

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TOZ METALURJİSİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM
MATRİSLİ TiC TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ
VE ÇEKME MUKAVEMETİ TESTLERİNİN ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hakan YILMAZ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

EKİM 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TOZ METALURJİSİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM
MATRİSLİ TiC TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ
VE ÇEKME MUKAVEMETİ TESTLERİNİN ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hakan YILMAZ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ahmet Çağatay ÇİLİNGİR

EKİM 2024

Hakan Yılmaz tarafından hazırlanan “Toz Metalurjisi İmalat Yöntemi İle Alüminyum Matrisli TiC Takviyeli Kompozit Malzeme Üretimi Ve Çekme Mukavemeti Testlerinin Analizi ” adlı tez çalışması 04.10.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim **Dalı Makina Tasarım ve İmalat Bilim** Dalı’nda **Yüksek Lisans tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “Toz Metalurjisi İmalat Yöntemi İle Alüminyum Matrisli TiC Takviyeli Kompozit Malzeme Üretimi Ve Çekme Mukavemeti Testlerinin Analizi” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(04/10/2024).

Hakan YILMAZ



TEŐEKKÖR

Yüksek lisans tez çalışmamda beni yönlendiren, her konuda destek olan, bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, değerli danışmanım Doç. Dr. Ahmet Çağatay ÇİLİNGİR hocama teşekkür ederim.

Teşekkürün az kalacağı beni saygı, sevgi ve ahlâk çerçevesinde yetiştirerek bugünlere getiren, maddi ve manevi desteklerini hiç eksik etmeyen, üzerimde çok büyük emekleri olan, değerli aileme sonsuz sevgilerimi sunarım.

Hakan YILMAZ



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. TOZ METALURJİSİ TEKNOLOJİSİ	3
2.1. Toz Metalurjisi (T/M)	3
2.1.1. Toz metalurjisinin temel adımları	4
2.1.2. Toz metalurjisinin diğer imalat metotlarına göre avantajları	4
2.1.3. Toz metalurjisinin diğer imalat metotlarına göre dezavantajları	4
2.1.4. Toz metalurjisinin uygulama alanları	5
2.2. Toz Üretimi	5
2.2.1. Mekanik yöntemler	6
2.2.1.1. Talaşlı üretim	6
2.2.1.2. Öğütme	6
2.2.1.3. Mekanik alaşımlama	8
2.2.2. Kimyasal yöntemler	8
2.2.2.1. Kimyasal çöktürme	8
2.2.2.2. Elektrolitik Yöntemler	9
2.2.2.3. Redüksiyon	9
2.2.2.4. Termal Degradasyon	9
2.2.2.5. Sol-Jel Yöntemi	9
2.2.3. Atomizasyon yöntemi	11
2.2.3.1. Gaz atomizasyonu	11
2.2.3.2. Su atomizasyonu	12
2.2.3.3. Vakum atomizasyonu	13
2.2.3.4. Santrifüj atomizasyonu	13
2.2.4. Atomizasyon yönteminin avantajları	13
2.2.5. Atomizasyon yöntemi uygulama alanları	13
2.2.6. Elektrolitik ayrıştırma yöntemi	14
2.2.6.1. Elektrolit seçimi	14
2.2.6.2. Anot ve katot seçimi	14
2.2.6.3. Elektroliz süreci	14
2.2.6.4. Toz toplama	14
2.2.6.5. Elektrolitik ayrıştırma yönteminin avantajları	15
2.2.6.6. Elektrolitik ayrıştırma yönteminin dezavantajları	15

