. Rahmi ÜNAL'a, Yrd. Doç.Dr. Tevfik DEMİR'e ve doktora öğrencisi arkadaşlarım Halil KARAKOÇ ve Hakan GÖKMEŞE'ye ayrıca teşekkür ederim.

Yüksek lisans, ders ve tez aşamalarında desteğini ve anlayışını esirgemeyen mensubu olmakla onur duyduğum kurumuma, değerli Daire Başkanım Mustafa ZIYPAK'a, Şube Müdürlerim Zeki OLGUN ve Cengiz ÇELEBİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Manevi desteği ile her zaman yanımda olan ve arkadaşım diye her zaman kendimi şanslı hissettiğim, arkadaşımdan öte kardeşim İsmail GÖK'e teşekkürü borç bilirim.

Herşeyden öte bildiğim, benim için büyük fedakârlıklar gösteren ve her zaman, her konuda arkamda olan aileme minnettarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vxi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR	10
3. TOZ METALURJİSİ (TM).....	18
3.1. TM Üretim Yöntemi Avantajları	19
3.2. TM Üretim Yöntemi Dezavantajları	20
3.3. TM Temel Üretim Basamakları	21
3.4. Metal Tozlarının Üretim Yöntemleri	22
3.4.1. Mekanik Yöntemler	22
3.4.1.1. Talaşlı İmalat.....	22
3.4.1.2. Öğütme	23
3.4.1.2.1. Silindirik Değirmen	23
3.4.1.2.2. Artitörler	24
3.4.1.3. Mekanik Alaşımlama	25
3.4.2. Elektroliz Yöntemi	26
3.4.3. Kimyasal Yöntemler	27
3.4.3.1. Doğrudan İndirgeme	28
3.4.3.1.1. Hoeganaes Yöntemi	28
3.4.3.1.2. Pyron Yöntemi	28
3.4.3.2. Karbonil Yöntemi.....	29
3.4.3.3. Sıvı Fazdan Çökeltme.....	29

3.4.3.4. Gaz Fazdan Çökeltme	30
3.4.4. Atomizasyon Yöntemleri	30
3.4.4.1. Gaz Atomizasyon.....	31
3.4.4.2. Su Atomizasyon	32
3.4.4.3. Döner Disk Atomizasyonu.....	32
3.4.4.4. Döner Elektrot Yöntemi.....	34
3.4.4.1. Vakum Atomizasyonu	35
3.5. Tozların Özellikleri ve Karakterizasyonu	37
3.5.1 Numune Alma	37
3.5.2 Toz Paraçacık Boyut Ölçümü.....	38
3.5.2.1. Mikroskop ile Toz Boyut Ölçümü.....	39
3.5.2.2. Eleme Yöntemi.....	39
3.5.2.3. Sedimentasyon Yöntemi	41
3.5.2.4. Işığın Kırınımı Yöntemi	43
3.5.3. Toz Şekli	44
3.5.4. Yüzey Alanı.....	46
3.5.5. Toz Akış Hızı.....	47
3.5.6. Görünür Yoğunluk.....	48
3.5.7. Sıkıştırılabilirlik	49
3.5.8. Ham Mukavemet.....	50
3.5.9. Safsızlık	51
3.5.10. Mikroyapı	51
3.5.11. Yanıcılık	51
3.5.12. Zehirleyicilik	52
3.6. Toz Sıkıştırma Yöntemleri	52
3.6.1. Toz Karıştırma	52
3.6.2. Kalıpla Sıkıştırma Yöntemi.....	54
3.6.3. Sıkıştırma Teknikleri	55
3.6.3.1. Presleme	55
3.6.3.2. İzostatik Presleme.....	57
3.6.3.2.1. Soğuk İzostatik Presleme (CIP)	57
3.6.3.2.1.1. Yaş Kalıpla Presleme.....	58
3.6.3.2.1.2. Kuru Kalıpla Presleme	58

3.6.3.2.2. Sıcak Kalıpla Presleme (HIP).....	59
3.6.3.3. Haddemeleme	60
3.6.3.4. Ekstrüzyon	60
3.6.3.5. Toz Enjeksiyon Kalıplama (TEK)	61
3.7. Sinterleme	63
3.7.1 Sinterleme Sonrası İşlemler	67
3.7.1.1. Gözeneklerin Doldurulması.....	67
3.7.1.2. Yağ Emdirme	68
3.7.1.3. Son Ölçüye Getirme ve Baskı (Tamlama).....	68
3.7.1.4. Buharla İşlem	68
3.7.1.5. Tekrar Presleme	69
3.7.1.6. Talaş Kaldırma İşlemleri	69
3.7.1.7. Çapak Alma	69
3.7.1.8. Birleştirme ve Montaj	70
3.7.1.9. Isıl İşlem.....	70
3.7.1.10. Yüzey Kalıplama İşlemleri.....	70
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	71
4.1. Malzeme ve Metod	72
4.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması	73
4.2.1. Tozların Elde Edilmesi	73
4.2.2. Tozların Karıştırılması	74
4.2.3. Tozların Preslenmesi	77
4.2.4. Tozların Sinterlenmesi	78
4.2.5. Yaşlandırma İşlemi	80
4.3. Mekanik Testlerin Uygulanması	80
4.3.1. Yoğunluk Ölçümleri	80
4.3.2. Çapraz Kırılma Dayanımı Ölçümleri.....	82
4.3.3. Sertlik Ölçümleri.....	84
4.3.4. Mikroyapı İncelemesi İçin Numunelerin Hazırlanması.....	85
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	87
5.1. Yoğunluk Sonuçlarının Değerlendirilmesi	87
5.2. Sertlik Sonuçlarının Değerlendirilmesi	99

5.3. Çapraz Kırılma Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi	102
6. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....	108
KAYNAKÇA	110
EKLER.....	118

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Alüminyumun mekanik özellikleri.....	6
1.2. SiC tozlarının mekanik özellikleri.....	8
3.1. Üretim yöntemlerine göre tozların muhtemel nihai şekilleri	36
3.2. Çeşitli metal tozlarının üretimlerinde kullanılan yöntemlerin yüzdesel dağılımı.....	36
3.3. Standart elek boyutları.....	41
4.1. Kompozit malzemenin üretim parametreleri	71
4.2. Kompozitlerin üretimde kullanılan Al 2014 malzemesinin özellikleri	72
4.3. Kompozitlerin üretimde kullanılan Al 2014'ün kimyasal bileşimi	72
4.4. Kompozitlerin üretimde kullanılan SiC takviye tozlarının özellikleri.....	73
5.1. Sinterlenmiş numunelerin yoğunluk ve yüzde gözeneklilik sonuçları....	87
5.2. T6 suni yaşlandırma işlemi uygulanmış numunelerin yoğunluk ve yüzde gözeneklilik sonuçları.....	90
5.3. 600 C'de sinterlenerek üretilen yaşlandırma işlemi uygulanmış ve uygulanmamış numunelerin takviye oranına göre değişen gözeneklilik yüzdeleri.....	93
5.4. Numunelerin sertlik değerleri.....	99
5.5. Numunelerin çapraz kırılma dayanımı verileri	102

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Genel bir kompozit malzeme yapısı.....	2
1.2. Kompozit Yapıları	3
3.1. MMK malzemelerin TM yöntemi ile üretim aşamaları	21
3.2. Metal tozların üretim yöntemleri.....	22
3.3. Silindirik bilyeli değirmen	24
3.4. Artitör ve kesit görünüşü	25
3.5. Elektroliz yöntemi ile toz üretimi	26
3.6. 300 kat büyütülmüş dentritik yapıda gümüş kristali	27
3.7. Atomizasyon şeması	30
3.8. Gaz atomizasyon ünitesi şematik görünüşü	31
3.9. Su atomizasyon ünitesi şematik görünüşü	32
3.10. Döner disk atomizasyonu şematik görünüşü	33
3.11. Döner elektrod yöntemi şematik görünümü.....	34
3.12. Plazma destekli döner elektrod yöntemi şematik gösterimi.....	35
3.13. Çeşitli toz boyut parametreleri.....	39
3.14. Eleme yönteminin şematik görünümü	40
3.15. Sedimentasyon yöntemi ile toz boyut analizi.....	42
3.16. Işığın kırınımı yöntemi ile toz boyutunun belirlenmesi.....	44
3.17. Üretim sonunda meydana gelen muhtemel toz şekilleri	44
3.18. 1000x büyütülmüş küresel tozların SEM görüntüsü	45
3.19. Çeşitli toz şekilleri ve şekil faktörleri	46
3.20. Yüzey alanı ölçümünde kullanılan BET yöntemi	47
3.21. Hall hunisi	48
3.22. Silindirik kap içerisindeki tozların sıkıştırılması	49
3.23. TM ile üretim akış şeması	52
3.24. Döner karıştırıcı (çift koni tip)	53
3.25. V Y karıştırıcı (çift boru tip).....	53
3.26. Kalıpta sıkıştırma basamakları	54

3.27. Tek eksenli ve çift etkili zımba.....	56
3.28. Parçalı ve yüzer kalıp zımba	56
3.29. Normal presleme (a) ve izostatik presleme (b).....	57
3.30. Yaş kalıpla presleme yöntemi	58
3.31. Kuru kalıpla presleme yöntemi	59
3.32. Sıcak izostatik presleme (HIP) yöntemi	59
3.33. Haddeme yöntemi	60
3.34. Ekstrüzyon işlem basamakları	61
3.35. Enjeksiyon kalıplama	62
3.36. TEK yönteminde imalat aşamaları	62
3.37. Sinterleme fırını ve iş akışı.....	63
3.38. İtici tip sinter fırını (a) ve çelik tel örgülü kayışlı sinter fırını (b).....	67
4.1. DPU Gaz Atomizyon Ünitesi ergitme fırını	74
4.2. DPU Gaz Atomizyon Ünitesi	74
4.1. Tozların tartılmasında kullanılan Presica marka terazi.....	76
4.4. Tozların karıştırılmasında kullanılan Turbila cihazı	77
4.5. Preslemede kullanılan tek yönlü pres	78
4.6. Sinterleme işleminde kullanılan yatay tüp fırın	79
4.7. Presleme ve sinterleme sonrası elde edilen test numuneleri	79
4.8. Suni yaşlandırma işleminde kullanılan fırın	80
4.9. Sartorius marka terazi.....	81
4.10. Çapraz kırılma deneyinde kullanılan kırma cihazı.....	83
4.11. Çapraz kırılma deney aparatı şematik gösterimi	83
4.12. Sertlik ölçümünde kullanılan sertlik ölçme cihazı	85
4.13. Kullanılan SEM cihazının görüntüsü	86
5.1. Takviye oranına göre yoğunluk değişimi	88
5.2. Yoğunluğun sinterleme sıcaklığına göre değişimi	89
5.3. 575 °C (a) ve 625 °C (b)'de sinterlenmiş %20 SiC takviyeli kompozit yüzeylerinin OM görüntüleri	92
5.4. 600 °C'de sinterlenerek üretilen kompozitlerin takviye oranına bağlı % gözenek miktarı değişimi.....	93
5.5. 575 °C'de sinterlenmiş (a) takviye içermeyen, (b) %5, (c) %10, (d) %15 (e) %20 SiC takviyeli kompozit yüzeylerinin OM görüntüleri	95

5.6.	575 °C'de sinterlenmiş (a) takviye içermeyen, (b) %5, (c) %10, (d) %15, (e) %20 SiC takviyeli numune yüzeylerinin SEM görüntüleri.....	97
5.7.	625 °C'de sinterlenmiş (a) takviye içermeyen, (b) %5, (c) %10, (d) %15, (e) %20 SiC takviyeli yaşlandırma işlemi uygulanmış numunelerin yüzeylerinin OM görüntüleri	98
5.8.	Farklı takviye oranlarındaki kompozitlerin sinterleme sıcaklığına bağlı sertlik değerleri	100
5.9.	Sertliğin takviye oranları ile değişimi	101
5.10.	Çapraz kırılma dayanımının takviye oranları ile değişimi	103
5.11.	600 °C sıcaklığında sinterlenmiş (a) takviye içermeyen, (b) %20 SiC takviyeli kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntüleri	104
5.12.	Çapraz kırılma dayanımının sinterleme sıcaklığı ile değişimi	105
5.13.	% 10 SiC takviyesi içeren (a) 575 °C ve (b) 625 °C sıcaklıklarında sinterlenmiş kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntüleri	106

SİMGELER DİZİNİ

Al	Alüminyum Elementi
SiC	Silisyum Karbür
Al ₂ O ₃	Alümina
MgO	Magenezyum Oksit
Si	Silisyum
H ₂ SO ₄	Sulfirik Asit
Fe ₃ O ₄	Magnetit
Fe ₂ O ₃	Hematit
Si ₃ N	Silikon Nitrit
SiO ₂	Silisyumdioksit
Ti	Titanyum
C	Karbon
Ar	Argon
O ₂	Oksijen
H ₂	Hidrojen
N ₂	Azot
CO	Karbonmonoksit
D	Parçacık Çapı
D _v	Hacim Difüzyonu Katsayısı
D ₀	Malzeme Sabiti
Q	Aktivasyon Enerjisi
R	Gaz Sabiti
W _A	Sıvıdan Katıya Geçişte Yapılan İş
X	Parçacıklar Arası Boyun Genişliği
V	Hacim
P	Yoğunluk
W	Ağırlık
T	Sıcaklık

KISALTMALAR DİZİNİ

ÇKD	Çapraz Kırılma Dayanımı
HM	Ham Mukavemet
MA	Mekanik Alaşım
MMK	Metal Matrisli Kompozitler
OM	Optik Mikroskop
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopu
TM	Toz Metalurjisi
SMK	Seramik Matrisli Kompozit
PMK	Polimer Matrisli Kompozit
EDAX	Elementsel Noktasal Analiz
CIP	Soğuk İzostatik Presleme
HIP	Sıcak İzostatik Presleme

1 GİRİŞ

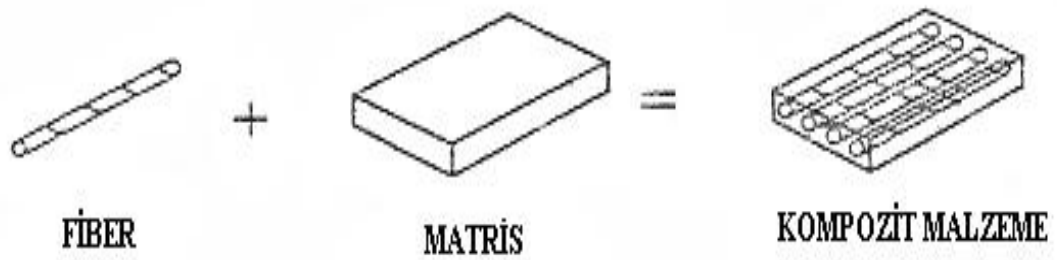
Son dönemlerde teknoloji alanındaki hızlı gelişmeler, geleneksel malzemelere oranla daha üstün özelliklere sahip yeni malzemelerin kullanımını gerekli kılmaktadır. Bu nedenle sürekli olarak gelişen bu teknolojik faaliyetler, beraberinde endüstriyel sanayinin temel maddesi olan malzemelerde de ilerlemeyi gerekli kılmıştır. Bu sebepten dolayı malzeme bilimciler, doğal ve alaşım maddelerinden daha üstün özelliklere sahip yeni malzemeleri araştırmaya yönelmişlerdir. Bu sayede diğer malzemelerden farklı olarak, üstün niteliklere sahip, "Kompozit Malzemeler" adı altında yeni malzemeler üretilmiştir. Geleneksel malzemelere göre birçok üstünlüğü bulunan kompozit malzemelerin en belirgin özelliği, hafif ancak yüksek dayanıma sahip olmasıdır [1].

İki yada daha fazla sayıdaki aynı yada farklı gruptaki malzemelerin, en iyi özelliklerini bir araya toplamak veya ortaya yeni bir özellik çıkarmak amacıyla, bu malzemelerin makro seviyede birleştirilmesi ile oluşan mühendislik malzemelere kompozit malzeme denir. Başka bir ifade ile birbirlerinin zayıf yönünü düzelterek üstün özellikler elde etmek amacıyla bir araya getirilmiş değişik tür malzemeler veya fazlardan oluşan oluşan malzemeler olarak da bilinir. Kompozit malzemeler; genel itibari ile kendini meydana getiren malzemelerin en iyi özelliklerini yansıtmak şeklinde biçimlendirilirler. Bu nedenle hafiflik ve yüksek mukavemet istenen yerlerde metaller yerine kompozit malzemeler kullanılmaktadır [2].

Kompozit malzemelerin temel kullanım alanları; otomotiv, savunma, havacılık sektörleridir. Bunun yanında MMK malzemeler, yatak, elektrik kontak malzemesi ve silindir gömleği olarak da kullanılmaktadır [3,4].

Kompozit malzemeler oluşturularak daha yüksek mukavemet, daha iyi rijitlik, daha iyi korozyon ve aşınma direnci, hafiflik, yüksek yorulma ömrü, ve ısıya dayanıklılık gibi özellikler kazanılabilir. Gerçekte tüm bu özellikler aynı anda

sağlanamaz. Kullanım alanlarına göre ihtiyaç duyulan özellik artırılır. Böylece; uygun kompozit malzemeler kullanılan matris ve fiberin özelliklerini taşıyacak şekilde elde edilebilir. Kompozit malzemeler üretimlerinde kullanılan ana malzemelere göre Metal Matrisli Kompozit (MMK), Seramik Matrisli Kompozit (SMK), Polimer Matrisli Kompozit (PMK) Malzemeler olarak genel bir sınıflandırma yapılmaktadır [6]. Şekil 1.1'de genel olarak kompozitlerin mantığı şematik olarak gösterilmiştir.

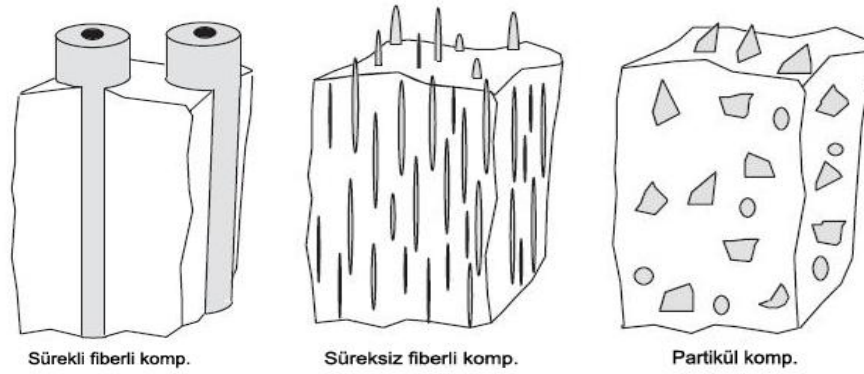


Şekil 1.1. Genel bir kompozit malzeme yapısı [60]

Metal matrisli kompozitler (MMK) genelde iki bileşenden meydana gelmektedir. Bunlardan biri metal matris (matris, genelde bir metal alaşımıdır) diğeri ise takviye malzemesidir. Kompozitin üretilmesinde matris ve takviye malzemesi beraber olarak karıştırılırlar. Bir kompoziti elde etmek için başlangıçta farklı elemanlar seçilir. Genelde matris bir metal veya metal alaşımıdır [7].

Metal matrisli kompozitler yüksek elastik modüle, yüksek çekme-basma ve kayma mukavemetine, yüksek servis sıcaklığına sahip olmaları ayrıca, metallerin süneklik ve tokluğunu, seramiklerin yüksek mukavemet ve yüksek elastik modül özelliklerini birleştirmelerinden dolayı son derece önemli bir mühendislik malzemeleri olmuşlardır. Bu üstünlüklerinin yanında tekrar üretilebilir mikroyapı, mekanik özellikler ve düşük yoğunluk değerleri vermeleri açısından daha da önem kazanmışlardır [8].

MMK Malzemeler; partikül MMK, fiber takviyeli MMK, sürekli fiber esaslı MMK olmak üzere 3 ana gruba ayrılırlar. Genel olarak MMK malzemeler metallere göre; yüksek mukavemet / yoğunluk oranı (spesifik mukavemet), spesifik modül, daha iyi yorulma direnci, düşük ısıl genleşme katsayısı, daha iyi aşınma direnci avantajları, zor ve karmaşık imalat yöntemleri, sünekliğin azalması, nisbeten daha yüksek üretim maliyetleri ise dezavantajları arasında gösterilebilir [6].



Şekil 1.2. Kompozit yapılar [60]

MMK malzemelerde genellikle, hafif metaller matris malzemesi olarak tercih edilmektedir. Bu matrislerin başında Al gelmektedir. Al ile birlikte Ti, Mg gibi metaller yaygın olarak kompozitlerde matris malzemesi olarak tercih edilirler. Al metalinin matris olarak çok tercih edilmesinin sebepleri arasında, dünyada oldukça büyük bir rezerve sahip ve demirden sonra en fazla üretilen ve tüketilen metal olması, hafif bir metal olması, dayanım/özgül ağırlık oranının yüksek olması, elektrik iletkenliği/özgül ağırlık oranının yüksek olması, atmosfer karşısında yüksek korozyon direnci, plastik deformasyon kabiliyetinin iyi olması ve saf Al nin döküm kabiliyetinin kötü oluşu gösterilebilir [6].

MMK malzemelerinde takviye malzemelerinin amacı, matrisin mekanik ve fiziksel özelliklerine olumlu etkiler sağlamaktır. Bu özellikler dayanım, korozyon direnci, yoğunluk, yorulma ömrü, ısı ve ses yalıtımı ve ısı iletkenlik olarak sayılabilir. Partikül, whisker, fiber ve metalik tel takviye olarak 4 ana grupta takviye malzemeleri sınıflandırılır. Takviye malzemesi olarak genelde, SiC, Al₂O₃, B₄C, TiC, TiB₂, grafit, tungsten vb. malzemeler kullanılır [9].

MMK malzemelerin üretim yöntemleri, matris ve takviye malzemesinin seçimine göre farklılıklar gösterir. MMK malzemeler; katı ve sıvı hal işlemleri uygulanarak bir çok üretim yöntemi ile üretilirler. Bunlar toz metalurjisi gibi katı hal işlemleri ve infiltrasyon, döküm, sıkıştırılmalı döküm, karıştırılmalı döküm ve püskürtme çökeltmesi gibi sıvı hal işlemleridir. Bunların yanında sıcak haddeleme ve difüzyon birleştirme yöntemleri de MMK'lerin üretiminde başarı ile kullanılan yöntemlerdir [10].

Al tozları 1900'lü yılların başlarında pul ürünler olarak kullanılmıştır. TM teknikleriyle yüksek mukavemetli, alaşımlı alüminyum parçalarının üretimi ise 20. yüzyılın ortalarına rastlamaktadır. Al tozunun tamamına yakını gaz atomizasyonu ile üretilmektedir. Al tozunun gerçek yoğunluğu ana metalin yoğunluğuna yakındır. Ancak görünür yoğunluğu 0,8-1,3 g/cm³ olup, bu değer verilen aralıkta boyut dağılımına bağlı olarak değişmektedir. Al oksijenle reaksiyona girmesi, toz yüzeyinde Al₂O₃ tabakası oluşturur. Al tozlarının yüzeyindeki bu ince oksit tabakası, tozların sinterlenmesinde olumsuz etkiye sebep olmaktadır. Oksit miktarı, toz boyutuna bağlı olarak, ağırlıkça % 0,1-1,0 arasında değişir. İnce tozlar, birim ağırlığa göre artan yüzey alanı sebebiyle, ağırlıkça en yüksek oksit yüzdesine sahiptir. Al tozları üzerindeki oksit tabakası kalınlığı, farklı atomizasyon şartlarında bile, göreceli olarak sabittir. Al, bu ince oksit tabakası sebebiyle havada kararlıdır. Bununla beraber, ince bölünmüş Al tozları kimyasal olarak reaktiftir [11].

Al tozları, ergiyik haldeki metalden atomizasyon yöntemiyle değişik saflık derecelerinde üretilirler. İşlem sırasında, açık havada kararlı olarak kalmasını sağlayan koruyucu ince bir oksit tabakası oluşturur. Al tozunun şekli

genellikle, incelmış, çomak şekilli ve yassı yüzeylidir. Yani uzunluğu diğer iki ölçüsüne göre çok büyüktür. Al tozunun katı roket yakıtlarında kullanımında ise bu boyut 10 µm'nin altına düşmesi gerekmektedir. Al tozlarının rengi çeşitli parlaklık derecelerinde metalik beyazdır. Al tozlarının çok geniş bir kullanım alanı olmasına rağmen başlıcaları şunlardır:

Kaynak elektrotlarında oksijen giderici kaplama olarak, roketler için katı yakıt yapımında, yüksek sıcaklık dayanımına sahip parçaların N₂ altında sinterlenmesinde, sürtünmeli ortamlarda çalışan parçaların üretiminde, roketlerin sürtünen parçalarında, fren ve kavramalarında, fren balatalarında vb., elmas taşlama disklerinde reçine ile karıştırılarak ve elmas takımlarda bağlayıcı olarak, amonyum nitrat gibi maddelerle birlikte patlayıcı karışım imalatında, dökümhanelerde ve demir-çelik sanayinde çelik imalinde kullanılan egzotermik karışımlarda oksit giderici (deoksidan madde) olarak (sıvı metalin içine kireç, soda veya başka bir maddeyle oksit giderici işlevi yapmak üzere püskürtülür), tren rayı gibi büyük parçaların kaynağında kullanılan termit kaynağında ve Cr, Mn, V gibi metaller için oksit önleyici olarak, fişek sanayinde diğer nitrat ve pekloratlarla birlikte renkli ve renksiz havai fişek yapımında, yağ ve su bazlı aydınlatma ve işaret verme maddelerinde, duman oluşturuvcu karışımlarda, kimya sanayinde boya ve mürekkep üretiminde, organik kimya sektöründe metal olmayan bileşik hazırlamada indirgeyici olarak kullanılmasıdır [12]. Al tozlarının mekanik özelliklerinden bazıları Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Alüminyumun mekanik özellikleri [39]

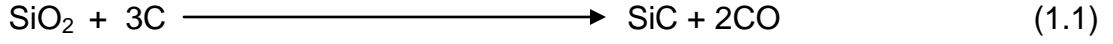
Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm ³) (20 °C)	2,7
Ergime sıcaklığı (°C)	660
Isı iletkenlik (W/mK)	230
Sertlik (HB)	16

1960'lı yıllarda plastik ve metal matrisli kompozitler için takviye fazı olarak yüksek özgül dayanım ve elastik modülüne sahip malzemeler üzerinde oldukça yoğun çalışmalar yapılmıştır. Bunlar arasında boron, SiC ve boron karbür gibi malzemelerde geniş olarak yer almış ve deneysel araştırmaların çoğu boron üzerine odaklanmıştır [13].

Yüksek dayanım, yüksek modül, ve düşük yoğunluğa sahip olan boron elyafın kimyasal buharlaştırma yöntemi ile üretilerek yüksek performanslı kompozitler için geliştiği bilinmektedir. Boron elyafların keza reçineli kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanılması daha iyi bilinmesine rağmen bu takviye elemanı da MMK'lerin kullanımında oldukça ilgi uyandırmıştır. Ancak yapılan çalışmalarda, herhangi bir metal matrisle boron elyafın kullanımı halinde bazı dezavantajlar ortaya çıkmıştır. Bu dezavantajlar, SiC elyafın geliştirilmesine yol açmıştır [14].

SiC'ün üretimi yaygın olarak "Acheson Prosesi" olarak isimlendirilen proses ile gerçekleştirilmektedir. 19. uncu yüzyılın sonunda geliştirilen bu proses, SiC üretim tarihinin en eski olanıdır ve adını tasarımcısı olan Acheson'dan almıştır. Bu proseste: silika, karbon ve genel tuz karışımı (% 50 Silika + % 40 Kok + %7 Silis tozu + % 3 Genel Tuz), elektrikli fırının merkezindeki grafit çekirdeğin etrafına yerleştirilir. Bu karışım 2400 °C 'ye kadar ısıtılır ve kademeli olarak soğutulur. Malzemenin miktarı ve fırın büyüklüğü gibi

unsurlara bağlı olarak 2 ile 20 gün süren silika ile karbonun reaksiyonun neticesinde SiC elde edilir. Kimyasal olarak SiC oluşunu Eşitlik 1.1'de gösterilmiştir.



Takviye elemanı olarak son zamanlarda SiC'e ilgi öncelikle ekonomikliği nedeniyle artmaktadır. Ancak bunlar daha yüksek sıcaklıklarda MMK uygulamalarında alternatif olarak sağlanmaktadır. SiC'in; parçacık, elyaf ve kaplama yanında Whisker türleri de üretilmektedir. Whiskerle üretilen kompozitlerde ikinci bir operasyon ekstrüzyon, haddeleme, kalıpta dövme ve presleme gibi plastik şekil verme tekniklerinin mekaniksel bir hasar oluşturmaksızın uygulanabilmesi önemli bir avantaj teşkil etmektedir. Toz metalürjisi tekniği yardımıyla da metalik matrisler içerisine SiC ile takviyelendirme yapılabilir. Ancak kompleks şekilli parçaların, sıcak izostatik presleme tekniği ile üretimi daha ekonomik olarak gerçekleştirilmektedir. Çünkü preslenen parçalarda bitirme operasyonu için az zaman sarf edilir. SiC güçlendirilen alüminyum kompozitlerin işlenebilirliği diğer takviye elemanlı kompozitlere göre daha iyidir [14].

SiC'n ticarileşmesini sağlayan özelliklerinden birisi de sertliğidir. SiC'n sertliği keşfedildiği zaman elması dahi kesebilecek bir yetenekten bahsedilmişti. Bu yetersiz bir açıklama dahi olsa bile, SiC'n en etkili aşındırıcılardan birisi olduğunu o dönemden beri ortaya koyar. Bor karbür kadar sert değildir ancak SiC kabuksal bir bileşim sergileyerek malzeme sıyırma işlemlerinde etkili olmaktadır. SiC'n sertliği kristalografik yönlere, varolan safsızlıklara ve parlatılmış yüzeyler gibi farklı durumlara bağlı olarak değişir. lm ortamı dahi sertliği etkileyebilir [50].

SiC kullanışlı, yüksek performanslı, sertliği yüksek, sürtünme katsayısı düşük bir sentetik malzemedir. Doğada direkt olarak rastlanmaz. SiC refrakter

uygulamalarındaki özellikleriyle iyi bilinmektedir. Mükemmel bir ısı iletkenliğe ve düşük ısı genleşme katsayısına sahiptir. SiC tozların genel olarak mekanik özellikleri Çizelge 1.2’de verilmiştir.

Çizelge 1.2. SiC’ün mekanik özellikleri [50]

<u>Özellik</u>	<u>Değer</u>
Yoğunluk (g/cm ³) (20 °C)	3,16
Silisyum Karbür Safılık (%)	97,8
Isıl iletkenlik (W/mK)	126
Sertlik (kgf/mm ²) Vickers	3100

SiC Özellikleri:

- Yüksek aşınma direnci ve dayanımı
- Yüksek korozyon direnci
- Yüksek sürünme mukavemeti
- Düşük ısı genleşme katsayısı
- Yüksek ısı iletkenlik

Bu özellikler sonucunda muazzam bir ısı şok dayanımı sergiler. Isıl iletkenlik kristal yapıda çözünen safsızlıkların varlığından etkilenir. Yüksek saflıkta ticari SiC elde etmek zordur. Çünkü sinterleme için eklenen safsızlıklar veya reaksiyon bağlamada kullanılan silisyumda bulunan safsızlıklar bunu engeller [50].

Yapılan bu çalışmada; ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranında SiC takviyeli Al 2014 matrisli kompozit 575°C, 600°C, 625°C’de 2 saat sinterlenerek TM yöntemi ile üretilmiş ve üretilen MMK malzemenin mekanik özellikleri aynı sıcaklıklarda ve sürede SiC takviye içermeyen Al 2014

tozlarıyla üretilen numuneler ile karşılaştırılmıştır. Bunların yanında aynı parametrelerde üretilen diğer numuneler yaşlandırma işlemine tabi tutulmuşlardır. Elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

2 LİTERATÜR

Ekerer (2007) yapmış olduğu çalışmada, Al₂O₃ (Alümina) - SiC partikül destekli TM yöntemi ile Al matrisli kompozitleri üretmiş ve mekanik özelliklerini incelemiştir. 200 Mpa ile 600 MPa arasında değişen basınçlarda preslenmiş numuler 640 °C'de Argon (Ar) gazı koruyucu gazı altında sinterlenmiştir. Daha sonra hazırlanan kompozitlerin yoğunlukları ve sertlikleri ölçülmüştür. Optik görüntülemeleri yapılmış, çekme ve eğme deneylerine tabii tutulmuşlardır. Üretilen kompozitlerin yoğunluk değerleri sıkıştırma basıncı ve partikül oranı artışıyla doğru orantılı olarak artmıştır. Üretilen kompozitlerin sertlik değerleri Brinell sertlik cihazı ile 62.5 kg yük altında 2.5 mm çelik bilye ile ölçülmesiyle 200 MPa gibi düşük basınçlarda kompozit malzemelerden beklenen sonuçlar elde edilemediği fakat basınç ve alümina takviye miktarının artışıyla sertliğin doğrusal olarak arttığı görülmüştür [15].