2.2.6.7. Elektrolitik ayrıştırma yönteminin uygulama alanları	15
2.3. Toz Karakterizasyonu.....	16
2.4. Tozların Karıştırılması.....	16
2.4.1. Tozların hazırlanması.....	16
2.4.2. Ön karıştırma.....	16
2.4.3. Islak karıştırma.....	17
2.4.4. Karıştırma ekipmanları.....	17
2.4.5. Homojenizasyon.....	17
2.4.6. Kalite kontrol.....	18
2.4.7. Depolama ve kullanım	18
2.5. Presleme	18
2.5.1. Soğuk presleme	19
2.5.2. Sıcak presleme.....	19
2.5.3. Presleme yöntemleri.....	21
2.6. Sinterleme.....	24
2.6.1. Katı faz sinterlemesi.....	28
2.6.2. Sıvı faz sinterlemesi	28
2.6.3. Sinterleme atmosferi	30
3. MATERYAL VE YÖNTEM	31
3.1. Mekanik Alaşımlama Yöntemi.....	31
3.1.1. Mekanik alaşımlama süreci.....	31
3.1.2. Mekanik alaşımlamanın avantajları	32
3.1.3. Mekanik alaşımlamanın uygulama alanları.....	32
3.2. Kullanılan Öğütücü Türleri	32
3.2.1. SPEX tipi öğütücü.....	33
3.2.2. Planetary tipi öğütücü.....	33
3.2.3. Atritör tipi öğütücü.....	34
3.3. Matris Malzemeleri	37
3.3.1. Polimer matrisler	37
3.3.2. Metal matrisler	37
3.3.3. Seramik matrisler	37
3.4. Alüminyum ve Alaşımları	38
3.4.1. Alüminyumun özellikleri	38
3.4.2. Alüminyum alaşımları.....	38
3.4.3. Alüminyum alaşımlarının işlenmesi.....	40
3.4.4. Alüminyumun kullanım alanları	40
3.5. Titanyum Karbür (TiC)	40
3.6. Takviye Malzemeleri.....	41
3.7. Sterik Asit.....	41
3.8. Bilyeler	41
4. DENEYSEL BULGULAR	43
4.1. Deneyin Amacı.....	43
4.2. Deney Malzemeleri	43
4.2.1. AA7075 alüminyum tozu	43
4.2.2. Titanyum karbür tozu (TiC)	44
4.2.3. Bilyeler.....	46
4.2.4. Mekanik alaşımlama cihazı	46
4.2.5. Ölçüm cihazı	47
4.2.6. Hazne.....	47
4.2.7. Sterik asit.....	48

4.2.8. Etil alkol.....	48
4.2.9. Elek	49
4.2.10. Pres makinesi	49
4.2.11. Pres kalıp parçaları.....	50
4.2.12. Çekme mukavemeti test cihazı	50
4.2.13. Üretilen parça	51
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	53
5.1. %0 TiC & %100 Al karışımı.....	53
5.2. %1 TiC & %99 Al karışımı.....	54
5.3. %5 TiC & %95 Al karışımı.....	55
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ.....	61





KISALTMALAR

BY	: Buğulanma-Yoğunlaşma
HD	: Hacim Difüzyonu
M/A	: Mekanik Alaşımlama
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
SEM	: Tarama Elektron Mikroskobu
T/M	: Toz Metalurjisi
VD	: Gözenek Difüzyonu
YD	: Yüzey Difüzyonu



SİMGELER

Ti	: Titanyum
Al	: Alüminyum
Mg	: Magnezyum
H	: Hidrojen
Ar	: Argon
N	: Azot
Ni	: Nikel
Si	: Silisyum
Pb	: Kurşun
Sn	: Kalay
Zn	: Çinko
Ag	: Gümüş
Cu	: Bakır
Cr	: Krom
Mn	: Manganez
Fe	: Demir
W	: Tungsten
CH₄	: Metan
TiC	: Titanyum Karbür
SiC	: Silisyum Karbür
B₄C	: Bor Karbür
TiO₂	: Titanyum Dioksit
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
SiO₂	: Silisyum Oksit
ZrO₂	: Zirkonyum Oksit
N₄	: Nitrür
Si₃N₄	: Silisyum Nitrür
TiN	: Titanyum Nitrür
ZrN	: Zirkonyum Nitrür
TaN	: Tantal Nitrür