Dörtbölük (2006) yapmış olduğu çalışmada, mekanik alaşımlama ve mekanik öğütme ile üretilen Al esaslı, % 5, %10, % 15 ve % 20 SiC seramik parçacık takviyeli Al olmak üzere beş farklı malzeme üzerinde çalışılmıştır. Tozlar atritör ve titreşimli değirmenlerde öğütülmüştür. Öğütülen tozlar optik ve taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiştir. Ayrıca, elementsel noktasal analizi (EDAX) ve toz boyut analizleri de yapılmıştır. Daha sonra tozlar 630 MPa basınç altında soğuk preslenerek 9 mm çapında ve 5 mm yüksekliğinde numuneler haline getirilmiştir. Bu numuneler daha sonra 530 °C'da 30 dakika süreyle sinterlenmiştir. Sonuç olarak takviye elemanı oranı artıkça tane boyutu azalmış, üretilen MMK malzemenin sertlik ve yoğunluğu artmıştır. Öğütme süreleri artıkça ince taneli yapılar meydana gelmiştir. EDAX analiz sonuçları incelendiğinde ise tozların kabul edilebilir oksijen kirlenmesine maruz kaldığı anlaşılmıştır [16].

Özkan (2007) yapmış olduğu çalışmada, Al matrisli SiC parçacık takviyeli kompozitleri mekanik alaşımlama yöntemiyle üretmiş ve kuru aşınma davranışlarını incelemiştir. Toz karışımları, 450 dev/dak hızda bilyeli dikey

değirmende 1,5 ve 3,5 saat karıştırılarak hazırlanmıştır ve daha sonra 650 MPa basınç altında preslenerek dairesel aşınma numuneleri üretilmiştir. Elde edilen blok numuneler 600 °C'de 2 saat Ar gazı atmosferi altında sinterlenerek MMK numuneler elde edilmiştir. Sinterleme sonrası üretilen MMK'lerin yoğunluk, porozite, sertlik ölçümleri ve mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Aşınma deneyleri pin-on-disk cihazında sabit hızla farklı yükler altında gerçekleştirilmiştir. Aşınmış yüzeylerinde SEM ve EDAX analizleri yapılmıştır. Yoğunluk ölçümleri, porozitenin çok düşük olduğunu, partikül oranının artması ve boyutunun düşmesi ile porozite oranının arttığını göstermiştir. MMK'lerin sertliğinin ise, genelde takviye oranının artması ile orantılı olarak arttığı gözlenmiştir. Optik mikroskop ile yapılan mikroyapı incelemelerinde, partikül boyutunun artması ile homojen bir dağılımın sağlandığı, düşük boyutlu partiküllerin partikül topaklanmasına ve porozite oluşumuna neden oldukları görülmüştür. Yapılan aşınma deneylerinde MMK'de tane boyutu küçüldükçe ağırlık kaybının arttığı görülmüştür. MMK'in SEM incelemelerinde; ağır yüklerde oksitlenme ve plastik deformasyon hakim iken düşük yüklerde ise oksidasyon ve kraterleşmenin baskın olduğu görülmüştür [14].

Yılmaz (2007) yapmış olduğu çalışmada, Al esaslı SiC takviyeli kompozit malzemeyi vorteks döküm yöntemi kullanarak üretmiştir. Yüzeylerindeki kirliliğin giderilmesi, absorbe olmuş gazların ayrılması ve yüzeylerinde koruyucu bir oksit tabakası oluşturulmaması için yaklaşık 1100 °C'de 3 saat ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra tekrar bir ısıtılma işlemine tabi tutulmuş SiC takviye partiküller ile matris arasında ıslanmanın iyi olması açısından SiC partiküller, ergitilmiş sıvı alaşım sıcaklığına yakın bir sıcaklığa ısıtılmıştır. Son olarak, ısıtılmış SiC partiküller, fırında ergitilmiş halde bulunan matris alaşımında bir grafit karıştırıcı vasıtasıyla oluşturulan vorteks içerisine, kontrollü uygulanan gaz basıncı ile yaklaşık 15–20 gr/dk hızla ilave edilerek mekanik zorlanma ile matris alaşımına tutunmaları sağlanmıştır. Sıvı alaşım içerisine Ar gazı üflenmiştir. Üretilen kompozit numuneler 10 saat 580 °C'de homojenizasyon işlemine tabii tutulmuştur. Daha sonra bu numunelere 500 °C'de sıcak ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Numunelere yorulma, çekme,

sertlik deneyleri uygulanmıştır. Kompozitlerin maksimum çekme mukavemeti takviyesiz alaşımlardan daha düşük çıkmıştır. Bunun nedeni olarak gevrek SiC takviye partiküllerin yapıya ilavesinin kompozitleri gevrekleştirdiği ve çekme mukavemetinin düşmesinde etkin bir rol oynadığı gösterilebilir. Takviyelendirilmiş numunelerin kopma yüzeyleri incelenmiş, genelde partikül ile matris alaşımı arasında oluşması beklenen bağlanmanın tam anlamı ile oluşmadığı görülmüştür. Takviye malzemesi partikül boyutlarının küçük olması ile genellikle malzemelerin sertliğinde bir artış elde edilmiş ve daha büyük SiC partikül boyutlarının ilavesi ile genellikle malzemelerin sertliğinde bir azalma meydana gelmiştir [17].

Pul (2010) yapmış olduğu çalışmada, Al tozu ile ağırlıkça %5, %10, %15 MgO takviyeli MMK'leri, vakum infiltrasyon yöntemi ile üretmiştir. Kullanılan Al tozların boyutu ortalama 295 µm, saflığı %99,7 dir. MgO tozlarının ise ortalama boyutları yaklaşık 149 µm olarak ölçülmüştür. Kompozit malzemelerin üretimden sonra çapraz kırılma dayanımları, yoğunlukları, sertlikleri tespit edilmiştir. Buna göre, takviye hacim oranının artması ile çapraz kırılma dayanımının düştüğü görülmüştür. Bu durumun sebebi olarak artan takviye oranıyla yoğunluğun düşmesi yani gözenekliliğin artması gösterilebilir. Benzer durum sertlik için de gözlenmiştir. Takviye hacim oranının artması ile boşluklu yapının arttığı bunun ise sertliği azalttığı görülmüştür [18].

Günay (2009) yapmış olduğu çalışmada Alumix 231 tozu ile ağırlıkça %5, %10, %15 SiC takviyeli kompozitleri TM metodu ile üretmiştir. Üretilen kompozitlere sertlik, yoğunluk ve çapraz kırılma deneyleri uygulanmıştır. Mikroyapı incelemelerinde homojen bir yapının sağlandığı lakin gözenekliliğin oluştuğu, oluşan gözenekliliğin ise takviye elamının oranının artması ile arttığı tespit edilmiştir. Gözenekliliğin artması ile en düşük yoğunluk oranı en yüksek takviye içeren %15 SiC'lik kompozit malzemede ölçülmüştür. Aynı şekilde en yüksek sertlik değeri de bu numunede tespit edilmiştir. Çapraz kırılma dayanım sonuçlarında, aynı numune en düşük çapraz kırılma dayanımını verirken en yüksek dayanım matris alaşımında ölçülmüştür [19].

Çalın (2010) yapmış olduğu çalışmada, Al esaslı SiO₂ takviyeli kompozit malzemeyi infiltrasyon yöntemi ile üretmiş ve takviye hacim oranının ısı iletkenliğe etkisini araştırmıştır. Isıl iletkenliğin takviye hacim oranının ters orantılı olduğu tespit edilmiştir [20].

Kılıç (2007) yapmış olduğu çalışmada, Al esaslı ağırlıkça %5, %10, %15 SiC takviyeli kompozitleri TM metodu ile üretmiştir. Al ve SiC tozlarını 800 MPa basınçla presleyerek test numunelerini hazırlamıştır. Bu numuneleri 650 °C'de 2 saat süreyle Ar gazı atmosferinde sinterlemiştir. Test için hazır hale gelen kompozitlerin sertlik, yoğunluk, aşınma değerlerini tespit etmiştir. Yoğunluk ölçümlerinde seramik takviye oranı yükseldikçe yoğunluğun arttığı tespit edilmiştir. Sertlik ölçümlerinde takviye oranı ve partikül boyutunun artması ile sertlik değerlerinin arttığı kaydedilmiştir. Numuneler üzerinde yapılan aşınma deneyinin sonuçlarında ise, kompozit içerisindeki seramiğin tane boyutu ve ağırlık oranı azaldıkça aşınma direncinin azaldığı, kompozit oranı arttıkça aşınma direncinin arttığı görülmüştür [21].

Topçu vd. (2009) yapmış oldukları çalışmada, Al matrisli ağırlıkça %5-%20 oranlarında B₄C takviyeli kompozit malzemeler üretmişlerdir. Artitörde alaşımlanan karışım tozlar 250 MPa basınç altında soğuk izostatik preslenmişlerdir. Preslenen numuneler 600 °C, 625 °C ve 650 °C sıcaklıklarda sinterlenmiştir. Sinterleme sıcaklığının yoğunluk ve sertliğe etkisi araştırmıştır. Düşük takviye oranlarında ve sinterleme sıcaklığının artmasıyla ile teorik yoğunluğa daha yakın sonuçlar elde edilmiştir. B₄C parçacıkları homojen bir dağılım sergilemiştir. Sertlik açısından bakıldığında, hem artan takviye oranı hem artan sinterleme sıcaklığı sertliğe pozitif yönde etki ettiği çalışmanın sonuçlarındandır [22].

Hiçyılmaz vd (1999) yapmış oldukları çalışmada, Al tozlarına ağırlıkça %1, %5 ve %10 oranlarında SiC ve Al₂O₃ tozlarını katarak kompozit malzeme üretmişlerdir. Üretim aşamasında tozlar 600 MPa basınçla preslenmiş ve sonra 600 °C'de sinterlenmiştir. Sinterleme süresince azot (N₂) gazı

koruyucu gaz olarak kullanılmıştır. Elde edilen numunelerin mikro yapıları incelenmiş ve set fazların yapı içerisinde homojen dağıldığı tespit edilmiştir. Üretilen numunelere çekme, darbe, sertlik ve aşınma deneyleri uygulanmıştır. Çalışma sonunda mekanik özelliklerin, matrisi oluşturan Al tozlarının boyutu küçüldükçe iyileştiği görülmüştür [23].

Yanıkçı (2006) yapmış olduğu çalışmada, Al matris malzemesine %4 oranında bakır (Cu) ilave etmiş ve takviye oranı olarak da SiC tozunu %5, %10, %15 ve %20 oranlarında karışıma ilave etmiştir. Hazırlanan karışımı kalıplara döküp 23 ton yük altında preslenerek 12 mm x 12 mm x 52 mm boyutlarında numuneler hazırlamış ve bu numuneler 585 °C'de sinterlemiştir. Sinterleme süresince koruyucu gaz olarak Ar kullanmıştır. Numunelerin gerçek yoğunlukları ölçülmüş ve takviye malzemesinin artması ile yoğunluğun arttığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak SiC'ün daha yoğun bir malzeme olması gösterilebilir. Yapılan eğme testi sonucunda ise takviye malzemesinin artması ile eğmeye karşı direncin azaldığı görülmüştür. Mikroyapı çalışmalarında %5 SiC içeren kompozit malzeme içerisinde SiC tozlarının homojen olarak dağıldıkları görülmüştür. %20 takviye malzemesi içeren numunede ise, SiC parçacıklarının yapı içerisinde homojen dağılmadıkları görülmüş, bunun sonucunda ise mekanik özelliklerin negataif yönde etkilendiği tespit edilmiştir [24].

Rahimian vd. (2009) yaptıkları çalışmada 30 µm toz boyutlarına sahip %99,97 saflıkta Al'a, 3 µm, 12 µm ve 48 µm toz boyutlarında ve %10 oranında Al₂O₃ katarak kompozit malzeme üretmişlerdir. Toz karışımı preslenerek kalıplanmış ve 500 °C, 550 °C, 600 °C sıcaklıklarda sinterlenmiştir. 30 ila 90 dakika aralığında sinterleme işlemi gerçekleştirilmiş ve koruyucu gaz olarak Ar gazı kullanılmıştır. Sinterleme sonrası yapılan yoğunluk ölçümlerinde 600 °C'de ve takviye elemanın toz boyutunun 12 µm olduğu numunede en yüksek yoğunluk değeri ölçülmüştür. Al₂O₃ toz boyutunun 48 µm'ye çıktığında 30 µm boyutlarındaki matris olan Al tozları ile daha fazla temas noktasına sahip olmasından dolayı sinterlemenin zorlaştığı, porozitenin arttığı ve bunların sonucunda yoğunluğun beklendiği gibi düştüğü

gözlemlenmiştir. Yapılan sertlik ve dayanım ölçümleri sonucunda Al_2O_3 toz boyutunun artmasıyla sertlik, akma mukavemeti ve basma mukavemeti değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Küçük parçacıklarda takviye elemanı ve matris arasında daha fazla ara yüzeyin olmasının sertliği arttırdığı ve büyük parçacıklarda daha yüksek porozite görülmesi nedeniyle sertlik değerinin düştüğü görülmüştür. Artan sinterleme sıcaklığı ve süresinin sertlik ve yoğunluğun artmasına sebep olduğu görülmüştür. En yüksek basma mukavemeti ve uzama oranlarının 600 °C'de 3 µm toz boyutlarında gerçekleştiği görülmüştür [25].

Çalın ve Çıtak (2007) yapmış oldukları çalışmada, vakum infiltrasyon yöntemi ile Al matrisli MgO takviyeli kompozit üretmişlerdir. Bu çalışmada matris içerisindeki takviye elemanı Mg varlığının infiltrasyon yüksekliğine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, Al matrisi içerisine Mg ilavesiyle yüzey gerilmesinin düştüğü, bunun yanında ıslatabilirlik özelliğinin arttığı görülmüştür. Artan Mg oranı sonucunda infiltrasyon yüksekliğinin de arttığı görülmüştür. İnfiltrasyonun kolaylaşması sonucunda gözenekliliğin azaldığı ve yoğunluğun arttığı tespit edilmiştir. Yapılan X Işınımı Kırılımı (XRD) analizinde matris ile takviye elemanı ara yüzeyinde üçüncü bir fazın oluştuğu görülmüştür. Oluşan fazın $MgAl_2O_4$ olduğu ve bunun da infiltrasyonun kolaylaşmasına zemin hazırladığı kanaatine varılmıştır. Artan Mg oranının kırılma mukavemetinde azalmaya sebep olduğu da yapılan çalışmanın neticelerindedir [29].

Arık (2008) yapmış olduğu çalışmada, %5, %10 ve %15 ağırlık oranlarında takviye olarak Si_3N_4 tozları ile Al tozlarını karıştırmış bunların bir kısmını bilyeli değirmende diğer kısmını artitör değirmende 5 saat süre ile mekanik alaşımlama (MA) işlemine tabii tutarak karışım tozu üretmiştir. Elde ettiği karışım tozu 1000 MPa basıçta tek yönlü preste sıkıştırarak 2 saat boyunca 620 °C, 640 °C, 660 °C ve 680 °C sıcaklıklarda sinterlemiştir. Üretilen numuneleri incelediğinde mekanik alaşımlama (MA) işlemi uygulanmış daha yüksek % yoğunluk, sertlik ve çapraz kırılma mukavemeti değerlerine ulaşıldığı tespit edilmiştir. %10 takviye oranlı MA numunelerinde homojen bir

yapı görülmüştür. Artan sinterleme sıcaklığının % yoğunluk, sertlik ve çapraz kırılma değerlerini artırdığı gözlemlenmiştir. Artan takviye oranı ile kompozitlerin yoğunluk ve çapraz kırılma mukavemetinin düştüğü, sertliğin ise yükseldiği elde edilen veriler sonucunda tespit edilmiştir [26].

Çalın ve Çıtak (2006) yapmış oldukları çalışmada, toz presleme aparatını titreşimli olarak tasarlamışlardır. Tasarladıkları titreşimli toz presleme aparatı ile MgO tozlarının sıkıştırılabilirliğini çalışmışlar ve bunun sonucunda MgO tozlarının parçacık boyutlarına göre farklı oranlarda sıkıştırılabildiğini ve optimum sıkıştırma süresinin 3 dakika olduğunu tespit etmişlerdir. Küçük boyutlu parçacıklarda daha yüksek sıkıştırma oranı elde edilebildiği sonuçlarına varılmıştır [28].

Simchi (2003) yapmış olduğu çalışmada, toz metal parçalarda yağlayıcı kullanmanın yoğunlaşma sinterleme ve mikroyapı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Yapılan deneylerde sıkıştırma basıncının artması parçacıklar arası plastik deformasyonun artmasına sebep olmuş bunun da yoğunluğun artmasına sebep olduğu tespit edilmiştir. Bağlayıcı ilavesi toz karışımlarda, sıkıştırmanın başladığı anlarda parçacıklar arası sürtünmeyi azaltarak yoğunluğun artmasına sebep olmuştur. Daha sonra artan basınç, yağlayıcı tarafından gözeneklerin doldurulmasına neden olmuş, yağ ile dolan gözenekler ise tüm yapının yoğunluğunda bir azalmaya sebep olmuştur. Yağlayıcı kullanmanın toz karışımlarda parçacık kilitlemesini ve soğuk kaynak kabiliyetini azalttığı görülmüştür. Yağlayıcı metaller arası teması azaltarak çapraz kırılma mukavemetini düşürmüştür. Kalıp duvarları yağlanarak üretilen numunelerde parçacıklar arasında daha fazla soğuk kaynak oluşmuş ve sıkıştırma süresince oluşan metalik köprüler sinterleme esnasında daha güçlenerek yüksek mukavemet değerlerine ulaşmayı sağlamıştır [27].

Çalın ve Çıtak (2007) yapmış oldukları çalışmada, Al matrisli MgO takviyeli kompozitleri vakum infiltrasyon yöntemi ile üreterek, toz boyutunun infiltrasyona etkilerini araştırmışlardır. Değişik toz boyutlarındaki MgO takviye

tozlarını tüplerin içerisine koymuşlar ve sıvı metali vakum infiltrasyon yöntemi ile blok parçacıklara infiltre etmişlerdir. Sonucunda sıvı metalin sıcaklığının infiltrasyonu kolaylaştırdığı tespit edilmiştir. Kırılma mukavemeti ve infiltrasyon yüksekliğinin takviye elamanı olarak kullanılan MgO'nun parçacık boyutu arttıkça yükseldiği gözlemlenmiştir. MgO parçacık boyutunun artması ile gözeneklilik oranının düştüğü ve yoğunluğun arttığı bu çalışmanın sonuçları arasındadır [30].

Bu tezin amacı, 2000 serisi alüminyum olan ve savunma sanayisinde geniş kullanım alanına sahip Al 2014 malzemesine, takviye olarak SiC katarak toz metalurjisi yöntemi ile daha mukavim makine elamanı imalatı gerçekleştirebilmektir. Al 2014 – SiC alaşımına, maksimum mukavemet özelliklerini kazandırmak amacıyla T6 yaşlandırma ısı işlemini uygulanmıştır.

3 TOZ METALURJİSİ

Metal tozu, mikron boyutundan milimetreye kadar çeşitli boyut ve saflıklarda farklı metallere üretilen tozlara verilen genel isimdir [47]. Toz metalurjisi (TM), metalik toz veya bu tozların şekillendirilip sinterlenmesiyle elde edilen ürünlerin imalatını kapsar. Başka bir deyişle TM, metal tozlarının, kendine has yöntemler ile küçük, karmaşık geometriye, diğer klasik metalurji yöntemleriyle üretilmesi zor olan iş parçalarının seri olarak üretilmesine olanak sağlayan toz malzeme teknolojisidir [31].

TM metal işleme teknolojileri arasında çok büyük farklılık gösteren bir üretim tekniğidir. Bu teknikle küçük, karmaşık ve boyutsal hassasiyeti yüksek parçaların seri imalatında son derece ekonomik ve uygundur. Malzeme kaybı çok az olmakta, küçük toleransla homojen kalite dağılımında parçalar üretilmektedir. Bunların yanında belirli derecede gözeneklilik (porozite) ve geçirgenlik de elde edilir.

Yapılan araştırmalarda TM' nin M.Ö. 3000 yıllarına kadar uzandığı saptanmış ve dünyanın bir çok yerinde metal tozu uygulaması izlerine rastlanmıştır. 1826'da Rusya'da tedavüle çıkarılan platin para toz metalurjisinin ilk endüstriyel uygulaması olmuştur. 1903-1905 yılları arasında, Wolfram (W) ve Molibden (Mo) sinterleme ile endüstriyel imalatı gerçekleştirilmiştir. W' ın ergime sıcaklığı 3400 °C, Mo' in ki 2600 °C civarındadır. Çok yüksek ergime sıcaklıklarından ötürü ergitme ve döküm yöntemi ile bu iki metalden tel ve levha üretiminde karşılaşılan zorluklar TM yöntemiyle ortadan kaldırılmıştır [32].

TM ile şekillendirmelerin ilk modern uygulamaları ise, I. Dünya Savaşı yıllarında yaygınlaşmıştır. Gözenekli gereçler, mıknatıslar ve elektrik lamba flamalarının bu yıllarda başlamış ve geliştirilmiştir. Otomobil sanayiindeki

gelişmelere paralel üretimi olarak toz metalurjisi üretim yöntemleri de artarak gelişmiştir.

TM günümüz endüstrisinde, otomotiv sektöründen tıbbi malzemelere, uçak ve uzay sanayisinden askeri araç ve ekipmanlara, enerji sektöründen filtre üretimine kadar hemen her alanda yaygın bir teknik olarak karşımıza çıkmaktadır. Örneğin her uzay mekiği fırlatıldığında yaklaşık olarak 160 ton Al tozu yakıt olarak kullanılmaktadır [47]. Ülkemizde 2005 yılında dördüncüsü gerçekleştirilen Uluslararası Ulusal Toz Metalurjisi Konferansları, bu alandaki gelişmelerin daha da iyi olacağına bir göstergesidir [33].

3.1 TM ile Üretim Yönteminin Avantajları

TM ile üretim yapmak çoğu zaman büyük avantajlar sağlamaktadır. Bu avantajlardan bazıları şunlardır [46, 15];

- Partikül takviyeli MMK üretiminde takviye elemanlarının kontrolü mümkün olduğundan, yapının kontrolünü sağlamak da mümkün olmaktadır.
- Yüzey kalitesi ve hassasiyet yüksek malzemelerin üretimine çok uygundur.
- Kendinden yağlamalı yataklar, sert metaller, kesici uçlar ve mekanik filtrelerin üretimine uygun bir yöntemdir.
- Yapısı gözenekli olan parçaların üretimine son derece uygundur.
- Karmaşık şekilli parçalar daha hızlı ve hassas üretilebilir.
- Yüksek ergime sıcaklığı olan malzemeler için son derece uygun ve ekonomik bir imalat yöntemidir.
- Üretim aşamasında malzeme kaybı yok denecek kadar azdır. %99'lar seviyesinde hammadde kullanımı söz konusudur.
- Üretilen parçaların gözeneklilik, porozite oranı kontrol edilebilir.
- Bilinen yöntemlerle birbirine karıştırılmayacak malzemeler birleştirilebilir.

- Çoklu üretimde ekonomiktir. Parça üretim hızı istenildiği gibi ayarlanır.
- Yüksek hız çelikleri ve süper alaşımlar bu yöntem ile geliştirilmiş özelliklerle üretilebilir.
- Çevreye duyarlı bir üretim yöntemidir.

3.2 TM ile Üretim Yönteminin Dezavantajları

TM yönteminin avantajlarının yanında bazı dezavantajları da vardır. Bunlar genel olarak şunlardır [46, 15];

- İlk yatırım maliyeti oldukça yüksektir. (Presleme ekipmanları, kalıp, sinter teçhizatı vb.)
- Bu yöntemle büyük parçalar, radyal delikli parçalar, girintili köşeli parçalar üretilemez.
- 100 gramdan ağır parçalar için ekonomik değildir.
- Talaşlı imalata göre toleransı kabadır.
- Metal tozlarının üretim maliyetleri ingota göre daha fazladır.
- Mekanik ve fiziksel özellikler ilave bazı işlemler olmadıkça sınırlı kalır.
- Belirli bir kapasitenin altındaki üretim hızlarında diğer yöntemlerle maliyet konusunda rekabet edemez.
- Büyük parçaları preslemek için çok yüksek basınç değerlerine ihtiyaç vardır.
- Toz kullanımı temizlik gerektirir. Yabancı maddeler yada artıklar toz halindeki malzemeye nüfuz edebilir.
- İş sağlığı ve güvenliği açısından riskli çalışma ortamına sahiptir.

3.3 TM Temel Üretim Basamakları

Gerekli boyut, şekil ve paketleme özelliklerine sahip metal tozunu güçlü, mükemmel ve yüksek performanslı bir şekle dönüştüren TM'de temel basamaklar, toza şekil verilmesi veya sıkıştırma işlemi ve sinterleme yolu ile tozların ısıl birleştirilmesidir [34]. Ancak TM parçalarının üretiminde genel olarak yedi aşama mevcuttur;

Toz hazırlama (karıştırma ve karmanlama)

Presleme

Pişirme

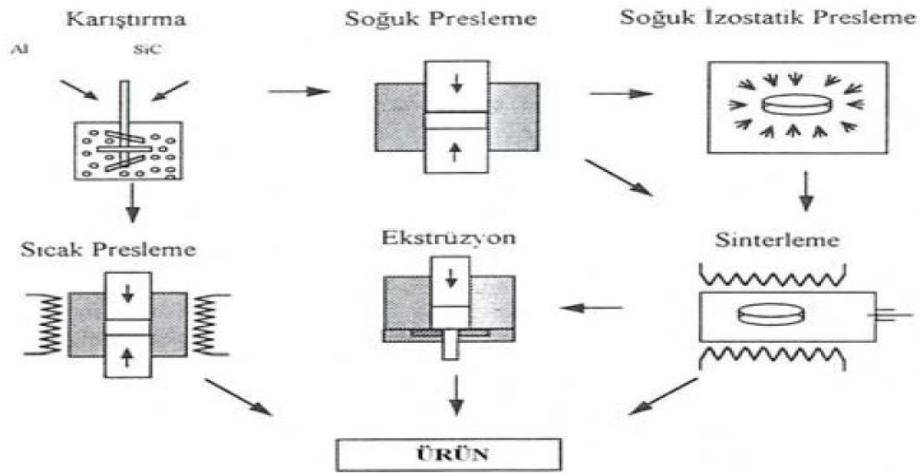
Yağ emdirme ve kalibrasyon (gerekirse)

Tam yoğunluk işlemleri (toz dövme)

Çapak alma

İkincil işlemler

Sıkıştırma işlemi bir kalıp içerisinde yapılır ve oluşturulan şekil, pişirilerek (sinterleme) gerekli mukavemete kavuşturulur. Böylece bu uygulama, bir tozun şeklini, özelliklerini ve yapısını bitmiş bir ürüne dönüştürür [35]. Şekil 3.1'de MMK'lerin üretim aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 3.1. MMK malzemelerin TM yöntemi ile üretim aşamaları [58]

3.4 Metal Tozların Üretim Yöntemleri



Şekil 3.2. Metal tozların üretim yöntemleri

Metal tozlarının üretiminde farklı yöntemler bulunmaktadır. Tozların imalinde kullanılan bu yöntemler, tozlara ait bazı özellikleri de tayin eder. Bu yöntemlerden bazıları şunlardır [2,36];

3.4.1 Mekanik Yöntemler

Mekanik yöntemlerde genellikle 4 temel mekanizma ile toz üretimi yapılır. Darbe, sıkıştırma, aşındırma ve basma kuvvetleri ile karmaşık şekilli tozlar üretilir. Bu metodla en az maliyetle toz üretimi için, kimyasal bağları zayıf, karışık kristalli yapıya sahip malzemelerle aşırı sert ve kırılabilir olan metal alaşımları ve seramikler kullanılır. Sünek malzemeler pul şeklindeki tozların üretilmesine sebep olacağından, genellikle kolay kırılıp dağılan, parçalanabilir, gevrek malzemelerin tozları bu metodla elde edilir. Bu metodla üretilen tozların şekli düzensiz ve köşelidir [2].

3.4.1.1 Talaşlı İmalat

Bu yöntemde kesme mekanizması hakimdir. Talaşlı imalat sonrasında oluşan talaş hurdası metal tozu için önemli ölçüde kaynak oluşturur. Oluşan talaşlar boyut küçültme işlemine tabi tutulur. Yeterli gevreklikte olmayan metal parçalar içerisinde katkı elemanı katılmak suretiyle gevrekleştirilir ve kırılabilirlik

sağlanır. Çoğu kez bu işlem sonrasında öğütme zorunlu haldedir. Bu yöntem verimsiz bir yöntem olarak bilinir ve pek tercih edilmez. Bu yöntemde Mg gibi kolay tutuşabilen tozlar ve yüksek karbonlu çelik tozları üretilir [2].

3.4.1.2 Öğütme

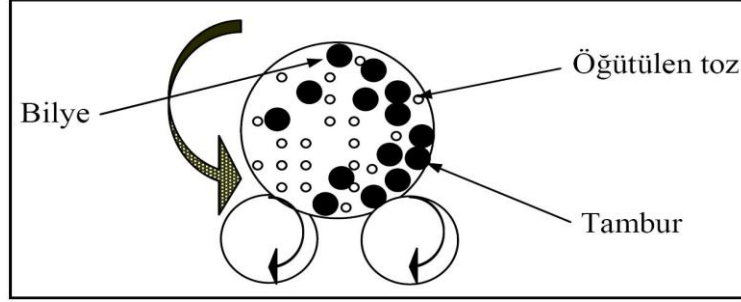
Bu yöntemde darbe mekanizması baskındır. Bu yöntem TM ile üretimde önemli bir doğrudan toz üretim yöntemidir. Diğer yollarla üretilmiş tozların tane boyutlarının küçültülmesi ve topaklanmayı önleme amacıyla da kullanılabilir. Bu yöntemle sünek tozların boyutları büyütülebilirken gevrek tozların boyutları küçültülebilir. Toz şekli değişebilir. Seramik tozlarının üretilmesinde de kullanılır.

Niobyum (Nb) gibi sünek malzemelerin hidrürleri kırılmandır. Bu tür metaller hidrojene maruz bırakılarak hidrürleri elde edildikten sonra öğütülürler. Daha sonra vakumda ısıtılarak hidrürleri giderilir. Elde edilen toz kırılğan , köşeli ve açılıdır. Öğütme işleminde silindirik değirmenler çok yaygın olarak kullanılmaktadır [2].

3.4.1.2.1 Silindirik Bilyeli Değirmen

Silindirik bilyeli değirmende öğütme ortamı önemli bir parametredir. Silindir boyu silindir çapından daha büyük seçilmelidir. En uygun silindir çapının 250 mm olduğu daha önce yapılan çalışmalarla tayin edilmiştir. Bilye çapı öğütülecek malzeme çapının ortalama 30 katı kadar olmalıdır. Bilyelerin hacmi silindir hacminin yarısını kaplayacak, toz hacmi ise silindir hacminin %25'i civarında olmalıdır. Toz kalitesi açısından silindirin dönüş hızı, devri önemli bir parametredir. Metaller silindirde öğütülürken, alkol gaz yağı vb. solventlerle asal gazlar kullanılarak oksitlenmenin önüne geçilmiş olur. Seramik tozları için su ve hava kullanılabilir. Ortalama %1'i geçmeyecek şekilde çinkosterat vb. katı yağlayıcıların katılmasıyla öğütme sırasında topaklanma engellenmiş olur. Silindirik değirmenlerde optimum devir hızı 60

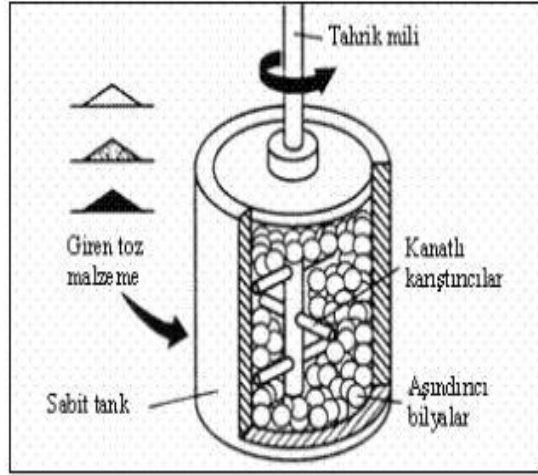
dev/dak'dir. Bu durum işlem süresinin uzunluğuna sebep olmaktadır. Bilye çapının küçülmesi işlem süresini azaltsa da öğütme süresinin nisbeten uzunluğu nedeniyle titreşimli değirmenler ve atritörler geliştirilmiştir. Silindirik bilyeli değirmen resmi Şekil 3.3'de gösterilmiştir [2].



Şekil 3.3. Silindirik bilyeli değirmen [2]

3.4.1.2.2 Atritörler

Atritörler yüksek öğütme hızına sahiptirler. Silindirik değirmenlerde optimum dönme hızı etkinken, atritörlerde yüksek karıştırma hızı etkindir. Dıştan su soğutmalı olup, metal oksitlenmesine karşı öğütme ortamında koruyucu gaz kullanımı söz konusudur. Bu yöntemde aşınma, darbe ve kesme mekanizmaları etkindir. Atritörler öğütmede de kullanılmakla birlikte mekanik alaşımla ile toz üretim tekniğinde de kullanılırlar. Atritör ve ertitörün kesit görüntüsü Şekil 3.4'de gösterilmektedir [2].



Şekil 3.4. Artitör ve kesit görünüşü [38]

3.4.1.3 Mekanik Alaşımlama

Sert olan oksit tozları ile nisbeten yumuşak olan metal tozlarının birlikte öğütüldüğü durumlarda kompozit yapı elde edilir. Başlangıçta tozlar kayanaklaşarak irileşir. Mekanik alaşımlama (MA) devam ettikçe deformasyon sertleşmesi sonucunda tozlarda boyut küçülmesi meydana gelir. Optimum bir süre sonra tozlar dengelenir. Bu arada oksit parçacıkları sürekli küçülerek yumuşak metal fazı içerisine gömülür. MA parametrelerine göre kompozit toz boyutu 50 µm ila 200 µm aralığına iner. Dispersiyon (dağılım) sertleşmesi sonucunda mekanik özelliklerde iyileşme görülür. MA yönteminde öğütme süresi aşağıdaki formülle hesaplanır [2,36].

—

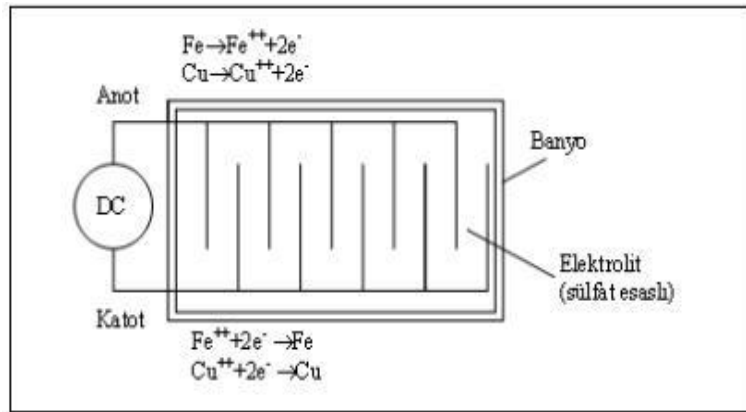
(3.1)

t: Öğütme Süresi
c: Denklem Sabiti

N: Devir Sayısı
d: Bilya Çapı

3.4.2 Elektroliz Yöntemi

Çözelti içerisinde uygulanan elektrik gerilimi etkisiyle anottan kopan ve iyonize olan metal parçaları katot üzerinde toplanır. Anot tükendiğinde üzerine bağlı metal tozları dökülür, bu tozlar yıkanarak asit kirliliğinden temizlenir. Koruyucu gaz altında kurutulur. Daha sonra elde edilen tozlar öğütülerek ince toz haline getirilir. Elektrolit tozları dentritik (dallantılı) yapıdadır. Kaplamada kalınlık arttıkça katotta dökülmeler meydana gelir. Elektroliz yöntemi kullanılarak toz üretme tekniği Şekil 3.4'de gösterilmiştir [2,36,38].



Şekil 3.5. Elektroliz yöntemi ile toz üretimi [38]

Elektroliz yönteminde yüksek elektrik maliyeti, tozların yıkanmasında kullanılan suyun fazlalığı ve yüksek kurutma giderleri yöntemin ekonomikliğine olumsuz etki etmiştir. Bu yöntemle sadece metal tozları üretilebilirken alaşım tozları üretilemez.



Şekil 3.6. 300 kat büyütülmüş dentritik yapıda gümüş kristali

3.4.3 Kimyasal Yöntemler

Metal tozlarının üretim yöntemleri arasında bazı kimyasal yöntemler de bulunmaktadır. Bunlardan bazıları alt maddeler halinde açıklanmıştır.

3.4.3.1 Doğrudan İndirgeme

Katının gazla bozunması olarak bilinen bu yöntemde metal cevherlerinin ergitilmeden katı şartlarında indirgeyici olan CO, H₂ gibi gazlarla kimyasal olarak indirgenerek saf metal tozu elde etme tekniğidir. Meydana gelen reaksiyon Eşitlik 3.2'de gösterilmiştir.



İndirgeme işleminde reaksiyon hızının artırmak amacıyla toz boyutları yaklaşık olarak 1 mm'ye kadar öğütülerek düşürülür. Doğrudan indirgeme yöntemi, demir (Fe) tozu üretiminde kullanılan en yaygın yöntemdir. Ayrıca bakır, nikel, kobalt, molibden, toryum ve titanyum gibi metal tozlarının üretiminde de kullanılır. İndirgeme CO gazı ile olursa Hoeganaes, H₂ gazı ile

olursa Pyron yöntemi olarak adlandırılır. Bilinen en eski metal üretim tekniğidir. [2]

3.4.3.1.1 Hoeganaes Yöntemi

İsveç'te geliştirilmiş olan bu yöntemle, magnetit (Fe_3O_4) döner fırında kurutulup öğütüldükten sonra manyetik sıyırıcılarla temizleme işlemi yapılır. Cevher kok ve kireç taşı ile karıştırılıp seramik tüplere doldurulduktan sonra vagon içerisine $1260\text{ }^{\circ}C$ 'de uzunluğu yaklaşık 260 m olan tünel fırından ortalama 3 gün gibi bir sürede geçirilerek indirgenir. N_2 ve H_2 gazları koruyucu gaz olarak kullanılır. Sonuçta gözenekli yapıya sahip sünger toz (sponge iron) elde edilir. Bu sıcaklıkta yapılan indirgeme işlemi sünger tozları birbiri ile kaynaştırıp kekleştirir. Bu sebeple öğütme yapılarak artan toz boyutları küçültülür. Demir tozları kireç, kok gibi safsızlıklardan sonra indirgeyici gaz ortamında $750\text{ }^{\circ}C$ ila $900\text{ }^{\circ}C$ aralığında bir sıcaklıkta tavlansak tozların O_2 seviyesi düşürülerek %99'lar mertebesinde saflık sağlanır [2].

3.4.3.1.2 Pyron Yöntemi

Hoeganaes yöntemi ile aynı işlem basamaklarını içerir. Bu yöntemde indirgeme sıcaklığı yaklaşık $1000\text{ }^{\circ}C$, indirgenen cevher hematit (Fe_2O_3) ve koruyucu gazda H_2 gazıdır. Bu işlemde öncelikle magnetitler ön ısıtma işlemiyle hematite dönüştürülür. Endüstriyel boyutta ergitilemeyen tungsten tozu doğrudan indirgeme yöntemi ile cevherinden tungsten paratugstat üretilir. Tozların önce preslenip sonra ekstrüze edilmesiyle de tungsten flamanı üretilir [2].

3.4.3.2 Karbonil Yöntemi

Bu yöntem, metallerin yüksek ısı ve basınç altında CO gazı ile tepkimeye girmesi ve karbonillerin oluşması sonucunda yüksek saflıkta metal tozlarının

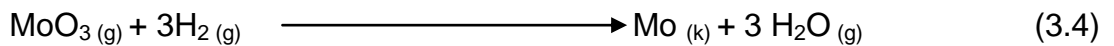
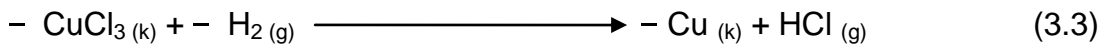
üretmesinden ibarettir. Au, Cu, Pt, Cr vb. metallerin tozlarının üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde kullanılan karbonil sağlığa zararlı olduğundan uygulama daha çok Fe ve Ni tozları ile sınırlı kalmıştır. Ni metali ısı ve basınç altında CO gazı ile tepkimeye sokularak gaz halinde nikelkarbonil elde edilir. Bu moleküller yoğunlaştırılıp damıtıldıktan sonra kontrollü olarak buharlaştırılır. Bu işlemler sonucunda saf nikel metal tozu elde edilir. Toz boyutu reaksiyon şartlarına bağlı olarak 0,2 µm ile 20 µm arasındadır. Toz enjeksiyon kalıplamada tercih edilen bir yöntemdir [2].

3.4.3.3 Sıvı Fazdan Çökeltme

Bu yöntem hidrometalurji olarak bilinir. Cu, Co ve Ni için yüksek saflıkta metal tozları bu yöntemle üretilebilir. Ortalama toz boyutu 1 µm civarındadır. Cu tozunun bu yolla üretilmesinde, CuSO₄ hidrojenli bir çözelti içerisinde 130 °C ve 3 MPa basınç altında tepkimeye sokulur. H₂SO₄ çözeltisi içerisinde çözülmüş halde Cu tozları elde edilir. Üretilen toz şekli süngerimsidir [2].

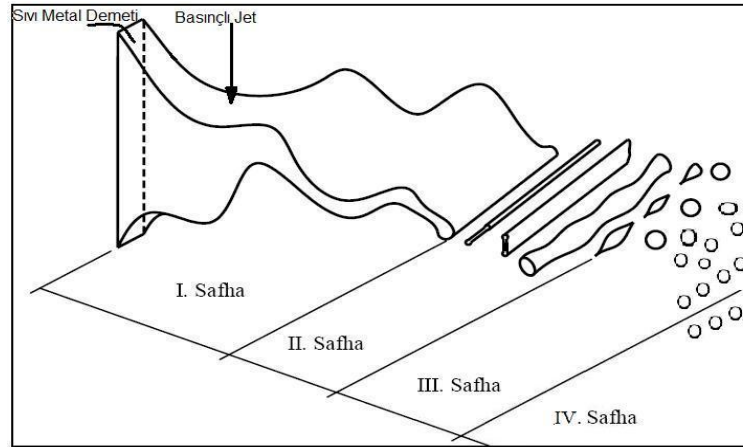
3.4.3.4 Gaz Fazdan Çökeltme

Karbonil yöntemine benzeyen bu yöntemde reaksiyona giren gazlar karbonil yönteminde kullanılanlardan farklılık gösterir. Gaz fazdan çökeltme işleminde meydana gelen reaksiyon Eşitlik 3.3 ve Eşitlik 3.4'de verilmiştir.



3.4.4 Atomizasyon Yöntemleri

Bu yöntem genel olarak sıvı demetinin çok sayıda damlacıklara ayrılıp katılması işleminden ibarettir. En yaygın olarak kullanılan toz üretim tekniğidir. Metal tozlarının yaklaşık %80'i bu yöntemle üretilir. Kimyasal kompozisyonun kontrol edilebilmesi, toz boyutunun ve şeklinin kolay tayini ve takibi, üretim hızlarının yüksek olması ve alaşım tozlarının üretilebilir olması atomizasyon yönteminin avantajlarıdır. Yöntemin 4 ana aşaması vardır. Bunlar; tabakalaşma, çubuklaşma (ligament oluşumu), damlacık oluşumu ve katılma. Tabakalaşma, basınçlı jetin etkisiyle sıvı metal demetinde dalga hareketinin oluşma ve kritik bir genliğe kadar büyümesi olarak tanımlanır. Çubuklaşma, tabakalaşma sırasında oluşan dalgada meydana gelen yırtılmaların ilerlemesi sonucu oluşan çubuk şeklindeki kopmalardır. Damlacık oluşumunda, yüzey gerilmesinin etkisiyle önce elipsoidler daha sonra süre yeterli ise damlacıklar oluşmaktadır. Damlacığın enerjisini kaybetmesi sonucunda oluşan tozlar, atomizasyon bölgesine geri döndüğünde uydulaşma veya sıvama diye bilinen katılma meydana gelir. Bu durum, istenmeyen bir durum olarak nitelendirilir. Gaz atomizasyon şematik gösterimi Şekil 3.7'de gösterildiği gibidir [2].

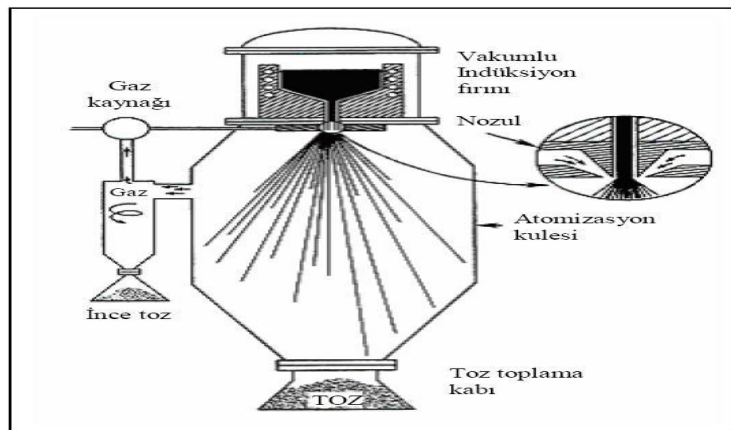


Şekil 3.7. Atomizasyon şeması

Sıvıların atomizasyonu ile ilgili ilk model olan ve 3 aşamadan Dombrowsk modeli 1963 yılında yakıtcılar tarafından bulunmuştur. 4 aşama ise toz metalciler See ve Johnston tarafından 1971 yılında bulunmuştur. 4. aşamada katı tozda uydulaşma ve sıvılaşma tespit edilmiştir [2].

3.4.4.1 Gaz Atomizasyonu

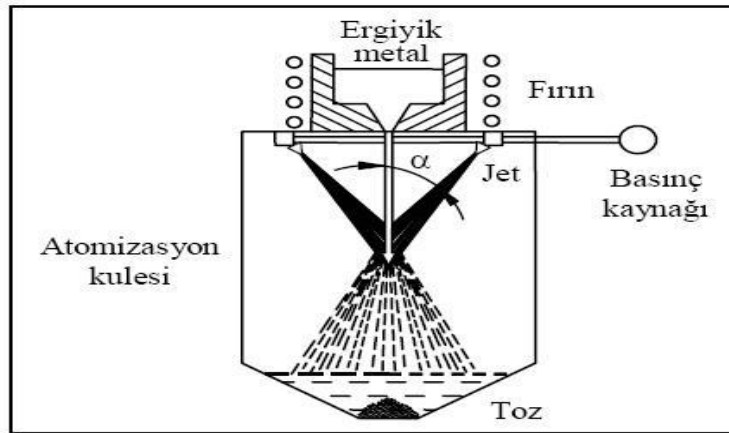
Sıvı metal demetini hava, N, Ar ve He ile parçalanması yöntemine gaz atomizasyonu denir. Nozullardan çıkan ve çok hızlı olarak genişleyen gaz dökülen sıvı metali parçalayarak önce ince bir tabakaya, sonra sırasıyla çubuksu, elipsoit ve küresel hale getirir. Tozlar toz toplayıcı kısmında toplanır ve gaz siklonundan geçirilerek temizlenir. Bu yöntemde çok sayıda değişken vardır. Bunlardan bazıları, alaşım kompozisyonu, sıvı metal akış debisi, sıvı metal sıcaklığı, sıvı metal viskozitesi, gaz akış hızı ve nozul geometrisi olarak gösterilir. Gaz atomizasyon yönteminin en büyük avantajı ürün homojenliğidir. Bunun yanında kirliliğin olmayışı ve küresel toz üretebilmek de yöntemin avantajları arasındadır. Gaz atomizasyon ünitesi şematik olarak Şekil 3.8'de gösterilmektedir [2,36].



Şekil 3.8. Gaz atomizasyon ünitesi şematik görünüşü[38]

3.4.4.2 Su Atomizasyonu

Sıvı atomizasyonu olarak da bilinen bu yöntem prensip olarak gaz atomizasyonuna benzer yapıdadır. En önemli değişken basınçtır. Soğutma hızı gaz atomizasyonuna göre daha hızlıdır, bu yüzden toz şekli düzensizdir. Saf metal tozlarının ve alaşımların üretilmesinde en yaygın yöntem olarak bilinir. Sıvı atomizasyonu ekonomik bir yöntemdir, işlem süresi kısadır. Üretim kapasitesi 400 kg/dk civarlarına çıkabilmektedir. Üretilen tozların oksit oranları yüksek olmaktadır. İndirgeme işlemi yapmak gereklidir. 150 MPa'ya kadar olan basınçlar kullanılabilirken, ticari olarak bu yöntemde kullanılan basınçlar 5 MPa ile 20 MPa arasında değişmektedir. Yöntem Şekil 3.9'da şematik olarak gösterilmiştir [2,36].

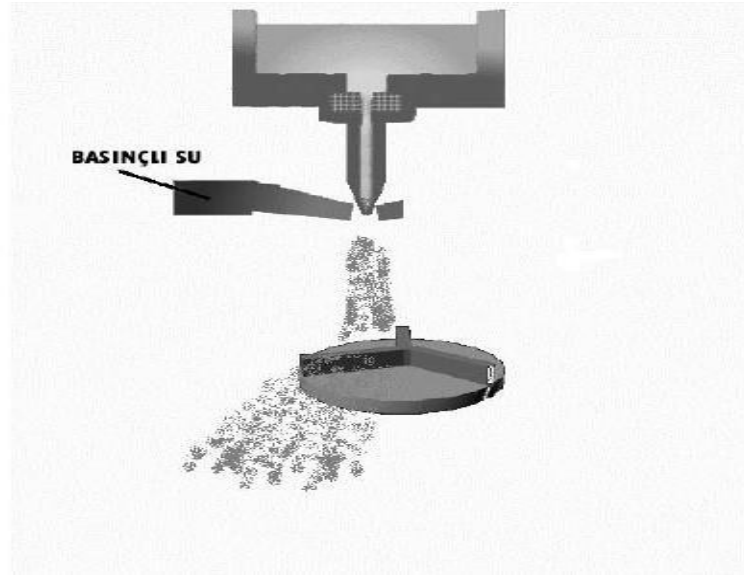


Şekil 3.9. Su atomizasyon ünitesi şematik görünüşü [38]

3.4.4.3 Döner Disk Atomizasyonu

Atomizasyon için değişik yöntemler kullanılabilir, bunların içinde önemli bir yer tutan yöntem olarak merkezkaç kuvvetinin etkisiyle toz metal üretimini sağlayan döner disk yöntemi görülmektedir. Bu yöntem içinde de iki ayrı üretim tekniği vardır. Bunlardan biri belli bir miktarda sıvı, metal toz oluşturacak kadar merkezkaç kuvvetine tabi tutulur, diğer yöntemde ise

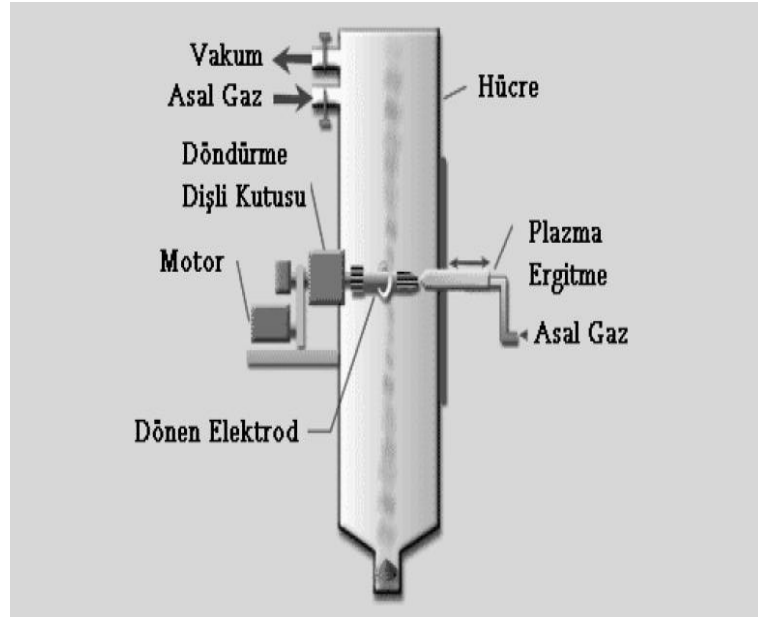
ergimiş metal, sürekli olarak dönen bir disk veya koni üzerine akıtılır. Koniden saçılan metalin toz haline gelmesi sağlanır. Bir potadan tandişe aktarılan sıvı metal, tandiş altındaki memeden dönen bir disk üzerine akıtılır. Disk üzerindeki set ve yarıklara çarpan sıvı metal parçalanarak şekildeki gibi saçılır. Saçılan metal parçacıklar nozuldan çıkışta bazen su ile soğutularak birbirine yapışmadan katılaşmaları sağlanır. Sıvı metali mekanik olarak parçalanmasında uygulanan basit bir yol da katılaşma sırasında karıştırmaktır. Örneğin Al katılırken karıştırılırsa toz haline gelir. Eğer bir alaşım söz konusu ise karıştırma katılaşma aralığında yapılır. Alüminyum, çinko, kalay gibi metallerin bu yöntemle tozları elde edilebilir. Döner disk hızı istenildiği gibi ayarlanır, böylece üretim kapasitesi kontrol altında tutulmuş olur. Düşük basınçlarda besleme yapılabilmesi de yöntemin avantajlarından. Bunların yanında atomizör disklerinin ve hız sağlayan motor ve ekipmanlarının pahalı olması ve akışkanlığı az sıvılarda verimli olmaması yöntemin dezavantajlarından. Gaz atomizasyon yöntemi Şekil 3.10'da şematik olarak gösterilmiştir [2,36].



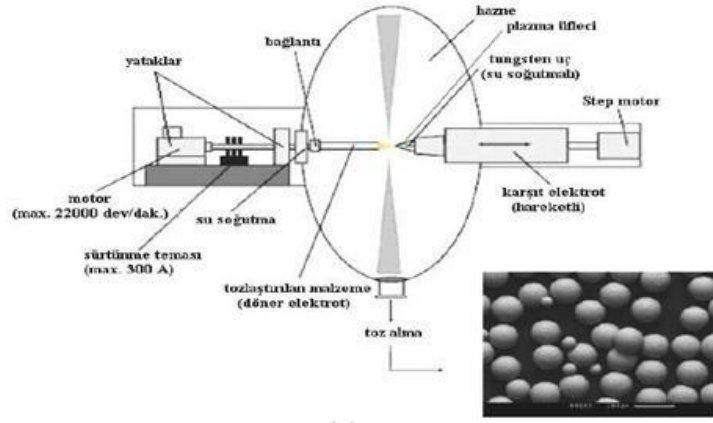
Şekil 3.10. Döner disk atomizasyonu şematik görünüşü [46]

3.4.4.4 Döner Elektrot Yöntemi

Bu yöntemde tozu elde edilecek metalden yapılmış bir elektrod ile ergimeyen tungsten elektrod arasında ark oluşturulur. Ergiyen elektrodun döndürülmesiyle, elektrik arkı altında bunun ucunda oluşan metal damlaları savrularak parçalanır ve tankta toplanır. Oksidasyonu önlemek için toz toplama tankı genellikle He, Ar gibi bir asal gazla doldurulur. Bu yöntemle küresel ve oldukça eşit tane iriliğinde metal tozu üretmek mümkün olmaktadır. Elektrot düşey veya yatay ekseninde döndürülebilir. Bu yöntemin avantajı kapalı, vakumlu veya sızdırmaz ortamlarda tamamen kontrol altında yapılabilir. Böylece ergitme potası kullanılmadığından metal dışı katkılardan uzak, yüksek saflıkta ve istenilen reaktif tozlar üretilir. Döner elektrod yöntemi şematik olarak Şekil 3.11'de ve plazma destekli döner elektrod yöntemi şematik olarak Şekil 3.12'de gösterilmektedir [2,36].



Şekil 3.11. Döner elektrod yöntemi şematik görünümü



Şekil 3.12. Plazma destekli döner elektrod yöntemi şematik gösterimi

3.4.4.5 Vakum Atomizasyon Yöntemi

Bu yöntemde silindirik bir tankın alt kısmında sıvı metal potası üst kısmında da vakum atomizasyon odası bulunmaktadır. Her iki bölüm sıvının geçeceği memeyi taşıyan bir plaka tarafından bölünmüştür. Memenin alt kısmında ona bağlı bir seramik boru bulunmaktadır. Vakum altındaki sıvı metal önce belirli bir sıcaklığa kadar indüksiyon akımı ile ısıtılır, bundan sonra bu bölüme hidrojen gazı doldurulur. Potadaki sıvı metalde bu hidrojen gazı çözüldükten sonra potayı yukarı taşıyan mil potayı yukarı iterek seramik boruyu potaya daldırır. Üst kısımda vakum olduğu için ergimiş sıvı metal memeden geçerek parçalanarak pulverize olur ve soğur. Böylece metal ve alaşımlarından ince küresel tozlar üretilebilmektedir [2].

Tozların üretim yöntemlerine göre elde edilen tozun nihai şekilleri Çizelge 3.1’de ve çeşitli metal tozlarının üretiminde kullanılan yöntemler ise yüzdesel olarak Çizelge 3.2’de verilmektedir [59].

Çizelge 3.1. Üretim yöntemlerine göre tozların nihai şekilleri [59]

TOZ ÖZELLİKLERİ					
	DÜZENSİZ GÖZENEKLİ	DÜZENSİZ YOĞUN	KİTLESEL YOĞUN	KÜRESEL GÖZENEKLİ	KÜRESEL YOĞUN
ÖĞÜTME	X	X			
FİZİKO-KİMYASAL	X	X	X	X	X
KİMYASAL	X	X	X	X	X
ATOMİZASYON					X

Çizelge 3.2. Çeşitli metal tozlarının üretimlerinde kullanılan yöntemlerin yüzdesel dağılımları [57]

Üretilen Miktar	%70	%15	%15				
			Atomizasyon	Kimyasal İndirgeme	Öğütme	Elektrolitik çökeltme	Isıl ayrışma
Alüminyum/Al-alaşımları	X						
Berilyum			X	X			
Kobalt							
Bakır	X	X		X			X
Bakır Alaşımları							
Cu-Al	X						
Cu-Pb	X						
Cu-Sn (Bronz)*	X						
Cu-Zn (Pirinç)	X						
Cu-Ni-Zn	X						
Demir	X	X	X	X	X		
Demir Alaşımları							
Düşük alaşımlı çelik	X						
Paslanmaz çelik	X						
Takım çeliği	X						
Molibdenim		X					
Nikel		X			X		X
Nikel Alaşımları	X		X				
Gümüş	X			X			X
Tantalum		X		X			
Kalay	X						
Titanyum	X	X			X		
Tungsten		X					
Zirkonyum	X				X		

* Bronz T/M tozları saf Cu ve Sn tozlarının karışımı ile de elde edilir.

3.5 Toz Özellikleri ve Karakterizasyonu

TM teknolojileri parçacıkların bir araya gelmesiyle oluşan tozlarla başlar. Yoğunlaştırma işleminde önemli girdi olması nedeniyle tozun tanımının iyi bir şekilde anlaşılması gerekir. Parçacık, tozun bölünemeyen en küçük birimi olarak tanımlanır. Toz işleme teknolojileri genellikle dumandan büyük (0.01-1 μm) kumdan küçük (0.1–3 μm) parçacıklarla ilgilenir. Kullanılan tozların çoğu, insan saçının çap ölçüsündendir (25-200 μm). SEM, bir tozun farklı özelliklerinin gözlenmesinde kullanılan en iyi araçlardan birisidir. Önemli toz özellikleri aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır;

- Parçacık şekli
- Parçacık boyutu ve dağılımı
- Yüzey alanı
- Parçacıklar arası sürtünme
- Akış ve paketleme
- İç yapı
- Bileşim, homojenlik ve kirlilik

3.5.1 Numune Alma

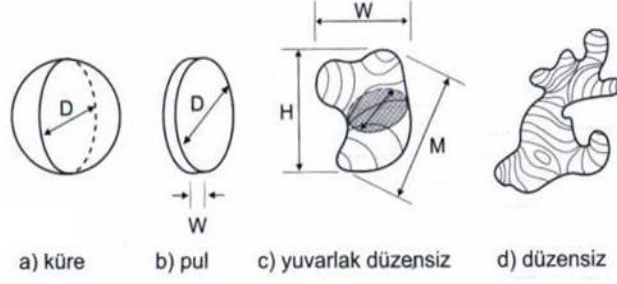
Tozların kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi için çeşitli testler yapılır. Bu amaçla ilk yapılacak iş, analiz için temsil edici toz numunesi almaktır. Numune, partinin tamamını temsil etmelidir. Bu durum sanılandan daha zor bir iştir. Bu nedenle çeşitli numune alma teknikleri kullanılır. Taşıma veya titreşimden sonra numune almak için toz partisi tamburlanarak karıştırılmalıdır. Ayrıca bir çok noktadan küçük numuneler alınmalı ve karıştırılmalıdır. Endüstriyel testler, en düşük numune alma hatalarının döner bir numune bölücü kullanıldığında olduğunu göstermektedir. Baston tip numune alıcılar yaygın olarak kullanılmaktadır [2,38].

3.5.2 Toz Parçacık Boyut Ölçümü

Parçacık boyutu TM'nin en önemli özelliklerinden birisidir. Parçacık boyutu ölçümü, bir parçacığın boyutlarının belirlenmesidir. Ancak bu belirleme ölçüm tekniğine, ölçülen özgül parametreye ve parçacık şekline bağlıdır.

Bir tozun boyutunu veya diğer özelliklerini doğru olarak belirlemek için, tozun uygun bir biçimde dağıtılması gereklidir. Dağıtma işlemi parçacık boyutu ne kadar küçük olursa o kadar güçleşir. 100µm'den daha küçük parçacıklar dağıtma işlemine direnç gösteren yüksek çekim kuvvetine sahiptir. Parçacıkların çoğu kohesiv ve doğal olarak birbirine yapışır. Parçacıkların topaklanmasına sebep olan yüzey nemidir. Topak, malzemenin mukavemetinden çok küçük kayma gerilmeleriyle yenilenebilecek zayıf kuvvetlerin bir arada tuttuğu parçacıklar kümesidir. Bunun aksine agregalar çok serttir ve dağıtılması zordur. Agregalar genellikle güçlü kimyasal kuvvetlerle bağlıdır. Toz özelliklerinin ölçülmesinden önce topaklar parçalanarak dağıtılabılır, agregalar ise dağıtılamaz. Nem topaklanmaya neden olduğu için toz kurutma işlemi genellikle iyi bir ilk adımdır. Tozu su, alkol ve diğer bir çözücü ile tamamen doyumak başka bir yöntemdir. Mekanik karıştırma veya ultrasonik çalkalama, topaklanmayı dağıtmada çok tercih edilen yöntemlerdir. Parçacık boyut analizi çeşitli tekniklerle gerçekleştirilebilir. Ancak, ölçülen parametrelerdeki farklılıklar nedeniyle, çeşitli parçacık boyut analiz tekniklerinin genellikle aynı sonucu vermediği bilinmelidir.

Küresel bir parçacık için boyut tek bir parametre olup, çap olarak verilir [36]. Ancak, parçacık şekli daha karmaşık olduğunda, boyutu tek bir parametre ile belirlemek zordur. Yassı veya pul şeklinde bir parçacık göz önüne alındığında boyutu tanımlamak için çap ve genişliğin her ikisi de gereklidir. Şekil daha düzensiz olduğunda, olası boyut parametrelerinin sayısı artar. Şekil 3.13'de çeşitli boyut parametreleri verilmiştir .



Şekil 3.13. Çeşitli toz boyut parametreleri [39]

3.5.2.1 Mikroskop İle Toz Boyut Ölçümü

Toz boyutu ölçmenin en yaygın olarak bilinen yöntemidir. Bu yöntem kullanılırken örneklenecek toz miktarında aşırıya kaçılmamalıdır. Bir kaç tozun birleşip tek bir toz gibi izdüşüm oluşturabileceği unutulmamalıdır. 100 nm ile 100 μm toz aralığı için OM, 10 nm ile 10 μm toz aralığı için SEM ve 0,1 nm ile 10 μm toz aralığı için geçirmeli elektron mikroskobu kullanılır.