TiCl₄	: Titanyum Tetraklorür
CaCO₃	: Kalsiyum Karbonat
CaCl₂	: Kalsiyum Klorür
Na₂CO₃	: Sodyum Karbonat
Fe₂O₃	: Demir Oksit
APT	: Amonyum Paratungstat
Fe₃O₄	: Magnetit
CO	: Karbonmonoksit
FeO	: Demir Oksit
H₂O	: Su
PH₂	: Sodyum Karbonat
PA	: Naylon
PP	: Polipropilen
PE	: Polietilen
PC	: Polikarbonat
R	: Yarıçap [metre]
ΔL	: Uzunluk [metre]

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Toz malzemeler için presleme basınçları.....	20
Tablo 2.2. Farklı malzemeler için sinterleme sıcaklıkları ve süreleri.....	25
Tablo 3.1. İşlem kontrol katkısı, kimyasal formülleri ve farklı çalışmalarda kullanılan miktarları.....	36
Tablo 3.2. M/A işleminde kullanılan farklı işlem kontrol katkılarının ergime noktaları ve kaynama noktaları.....	37
Tablo 4.1 AA7075 Tozlarının Ağırlıkça Bileşimi (%).....	43
Tablo 4.2 AA7075 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri.....	44
Tablo 4.3. TiC alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri.....	45



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. T/M yöntemiyle parça üretim akış şeması.....	3
Şekil 2.2. T/M ile imal edilen bazı parçalar.....	5
Şekil 2.3. Bilyalı değirmen ve öğütme.	7
Şekil 2.4. Mekanik alaşımlama yöntemi	8
Şekil 2.5. Kimyasal yöntem kullanılarak demir tozu imalatı	10
Şekil 2.6. Düşey gaz atomizasyonu kesiti	12
Şekil 2.7. Su atomizasyon işlemi	12
Şekil 2.8. Vakum atomizasyon yöntemi	13
Şekil 2.9. Elektrolitik ayrıştırma yöntemi ile toz üretimi.....	15
Şekil 2.10. Örnek toz karıştırma bölümü.....	17
Şekil 2.11. Toz şekilleri.....	18
Şekil 2.12. T/M’de tek yönlü preslemeye ait işlem kademeleri.....	21
Şekil 2.13. Metal tozlarında presleme basıncının teorik yoğunluğa etkisi.....	22
Şekil 2.14. Metal tozlarının tek ve çift yönlü preslenme sırasında yoğunluk değişiminin şematik gösterimi.....	22
Şekil 2.15. Örnek preshane.....	23
Şekil 2.16. Sinterleme sıcaklığının toz biriket özelliklerine etkisi.....	26
Şekil 2.17. Sinterleme işlemi sırasında nokta teması bağlarının ortaya çıkması.....	26
Şekil 2.18. Küreden-küreye sinterlemede; iki tür sinterleme mekanizmasında boyun büyümesi için yüzeyden malzeme taşıma mekanizması, yüzey kaynaklarından sağlanması.....	27
Şekil 2.19. Katı faz sinterlemesinin aşamaları.....	28
Şekil 2.20. Geleneksel sıvı faz sinterleme aşamaları ve mikroyapı değişimleri.....	29
Şekil 3.1. SPEX tipi öğütücü (a) SPEX bilyeli değirmen, (b) SPEX 8000 tipi karıştırıcının; öğütme kabı, kapak, conta ve bilyelerden oluşan öğütme seti.....	33
Şekil 3.2. Planetary tipi bilyeli öğütücü değirmen.....	34
Şekil 3.3. Atritör tipi (dikey) bilyeli öğütücü değirmen.....	35
Şekil 4.1. AA7075 alüminyum tozu.....	44
Şekil 4.2. Titanyum karbür (TiC) tozu.....	45
Şekil 4.3. Bilyeler.....	46
Şekil 4.4. Mekanik alaşımlama cihazı.....	46
Şekil 4.5. Ölçüm cihazı.....	47
Şekil 4.6. Haznenin görünümü.....	47
Şekil 4.7. Sterik asit eklenmiş toz karışımı.....	48
Şekil 4.8. Etil alkol.....	48
Şekil 4.9. Elek.....	49
Şekil 4.10. Pres makinesi.....	49
Şekil 4.11. Pres kalıpları.....	50
Şekil 4.12. Çekme mukavemeti test cihazı.....	51
Şekil 4.13. Üretilen numunelerden biri.....	52