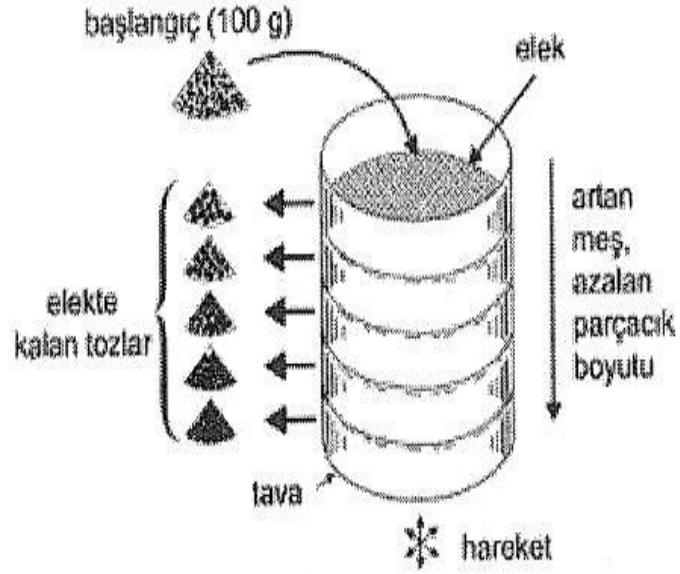
3.5.2.2 Eleme Yöntemi

Bu yöntem elek analizi olarak ta bilinen bu yöntem boyut dağımı tayininde kullanılan en eski yöntemdir. Ancak tam anlamıyla bir boyut tekniği değil, tozların sınıflandırılması yöntemidir. Eşit aralıklı tellerden oluşan bir kare ızgara eleği oluşturur. Elek boyutu birim uzunluğundaki tellerin sayısıyla belirlenir. Elek boyutu mesh olarak da adlandırılır. Açıklık boyutu, elek boyutu ile ters orantılıdır. Eleme yöntemi Şekil 3.13'de şematik olarak gösterilmiştir. Elek boyutunun belirlenmesinde en yaygın kabul, bir inçteki tel sayısıdır. Örneğin 200'lük elek, elek üzerinde bulunan doğrusal 200 teli ifade eder.

Parçacık topaklanması ve adhezyon sebebiyle küçük boyutlu elekler tercih edilmez. Bir elekten geçen toz – elek boyutu, üzerinde kalan toz ise + elek boyutu ile ifade edilir. Örneğin 150 μm boyutunda bir elekten elenen tozlarından eleğin üzerinde kalanları +150 mm, altında kalan tozlar ise -

150mm olarak anılır. Eleme yönteminde, çok fazla eleme süresi aşınmaya neden olur. Kısa eleme süresi ise küçük parçacıkların elek serisinden geçmesine engel olur. Bu yüzden eleme için, optimum eleme süresi belirlemek gerekir. Elek altı (serbest akmayan) tozlar diye ifade edilen tozlar, elek deliklerini tıkayabilir, Buda elek analizinde hataya sebep olur. Elek altı tozlarda sedimentasyon ve lazer yöntemleri daha etkindir [46].

Eleme işlemi şematik olarak Şekil 3.14'de gösterilmiştir. Anon (1984) tarafından kullanılan ve bugün standart olarak kabul gören elek boyutları Çizelge 3.3'de verilmiştir.



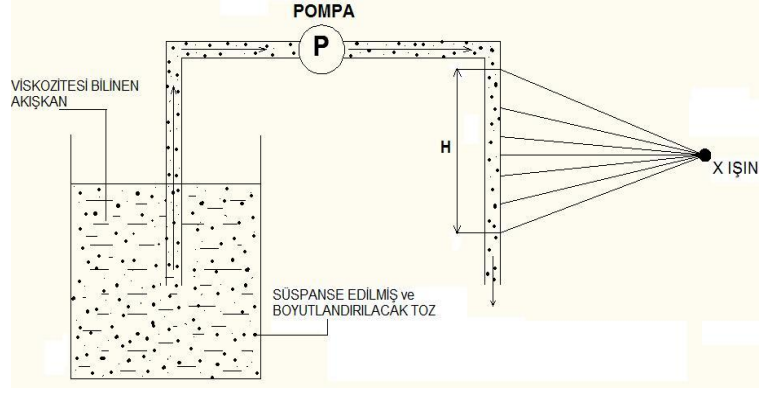
Şekil 3.14. Eleme yönteminin şematik görünüşü [46]

Çizelge 3.3. Standart elek boyutları [46]

ELEK BOYUTU (mesh)	AÇIKLIK (µM)	ELEK BOYUTU (mesh)	AÇIKLIK (µM)
18	1000	100	150
20	850	120	125
25	710	140	106
30	600	170	90
35	500	200	75
40	425	230	63
45	355	270	53
50	300	325	45
60	250	400	38
70	212	450	32
80	180	500	25
		635	20

3.5.2.3 Sedimentasyon Yöntemi

Sedimentasyon yöntemi elek analizinde elek altı olarak tabir edilen ve serbestçe akmayacak kadar küçük olan tozların boyut tayininde etkili bir yöntemdir. Sedimentasyon yönteminde 0,02 µm ila 100 µm arasında toz boyutları tayin edilebilir. Genelde aynı cins tozların toz boyut analizinde kullanılır. Bu yöntemde tozların boyutları viskozitesi bilinen bir akışkan içerisinde çökme süresi ile tayin edilir. Seçilen akışkanın toz ile reaksiyona girmemesine dikkat edilmelidir. Akışkanın viskozitesi ayarlanabilmelidir. Topaklanmayı önlemek için ultrasonik karıştırma gereklidir. Sedimentasyon yöntemi Şekil 3.15'de şematik olarak gösterilmektedir [2].



Şekil 3.15. Sedimentasyon yöntemi ile toz boyut analizi

Bu yöntemde kullanılan toz miktarı 1 gr'dan azdır. Bu yöntem, süspansiyon haline getirilen tozun X ışını ile belirli bir H mesafesinden geçiş süresinin kendi halinde serbestçe çökme ile geçişinin ölçülmesinden ibarettir. Eşitlik 3.5'deki gibi yazılan Stoke denkleminden D çekilerek parçacığın çapı bulunur [2].

$$\text{————— } D^2 g \quad (3.5)$$

Burada;

V : Parçacığın düşme hızı

ρ_s : Sıvının yoğunluğu

ρ_p : Parçacığın yoğunluğu

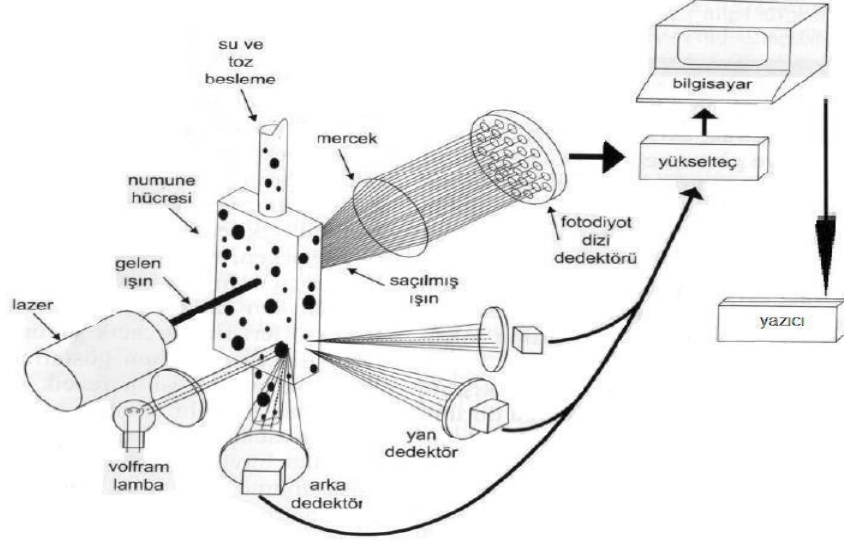
D : Parçacığın çapı

η : Sıvının viskozitesi

g : Yerçekimi ivmesi

3.5.2.4 Işığın Kırınımı Yöntemi

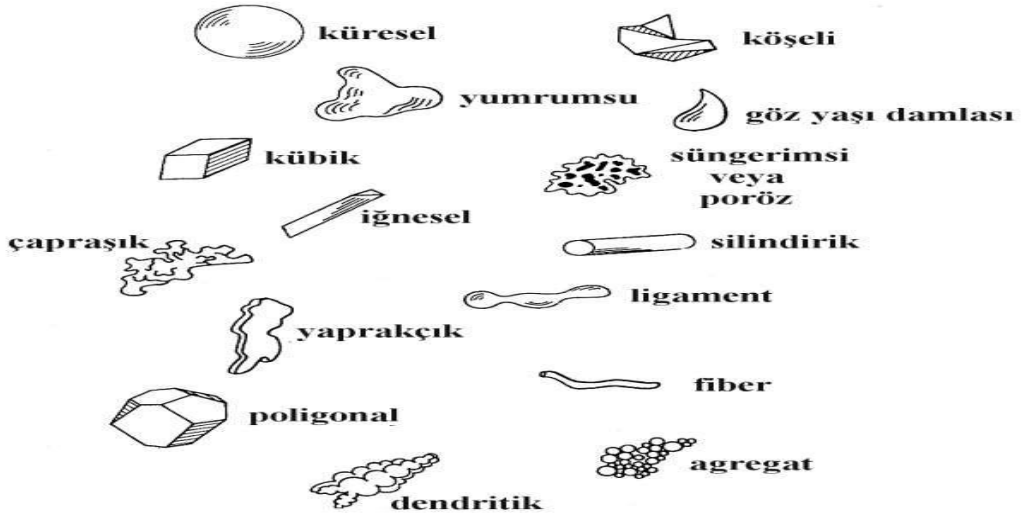
Otomatik parçacık boyut analiz cihazları, parçacıkları hareketli bir akışkan içinde dağıtır. Dağılmış olan bu parçacıklar bir dedektörün önünden geçirilir. Akıntı tekniklerinin çoğu akışkan içinde hacimce %1'den daha az katı kullanır. Kullanıldığı fizik yasalarına bağlı olarak dedektör, parçacık boyutu ile orantılı olan ışık saçılması, elektrik iletkenliği veya diğer sinyallerdeki değişimleri ölçer. Kabarcıklar gibi yapay süreksizlikler var ise, bu durum hataya sebep olur. Akıntı yöntemlerinin önemli bir üstünlüğü büyük dinamik orandır. Bu oran aynı anda ölçülebilen en büyük parçacıkların en küçüklere göre oranı olarak tanımlanır. Çoklu dedektörleri kullanan lazer cihazlarında dinamik oran 7000-8000 değerleri kadar büyük olabilir. En etkili akıntı tekniği, ışık saçılması esasına dayanır. Tek renkli lazer ışığı ve dağıtılmış parçacıklar kullanan düşük açılı Fraunhofer ışık saçılımı, otomatik boyut analizlerinde yaygın olarak kullanılır. Dağıtılmış parçacıklı bir akıntı, aşağıda şematik olarak gösterilen bir dedektör sisteminin önünden geçirilir. Parçacık lazer ışınının önünden geçerken, parçacık boyutuna özgü bir saçılma işareti oluşturur. Bu işaretler fotodiyot dedektör dizisi kullanılarak toplanır. Lazer ışığı ile saçılma açısı, parçacık çapı ile ters orantılı olarak değişir. Bundan başka, saçılan sinyalin şiddeti parçacık çapının karesiyle değişir. Açı ve şiddet verilerinin bilgisayarda analizi parçacık boyutunu verir. Cihaz tasarımına bağlı olarak dinamik oran 30 ile 500 aralığında değişebilir ve bu diğer bir çok otomatik cihazlardan daha fazladır. Fraunhofer ileri saçılımı 1 µm ila 200 µm boyut aralığında uygulanır. En küçük parçacıklar, algılanan lazer ışığının dalga boyunun en az iki katı olmalıdır. Parçacık boyut analizinde kullanılan diğer yaklaşımlarda olduğu gibi, parçacık şekli küresel kabul edilir. Topaklanmayı algılamak zordur, fakat uygun dağıtma ve ultrasonik topak dağıtma ile topaklanma en aza indirilebilir. Bu yöntemde veri toplama kolay olduğu için, teknik yaygın olarak kullanılmaktadır. Işığın kırınımı yöntemiyle toz boyutunun belirlenmesi Şekil 3.16'de şematik olarak gösterilmektedir [38].



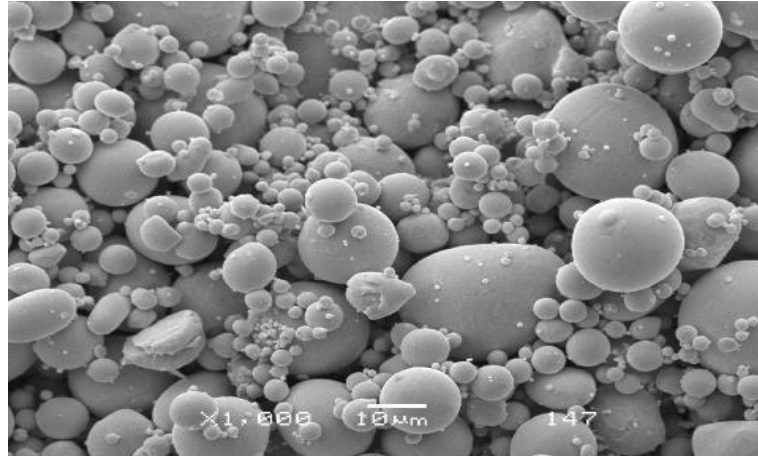
Şekil 3.16. Işığın kırınımı yöntemi ile toz boyutunun belirlenmesi [38]

3.5.3 Toz Şekli

Tozun şekli, elde edilmesinde kullanılan tekniğe ve boyutuna bağlıdır. Toz şekli akıcılığı, sıkıştırılabilirliği ve paketlemeyi etkiler. Şekil 3.17’de üretim sonucunda meydana gelen olası toz şekilleri verilmiştir. Şekil 3.18’de ise gaz atomizasyon yöntemi ile üretilmiş tozların SEM görüntüsü verilmiştir [2].



Şekil 3.17. Üretim sonunda meydana gelen muhtemel toz şekilleri [34]



Şekil 3.18. 1000x büyütülmüş küresel metalik tozların SEM görüntüsü [36]

3.5.4 Yüzey Alanı

Tozların artan yüzey alanı preslemeyi zorlaştırdığından istenilen bir durum değildir. Aynı boyut için küre en düşük, pul tozu en yüksek yüzey alanına sahiptir. Yüzey alanı, şekil faktörüne bağlıdır ve BET yöntemi ile ölçülür. Çeşitli tozların yüzey alanları Şekil 3.19'de verilmiştir.

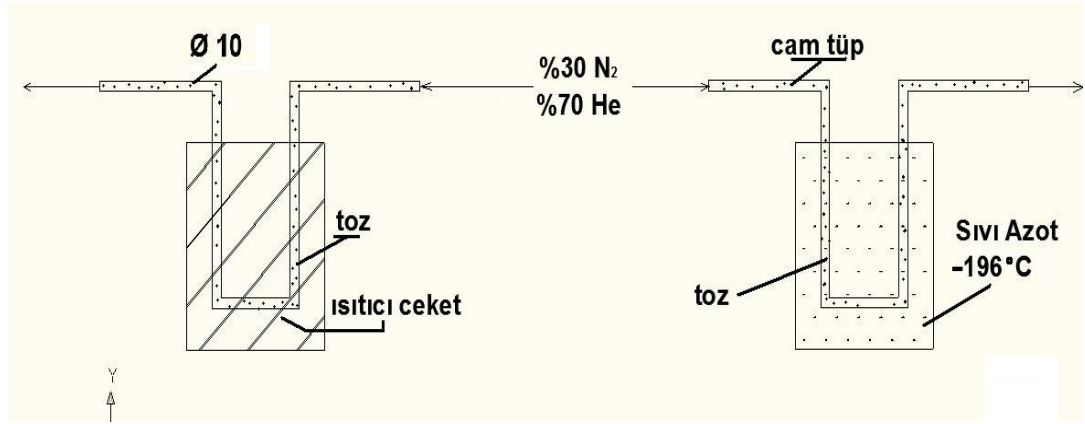
TOZ ŞEKLİ	 ELİPS	 SİLİNDİRİK	 KÜPİK	 PUL	 KÜRESEL
Şekil Faktörü k_s	7,57	6,86	7,44	24,0	6,0

Şekil 3.19. Çeşitli toz şekilleri ve şekil faktörleri [36]

Özgül yüzey alanının hesaplanması ise Eşitlik 3.6'da verilen denklem yardımıyla hesaplanır.

$$S = \text{Yüzey Alanı} / \text{Kütle} \quad (S: \text{Özgül Yüzey Alanı}) \quad (3.6)$$

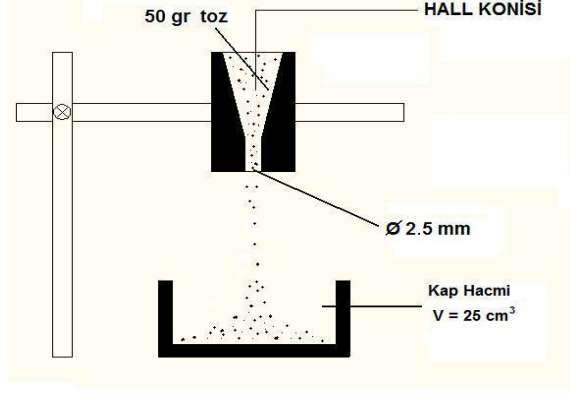
BET yönteminde kullanılan toz miktarı 1 gr'dan daha azdır. Tozlar U şeklindeki cam tüplere konur. Atmosfer kontrollü olarak 100 °C'nin biraz üstüne çıkacak şekilde ısıtılır. Böylelikle tozların daha önce emdiği gazlar tozlardan uzaklaştırılır. Daha sonra tüp sıvı azota daldırılarak tüp içerisinden helyum ve azot gazı geçilir. Tüketilen gaz miktarından özgül yüzey alanı hesaplanır. Metal tozlarında özgül yüzey alanı 1m²/gr'dan daha azdır. BET yöntemi Şekil 3.20'de şematik olarak gösterilmiştir [2].



Şekil 3.20. Yüzey alanı ölçümünde kullanılan BET yöntemi

3.5.5 Toz Akışı Hızı

Toz akış hızı pres kalıpların doldurulma sürelerini belirler. Toz akış hızı üretim hızına doğrudan etkir. Akış ne kadar sağlıklı ise üretim o kadar hızlı olur. Toz akış hızı toz şekline ve boyutuna bağlıdır. Akıcılık küresel tozlarda en iyi iken, pul tozlarda en yavaştır. Elek altı tozlar yüksek yüzey alanı nedeniyle zor akarlar, bu sebeble preslenmeleri zordur. Bunlar için Carney hunisi kullanılır. Toz akış hızı, 50 gr tozun Hall hunisinden akış süresi olarak tanımlanır. Hall hunisinde tozların akması için aralık 2,54 mm iken, Carney hunisinde bu 5,08 mm'dir. Carney hunisinde açıklığın fazla olması akışkanlığı nisbeten daha kötü olan tozlar için bu huniyi kullanmayı cazip hale getirmiştir. Carney hunisinden dahi akamayacak akışkanlığa sahip tozlar için Scott düzeneği kullanılır. Hall hunisinin şematik gösterimi Şekil 3.21'de verilmiştir.



Şekil 3.21. Hall hunisi [2]

3.5.6 Görünür Yoğunluk

Görünür yoğunluk, tozların kütesinin sarsılmadan ve sıkıştırılmadan (gevşek halde) doldurdukları hacime oranı olarak tariflenir. Hall hunusine alttaki toplama kabının hacmi olan 25 cm^3 'den biraz daha fazla toz konur. Tozun serbest halde akıp kabı doldurduktan sonra, fazla toz manyetik olmayan bir sıyrıcı ile sıyrılır. 25 cm^3 hacmindeki kabın darası düşüldükten sonra kap içerisindeki toz kütlesi bulunur. Bulunan kütle 25 cm^3 hacme bölünerek tozun yoğunluğu gr/cm^3 cinsinden bulunur [2]. Teorik yoğunluk denklemi Eşitlik 3.7'de verilmiş olup doğrudan gözenek miktarını verdiği için daha çok kullanılır [2].

$$\text{Teorik Yoğ.} = (\text{Görünür Yoğ.} / \text{Malzeme Yoğunluğu}) \times 100 \quad (3.7)$$

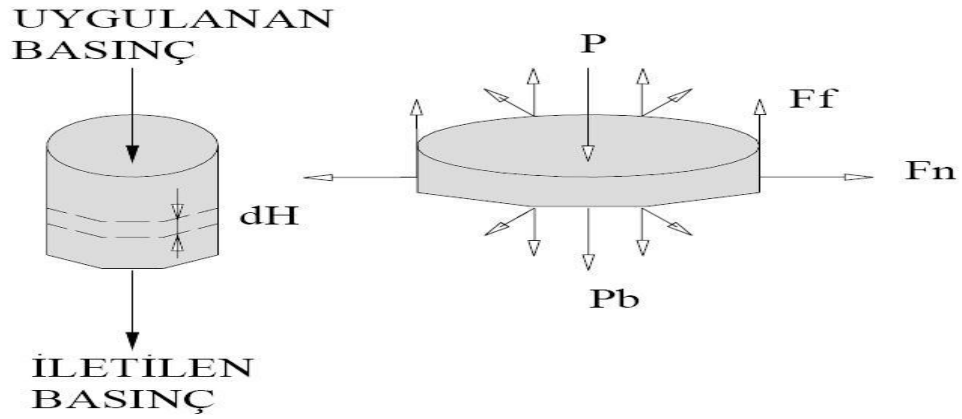
Vurgu yoğunluğunda ilave bir basınç yoktur. Tozun sadece titreştirilerek sıkıştırılması ile elde edilen maksimum yoğunluğu olarak tanımlanır. Vurgu yoğunluğu Eşitlik 3.5'de verilen denklemle hesaplanır.

$$\text{Vurgu Yoğunluğu} = 1,1 \times \text{Görünür Yoğ.} \quad (3.8)$$

3.5.7 Sıkıştırılabilirlik

Tozların belirli bir basınçtaki yoğunlukları olan görünür yoğunluk, genel olarak 700 MPa basınçtaki yoğunluk olarak kabul edilmektedir. Toz şekli, toz büyüklüğü, yüzey alanına bağlıdır. Tozun sıkıştırılması esnasında karşılaşılan zorluklardan birisi, kalıp duvarları ile toz taneleri arasında meydana gelen sürtünmedir. Bu sürtünme uygulanan basıncın, tozun kalıp içindeki derinlik mesafesiyle azalmasına neden olmaktadır. Tozların sıkıştırılmasında basınç – mukavemet - yoğunluk ilişkilerini etkileyen çok sayıda önemli tane özellikleri vardır. Bunlar iç ve dış fiziksel özellikler olmak üzere, sertlik, gerilme sertleşmesi, yüzey sürtünmesi gibi malzeme özellikleri, tanecikler arası kimyasal bağ, toz tane boyutu, şekli, yağlama ve sıkıştırma yöntemi özellikleridir [23].

Çapı D ve yüksekliği H olan, silindirik kalıp içerisindeki tozların sıkıştırılması prensip olarak Şekil 3.22 gösterilmektedir.



Şekil 3.22. Silindirik kalıp içerisindeki tozların sıkıştırılması [42]

Silindirik tozun içerisinde sonsuz küçük yüksekliğe sahip toz ele alındığında, bu toza etki eden kuvvetlerin dengesinden kalıp duvarı tarafından toza uygulanan kuvvet Eşitlik 3.6'da verilen denklemlerle hesaplanır.

$$\Sigma F = 0 = A(P - P_b) + U.F_n \quad (3.9)$$

F_n : Kalıp duvarı tarafından toza uygulanan kuvvet

P : Uygulanan basınç

A : Kesit alanı

P_b : Uygulanan P basıncı ile elemanın içinden tabanına iletilen basınç

Sıkıştırılabilirliğe etki eden faktörler,

- Toz Sertliği: Sıkıltırmada en etkili faktördür. Sert tozların sıkıştırılması zordur. Demir içerisindeki karbondan dolayı sertlik kazanır bu yüzden demirin sıkıştırılmasında büyük basınç değerlerine ihtiyaç vardır.
- Toz Şekli: Karmaşık şekilli tozların sıkıştırılması daha zordur.
- Toz Boyutu: Geniş dağılımlı tozların sıkıştırılabilirliği iyidir.
- İç Gözenek: Sıkıştırılabilirlik azalır çünkü yapı kapalıdır.
- Yağlayıcılar: Tozlar arasında sürtünmeyi azalttığı içindir ki sıkıştırılabilirliği artırır. Çinkostearat, kalsiyumstearat gibi tepkimesiz katı yağlayıcılar kullanılır. Yağlayıcı toz içerisinde %0,5 ila %1,5 aralığında katılabilir. Kalıp duvarları için kullanılır [42].

3.5.8 Ham Mukavemet

Toz kütlelerinin presten çıktığı mukavemete ham mukavemet adı verilir. Soğuk kaynaklama ve mekanik kilitleme ham mukavemet bileşenidir. Soğuk kaynaklama ham mukavemetin %10'unu oluştururken %90'lik kısmı mekanik kilitlemeden ibarettir. Parçanın kalıptan çıkarılabilmesi için sinterlenmesi

için, taşınabilmesi ve depolanması için gerekli mukavemettir. Ham mukavemete toz şekli, toz boyutu, ham yoğunluk ve yağlayıcı kullanmak etki eden faktörler arasında gösterilebilir [37].

3.5.9 Safsızlık

Sinterlemede yüksek yoğunluğa ulaşıldıktan sonra genel olarak tane boyutu büyümesi gözlemlenir. Bu durum sinter sonrası yüksek yoğunluk ve ince taneli yapı istenmesi durumunda göz önünde bulundurulmalıdır. Bu durumun sağlanması çoğu zaman zor olmakla birlikte yüksek yoğunluk ve ince taneli yapı malzemenin mekaniksel mukavemetini arttıran bir etki yapar. Dolayısıyla sinterleme süreci en küçük tane boyutunu ve yüksek yoğunluk verecek şekilde optimize edilmelidir. Diğer bir değişle, dayanım gözenek miktarı ve tane boyutuna bağlıdır. Bu durum hem seramik ve hem de metalik parçalar için geçerlidir. Sinterlemede düşük yoğunluklarda, gözenekler tane büyümesini engellemektedir. Ancak tane büyümesi daha çok boşlukların tamamen kaybolması ve tane sınırlarının artması ile birlikte gözlenmektedir. Bu aşamaya gelinmeden önce yardımcı sinterleme elemanlarının (inhibitörler) veya toz üretim süreçlerinden gelen safsızlıklar tane büyümesini önlerler ve yoğunluk artışına yardımcı olurlar [37].

3.5.10 Mikroyapı

Toz şekli, iç gözenekler, segregasyon (ayrışma), kirlilikler, oksitler, soğuma hızları, uydulaşma vb. unsurlardan ibarettir. Mikroyapının incelenebilmesi için tozlar epoksi reçine ile karıştırılır [37].

3.5.11 Yanıcılık

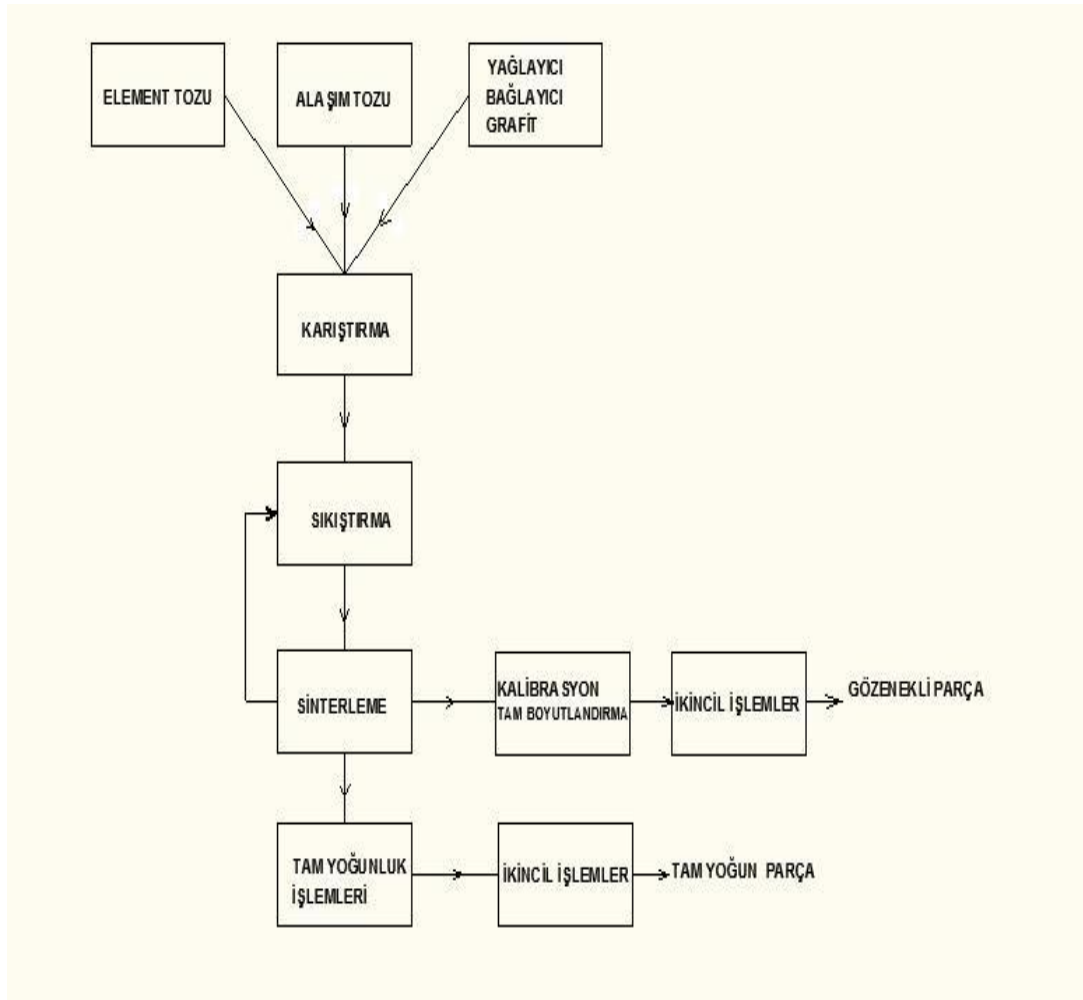
İnce öğütülmüş tozlar yanıcı özellik taşırlar. Al, Mg, Zn, Zr gibi metal tozları bunlara örnektir. Bu tozlarda 40 gr/m^3 patlayıcılık sınırı vardır. Bu tozların tutuşma sıcaklığı $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ila $700 \text{ }^\circ\text{C}$ arasındadır [2,37].

3.5.12 Zehirleyicilik

Ar, Te, Be, Cd, Ni, Cr, Co, Pb gibi metallerin tozları zehirlidir. 10 µm altındaki tozların burun tarafından filtrelenmesi zordur. Bu husus iş sağlığı ve güvenliği açısından önem teşkil eder [2].

3.6 Toz Sıkıştırma Yöntemleri

TM ile üretim akışı genel olarak Şekil 3.23'de verildiği gibidir.



Şekil 3.23. TM ile üretim akış şeması [2]

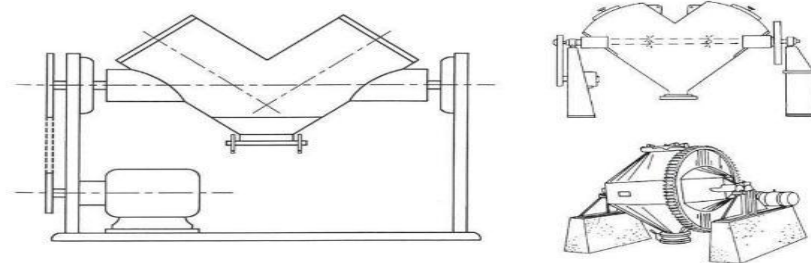
İkinci kez sinterleme çelikler dışında pek yaygın değildir. Deformasyon sertleşmesi nedeniyle presleme güçleşir. Sıkıştırma yöntemleri arasında presleme, izostatik presleme, haddeleme, ekstrüzyon ve toz enjeksiyon kalıplama (TEK) yöntemleri bulunur. Gerekli durumlarda ikincil işlem uygulanır [2].