Şekil 5.1. 0% TiC & %100 Al karışımı malzemesi çekme mukavemetinin karıştırma süresi ile değişimi.....	53
Şekil 5.2. 1% TiC & %99 Al karışımı malzemesi çekme mukavemetinin karıştırma süresi ile değişimi.....	54
Şekil 5.3. 5% TiC & %95 Al karışımı malzemesi çekme mukavemetinin karıştırma süresi ile değişimi.....	55
Şekil 5.4. AA7075 matrisli TiC takviyeli kompozit malzemelerin çekme mukavemetinin karıştırma süresi ile değişimi.....	56
Şekil 5.5. AA7075 matrisli TiC takviyeli kompozit malzemelerin çekme mukavemetinin karıştırma süresi ile değişimi.....	57



TOZ METALURJİSİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM MATRİSLİ TiC TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE ÇEKME MUKAVEMETİ TESTLERİNİN ANALİZİ

ÖZET

Toz metalurjisi (T/M), günümüzde toz metaller, parçacık takviyeli kompozitler, seramikler, dövme işlemi, kalıplama gibi tekniklerin analizinden oluşan, metal tozlarının uygun standartlar ve belirli değerlerde karıştırılarak denetimli atmosfer şartlarında sinterlenmesiyle malzeme üretildiği bir imalat tekniğidir. Bu teknik malzeme israfını minimize ederek, yüksek hassasiyet ve verimlilik sağlar. Bu yöntemde birbiri içinde çözünmeyen tozları uygun takviye malzemesi kullanılarak karıştırılıp soğuk presleme ve ardından sinterleme yapılarak istenilen özellikler sağlanabilmektedir.

Bu çalışmada Al matrisli TiC takviyeli kompozit malzemeler, T/M imalat yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Al7075 matris malzemesine ağırlık oranınca %0, %1, ve %5 oranında TiC ve her karışıma %0,25 oranında sterik asit ilave edilerek toz karışımları oluşturulmuştur. Elde edilen karışımlar 1, 2, 5 ve 10 saat boyunca mekanik alaşımlama test cihazında karıştırılmıştır. Elde edilen bu toz karışımları 450 Mpa basınçta soğuk presleme ile üretilip sinterleme fırınında 600 °C de 60 dakika boyunca sinterlenmiştir. Ardından roto fnish işlemiyle parçalar üzerindeki çapaklar temizlenmiştir. Üretilen numunelere deneyler yapılarak mikroyapıları ve çekme mukavemeti değerleri irdelenmiştir. Elde edilen numunelerde, hazne içerisindeki matris ve takviye malzeme tozlarının dağılımı, homojen olarak gözlemlenmiştir.

Deneyler sonucunda; ilave edilen TiC' e bağlı olarak kompozit malzemelerin ana bileşenlerinde farklılıklar gözlemlenmiş ve çekme mukavemeti değerlerinde etkilenmeler görülmüştür. Matris içindeki TiC oranı arttıkça parçacıkların daha fazla topaklanma olduğu görülmüş. Takviye elemanının (TiC) boyutunun nano boyutta olması, Al7075 matrisi oluşturan tozların makro boyutta olması neticesinde oluşan bu tane boyutu farklılığından dolayı, karışımda topaklanmalar oluşmuş ve bunun sonucunda porozite oranı artmıştır. Bunun ana sebebi, topaklanmalar sonucu Al7075 matris malzemesi ile TiC takviye malzemesi arasında yeteri kadar yüzey bağı sağlanamamış ve bu noktalarda poroziteler gözlemlenmiştir. Karışımı fazla karıştırmak tozların yapısını bozduğu kanısına varılmıştır.