3.6.1 Toz Karıştırma

Tozların karıştırılması çok çeşitli karıştırıcı tipleri olmakla birlikte en çok karıştırma işlemi V veya Y tipi karıştırıcılar adıyla bilinen çift borulu ve çift-koni karıştırıcılarda yapılmaktadır [36]. Karıştırıcı çeşitlerinden döner karıştırıcı (çift koni tip) Şekil 3.24'de ve V Y karıştırıcı (çift boru tip) Şekil 3.25'de verilmiştir.



Şekil 3.24. Döner karıştırıcı (çift koni tip) [36]



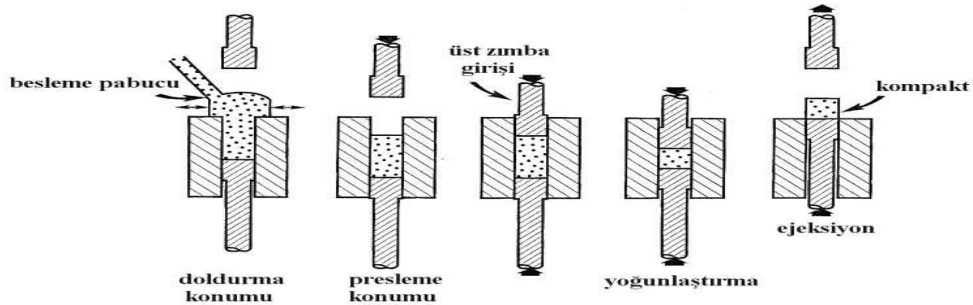
Şekil 3.25. V Y karıştırıcı (çift boru tip) [36]

Karıştırma işlemi, tozların tane boyutuna ve şekline göre yığılmasını önlerken, akma hızını ve görünür yoğunluğunu da değiştirir. Karıştırma işleminin uzun tutulması taneciklerin kırılarak küreselleşmesine ve önemli ölçüde plastik deformasyona uğramasına sebep olabilir. Buda tozun sıkıştırılabilme özelliğini azaltıp, şekillendirme sırasında gerekenden fazla soğuk işleme sebep olur.

Karıştırma işlemi sonucunda iyi bir karışım olması istenir. İyi bir karışım için düzenek doluluk oranının %20 - %40 arasında olması istenir. Karıştırmayı etkileyen faktörler arasında; karıştırıcının tipi, hacmi, yapıldığı malzeme, yüzey pürüzlülüğü, doluluk oranı, karıştırma süresi, sıcaklığı sayılabilir. Optimum karıştırma süresi deneysel olarak belirlenir. Karıştırma ıslak yada kuru olarak yapılabilir [36].

3.6.2 Kalıpta Sıkıştırma Yöntemi

Toz parçacıkların ısıtılmadan yoğunlaştırılmasında sıkıştırma adı verilir. TM'deki en önemli ve üçüncü işlem basamağı sıkıştırmadır. Metal tozları, özel olarak hazırlanmış kalıp içersinde basınç etkisiyle briket hale getirilir. Sıkıştırmanın temel amacı, toz partiküllerinin istenilen şekle dönüştürülmesi için, yapıya kendi ağırlığını taşıyabilecek kadar yoğunluk kazandırılmasıdır. Şekil 3.26'da kalıpta sıkıştırma basamakları gösterilmektedir.



Şekil 3.26. Kalıpta sıkıştırma basamakları [36]

3.6.3 Sıkıştırma Teknikleri

Yaygın olarak bilinen sıkıştırma teknikleri; presleme, izostatik presleme (soğuk ve sıcak izostatik presleme), haddeleme, ekstrüzyon ve toz enjeksiyon kalıplamadan ibarettir.

3.6.3.1 Presleme

Toz parçaların yaklaşık olarak %80'den fazlası bu yöntem ile üretilir. [39]

Genel olarak üç tipi mevcuttur.

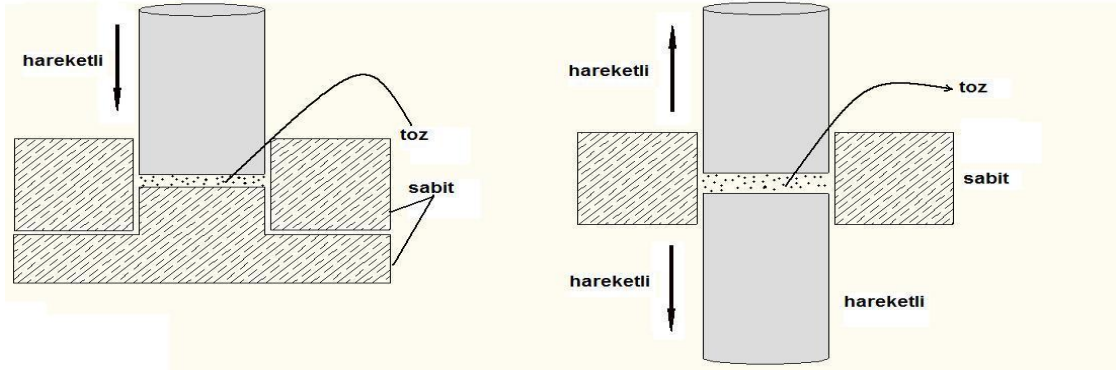
- Sadece alt zımbanın hareket ettiği tek hareketli presleme
- Alt ve üst zımbanın beraber hareket ettiği çift hareketli presleme
- Hareketli zımbanın yanı sıra yaylar üzerinde oturtulmuş kalıbın da kısmen hareket ettiği yüzey kalıp tipi presleme

En yaygın kullanılanı tek eksenli bir kalıp ile basma işlemidir. Tek eksenli kalıp ile sıkıştırma tekniği kesintisiz üretim, otomasyon sistemleri, yüksek miktarlarda metal ve seramik parçalar ile ilaç ve patlayıcı endüstrisinde yaygın kullanım alanına sahiptir. Bu nedenlerden dolayı endüstriyel uygulamalardaki çoğu TM parçaları bu teknik kullanılarak üretilirler.

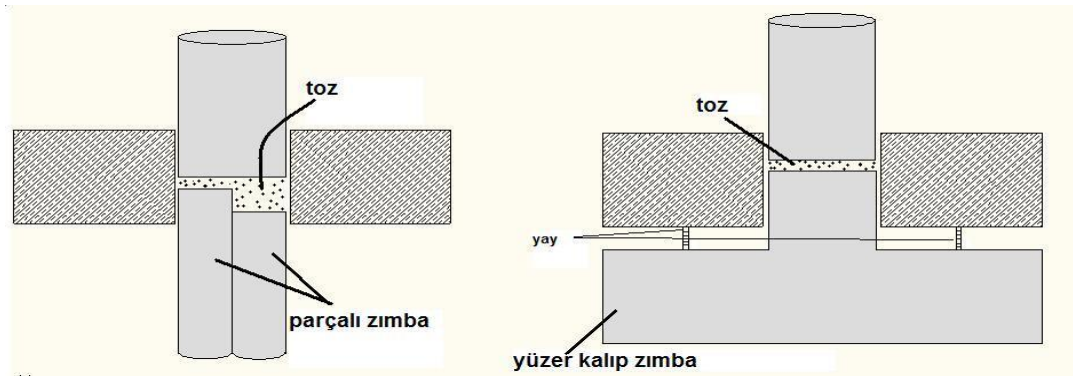
Çift etkili sıkıştırmada, zımbaların her ikisi de hareketlidir. İlk aşama, imal edilecek parçanın kalıbı daha önceden tasarlanmasıdır. Bu aşamada kalıp prese montajlanır. İkinci aşamada, toz partikülleri kalıp doldurma pabucundan kalıba serbest akış durumunda doldurulur. Üçüncü aşamada, kalıp boşluğuna doldurulan toz, sistemin titreşim mekanizmasıyla sıkıştırma öncesi titreşimli yoğunluk kazandırma işlemi yapılarak doldurulan tozun kalıpta düzgün bir şekilde yerleşmesi sağlanır. Bu sırada da, istampa ile kalıp yüzeyinde artan tozlar diğer toz haznesine itilir ve üst zımba sıkıştırmak için dişi kalıp boşluğuna yerleşir. Dördüncü aşamada, sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir. Bu aşamada, toz taneleri sıkıştırmanın etkisiyle belli bir

değerde yoğunluk ve mukavemet kazanarak briket hale gelmektedir. Beşinci aşamada ise mukavemet ve yoğunluk kazandırılmış ham briket, belli bir sıyırma kuvvetiyle alt zımba tarafından kalıp boşluğundan çıkartılır. Altıncı ve son aşamada, kalıp boşluğundan çıkarılan ham briket toz doldurma pabucu tarafından itilir ve ikinci parçanın preslenmesi için toz doldurma işlemi gerçekleştirilir [38].

Tek eksenli zımba ve çift etkili zımba çeşitleri şematik olarak Şekil 3.27'de ve parçalı zımba yüzer kalıp zımba çeşitleri ise Şekil 3.28'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.27. Tek eksenli ve çift etkili zımba



Şekil 3.28. Parçalı ve yüzer kalıp zımba

Parça yüksekliğinin (H) parça çapına (D) oranına narinlik oranı denir. Narinlik oranı TM'de önemli bir parametredir. Narinlik oranının kalıplarda 1'de küçük olması arzu edilir [2].

3.6.3.2 İzostatik Presleme

Bu yöntemde, toz kütlesi her yönden eşit basınçta sıkıştığından homojen bir yoğunlaşma sağlanır. Narinlik oranının yüksek, geometrinin karmaşık olduğu durumlarda bu yöntem üstünlük sağlamaktadır. Ancak pahalı ve üretim hızı yavaş olan bir yöntemdir. Yağlayıcı katılmadığından yüksek ham mukavemetli parçalar elde edilir. Soğuk izostatik presleme (CIP) ve sıcak izostatik presleme (HIP) olmak üzere 2 farklı biçimde uygulama yöntemi vardır [2]. Normal presleme ve izostatik presleme Şekil 3.29'da şematik olarak gösterilmiştir.



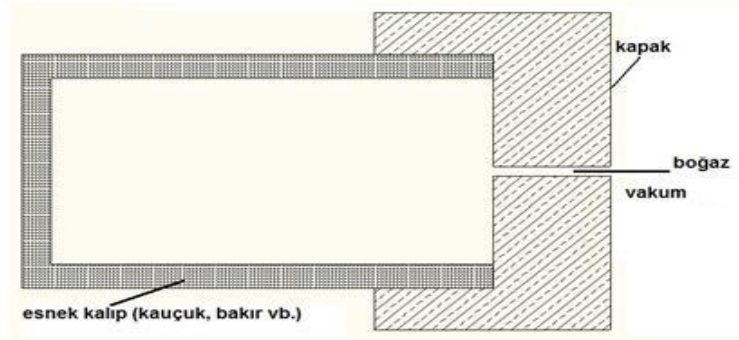
Şekil 3.29. Normal presleme (a) ve izostatik presleme (b) [48]

3.6.3.2.1 Soğuk İzostatik Presleme (CIP)

Soğuk izostatik presleme tekniğinde (CIP) iki farklı yöntem kullanılır. Bunlardan ilki yaş kalıpla presleme yöntemi diğeri ise kuru kalıpla presleme yöntemidir [2].

3.6.3.2.1.1 Yaş Kalıpla Presleme

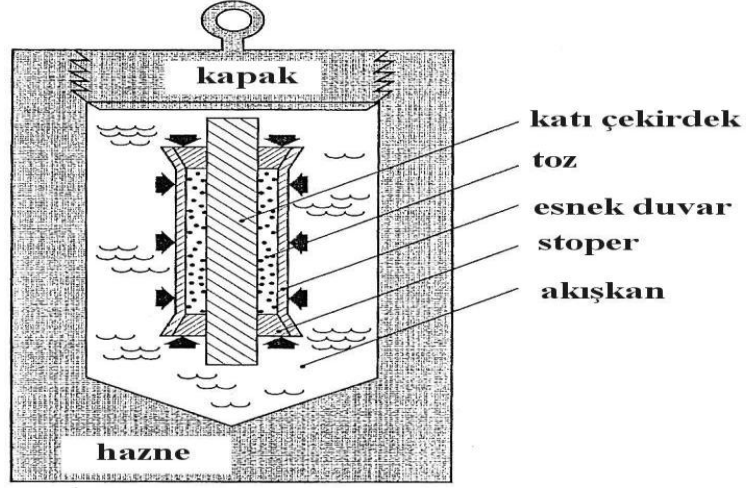
Yaş kalıpla presleme yöntemi Şekil 3.30'da şematik olarak gösterilmiştir. Bu yöntemde aşırı boyutlandırılmış bir kalıbın içerisinde tozlar doldurulup, kapak kapatıldıktan sonra kalıp içerisindeki hava vakumla emilir. Sonra kalıp basınç hücreğine atılarak izostatik basınç uygulanır. Yaş kalıp yöntemine serbest kalıp yöntemi de denir.



Şekil 3.30. Yaş kalıpla presleme yöntemi [2]

3.6.3.2.1.2 Kuru Kalıpla Presleme

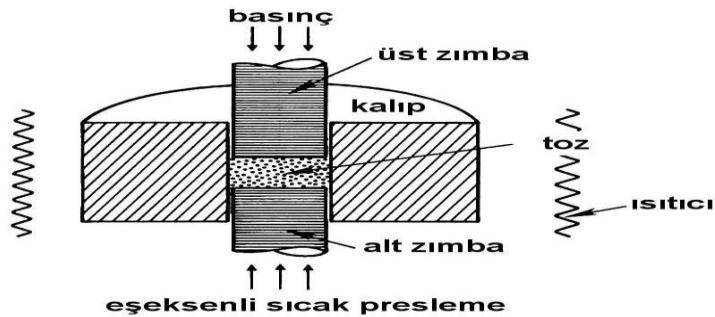
Bu yöntem yaş kalıpla presleme yönteminde göre daha hızlı ve otomasyona daha uygun bir yöntemdir. Bu yöntemde kalıp birden fazla kez kullanılabilir. İzostatik basınç yönünden ise yaş kalıpla presleme yönteminde göre daha zayıftır. CIP genellikle 350 MPa basınçta uygulanır. Kuru kalıpla presleme yöntemi Şekil 3.31'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.31. Kuru kalıpla presleme yöntemi [38]

3.6.3.2.2 Sıcak İzostatik Presleme (HIP)

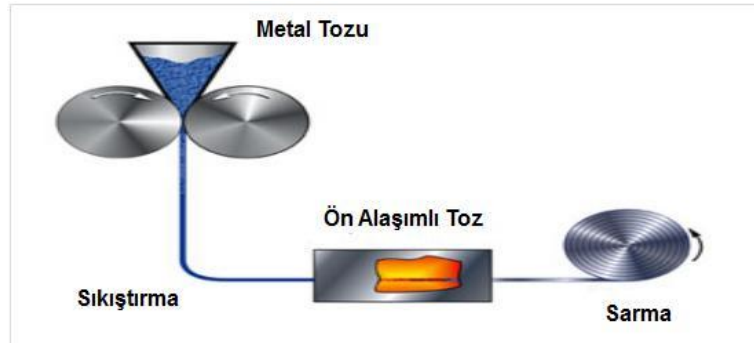
Sıcak izostatik presleme, 2000°C ve 200 MPa gibi yüksek basınç ve sıcaklıklarda uygulanır. Isı transferi ve basınç sağlamak için genellikle Ar veya N₂ gazları kullanılır. Sıcaklığa bağlı olarak cam, çelik, alümina ve SiC gibi malzemelerden yapılmış kalıplar kullanılır. Yoğunlaşma ve sinterleme ile birlikte gerçekleştirilir. İşlem süresi 1 saat ila 7 saat arasında değişir. Elde edilen parçacıklar tam yoğunluklu parçacıklardır. 1 m çapında ve 3 m boyunda olan parçalar bile sıcak izostatik presleme yöntemi ile üretilebilmektedirler. HIP yöntemi Şekil 3.32’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.32. Sıcak izostatik presleme (HIP) yöntemi [38]

3.6.3.3 Haddeme

Haddeme, gevşek metal tozlarının bir dizi silindir çiftleri arasından geçirilerek şekillendirilmesi işlemidir. Haddeme, hadde silindirleri arasına beslenen tozların yoğunlaşmasıyla TM şeritler elde edilir. Tek pasoda %99'un üzerinde yoğunluklar mümkünse de çoklu pasolar yöntemde daha yaygındır. İlk pasoda şerit kalınlığı ne kadar az ise son yoğunluk o kadar yüksek demektir. Tozlar ilk pasoda %60 ila %90 arasında bir yoğunluk elde edilerek sinterleme fırınına sokulur [36]. Haddeme yöntemi şematik olarak Şekil 3.33'de gösterilmektedir.

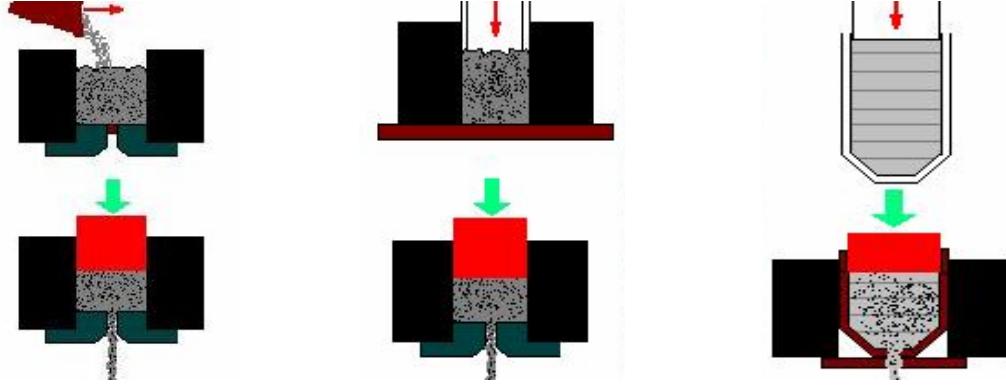


Şekil 3.33. Haddeme yöntemi [36]

3.6.3.4 Ekstrüzyon

Ekstrüzyon, metal tozlarının bir kalıba doldurulduktan sonra bir matrizen basılıp şekillendirilmesi işlemine denir [36]. Ekstrüzyon işleminde, metal tozları ısıtılmış ekstrüzyon alıcısına gevşek olarak doldurulur ve matrizen basılır. Ardından metal tozları önce soğuk olarak preslenerek yoğunlaştırılır. Daha sonra buradan alınan sıkıştırılmış parça sıcak ekstrüzyona tabi tutulur. Ve son olarak da metal tozu metalik bir zarf içine doldurulup ısıtılarak kapsülle birlikte ekstrüzyon işlemi uygulanır. Bu yöntem, tam yoğun TM parça üretimine uygun bir yöntemdir. Tozlar sıkıştırılıp yaklaşık %85 yoğunluğa

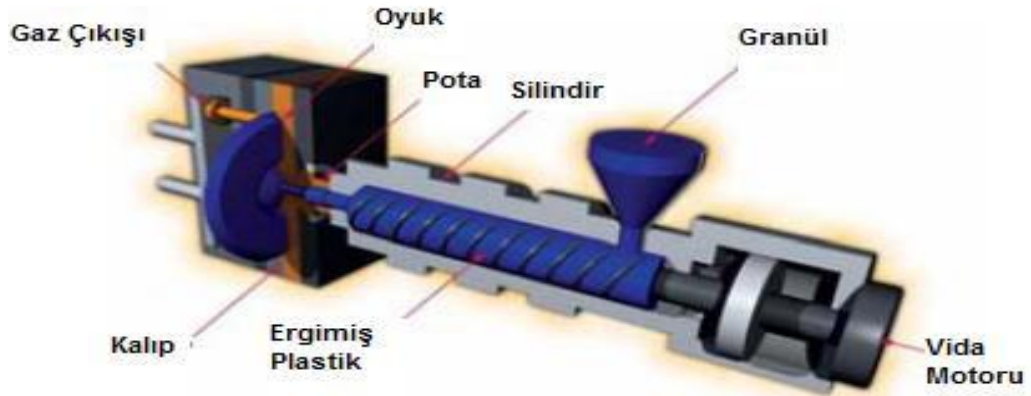
ulaşmadıkça ekstrüzyon başlamaz. İşlem adımlarında önce pres sonra ekstrüzyon gelmektedir [36]. Ekstrüzyon işlem basamakları Şekil 3.34'de gösterilmiştir.



Şekil 3.34. Ekstrüzyon işlem basamakları [36]

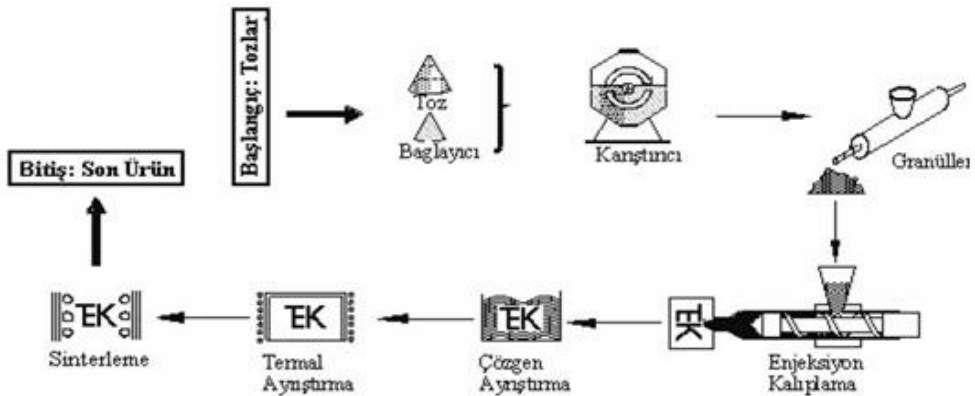
3.6.3.5 Toz Enjeksiyon Kalıplama (TEK)

Toz enjeksiyon kalıplama (TEK); karmaşık şekilli küçük boyutlu makine parçalarının, protezlerin ve tıbbi cihaz parçalarının üretimlerinde metal veya seramik tozlarının bir bağlayıcı yada taşıyıcı yardımıyla kalıp içerisine doldurulması yöntemidir. Toz enjeksiyon kalıplama işlemi TM'nin en yüksek teknolojilerindedir. Metal ve seramik tozların parça üretimlerinde ideal bir yöntemdir. Çoklu parça üretimleri için ekonomiktir. Toz şeklinin küresel olması ve toz boyutunun 20 µm altı olması işlemi kolaylaştırır. Toz enjeksiyon kalıplama için hazırlanmış toz 4 bağlayıcı karışımına "besleme stoğu" denir. Besleme stoğu genellikle hacimsel olarak %60 toz ve %40 bağlayıcı içeren bir yapı olmakla birlikte besleme stoğundaki hacimsel oranları %15 ile %50 aralığında değişmektedir. Bağlayıcılar çoğu kez plastik esastır. Enjeksiyon kalıplama Şekil 3.35'de şematik olarak gösterilmiştir. [2,36]



Şekil 3.35. Enjeksiyon kalıplama [36]

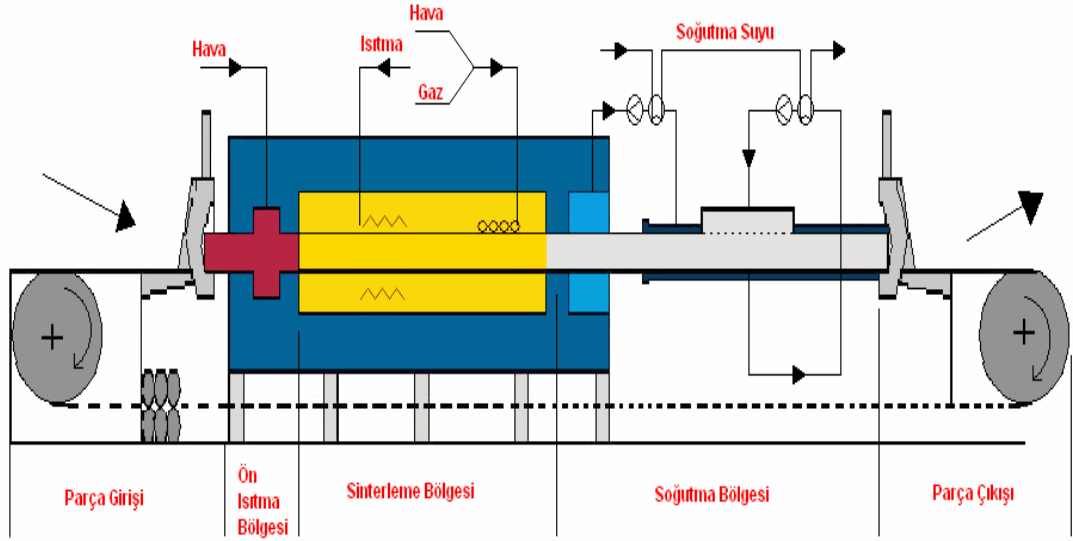
150 °C'de eriyen bağlayıcı, sinterleme aşamasına kadar tozların bir arada tutulmasını sağlar. Besleme stoğu, homojenlik ve hatasız bir kalıplama için enjeksiyon öncesinde granül hale getirilir. Enjeksiyon sonrası ilk ve kritik aşama bağlayıcı giderme işlemidir. Bağlayıcı giderme aşaması çok hızlı olursa parça sinterleme öncesinde dağılılabılır. Toz enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilen parçaların imalat aşamaları Şekil 3.36'da gösterilmiştir.



Şekil 3.36. TEK yönteminde imalat aşamaları [36]

3.7 Sinterleme

Sinterleme, toz halindeki malzemenin ergime sıcaklığı altındaki bir sıcaklığa belli bir süre maruz bırakılarak tozların birbirlerine değdikleri noktalardan başlayarak kaynaşmasına denir. Sinterleme fırını ve işlem akışı şematik olarak Şekil 3.37'de gösterilmiştir [2, 37, 57].



Şekil 3.37. Sinterleme fırını ve iş akışı [36]

Tüm toz metal ve seramik parçalar mukavemet kazandırmak amacıyla yüksek sıcaklıklarda sinterlemeye tabi tutulurlar. Sıkıştırılmış toz parçalar arasındaki bağlantı yapışma, mekanik kitlenme ve benzeri türden zayıf bağlar olup kristal kafes içerisindeki bağ dayanımına kıyasla çok zayıf kalmaktadır. Sıkıştırılmış toz yapılar içerisindeki partiküller bir biri ile temas ediyor olsa da her bir partikül diğerinden bağımsızdır. Sinterleme ile partikül temas noktaları artmakta ve atomlar ve iyonlar arasında fiziksel bir bağ oluşmaktadır. Bu türden bağ oluşumu kristal kafes sistemi içerisindeki yüksek dayanımlı atomsal bağlanma ile benzeşir [55,2].

Sinterleme, gözenekli yapıda bir form (şekil) kazandırılmış tozların spesifik yüzey alanının küçülmesi, partikül temas noktalarının büyümesi ve buna bağlı olarak gözenek şeklinin değişmesine ve gözenek hacminin küçülmesine neden olan ısı olarak aktive edilmiş malzeme taşınımı olayı olarak tanımlanabilir. Diğer bir ifade ile sinterleme toz kütlelerinin veya gözenekli yapıda sıkıştırılmış toz parçalarının özelliklerinin gözeneksiz yapıya sahip malzeme özelliklerine değiştirmek için yapılan bir ısı işlem uygulamasıdır.

Sinterleme, preslenmiş parçaların mukavemet kazandığı bir ısı işlemidir. En yaygın sinterleme sıcaklığı aralığı demir esaslı alaşımlar için 1100 °C ile 1150 °C'dir. Bazı durumlar için 1250 °C'ye kadar olan yüksek sinterleme sıcaklıklarına ihtiyaç duyulur. Uygulamaya bağlı olarak sıcaklıktaki bekleme zamanı 10 dakika ile 60 dakika arasında değişir. En yaygın kullanılan fırın çelik-tel örgülü kayışlı fırındır. Çelik-tel örgülü kayışlı fırınların sıcaklıkları en fazla 1150 °C'dir. Daha yüksek sıcaklıklar için yürüyen kiriş veya itmeli fırınlar yaygındır. Eğer sinterleme sıcaklığı 1150 °C üzerinde ise sinterleme maliyetleri önemli ölçüde yükselir [37,55,56].

Sıcaklığın yükselmesiyle çekme kuvvetlerinin etkileri artarken, sinterlemeyi zorlaştıran etkiler de ortadan kalkar. Ayrıca sıcaklığın artması kristalleşme şartlarını da uygun hale getirir. Ortam sıcaklığında, toz taneleri gerektiği kadar plastik olmamaları, yüzeylerinde gaz ve oksit tabakalarının mevcudiyeti, toz taneleri arasındaki temasın mükemmel olmaması, presleme esnasında toz içinde zararlı gazlar bulunması, sinterlemenin yüksek sıcaklıkta yapılmasını gerektirir. Bu zararlı etkiler sinterleme şartlarında önemli değişiklikler gösterirler ve büyük ölçüde tozun hazırlanma şartlarına bağlıdır. Bu nedenle tozun sinterlemeden önce tabii tutulduğu işlemler çok önemlidir. Sinterleme başlangıç sıcaklığı hakkında verilen bilgiler hiçbir şey ifade etmemekle beraber, bu sıcaklığın bilinmesi pratik açıdan önemlidir. Sinterlenen parçaların yapı değişimleri mikroskop ile incelenmiş ve sinterlemenin ilk sıcaklığından itibaren belirli sıcaklık aralıkları ile çekme mukavemetleri ölçülmüştür. Gümüş, bakır, kurşun, alüminyum, magnezyum komprimerlerinin mukavemeti 150 °C ile 300 °C arasında artarak değiştiği

görülmüştür. Bu artış sinterlemenin başladığını gösterir. Aynı malzemeden iki yüzey sadece basınç etkisiyle, birbiri üzerine uygulandığı takdirde, belirli bir sıcaklığın üzerinde bu iki yüzeyin aderansı yüksek değerler alır. Bu sıcaklığa “aderans” sıcaklığı denir ve sinterleme başlangıcı sıcaklığı olarak kabul edilebilir . Aderans sıcaklığı, demir için 550 °C, nikel için 600 °C, volfram için 1250 °C’dir. Önce sinterleme sıcaklığı, sinterleme süresi ve toz taneleri büyüklüğünün yoğunluğa etkisi incelenecektir. Çok az veya normal bir basınç altında tozların belirli bir sıcaklıkta sinterlenmeleriyle meydana gelen kendini çekme de normaldir. Aksine, çok yüksek basınçlar altında preslenen cisimler (30 MPa’ya kadar) kendileri çekmedikleri gibi, bir hacim büyümesi de gösterirler. Örneğin, 600 °C de sinterlermiş ve yüksek basınç altında preslenmiş bir bakır parçasının yoğunluğu alçak basınç altında preslenmiş parçanınkinden çok daha küçüktür [2,56,57]

Sinterleme sıcaklığının 1050 °C civarında olması halinde nikel-krom veya demir-krom-alüminyum rezistanslı elektrik fırınları yeterli gelir. 1350 °C ye kadar silit çubuklu fırınlar kullanılır. 1600 °C’ye kadar olan sıcaklıklarda molibden rezistanslı fırınlar, 1600 °C ve daha yüksek sıcaklıklar için ise yüksek frekanslı veya kısa devreli karbon tüplü fırınlar kullanılır. Karbon tüplü fırınlar, karbon monoksit mevcudiyetinin zararlı etkileri olmadığı hallerde kullanılır. Molibden, volfram, tantal gibi refrakter metallerin sinterlenmesinde 2000 °C lik sıcaklık dahi yeterli gelmediğinden, bu metaller hidrojen dolu TM çantaları içinde sinterlenirler. Burada sinterlenecek parçadan akım geçirilir. Harcanan enerji zor sinterlenen parçanın ergimesi için gereken enerjiden %10 kadar daha azdır. Sinterlenen malzemenin oksitlenmesini önleyecek tedbirler alındığı taktirde gazla ısıtılan fırınlardan da faydalanılabilir [37,57].

Sinterleme sıcaklığı gibi, sinterleme süresi de kullanılan malzemeye göre değişir. Sert alaşımlar ve mıkınatis alaşımlarında olduğu gibi birçok hallerde de birkaç saat süren bir sinterleme uygulanmalıdır. Sinterleme zamanı ve sıcaklığı arasında basit bir bağıntı vardır. Sinterleme sıcaklığı yükseldikçe sinterleme zamanı kısalır; aksine olarak alçak bir sinterleme sıcaklığı sinterleme zamanının uzamasına neden olur [36,37].

Sıkıştırılmadan sonra parça, sürekli denetlenen bir ortamda ısıtılır. Sinterleme sırasında kütle içindeki boşluklar, atom hareketleriyle ortadan kalkar ve sonunda gözeneksiz, yoğun bir kütle elde edilir. Sinterleme, bölüm bölüm ya da sürekli olarak yapılabilir.

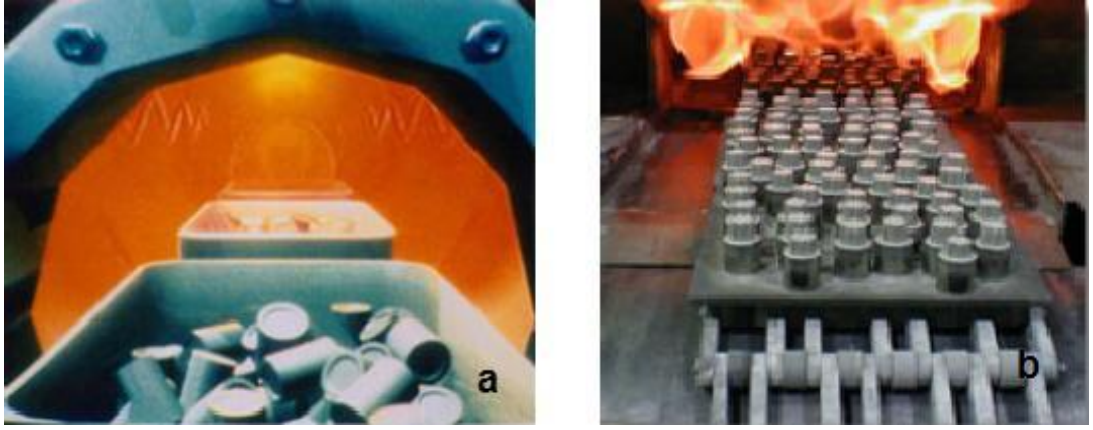
Kullanılan fırınlar, gaz ya da elektrikle ısıtılır. Isıya dayanıklı metaller doğrudan akım geçirilerek ısıtılır. Fırının atmosferi genellikle hidrojen, amonyak ve hidrokarbon gazlarından oluşur.

Çok kolay tepkime veren titan, krom, tantal ve niyobyum metalleri vakumda sinterlenir. Sinterleme süresi, ısıya dayanıklı metaller için yaklaşık otuz dakika, karbürler içinse birkaç saattir.

Sinterleme sıcaklığı, metalin erime derecesinin (Kelvin derecesine göre) üçte ikisi kadar ya da daha fazladır. Sinterleme sırasında ortaya çıkan yoğunlaşma, üretilen nesnenin küçülmesine de neden olur. Ama bu özellik, önceden bilindiği ve üretim ona göre yapıldığı için, herhangi bir sakınca oluşturmaz.

Sinterleme fırını içinde oksitlenmeyi önleyen bir koruyucu atmosfer gereklidir. Kırılmış amonyak, endo-gaz veya azot-bazlı atmosferler yaygınca kullanılır. Sinterlenmiş parçaların boyut toleranslarının ve mekanik özelliklerinin sağlanması için fırın ortamında kontrollü karbon potansiyeline sahip olmak önemlidir. Sinterleme işlemi yağlayıcı alma, sinterleme ve soğutma basamaklarını kapsar. Fırının yağlayıcı alma bölgesinde, yağlayıcı yanar. Sinterleme esnasında bir çok reaksiyon meydana gelir. Başlangıçta, fırın atmosferi tozların yüzeyindeki oksitleri indirger ve birbirleri ile temas halindeki tozlar arasında bağ oluşur. Bu işlem kademesinden sonra ise, boyutlandırma, ikinci presleme, talaşlı üretim, birleştirme, ısıl işlem ve yüzey kaplama işlemleri de isteğe göre yapılmaktadır.

Genel olarak üretimlerde iki tip sinterleme fırını kullanılmaktadır. Bunlar itici tip ve çelik tel örgülü kayışlı fırınlardır. İtici tip fırınlarda toz metal parçalar arabalara doldurularak fırının içerisine itilir. Fırın sıcaklığı 1150 °C ila 1350°C arasındadır. Çelik tel örgülü kayışlı fırınlar En yaygın kullanılan sinterleme fırını çeşididir. Çelik tel örgü üzerine yerleştirilen toz metal parçalar otomatik olarak fırın içerisine alınır. Fırın sıcaklığı en fazla 1150°C'dir. Şekil 3.38'de iki tip fırında gösterilmiştir [2, 36,37,55,56].



Şekil 3.38. İtici tip sinter fırını (a) ve çelik tel örgülü kayışlı sinter fırını (b) [36]

3.7.1 Sinterleme Sonrası İşlemler

Sinterleme sonrasında sinterlenen malzeme gerekirse bir takım işlemlerden geçirilir. Bunlardan bazıları şunlardır [37];

3.7.1.1 Gözeneklerin Doldurulması

Parçanın yapıldığı malzemenin sinterleme sıcaklığından daha düşük ergime sıcaklığına sahip metal ile gözeneklerin doldurulması esasına dayanır. Örneğin demir esaslı alaşımlarda genellikle sinterleme esnasında bakır kullanılarak gözeneklerin dolması sağlanır.

Gözeneklerin doldurulması, geçirgenliği azaltır ve mekanik özelliklerin iyileşmesini sağlar. Fakat göz önüne bulundurulması gereken bir konu da, bu sırada parça boyutlarında değişim görülmesidir. Bu işlemin diğer bir faydası da ısıtma işlemi sırasında istenen tabaka kalınlığının hesaplanmasında porozite olmadığı için kolaylık sağlamasıdır [2,36,37].

3.7.1.2 Yağ Emdirme

Sinterlenmiş parçaların korozyona karşı direncini artırabilmek için yağ veya metal olmayan maddeler emdirilmesi yoluna gidilebilir. Kendinden yağlamalı yataklar sadece TM metodu ile yapılabilir, bu yataklarda porozitelerin içine yağ emdirilmek suretiyle yağlamasız yatak yapımı gerçekleştirilir [37].

3.7.1.3 Son Ölçüye Getirme ve Baskı (Tamlama)

Son ölçüye getirme ve baskı sinterleme sonrası uygulanan ilave presleme işlemleridir. Son ölçüye getirebilmek ve yüzey kalitesini artırabilmek için orta kuvvette presleme işlemi yapılarak çok hafif plastik deformasyon sağlanır. Baskı işleminin iki amacı vardır; hem boyut hassasiyetini artırmak, hem de parça yoğunluğunu artırmaktır. Bu iş için alışılmış sıradan presler kullanılır [2,37].

3.7.1.4 Buharla İşlem

Sadece demir esaslı alaşımlara uygulanır, bunun için parçalar 550 °C sıcaklığa kadar ısıtılır ve sonra parça üzerine su buharı gönderilir, böylece parça üzerinde ve boşluklarında Fe₃O₄ oluşması sağlanır. Bu işlemle parçanın korozyon direnci, sertliği, aşınma direnci ve basma yüklerine karşı direnci artırılmış olur [37].

3.7.1.5 Tekrar Presleme

Mekanik ve manyetik özellikler gibi özellikler açısından bir önem arz ediyorsa parçaya tekrar presleme işlemi uygulanır ve böylece istenen özelliklerin elde edilmesi sağlanır. Preslenmiş parçaların 700 °C ila 800 °C'de ön sinterlenmesinde ilave edilen yağlayıcılar yanarak uzaklaşır ve parçada yeniden kristalleşme gerçekleşir. İşlem sırasında oluşan sertleşme ve iç gerilimler sonrası parçaya tekrar eski sünekliğini ve yoğunluğunu daha fazla artırabilmek gerekir, bu nedenle presleme yapılır ve parça bundan sonra sinterlenir.[37,55,56]

3.7.1.6 Talaş Kaldırma İşlemleri

TM ile üretilmiş parçalar her ne kadar karmaşık şekilli ve hassas toleranslarda yapılabilseler de yine de bazı kısıtlamalar olabilir. Bu nedenle delme, talaş kaldırma, delme, diş açma gibi bazı talaşlı imalat metodlarının şekillendirme kalıpları üzerinde bulunması mümkün değildir. Sinterlenmiş parçalar için uygulanan işlem hızları aynı bileşimde dövme olarak imal edilmiş parçalara göre daha düşüktür, bu nedenle işlem hızları seçilirken buna dikkat edilmesi gerekir.

Kesici takım ömrünün artırılması için tozların içine talaşlı imalatı kolaylaştırıcı MnS ilave edilir. Sinterleme sonrasında da yapıda bu katkıları kaldığı için talaşlı imalatı olumlu yönde etkiler.

3.7.1.7 Çapak Alma

Çapak alma işlemi, presleme sonrası parça üzerinde oluşan çapakların giderilmesi işlemidir. En genel uygulama tambur içinde aşındırıcı toz kullanarak yapılan çapak alma işlemidir.

3.7.1.8 Birleştirme ve Montaj

Büyük ve karmaşık şekilli parçalar birleştirmek suretiyle gerçekteştirilebilir. Birleştirme için kullanılan yöntemler; difüzyonla birleştirme, sinter braze veya laser ile kaynaktır.

3.7.1.9 Isıl İşlem

TM ile üretilmiş parçada faz dönüşümleri parça içindeki porozite ile değil fakat parçayı oluşturan tozların bileşimi ve homojen olması ile ilgilidir. Bu nedenle her türlü TM ile üretilmiş parçaya ısıl işlem uygulanabilir.

Su verme ile sertleştirme ve temperleme işlemleri sonucu TM parça mukavemetinde, aşınma direncinde artış olurken sünekliğinde ise azalma görülür. TM ile üretilmiş parçalara genellikle karbürleme, karbonitrürasyon gibi yüzey sertleştirme işlemleri uygulanır.

3.7.1.10 Yüzey Kaplama İşlemi

Eğer malzemenin korozyona karşı daha dirençli olması isteniyorsa elektroliz ile yüzey kaplaması yapılabilir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta elektrolitin TM parçanın boşluklarına girerek olumsuz etkilere neden olmasını engellemek için gözeneklerin doldurulması gerekir [2,36,37,55,56]

4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

TM yöntemi ile Al 2014 matrisli ve SiC takviyeli kompozit malzemeler başarı ile üretilmiştir. Kompozit malzemelerin üretilmesinde; %0, %5, %10, %15 ve %20 takviye hacim oranı, 500 MPa presleme basıncı, 575 °C, 600 °C, 625 °C sinterleme sıcaklıkları ve Ar gazı atmosferinde 2 saat sinterleme süresi üretim parametreleri olarak kullanılmıştır. Test numunesi olarak 500 MPa presle üretilmiş olan kompozit malzemeye ait üretim parametreleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kompozit malzemenin üretim parametreleri

Grup No.	Numune No.	SiC (%)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)
1	1.1	0	575
	1.2		600
	1.3		625
2	2.1	5	575
	2.2		600
	2.3		625
3	3.1	10	575
	3.2		600
	3.3		625
4	4.1	15	575
	4.2		600
	4.3		625
5	5.1	20	575
	5.2		600
	5.3		625

4.1 Malzeme ve Metod

Kompozit malzemelerin üretilmesinde matris malzemesi olarak Çizelge 4.2'de özellikleri ve Çizelge 4.3'de kimyasal bileşimi verilen Al 2014 tozları kullanılmıştır. Üretim sonucunda 92,53 µm boyutunda Al 2014 tozu elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. Kompozit üretiminde kullanılan Al 2014 matris malzemenin özellikleri [49]

Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm ³) (20 °C)	2,8
Ergime Sıcaklığı (°C)	638
Elastisite Modülü (GPa)	73
Sertlik (HB)	45

Çizelge 4.3. Kompozit üretiminde kullanılan Al 2014 matris malzemenin kimyasal bileşimi [61]

Malzeme	%Al	%Cu	%Cr	%Fe	%Mn	%Mg	%Si	%Diğerleri*
Oran	92.5	4.5	0.1	0.6	0.6	0.7	0.8	0.3

* Ti, Zn vs.

Kompozit malzemelerin üretilmesinde takviye elemanı olarak kullanılan ve toz boyutu 20 µm altında olan SiC hazır olarak Aldour adlı firmadan temin edilmiştir.

Kompozit malzemelerin üretilmesinde takviye elamanı olarak Çizelge 4.4'de özelliklerinden bazıları verilen SiC tozları kullanılmıştır.

Çizelge 4.4. Kompozit üretiminde kullanılan SiC takviye tozlarının özellikleri

Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm ³) (20 °C)	3,16
Silisyum Karbür İçeriği (%)	97,8
Isıl iletkenlik (W/mK)	126
Sertlik (kg/mm ²) Vickers	3100

4.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması

4.2.1 Tozların Elde Edilmesi

Deneylerde matris malzemesi olarak kullanılan ortalama 92,53 µm toz boyutundaki Al 2014 tozu bir dizi işlem sonucunda elde edilmiştir. Ankara Moral Alüminyum firmasından temin edilen Al 2014 bloğu Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi'ne ait potada eritilmiş ve daha küçük parçalar halinde kalıplanarak katılaştırılmıştır. Elde edilen Al 2014 kalıpları Kütahya'da bulunan Dumlupınar Üniversitesi Gaz Atomizasyon Ünitesinde 3 gün süren deneysel çalışmalarla üretilmiştir. Malzeme ergitme fırınında 850 °C - 900 °C derecede ergitilmiş ve daha sonra ergiyen malzemenin nozuldan akması beklenmiştir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de Dumlupınar Üniversitesi Gaz Atomizasyon Ünitesi görülmektedir.



Şekil 4.1. DPU Gaz Atomizyon Ünitesi ergitme fırını



Şekil 4.2. DPU Gaz Atomizasyon Ünitesi

4.2.2 Tozların Karıştırılması

Yapılan deneylerde ASTM B-328 standartlarında verilen ölçülerde (6,35 mm x 12,70 mm x 31,75 mm) test numunesi elde etmek için gerekli toz karışımlarının ağırlık hesapları yapılmıştır. Toz karışımlarının hazırlanması aşamasında aşağıda verilen denklemler kullanılmıştır.

$$\text{---} \quad (4.1)$$

$$\text{takviye} \quad \text{-----} \quad (4.2)$$

$$(4.3)$$

$$\text{-----} \quad (4.4)$$

Burada;

	: Hacim (cm ³)
W	: Ağırlık (gr)
ρ	: Yoğunluk (gr/cm ³)
takviye	: SiC takviye oranı (%)
Al	: Al matris oranı (%)
SiC	: Kompozit içerisindeki SiC hacmi (cm ³)
Al	: Kompozit içerisindeki Al hacmi (cm ³)
ρ_{teorik}	: Kompozitin teorik yoğunluğu (gr/cm ³)
ρ_{Al}	: Al yoğunluğu (gr/cm ³)
ρ_{SiC}	: SiC yoğunluğu (gr/cm ³)
φ	: Kompozit içerisindeki SiC ağırlığının Al ağırlığına oranı

Toz karışımları Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü TM laboratuvarındaki 0,1 mg hassasiyetli Presica marka elektronik tartı ile tartılmıştır. Şekil 4.3'de toz karışımının hazırlanmasında kullanılan hassas terazi görülmektedir.



Şekil 4.3. Presica marka terazi

Tozların karıştırılması işlemi, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü TM laboratuvarında bulunan ve üç boyutlu karıştırma yapabilen turbula cihazında 45 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4'de tozların karıştırılmasında kullanılan turbula cihazı görülmektedir.



Şekil 4.4. Turbula cihazı

4.2.3 Tozların Preslenmesi

Yapılan literatür çalışmaları sonucunda, 500 MPa basınçla presleme işleminin yapılması uygun bulunmuştur. Presleme (sıkıştırma) işlemi Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan özel imalat 360 tonluk tek yönlü presle yapılmıştır. Ön hazırlık olarak toz karışımlar kalıplara konulmadan evvel her defasında zımba ve kalıp duvarları çinko stearat ile yağlanmıştır. Şekil 4.5'de tozların sıkıştırılmasında kullanılan özel imalat presleme tezgahı görülmektedir.



Şekil 4.5. Özel imalat tek yönlü pres

4.2.4 Toz Karışımların Sinterlenmesi

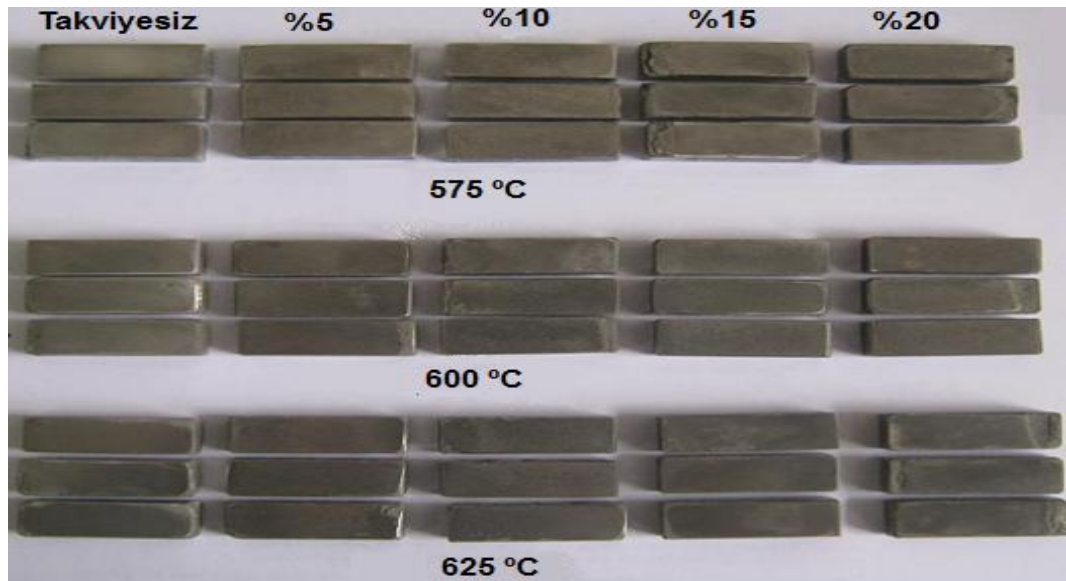
Al 2014 matrisli SiC takviyeli numuneler 575 °C, 600 °C ve 625 °C sıcaklıklarda 2 saat süreyle Ar gazı atmosferi altında sinterlenmişlerdir. Değişen sinterleme sıcaklıklarının elde edilen kompozit malzemelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Preslenmiş numelerin sinterleme işlemi Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü TM laboratuvarında bulunan ve sıcaklığı değeri elektronik gösterge ile ekranından izlenebilen ve Şekil 4.6'da gösterilen yatay tüp fırında yapılmıştır. Sinterleme sırasında oksitlenmeyi önlemek için işlem süresince fırın içerisinde Ar gazı bulundurulmuştur. Fırın sıcaklık artış hızı 20 °C/dak'dır.



Şekil 4.6. Sinterleme işleminde kullanılan yatay tüp fırın

Presleme ve sinterleme işleminden sonra kompozitlere çeşitli mekanik testler uygulanmıştır. Elde edilen test numuneleri Şeki 4.7'de gösterilmektedir.



Şekil 4.7. Presleme ve sinterleme sonrası elde edilen test numuneleri

4.2.5 Yaşlandırma İşlemi

Değişik üretim parametrelerinde üretilen numunelerden her biri kıyaslama amacı ile suni yaşlandırma işlemine de tabi tutulmuştur. Yaşlandırma işlemi için numuneler, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü TM laboratuvarında bulunan düşey tip fırında 2 saat süreyle 470 °C tutulmuş ve süre bitiminde su dolu kaba düşmeleri sağlanarak ani soğuma hedeflenmiştir. Daha sonra numuneler 24 saat süreyle 120 °C'de bekletilerek T6 yaşlandırma işlemi tamamlanmıştır. Yaşlandırma işleminde kullanılan fırın Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Suni yaşlandırma işlemde kullanılan fırın

4.3 Mekanik Testlerin Uygulanması

4.3.1 Yoğunluk Ölçümleri

Yoğunluk ölçümleri hem sinterleme öncesinde hem de sinterleme sonrasında Şekil 4.9'da gösterilen Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve

Malzeme Mühendisliği Bölümü TM laboratuvarında bulunan Sartorius marka 0,1 mg hassasiyetli elektronik tartı yardımıyla ölçülmüştür.



Şekil 4.9. Sartorius marka hassas terazi

Numuneler, önce havada tartılmış daha sonra suda tartılarak deneysel yoğunlukları Eşitlik 4.5'de verilen denklemle hesaplanmıştır. Kompozitlerin teorik yoğunlukları ve deneysel yoğunlukları kullanılarak gözeneklilik oranları Eşitlik 4.6'daki denklem yardımıyla hesaplanmıştır.

Üretilen kompozit malzemelerin yoğunluklarının ölçülmesinde Arşimet prensibi esas alınmıştır.

$$d_{Deneysel} = \frac{G_{havada}}{G_{havada} - G_{suda}} \rho_{su} \quad (4.5)$$

$$d_{Teorik} = \frac{\% .d_{matris} + \% .d_{takviyelemanı}}{100} \quad (4.6)$$

DeneySEL ve teorik yoğunlukları belirlenen kompozitlerin gözenek miktarları da Eş.4.7'de verilen formüle göre belirlenmiştir.

$$\% \text{ gözenek} = \frac{d_{Teorik} - d_{Deneysel}}{d_{Teorik}} \times 100 \quad (4.7)$$

Burada ;

G_{havada}	: Kompozitin havada tartılan ağırlığı
G_{suda}	: Kompozitin suda tartılan ağırlığı
$d_{deneySEL}$: Kompozitin deneySEL yoğunluğu
d_{teorik}	: Kompozitin teorik yoğunluğu

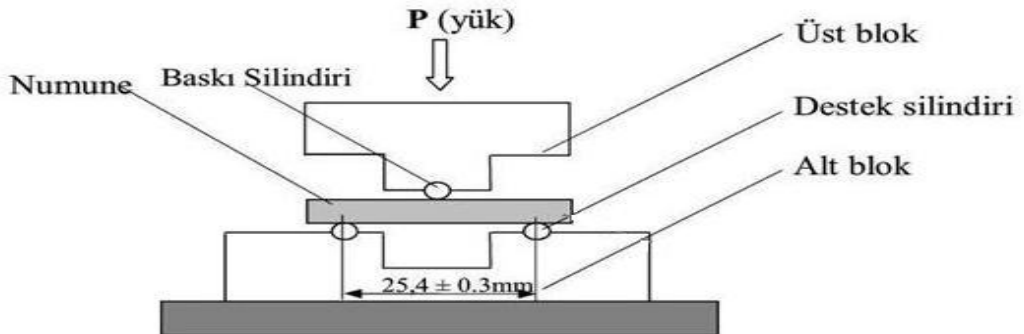
4.3.2 Çapraz Kırılma Dayanımı Ölçümleri

Çapraz kırılma deneyleri için 6,35mm x 12,7mm x 31,75 mm boyutlarında hazırlanan numuneler yüzeylerinde herhangi bir çentik, çizik kalmayacak şekilde zımparalanmış ve parlatılmıştır. Hazırlanan numunelerin kırılma yükleri Şekil 4.9'da gösterilen Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi (TOBB ETÜ) Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarındaki bulunan Instron Marka 3369 Model bilgisayar kontrollü cihazda yapılmıştır.



Şekil 4.10. Çapraz kırılma deneyinde kullanılan kırma cihazı

ASTM B 528-05 standardına uygun olarak 0,5 mm/dakika ilerleme hızında test numunelerinin kırılma yükleri belirlenmiştir. Elde edilen kırılma yüklerine (P) göre numunelerinin herbirinin çapraz kırılma dayanımı Eşitlik 4.8 verilen denklem ile hesaplanmıştır. Çapraz kırılma deneyinin yapıldığı aparat Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Çapraz kırılma deney aparatı şematik gösterimi

$$\text{ÇKM} = \frac{3.P.l}{2.b.h^2} \text{ MPa} \quad (4.8)$$

Burada;

ÇKM : Çapraz kırılma mukavemeti (MPa)

P : Numune kırıldığı anda ölçülen yük (N)

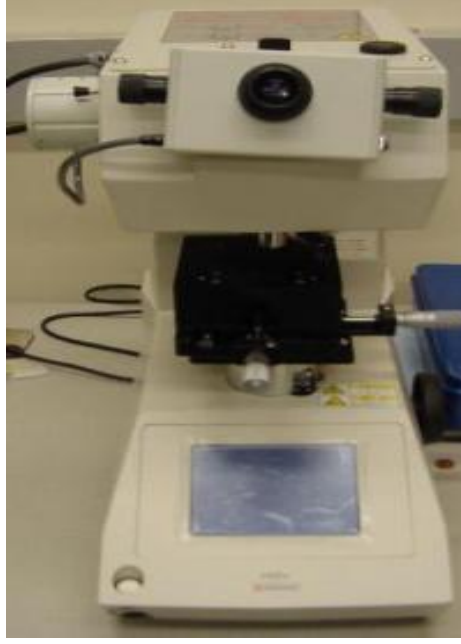
l : Destekler arası uzaklık (25,4 ± 3 mm)

b : Numunenin genişliği (mm)

h : Numunenin yüksekliği (mm)'dir.

4.3.3 Sertlik Ölçümleri

Hazırlanan numunelerin mikrosertliklerine Vicker cinsinden, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü TM laboratuvarındaki bulunan ve marka modeli, HMV Microhardness Tester SHIMADZU Single Mode olan sertlik ölçme cihazında bakılmıştır. Tek yönlü preslemede alt ve yüzeylerde basınç iletiminden kaynaklı farklı sertlik değerleri okunabileceğinden optimum sonuçlar için, her bir numune yüzeyinin 3 farklı noktasından sertlik değerlerinin ölçümleri yapılmıştır. Bunların aritmetik ortalamaları ilgili numunenin sertlik değeri olarak alınmıştır. Sertlik ölçüm cihazı Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Sertlik ölçme cihazı

4.3.4 Mikroyapı İncelemesi İçin Numunelerin Hazırlanması

Sinterleme işleminden sonra numunelerin yüzeylerine 600 mesh, 1000 mesh, 1200 mesh, 1500 mesh SiC zımparalar ile zımpara yapılmış ve yüzeyler pürüzsüz hale getirilmiştir. Zımparalamadan sonra parlatma keçesinde 3 µm elmas pasta süspansiyonu dökülerek yüzeyler parlatılıp alkol ile temizlenmiş ve kurutulmuştur. Daha sonra numuneler Keller's sıvısında dağlanarak mikroyapı incelemesi için hazır hale getirilmiştir. SEM incelemeleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü TM laboratuvarında bulunan Jeol marka JSM-6060LV model cihaz ile yapılmıştır. SEM cihazı Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.13. SEM cihazının görüntüsü

5 SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1 Yoğunluk Sonuçlarının Değerlendirilmesi

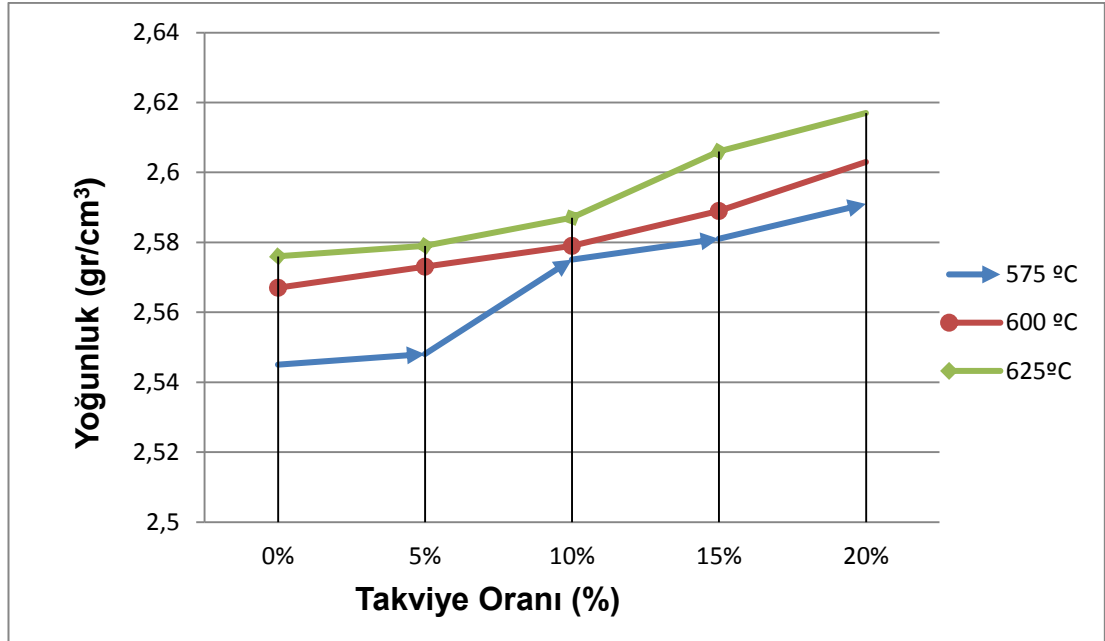
Sinterleme işlemi sonrasında test numunelerinden elde edilen yoğunluk sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Sinterlenmiş numunelerin yoğunluk ve yüzde gözeneklilik sonuçları

GrpN o.	Numune No.	SiC (%)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Teorik Yoğunluk (gr/cm ³)	DeneySEL Yoğunluk (gr/cm ³)	Gözenek (%)
1	1.1	0	575	2,80	2,545	9,107
	1.2		600		2,567	8,322
	1.3		625		2,576	8,000
2	2.1	5	575	2,818	2,548	9,581
	2.2		600		2,573	8,695
	2.3		625		2,579	8,481
3	3.1	10	575	2,836	2,575	9,203
	3.2		600		2,579	9,062
	3.3		625		2,587	8,780
4	4.1	15	575	2,854	2,581	9,567
	4.2		600		2,589	9,285
	4.3		625		2,606	8,689
5	5.1	20	575	2,872	2,591	9,785
	5.2		600		2,603	9,366
	5.3		625		2,617	8,879

Elde edilen ve Çizelge 5.1'de de verilmiş olan sonuçlara göre;

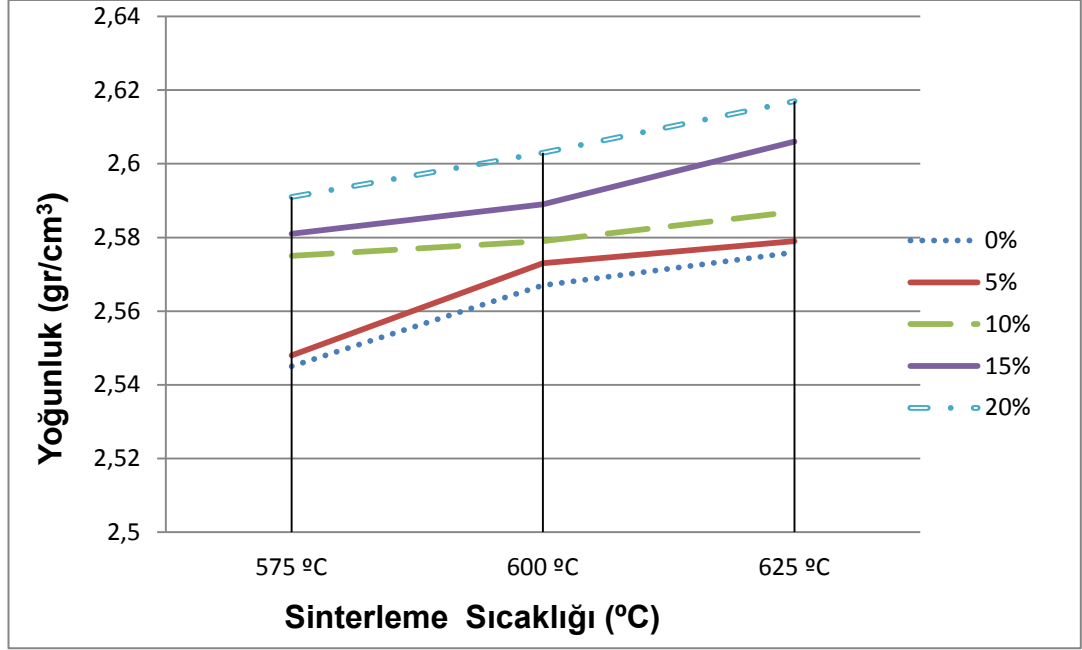
En az gözeneklilik oranı % 8 ile takviye içermeyen Al 2014 tozları ile 625 °C'de sinterlenerek üretilen numunelerden elde edilmiştir. En fazla gözeneklilik oranı ise, % 9,785 oranı ile % 20 SiC takviyesi içeren ve 575 °C'de sinterlenmiş numunelerden elde edilmiştir.