TiC takviye malzemesi oranındaki artışla ve malzemenin nano boyutta olması sebebiyle çekme mukavemeti %1 karışımı için artmıştır. Hazırlanan kompozit malzemelere bakıldığında 2 saate kadar çekme mukavemeti değerlerinin arttığı gözlemlenmiş, 2 saatten sonra bu değerler düşmeye başlamıştır. Bu demektir ki, karışımı 2 saatten fazla karıştırmak tozların yapısını bozduğu gibi çekme mukavemeti değerlerini de düşürmüştür. Sonuç olarak; öğütülen kompozit malzemelerin çekme dayanımı test sonuçları irdelendiğinde en yüksek mukavemet değerinin %1 TiC takviyeli 2 saatlik karışım numunesinde olduğu belirlenmiştir.



PRODUCTION OF ALUMINUM MATRIX TIC REINFORCED COMPOSITE MATERIAL BY POWDER METALLURGY MANUFACTURING METHOD AND ANALYSIS OF TENSILE STRENGTH TESTS

SUMMARY

Powder metallurgy (P/M) is a manufacturing technique that consists of the analysis of techniques such as powder metals, particle reinforced composites, ceramics, forging, and molding, and in which materials are produced by mixing metal powders with appropriate standards and specific values and sintering them under controlled atmospheric conditions. In other words, it is a method of producing parts by bringing metals into fine powder form, mixing them in a certain ratio, pressing them in precise molds at room temperature at pressures appropriate to predetermined technical values, and then sintering them under controlled atmospheric conditions.

This method consists of various stages such as powder production, blending the obtained powders, compacting the powders, sintering and optional additional processes (infiltration, oil impregnation, deburring, etc.).

This technique minimizes material waste and provides high precision and efficiency. In this method, powders that do not dissolve in each other are mixed using appropriate reinforcement materials, cold pressing and then sintering are performed to obtain the desired properties.

Composite materials constitute a category of advanced technological materials. These materials are the first materials developed by humanity to protect itself from external factors and have begun to enter almost every area of our lives in this century, and their areas of use are also rapidly expanding.

Parts produced with the P/M manufacturing method have many areas of use in the sector. These include various applications such as aircraft brake pads, high-power lights, electrical contact elements, bearings, armor-piercing bullets, automobile transmission shafts, orthopedic prostheses, nuclear fuel rods, rechargeable batteries, high-temperature filters, electronic capacitors, watch cases and jet engine turbines. In addition, this production method has many advantages such as low investment costs, flexibility of the equipment used, high efficiency and easy production of materials with different properties.

The mechanical alloying technique is a powder processing method used to improve solid state reactions and material properties. This method is usually carried out by grinding micron-sized metal powders in a high-energy mill. The mechanical alloying technique is used to mix a series of materials homogeneously and to form new, usually amorphous or nanocrystalline materials.

During the mechanical alloying process, the sufficient force applied to the powders grinds the powders and bonds are formed between the formed powder particles at low temperature. The internal structure of the final powder is usually finer than the powders

formed by atomization. The microstructure has particles of similar size formed by serial cooling methods. In addition, the powder particles are positioned between the balls. This causes elongation in the microstructure and increases the mechanical quality.

Technically, the mechanical alloying method is generally a suitable technique for the production of metal matrix composite materials. The reason is that it allows to obtain specialty at a high level from the qualities handled with other techniques. This method is to ensure that the reinforcement material is spread homogeneously within the matrix by removing the agglomeration of the reinforcement particles. Furthermore, if there is a fault in the reinforcement material as a result of this continuous impact, it eliminates it and prevents the composite material from deforming suddenly. With the use of this method and these powders, not only the unprocessed states but also the problems that arise with different techniques are eliminated.

Recently, aluminum matrix composites have been used in the automotive industry, especially in applications such as engine pistons, cylinder liners, brake discs and drums, thanks to their low cost, lightness, high strength, high elasticity modules and superior wear resistance.

Ceramics, especially silicon, which is frequently encountered in the kitchen, and kardur, the favorite of chefs, are used to strengthen the mechanical properties of aluminum matrix composites.