Şekil 5.1. Takviye oranına göre yoğunlukların değişimi

Şekil 5.1'den de görüldüğü üzere takviye oranı artan kompozit malzemenin yoğunluğu da doğru orantılı olarak artmıştır. Bunun sebebi kompozit içerisinde yoğunluğu fazla olan SiC miktarının artmasıdır. Al 2014 metal tozunun yoğunluğu 2,8 gr/cm³ iken SiC tozunun 3,16 gr/cm³'tür. Bu sonuçlara benzer sonuçlar; Karaman, (2011) ve Min vd. (2005) tarafından elde edilmiştir.

Şekil 5.2'de üretilen test numunelerinin farklı sinterleme sıcaklıkları sonrasında elde edilen yoğunluk değerleri verilmiştir.



Şekil 5.2. Yoğunluğun sinterleme sıcaklığına göre değişimi

Sinterleme sıcaklığı arttıkça yoğunluğun arttığı görülmektedir. Bu artış Eşitlik 5.1'de verilen Arrhenius Denklemi ile açıklanabilir.

$$D_V = D_0 \cdot e^{(-Q/RT)} \quad (5.1)$$

Burada ;

D_V : Hacim difüzyonu katsayısı (L/mol. s)

D_0 : Malzeme sabiti

Q : Aktivasyon enerjisi (J/mol)

R : Gaz sabiti (J/Kmol)

T : Mutlak sıcaklık (°K)

e : Sabit

Bu durum denklemin sağ tarafında yer alan T sıcaklığının artması ile D_v değerinin artmasındandır.

Kompozit malzemeyi oluşturan metal tozlarının ergime sıcaklığına yakın sıcaklıklara ulaşıldığında Al 2014 tozları arasında daha fazla difüzyon gerçekleşecek ve yoğunluk buna bağlı olarak artacaktır. Bu sonuçlara benzer sonuçlar; Karaman, (2011) ve Min vd. (2005) tarafından elde edilmiştir.

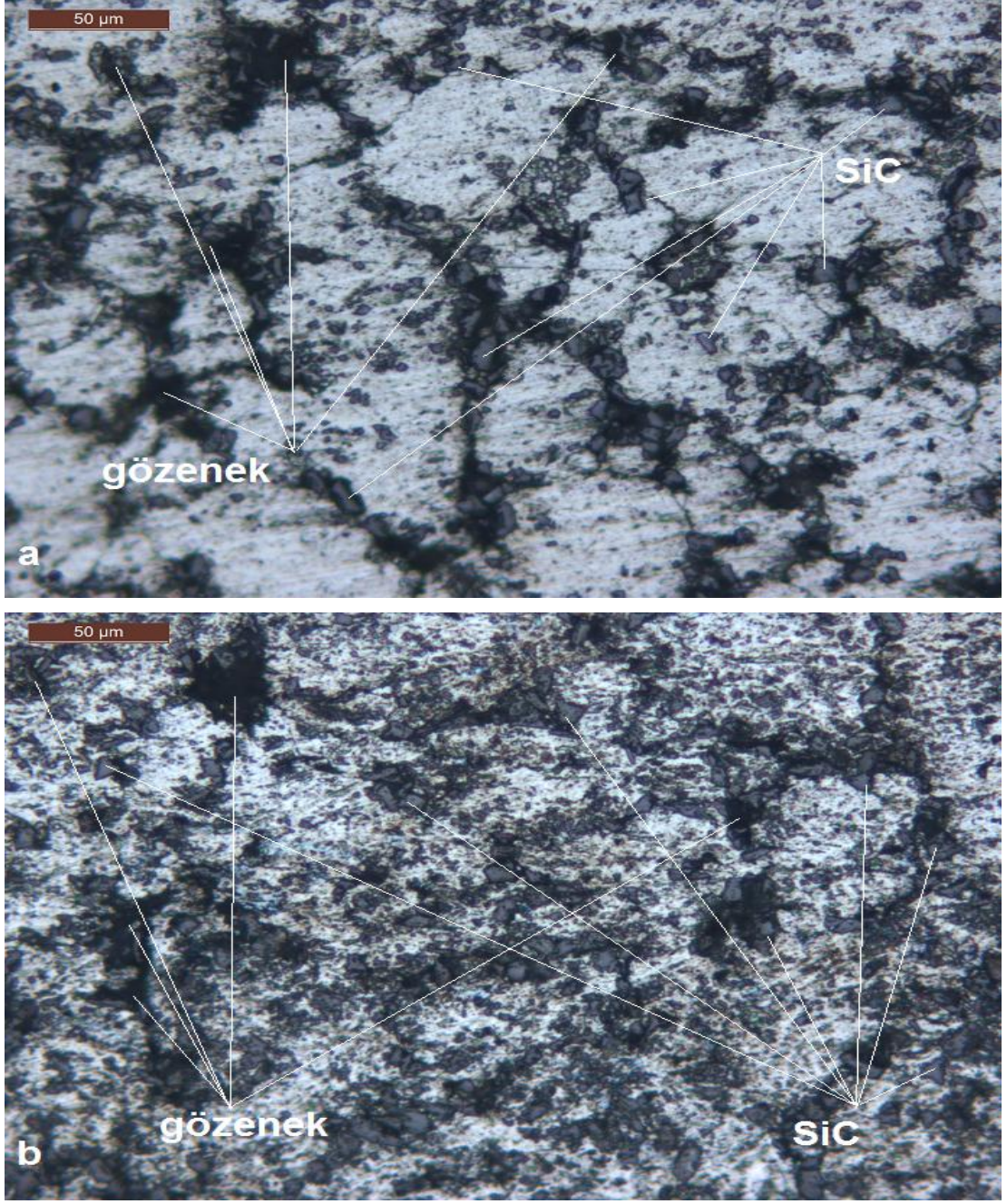
Çizelge 5.2. T6 sunni yaşlandırma işlemi uygulanmış numunelerin yoğunluk ve yüzde gözeneklilik sonuçları

Numune No.	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	SiC (%)	2 Saatlik Fırınlama Sıcaklığı (°C)	24 Saatlik Fırınlama Sıcaklığı (°C)	Teorik Yoğunluk (gr/cm ³)	DeneySEL Yoğunluk (gr/cm ³)	Gözenek (%)						
1.T6.1	575	0	470	120	2,80	2,585	7,679						
1.T6.2	600					2,593	7,393						
1.T6.3	625					2,606	6,929						
2.T6.1	575	5			470	120	2,818	2,598	7,807				
2.T6.2	600							2,607	7,488				
2.T6.3	625							2,619	7,062				
3.T6.1	575	10					470	120	2,836	2,606	8,110		
3.T6.2	600									2,620	7,616		
3.T6.3	625									2,631	7,229		
4.T6.1	575	15							470	120	2,854	2,613	8,444
4.T6.2	600											2,629	7,884
4.T6.3	625											2,638	7,568
5.T6.1	575	20	470	120							2,872	2,619	8,809
5.T6.2	600											2,634	8,287
5.T6.3	625											2,641	8,043

Elde edilen ve Çizelge 5.2'de de verilmiş olan sonuçlara göre;

En az gözeneklilik takviye içermeyen ve 625 °C'de sinterlenmiş numunelerde % 6,629 sonucu ile elde edilmiştir. Bunun anında en fazla gözeneklilik ise % 20 SiC takviyesi içeren ve 575 °C'de sinterlenmiş numunelerden % 8,809 sonucu ile elde edilmiştir.

Şekil 5.3'de 575 °C ve 625 °C'de sinterlenmiş %20 SiC takviye oranına sahip kompozitlerin optik mikroskop (OM) mikroyapı görüntüleri yer almaktadır. Yoğunluğun 625 °C'de sinterlenmiş kompozitte daha fazla olduğu mikroyapı incelemelerinden de görülmektedir.

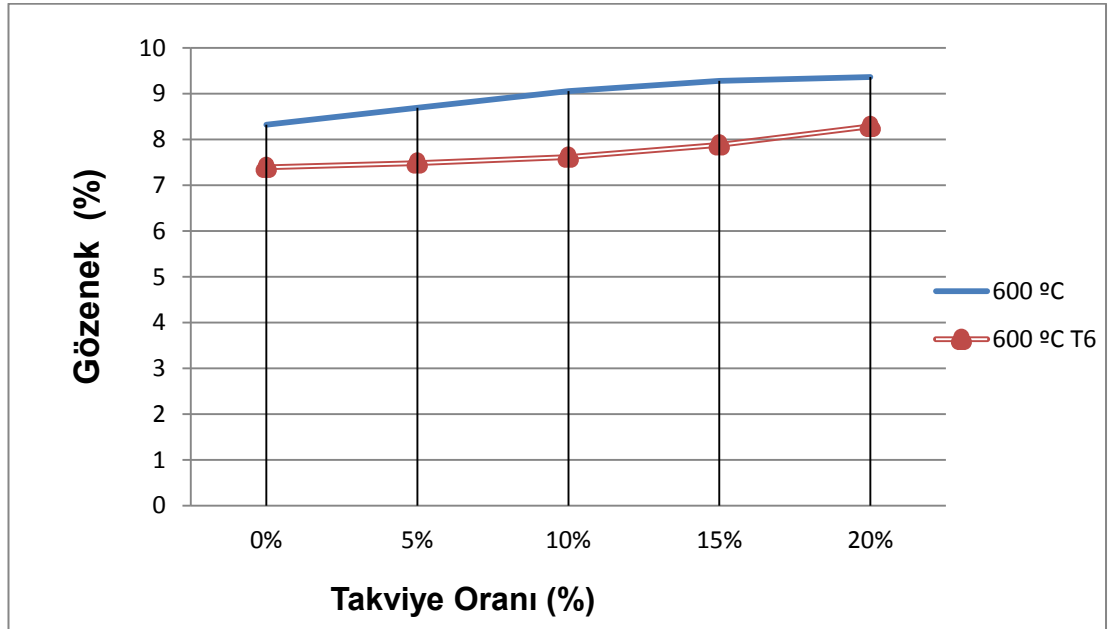


Şekil 5.3. 575 °C (a) ve 625 °C (b)'de sinterlenmiş %20 SiC takviyeli kompozitlerin yüzeylerinin OM görüntüleri

Çizelge 5.3'de 600 °C'de sinterlenerek üretilen numunelerinin içerdikleri takviye elamanı oranıyla gözenek değerlerinin değişimi verilmiştir.

Çizelge 5.3. 600 °C'de sinterlenerek üretilen ve yaşlandırma işlemi uygulanmış ve uygulanmamış numunelerinin takviye oranına göre değişen ortalama gözenek yüzdeleri

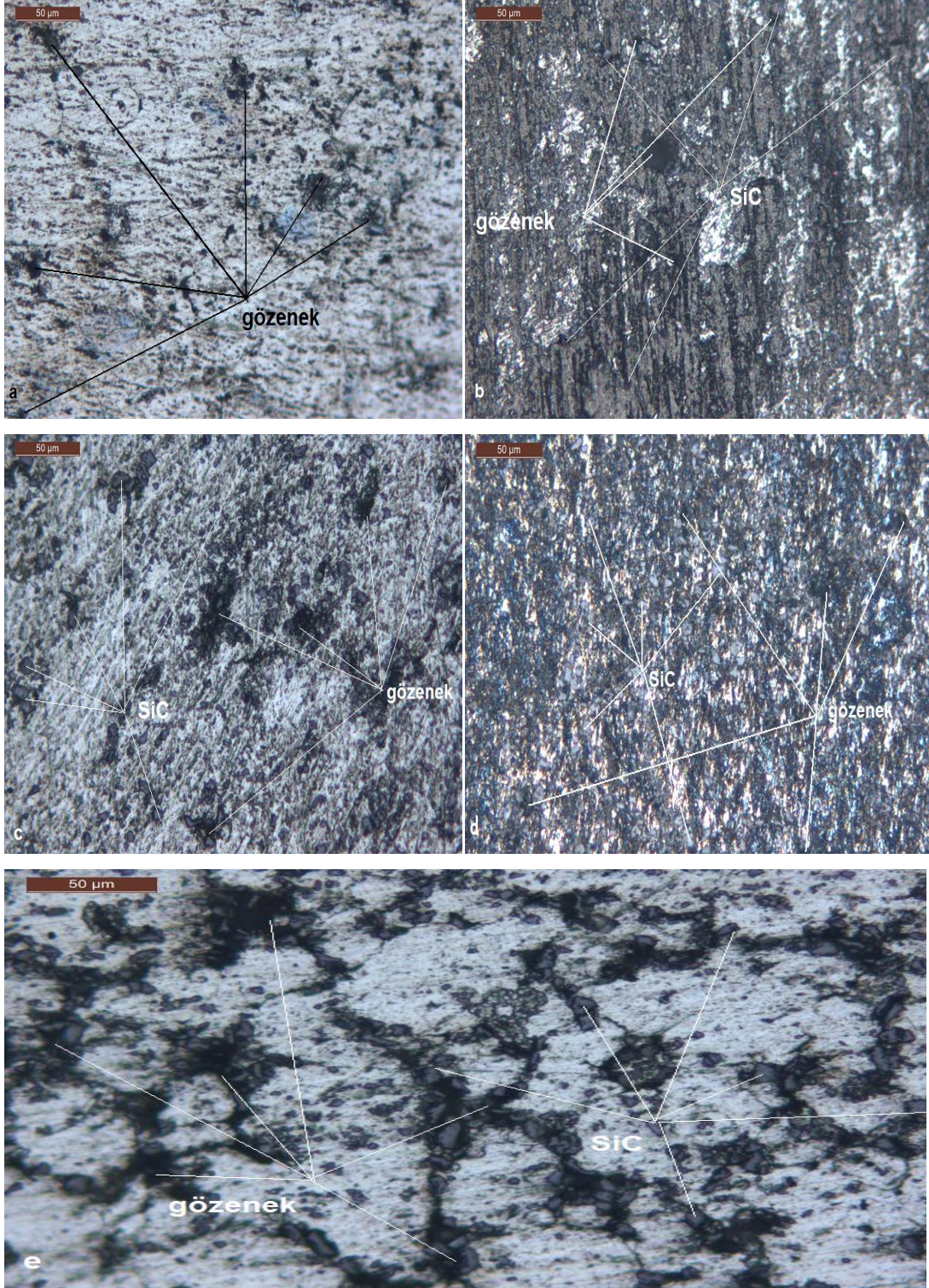
SiC (%)		0	5	10	15	20
Gözeneklilik (%)	600	8,322	8,695	9,062	9,285	9,366
Gözeneklilik (%)	600_T6	7,393	7,488	7,616	7,854	8,287



Şekil 5.4. 600 °C'de sinterlenerek üretilen kompozitlerin takviye oranına bağlı % gözenek miktarları değişimi

Şekil 5.4'de yer alan grafikten de görüldüğü üzere, üretilen kompozit malzemelerde yaşlandırma işlemi tabii tutulsun yada tutulmasın gözeneklilik, takviye oranının artmasıyla artmaktadır. Bunun nedeni gözenekliliğin daha çok kompozit içerisinde bulunan takviye parçacıkları etrafında oluşmasındandır. Ayrıca ısı iletkenliği düşük olan SiC tozları oranının kompozit içerisinde artmasıyla kompozitin genel ısı iletkenliğinin düştüğü, bu durumun ise sinterleme mekanizmasını önleyici bir hal aldığı daha önce Bhattacharyya vd., (2008) tarafından yapılan çalışmada görülmüştür. Bir başka sebep ise; toz karışımı içerisindeki sıkıştırılabilirliği düşük olan sert tozun (SiC) oranının artmasıyla karışımın genelinde sıkıştırılabilirliğinin azalmasıdır. T6 ısı işlemine tabii tutulan numunelerin yüzde gözeneklilik miktarları oranının artmasıyla karışımın genelinde sıkıştırılabilirliğinin azalmasıdır. T6 ısı işlemine tabii tutulmayanlara göre azalmıştır. Bunun nedeni yaşlandırma işleminde numunelerin sıcaklığının, Al ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklığa çıkarılması olarak gösterilebilir. Ancak yüzde gözeneklilik miktarı yaşlandırma işlemi uygulanmış malzemelerde de takviye oranının artması ile artmıştır. Bunun nedeni gözenekliliğin daha çok kompozit içerisinde bulunan takviye parçacıkları etrafında oluşmasıdır. Buna benzer sonuçlar Aycan (2010) tarafından yapılan çalışmada da tespit edilmiştir.

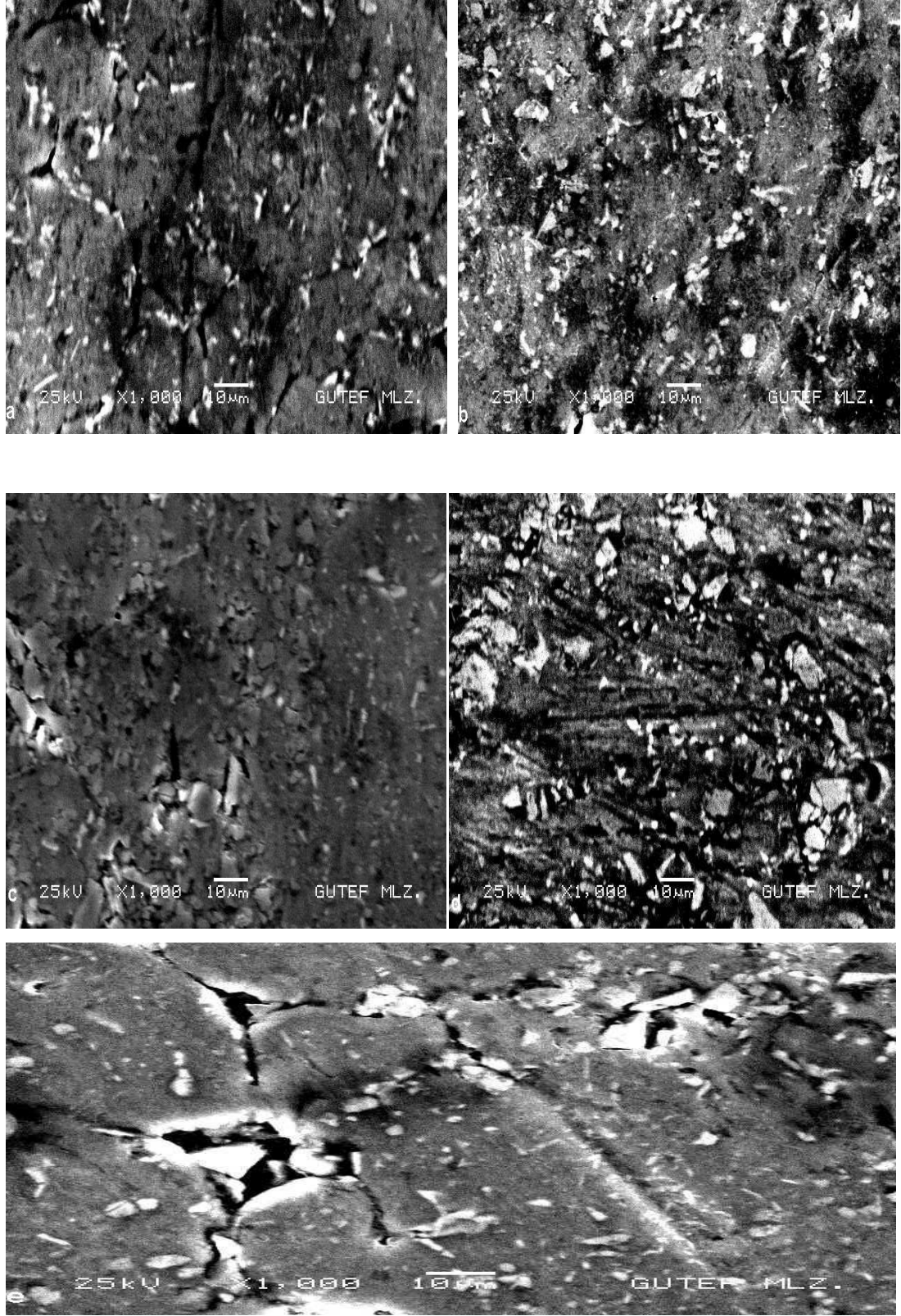
Şekil 5.5'de 575 °C'de sinterlenen takviye içermeyen (%0), %5, %10, %15 ve % 20 SiC takviye oranına sahip kompozitlerin OM mikroyapı görüntüleri yer almaktadır. Gözenekliliğin %20 SiC içeren kompozitte daha fazla olduğu mikroyapı fotoğraflarından da görülmektedir.



Şekil 5.5. 575 °C'de sinterlenmiş (a) takviye içermeyen, (b) %5 SiC, (c) %10 SiC, (d) %15 SiC, (e) %20 SiC takviyeli kompozitlerin yüzeylerinin OM görüntüleri

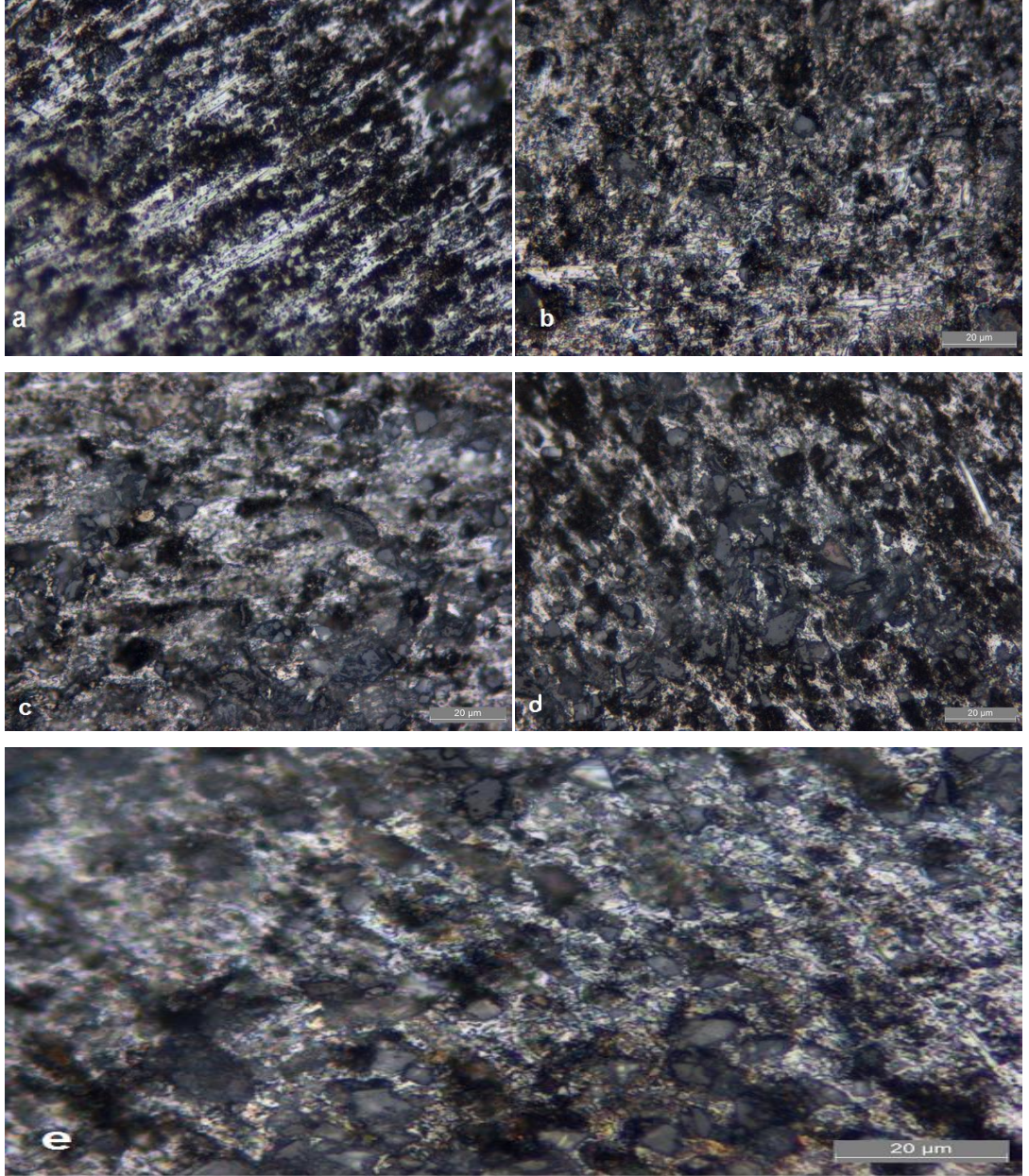
Şekil 5.5'de verilen görüntülerden de anlaşılacağı üzere; 575 °C'de sinterlenen takviye içermeyen, %5, %10, %15 ve % 20 SiC takviye oranına sahip kompozitlerin OM mikroyapı görüntüleri yer almaktadır. Gözenekliliğin %20 SiC içeren kompozitte daha fazla olduğu mikroyapı görüntülerinden de görülmektedir. Üretilen kompozit malzemelerde oluşan gözenekliliğin genellikle takviye elemanı etrafında ve tane sınırlarında yer aldığı görülmüştür.

Şekil 5.6'da 575 °C'de sinterlenen takviye içermeyen, %5, %10, %15 ve % 20 SiC takviye oranına sahip kompozitlerin SEM görüntüleri yer almaktadır. Gözenekliliğin %20 SiC içeren kompozitte daha fazla olduğu mikroyapı görüntülerinden de görülmektedir.



Şekil 5.6. 575 °C'de sinterlenmiş (a) takviye içermeyen, (b) %5 SiC, (c) %10 SiC, (d) %15 SiC, (e) %20 SiC takviyeli kompozitlerin yüzeylerinin SEM görüntüleri

Şekil 5.7'de 625 °C'de sinterlenen takviye içermeyen (%0), %5, %10, %15 ve % 20 SiC takviye oranına sahip yaşlandırma işlemine tabi tutulmuş kompozitlerin OM mikroyapı görüntüleri yer almaktadır. Gözenekliliğin %20 SiC içeren kompozitte daha fazla olduğu mikroyapı görüntülerinden de görülmektedir.



Şekil 5.7. 625 °C'de sinterlenmiş (a) takviye içermeyen, (b) %5 SiC, (c) %10 SiC, (d) %15 SiC, (e) %20 SiC takviyeli yaşlandırma işlemi uygulanmış numunelerin yüzeylerinin OM görüntüleri

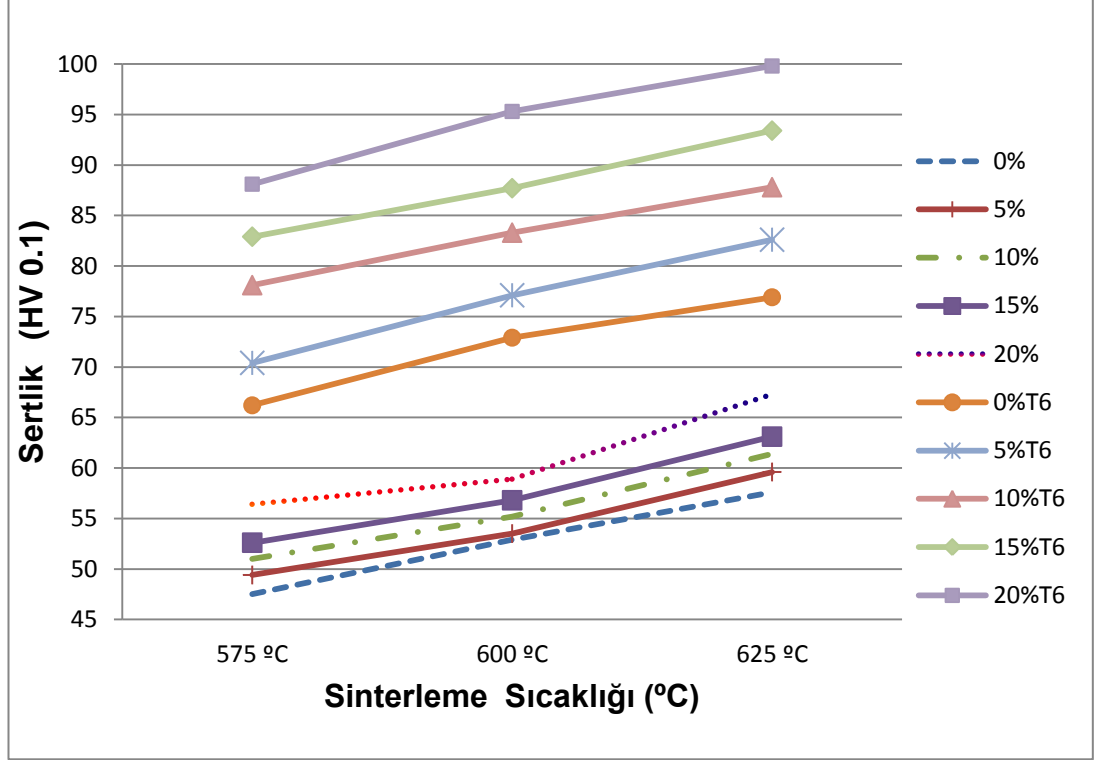
5.2 Sertlik Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Üretilen kompozit malzemelerin yapılan sertlik testinden elde edilen Vickers cinsinden sertlik değerleri Çizelge 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Numunelerin sertlik değerleri

Grup No.	Numune No.	SiC (%)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sertlik (HV 0.1)	T6 Yaşlandırma Sonrası Sertlik (HV 0.1)
1	1.1	0	575	47,5	66,2
	1.2		600	52,9	72,9
	1.3		625	57,6	76,9
2	2.1	5	575	49,4	70,4
	2.2		600	53,5	77,1
	2.3		625	59,6	82,6
3	3.1	10	575	51,0	78,1
	3.2		600	55,2	83,3
	3.3		625	61,4	87,8
4	4.1	15	575	52,6	82,9
	4.2		600	56,8	87,7
	4.3		625	63,1	93,4
5	5.1	20	575	56,4	88,1
	5.2		600	58,9	95,3
	5.3		625	67,3	99,8

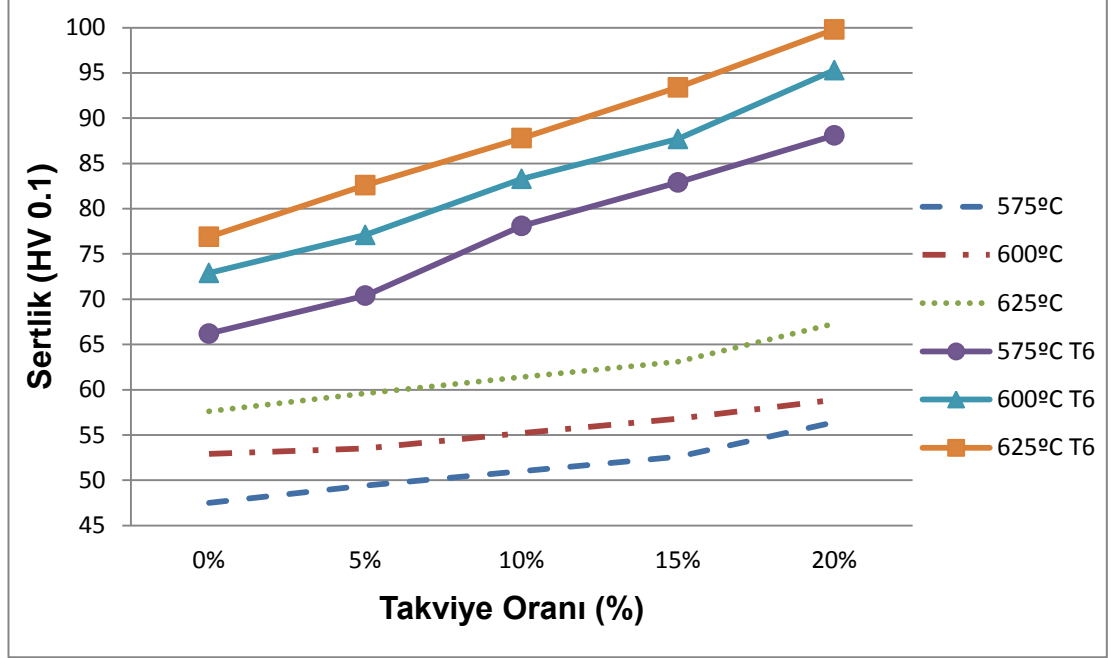
Şekil 5.8’de farklı takviye hacim oranlarında üretilen kompozitlerin sinterleme sıcaklıklarına bağlı sertlik değerlerinin değişimi görülmektedir.