The main reinforcement materials used to strengthen the mechanical properties of aluminum matrix composite materials are ceramics such as TiC, SiC, B₄C and Al₂O₃. Since our country has rich boron resources, B₄C composite material stands out with its superior physical and chemical properties.

Composite materials are increasingly attracting the attention of researchers due to their low cost, lightness, superior mechanical and thermal properties. Composite materials are classified as metal, ceramic and polymer matrix composites depending on the matrix material. Metal matrix composite materials consist of a matrix material consisting of reinforcement elements in particle form and a metal or alloy. Metals such as aluminum (Al), titanium (Ti), magnesium (Mg), copper (Cu) are generally preferred as matrix materials, and metal nitrides (Si₃N₄, TiN, TaN, ZrN etc.), metal carbides (SiC, B₄C, WC etc.) and metal oxides (Al₂O₃, SiO₂, ZrO₂ etc.) are preferred as reinforcement elements.

Aluminum is often preferred as the matrix material in MMK materials because it has an almost 100% recycling rate, is easily formed, is lightweight, and has good electrical and thermal conductivity. It is used extensively due to these properties. Nowadays, aluminum and its alloys are used in a number of sectors such as construction, aviation, aerospace and the automotive industry.

In this study, Al matrix TiC reinforced composite materials were produced using the P/M manufacturing method. Powder mixtures were created by adding 0%, 1% and 5% TiC by weight to the Al7075 matrix material and 0.25% steric acid to each mixture. The resulting mixtures were mixed in a mechanical alloying test device for 1, 2, 5 and 10 hours. The obtained powder mixtures were produced by cold pressing at 450 Mpa pressure and sintered in a sintering furnace at 600 °C for 60 minutes. Then, the burrs on the parts were cleaned with roto finish process. Experiments were performed on the produced samples and their microstructures and tensile strength values were examined.

In the obtained samples, the distribution of matrix and reinforcement material powders in the chamber was observed homogeneously.

As a result of the experiments; differences were observed in the main components of the composite materials depending on the added TiC and effects were observed in the tensile strength values. It was observed that the particles were more agglomerated as the TiC ratio in the matrix increased. Due to this grain size difference that occurred as a result of the reinforcement element (TiC) being in nano size and the powders forming the Al7075 matrix being in macro size, agglomerates were formed in the mixture and as a result, the porosity rate increased. The main reason for this was that sufficient surface bonding could not be provided between the Al7075 matrix material and the TiC reinforcement material as a result of agglomerations and porosities were observed at these points. It was concluded that mixing the mixture too much disrupted the structure of the powders. With the increase in the TiC reinforcement material ratio and due to the nano-sized nature of the material, the tensile strength increased for the 1% mixture. When the prepared composite materials were examined, it was observed that the tensile strength values increased up to 2 hours, and these values began to decrease after 2 hours. This means that mixing the mixture for more than 2 hours disrupted the structure of the powders and also reduced the tensile strength values. As a result; when the tensile strength test results of the milled composite materials were examined, it was determined that the highest strength value was in the 2-hour mixture sample with 1% TiC reinforcement.



1. GİRİŞ

Son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmeler, özellikle mühendislik alanında kullanılan malzemelerden performans açısından daha yüksek beklentileri doğurmuştur. Farklı malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan kompozit malzemeler bu yüksek performans taleplerine yanıt verebilen önemli bir alternatif malzeme kategorisi olarak dikkat çekmektedir. Başlangıçta uzay ve havacılık sektöründe kullanılan araçların yapı malzemesi olarak tasarlanan ve üretilen kompozit malzemeler, zamanla özellikle otomotiv sektörü başta olmak üzere birçok alanda yaygın şekilde kullanılmaya başlamıştır. Kompozit malzemelerin üretiminde matris yapısı olarak polimer, seramik veya metal kullanılabilir. Metal matrisli kompozitler (MMK), yüksek sertlik ve aşınma direnci gibi mekanik özelliklerle birlikte düşük termal genleşme özelliklerini bir arada sundukları için yapı elemanı olarak tercih edilmektedir [1-4].