Şekil 5.8. Farklı takviye oranlarındaki kompozitlerin sinterleme sıcaklığına bağlı sertlik değerleri

Şekil 5.8’de yer alan grafikten de görüldüğü üzere, sinterleme sıcaklığının artmasıyla sertlik miktarı da doğru orantılı bir biçimde artmaktadır. Bunun nedeni sinterleme sıcaklığının artmasıyla teorik yoğunluğa daha yakın deneysel yoğunluk sonuçları elde edilmesiyle gözenekliliğin difüzyondan kaynaklı azalmasıdır. Elde edilen bu sonuçlara benzer sonuçlar; Aycan, (2010) ve Özçatalbaş vd., (2006) tarafından elde edilmiştir.

Şekil 5.9'da farklı sinterleme sıcaklıklarında üretilen kompozitlerin takviye oranına bağlı sertlik değerlerinin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Sertliğin takviye oranları ile değişimi

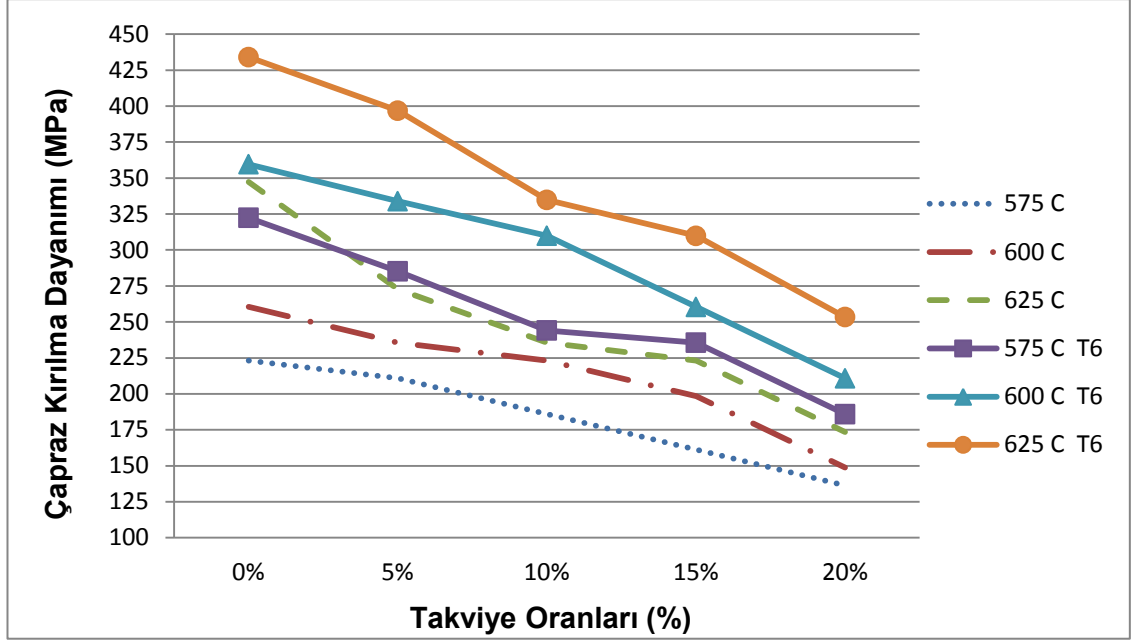
Şekil 5.9'da yer alan grafikten de görülebileceği gibi sertlik değeri takviye oranının artması ile artmıştır. Yaşlandırma işlemine tabi tutulmuş numunelerde de durum aynıdır. Bunun nedeni matris malzemesine göre çok daha sert olan SiC tozlarının kompozit malzeme içerisindeki miktarının artmasıdır. Elde edilen bu sonuçlara benzer sonuçlar; Özçatalbaş vd., (2006), Topçu vd., (2009), Arık vd., (2008) ve Aydın vd., (2010) tarafından da benzer şekilde elde edilmiştir.

5.3 Çapraz Kırılma Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Üretilen numunelerin çapraz kırılma dayanımı testinden elde edilen sonuçlar Çizelge 5.5’de verilmiştir.

Çizelge 5.5. Numunelerin çapraz kırılma dayanımı verileri

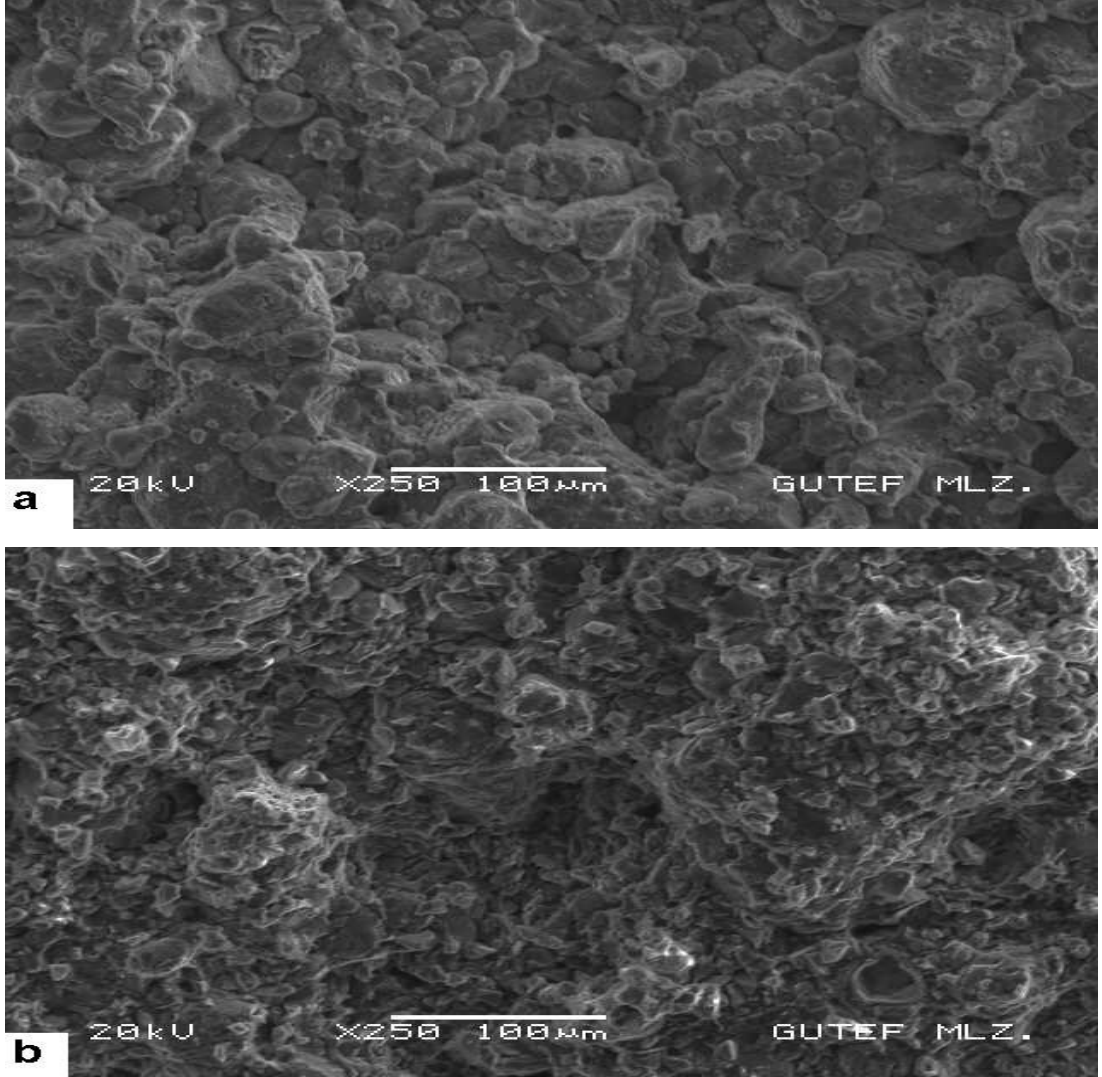
Grup No.	Numune No.	SiC (%)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Çapraz Kırılma Dayanımı (MPa)	T6 Yaşlandırma Sonrası Çapraz Kırılma Dayanımı (MPa)
1	1.1	0	575	223,2	322,4
	1.2		600	260,4	359,6
	1.3		625	347,2	434,0
2	2.1	5	575	210,8	285,2
	2.2		600	235,6	333,9
	2.3		625	272,8	396,8
3	3.1	10	575	186	244,1
	3.2		600	223,2	309,9
	3.3		625	235,6	334,8
4	4.1	15	575	161,2	235,6
	4.2		600	198,4	260,4
	4.3		625	223,2	309,8
5	5.1	20	575	136,4	185,9
	5.2		600	148,8	210,8
	5.3		625	173,6	253,7



Şekil 5.10. Çapraz kırılma dayanımının takviye oranları ile değişimi

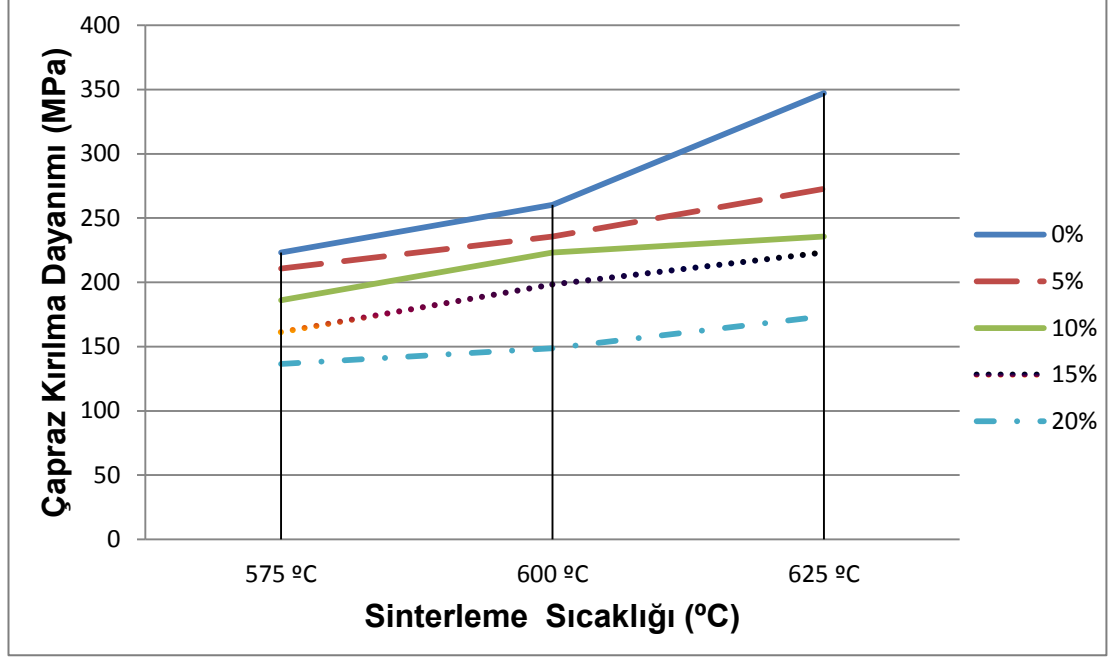
Şekil 5.10'da takviye oranının artmasıyla çapraz kırılma dayanımının düştüğü görülmektedir. Bu durum artan SiC miktarı ile kompozitlerin gözenek miktarının artmasından kaynaklanmaktadır. Kompozit içerisindeki gözenekler mikro çatlaklar gibi davranarak çapraz kırılma dayanımını azaltmaktadır. Ayrıca metal matris ile seramik takviye ara yüzeyinde güçlü bağ oluşmadığı da sebepler arasında gösterilebilir. Bunun yanında aynı takviye içeren numunelerde sinterleme sıcaklığının artmasıyla çapraz kırılma dayanımı artmıştır. Kompozitlerin yaşlandırma işlemine tabi tutulması numunenin çapraz kırılma dayanımını artırmıştır. En iyi çapraz kırılma dayanımı değeri, 434 MPa değeri ile takviye içermeyen ve 625 C'de sinterlenerek üretilmiş ve ardından yaşlandırma işlemine tabi tutulmuş numunelerden elde edilmiştir. Elde ettiğimiz bu sonuçlara benzer sonuçlar; Karaman, (2011) ve Aycan, (2010) tarafından da elde edilmiştir.

Şekil 5.11'de çapraz kırılma testi uygulanan 600 °C'de sinterlenmiş, takviye içermeyen ve % 20 SiC takviye içeren numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri verilmiştir. Takviye içermeyen numunede, genel olarak kırılma; kopma şeklinde, %20 SiC takviye içeren numunede ise parçalı kırık şeklinde gerçekleşmiştir.



Şekil 5.11. 600 °C'de sinterlenmiş (a) takviye içermeyen, (b) %20 SiC takviyeli kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntüleri

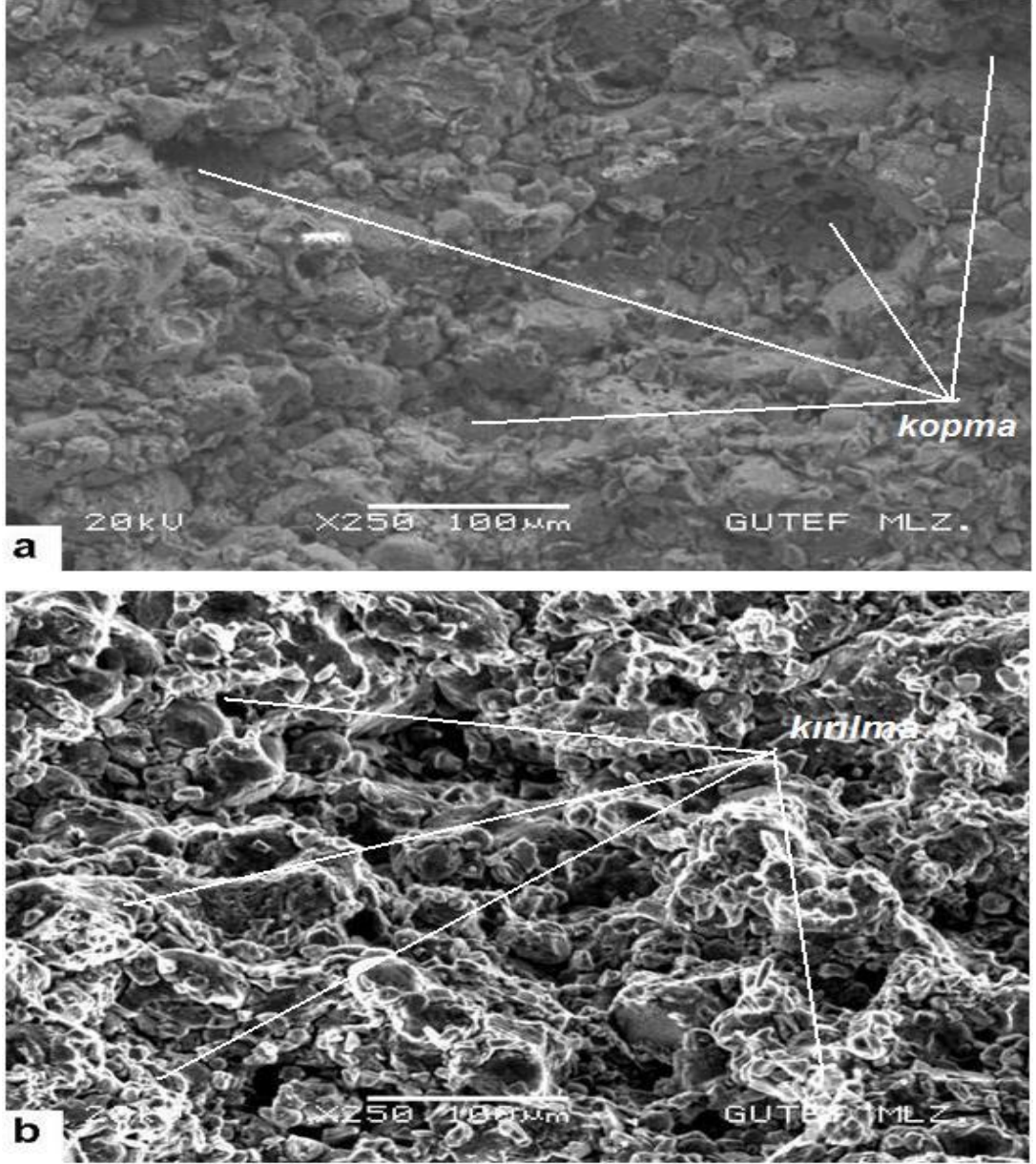
Şekil 5.12’de üretilen kompozit malzemelerin çapraz kırılma dayanımlarının sinterleme sıcaklığı ile değişimi görülmektedir.



Şekil 5.12. Çapraz kırılma dayanımının sinterleme sıcaklığı ile değişimi

Şekil 5.12’de yer alan grafikten de anlaşılacağı gibi sinterleme sıcaklığı arttıkça çapraz kırılma dayanımının da arttığı tespit edilmiştir. Bu durumun sebebi olarak sinterleme sıcaklığının artması ile matris malzemesi ve takviye elamanı arasında meydana gelen daha güçlü bağ gösterilebilir. Yüksek sıcaklıklarda Al 2014 malzemenin yüzey geriliminin düşmesi, ıslatma kabiliyetinin artması ve daha güçlü bağ oluşturması beklenmektedir. Bu sonuçlara benzer sonuçları Xu vd., (2002) ve Aycan, (2010) yaptıkları çalışmalarda bulduklarını belirtmişlerdir.

Şekil 5.13'de çapraz kırılma dayanımı testine maruz kalan % 10 SiC takviye içeren, 575 °C ve 625 °C'de sinterlenmiş numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.13. % 10 SiC takviyesi içeren (a) 575 °C ve (b) 625 °C sıcaklıklarında sinterlenmiş kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntüleri.

Şekil 5.13 (a)'da 575 °C sıcaklıkta üretilmiş olan kompozitlerin kırık yüzeylerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde takviye SiC'ün yerinden çıktığı anlaşılmaktadır. Şekil 5.12 (b)'de 625 °C sıcaklıkta üretilmiş olan kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde SiC'ün kırılarak kompozitlerden ayrıldığı görülmektedir. Bu durum artan sinterleme sıcaklıklarının yüzeyde daha iyi bağlama oluşmasına sebep olduğunu göstermektedir.

6 DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Sinterleme sıcaklığının artması ile T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmamış ve T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış kompozit malzemelerde yoğunluk, sertlik, çapraz kırılma dayanımı artmış, porozite (gözeneklilik oranları) azalmıştır.

T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmamış numunelerin T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numunelere göre daha iyi mekanik özellikler gösterdiği tespit edilmiştir.

T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmadan üretilen numunelerde oluşan gözenekliliğin takviye elemanı etrafında ve tane sınırlarında yer aldığı görülmüştür. En düşük gözeneklilik % 8 değeri ile 625 °C'de sinterlenen ve SiC takviyesi içermeyen sadece Al 2014 tozlarıyla elde edilmiş numuneden elde edilmiştir. En yüksek gözeneklilik değeri ise; % 9,785 değeri ile 575 °C sinterlenen ve % 20 SiC içeren kompozit numunelerden elde edilmiştir. Benzer sonuç T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanarak üretilen numunelerde de görülmüştür. En düşük gözeneklilik % 6,929 değeri ile 625 °C'de sinterlenen ve SiC takviyesi içermeyen sadece Al 2014 tozlarıyla elde edilmiş numuneden elde edilmiştir. En yüksek gözeneklilik değeri ise; % 8,809 değeri ile 575 °C sinterlenen ve % 20 SiC içeren kompozit numunelerden elde edilmiştir.

Takviye olarak kullanılan SiC oranının artması ile üretilen T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan kompozit malzemelerde yoğunluk ve sertlik değerleri artmış, çapraz kırılma dayanımı azalmıştır. Bu durumun nedeni olarak, artan gözenekliliğin kompozit malzemedeki mikro çatlak etkisi oluşturması gösterilebilir.

Üretilen kompozit malzemelerin kırık yüzeylerin SEM görüntüleri incelendiğinde, kırılmanın ara yüzeylerde ve matris tane sınırlarında oluştuğu görülmektedir. Kompozitlerde oluşan gözenekliliğin, takviye elemanı etrafında gerçekleştiği tespit edilmiştir.

İleride yapılacak çalışmalarda bu tezin sonuçları ışığında aşağıdaki araştırmalar gerçekleştirilebilir.

Daha yüksek sinterleme sıcaklıkları ve değişen sinterleme sürelerinde oluşan mekanik özellikler araştırılabilir. Bu çalışmada kullanılan toz boyutlarından daha ince taneli ya da kaba taneli tozlarla üretim gerçekleştirilebilir ve sonuçlar incelenebilir. Malzeme aynı parametrelerle farklı üretim yöntemleri kullanılarak üretilip elde edilen sonuçlar incelenebilir. Üretilen numuneler aşınma deneyine tabi tutulabilir.

KAYNAKÇA

- [1] Acılar M., Al/SiC Kompozitlerin Vakum İfiltrasyon Yöntemi ile Üretimi ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara, 2002.
- [2] Uslan ,İ., Toz Metalurjisi Üretim Teknikleri, Yüksek Lisans Ders Notları. Gazi Üniversitesi, Ankara, 2011.
- [3] Ögel, B., Kaya, G., Alüminyum-SiC Kompozitlerin Konvensiyonel Sıcak Presleme Yöntemi İle Üretimi. 1.National PM Conference, 1992 Ankara s.631-635, 1992.
- [4] Yılmaz, M., Nurlu, N., Altıntaş, S., Alüminyum-SiC Kompozitlerin Üretimi. 2.National PM Conference, 1996 Ankara s.277-285, 1996.
- [5] Berghezan, A., Basic Design Concepts and Specific Methods For The Fabrication Of Metal-Matrix Composite Materials. Advances in Composite Material. s.43-52, 1978.
- [6] Akdoğan Eker, A., Metal Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri. Yıldız Teknik Üniversitesi. http://www.yarbis.yildiz.edu.tr/web/userCourseMaterials/akdogan_81544a85d0e6510467de73b57b89f0fe.pdf (Erişim tarihi 08.11.2012)
- [7] Akbulut, H., Durman M., SiC Partikül Takviyeli Al-Si metal Matrisli Kompozitlerin Santrifüj Dökümü. 8. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 1995 İstanbul. s.687-692, 1995.
- [8] Ekinci, V.Ş., Alümina takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara, 2007.

- [9] Deniz, M.E., Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri ve Isıl İşleme Presleme Tekniğini Kullanılarak Kompozit Malzemeler Üretecek Bir Düzeneğin Tasarım ve İmalatı. Yüksek Lisans Tezi. Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, 2005.
- [10] Çalın, R., Magnezya Parçacık Takviyeli Al Matrisli Kompozitin Vakum İnfiltrasyon Yöntemi İle Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara, 2006.
- [11] Akoral, A., Toz Metalurjisi Yöntemi İle Al-SiC Kompozit Malzeme Üretimi ve İşlenebilirliğinin İncelenmesi. Doktora Tezi. Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, 2003.
- [12] Çöçen, Ü., Önel, K., Özdemir, İ., Microstructures and Age Hardenability of Al-5%Si - 0-2%Mg Based Composites Reinforced With Particulate SiC. Composites Science and Technology 1997,. s.139-147, 1997.
- [13] Şahin, Y., Kompozit Malzemelere Giriş, Seçkin Kitabevi, Ankara, s.28-78, 2006.
- [14] Özkan, S., Alüminyum Matrisli SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşımlama Yöntemi İle Üretilmesi ve Kuru Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara, 2007.
- [15] Ekerer, F.A., Alümina-SiC Partikül Destekli T/M Al Matrisli Kompozitlerin Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2007.

- [16] Dörtbölük, C., Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilmesi ve Karakterizasyonu. Bilim Uzmanlığı Tezi. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak, 2006.
- [17] Yılmaz, H., Alüminyum Esaslı SiC_p Partikül Takviyeli Metal Matrisli Kompozit Malzemeler. Bitirme Ödevi. Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2007.
- [18] Pul, M., Al Matrisli MgO Takviyeli Kompozitlerin İnfiltasyon Yöntemi İle Üretilmesi ve İşlenebilirliğinin Değerlendirilmesi. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara, 2010.
- [19] Günay, M., Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilmiş Al-SiC Kompozitlerin Mekanik ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara, 2009.
- [20] Çalın, R., Effect of Reinforcement Volume Ratio on Thermal Conductivity of SiO₂ Reinforced Al Matrix Composite Produced by Vacuum Infiltration Method. Asian Journal of Chemistry, Vol.22, No 1, s. 808-814, 2010.
- [21] Kılıç, E.F., Alüminyum Alaşımli SiC parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara, 2007.
- [22] Topçu, İ., Gülsoy, H.O., Kadioğlu, N., Güllüoğlu, A.N., Processing and Mechanical Properties of B₄C Reinforcement Al Matrix composites. Journal of Alloys and Compounds, Vol.482, s.516-521, 2009.
- [23] Hiçyılmaz, N., Aydın, Ş., Sarıtaş, S., Toz Metalurjisi ile Üretilmiş Alüminyum Esaslı Tanecikli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri. Uluslararası Katılımlı 2.Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, 1999, ODTÜ., Ankara, s.621-629, 1999.

- [24] Yanıkçı, G., SiC Takviyeli Al Matrisli Kompozitlerin T/M ve Döküm Yöntemi ile Üretilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2006.
- [25] Rahimian, M., Parvin, N., Ehsani, N., Investigation of Particle Size and Amount of Alumina on Microstructure and Mechanical Properties of Al Matrix Composite Made by Powder Metallurgy. *Material Science and Engineering*, Vol.527, s.1031-1038, 2010.
- [26] Arık, H., Effect of Mechanical Alloying Process on Mechanical Properties of α -Si₃N₄ Reinforcement Aluminum Based Composite Materials. *Materials and Design*, Vol.29, s.1856-1861, 2008.
- [27] Simchi, A., Effect of Lubrication Procedure on the Consolidation, Sintering and Microstructural Features of Powder Compacts. *Materials and Design*, Vol.24, s.585-594, 2003.
- [28] Çalın, R., Çıtak R., Designing of a Powder Compressing Device With Vibration and Investigation of Compressibility of MgO Powders With This Device. *Materials and Design*, Vol.28, s.2654-2657, 2006.
- [29] Çalın, R., Çıtak R., Effect of Vacuum on Infiltration Height in Producing MgO Reinforced Al Matrix Composite By Vacuum Infiltration Method. ICIT-MPT International Conference on Industrial Tool and Materials, Bled, Slovenia, 2007.
- [30] Çalın, R., Çıtak R., Effect of Powder Size on Infiltration Height in Producing MgO Reinforced Al Matrix Composite By Vacuum Infiltration Method. *Materials Science*, Vols.,534-536, s.797-800, 2007
- [31] Tomac, N., Tonnessen K., Machinability of Particulate Aluminium Matrix Composites. *Annal of the Cirp*, s.41-43, 55-58,1992

- [32] Ersümer, A., Toz Metalurjisi Sert Metal Sinterleme, İTÜ Matbaası İstanbul, s.277, 1970.
- [33] Kurt, A., Toz Metal Bronz Yatak Malzemelerinin Üretilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara, 1992.
- [34] Man, H.C., Kwork, C.T., Yue, T.M., Cavitation erosion and corrosion behaviour of laser surface alloyed MMC of Sic and Si₃N₄ on Al alloy AA6061. Surface and Coatings Technology, Vols.132, s.11-20, 2000
- [35] Feng, A.H., Geng, L., Zhang, J., Yao, C.K., Yue, T.M., Hot compressive deformation behaviour of eutectic Al-Si alloy based composite reinforced with α -Si₃N₄ whiskers. Materials chemistry and physics, Vols.82, s.618-621, 2003
- [36] Ünal R., Toz Metalurjisi Üretim Teknikleri, Lisans Ders Notları. Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, 2010.
- [36] Milli Eğitim Bakanlığı, MEGEP (Mesleki Eğitim ve Öğrenme Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi) Kimya Teknolojisi - Karıştırıcı Kullanma, Ankara, 2008
- [37] Alev, E., Otomobil Endüstrisinde Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Parça Kullanımı ve Performansının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 2011.
- [37] Makine Bilgi Center, Toz Metalurjisi ve Genel İmal Usulleri Dersi, <http://makinabilgicenter.blogspot.com/p/toz-metalurjisi-imal-usulleri-dersi.html> (Erişim Tarihi 10.112012)
- [38] German, R.M., Princeton, N.J., Powder Metal Industries Federation, Powder Metallurgy Science. s.278, New Jersey, 1984.

- [39] Karaman, Y., Toz Metalurjisi Yöntemi ile MgO Takviyeli Al Esaslı Kompozit Üretim ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2010.
- [40] Erden, O.E., Alüminyum-Silisyumnitrür Kompozit Malzemenin Difüzyon Kaynağı ile Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara, 2005.
- [41] Erden, O.E., Alüminyum-Silisyumnitrür Kompozit Malzemenin Difüzyon Kaynağı ile Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara, 2005.
- [42] Köksal, F., Al-Cu-SiC ve Al-Cu-B₄C Kompozitlerin Sıcak Presleme Yöntemi ile Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 2004.
- [42] Acun, S., SiC Partikül Takviyeli Alüminyum Alaşım Matrisli Kompozit Mazlemelerde Yaşlandırma İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Ege Üniversitesi, İzmir, 2007.
- [43] Başaran, A., Toz Metal Parçalara Isıl ve Mekanik Yüzey İşlemlerinin Birlikte Uygulanabilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 2007.
- [44] Kumdalı, F., Alüminyum Matrisli B₄C Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2008.
- [45] Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTU), Mühendislik Fakültesi, Trabzon http://www.muhsak.ktu.edu.tr/metalurji/lab_foylel/Elek%20Analizi%20Deneyi.pdf (Erişim Tarihi 10.11.2012)

- [46] Baksan, B., Gürler, R., Toz Metalurjisinin Savunma Sanayiinde Uygulanması. Osmangazi Üniversitesi Metalurji Enstitüsü, Eskişehir, 2000.
- [47] Vikipedi, http://tr.wikipedia.org/wiki/Toz_metal, (Erişim Tarihi 09.12.2012)
- [48] MSE Material Science Engineering, http://www.msetec.net/izostatik_presler.asp, (Erişim Tarihi 28.12.2012)
- [49] efunda, http://www.efunda.com/materials/alloys/aluminum/show_aluminum.cfm?ID=AA_2014&prop=all&Page_Title=AA%202014 (Erişim Tarihi 14.11.2012)
- [50] Ergün, N., Borkarbür-Silisyumkarbür Kompozitlerin Reaktif Sıcak Presleme ile Üretimi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2006.
- [51] Sertlik Dönüşüm Tablosu, <http://ozct.com.tr/tr/pdf/teknik03.pdf> (Erişim Tarihi 14.11.2012)
- [52] Bharttacharyya, M., Kumar, A.N., Kapuria, S., Synthesis and Characterisation of Al/SiC and Ni/Al₂O₃ Functionally Garded Materials. Materials Science and Engineering A 487, s.524-535, 2008.
- [53] Xu, X., Lu, P., German, R.M., Densification and strength evolution in solid state sintering. Journal of Materials Science. Vol 37, s.117-126,7 2002.
- [54] Lui, Z.Y., Wang, Q.Z., Xiao, Z.Y., Liu, L., Experimental and modeling investigation on SiC_p distribution in powder metallurgy processed SiC_p/20024 Al composites. Materials Science and Engineering A527, s.5582-5591, 2010.

- [55] Sinterleme nedir, <http://www.kimyaturk.net/index.php?topic=8297.0> ;wap2 (Erişim Tarihi 10.11.2012)
- [56] Aslan, F. Öztürk, S. Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Toz Metalurjisi Deneyi, 2009.
- [57] Kurt, A.O., Toz Üretim Yöntemleri ve Sinterleme, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ders Notları, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2010.
- [58] Akdoğan, A.E., Metal Matrisli Kompozitler ve Üretim Yöntemleri, Makine Mühendisliği Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2009.
- [59] Baksan, B., Gürler, R., Toz Metalurjisinin Savunma Sanayiinde Uygulanması, Metalurji Enstitüsü, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- [60] Özgür, Ş., Topaloğlu, V., Küçükbaş, M., Metal Matrisli Kompozit Malzemeler, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- [61] Aycan, M.F., Yaşlandırma Isıl İşleminin SiC ve Al₂O₃ Parçacık Takviyeli Alüminyum Alaşımı Esaslı Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara, 2010.
- [62] Aydın, H., Bayram, A., Farklı Isıl İşlem Koşullarındaki 2024 Alüminyum Alaşımlarının Korozyon Sonrası Mekanik Özelliklerindeki Kaybın Belirlenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt 15, Sayı1, Bursa, 2010.
- [62] Özçatlabaş, Y., Bayram, A., Mekanik Özellik ve Kesme Geometrisinin AA2014 Alaşımının işlenebilme Özelliklerine Etkisi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt 21, No1,21-27 Ankara, 2006.

EKLER

EK1: Al 2014 toz boyut analiz raporu.