Kompozit malzemeler, ileri teknolojiye sahip malzemelerin bir kategorisini oluşturur. Bu malzemeler insanlığın kendini dış faktörlerden korumak amacıyla geliştirdiği ilk materyallerdir ve bu yüzyılda yaşamımızın neredeyse her alanına girmeye başlamış olup, kullanım alanları da hızla genişlemektedir. Kompozit malzemeler, düşük maliyet, hafiflik, üstün mekanik ve termal özellikleri nedeniyle araştırmacıların ilgisini giderek daha fazla çekmektedir [6].

T/M imalat yöntemiyle üretilen parçalar sektörde birçok alanda kullanım imkanı vermektedirler. Bunların arasında uçak fren balataları, yüksek güçlü ışıklar, elektrik temas elemanları, yataklar, zırh delici mermiler, otomobil şanzıman milleri, ortopedik protezler, nükleer yakıt çubukları, yeniden doldurulabilir piller, yüksek sıcaklık filtreleri, elektronik kapasitörler, saat kasaları ve jet motoru türbinleri gibi çeşitli uygulamalar bulunmaktadır. Ayrıca, bu üretim yöntemi düşük yatırım maliyetleri, kullanılan ekipmanların esnekliği, yüksek verimlilik ve farklı özelliklere sahip malzemelerin kolayca üretilmesi gibi birçok avantaja sahiptir [8].

Son zamanlarda, alüminyum matrisli kompozitler, maliyetin az olması, hafiflikleri, yüksek dayanımları, yüksek elastikiyet modülleri ve üstün aşınma dirençleri sayesinde

otomotiv endüstrisinde, özellikle motor pistonları, silindir gömlekleri, fren diskleri ve kampanalar gibi uygulamalarda kullanılmaktadır [7].

Alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini güçlendirmek için seramiklerden, özellikle de mutfakta sıkça karşılaşılan silisyum ve şefflerin gözdesi kardur kullanılmaktadır. Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin, mekanik özelliklerinin güçlendirmek için kullanılan takviye malzemelerinin başlıcaları TiC, SiC, B₄C ve Al₂O₃ gibi seramiklerdir. Ülkemizin zengin bor kaynaklarına sahip olması nedeniyle, B₄C kompozit malzemesi üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri öne çıkmaktadır [7].

Kompozit malzemeler, matris malzemesine bağlı olarak, metal, seramik ve polimer matrisli kompozitler olarak sınıflandırılmaktadır. MMK malzemeler, partikül formundaki takviye elemanları ile metal veya alaşımından oluşan bir matris malzemedan meydana gelir. Matris malzemesi olarak genellikle, alüminyum (Al), titanyum (Ti), magnezyum (Mg), bakır (Cu) gibi metaller, takviye elemanı olarak ise, metal nitürler (Si₃N₄, TiN, TaN, ZrN vb.), metal karbürler (SiC, B₄C, WC vb.) ve metal oksitler (Al₂O₃, SiO₂, ZrO₂ vb.) tercih edilmektedir [9]. Alüminyum, MMK malzemelerde, matris malzemesi olarak sıklıkla tercih edilir çünkü neredeyse %100 geri dönüşüm oranına sahiptir, kolayca şekillendirilebilir, hafiftir ve iyi elektrik ile ısı iletkenliğine sahiptir. Bu özellikleri sayesinde yoğun bir şekilde kullanılır. Bugünlerde alüminyum ve alaşımları, inşaat, havacılık, uzay ve otomotiv endüstrisi gibi bir dizi sektörde kullanılmaktadır [10].

Yapılan bu çalışmada alüminyum matrisli TiC partikül takviyeli kompozitler sterik asit ilavesiyle mekanik alaşımlama test cihazında üretilmiş. Üretilen numuneler soğuk presle preslendikten sonra, sinterleme fırınında sertleştirilmiş. Ardından üretilen bu numuneler çekme dayanımı test cihazında test edilerek çekme mukavemetlikleri karşılaştırılmıştır.

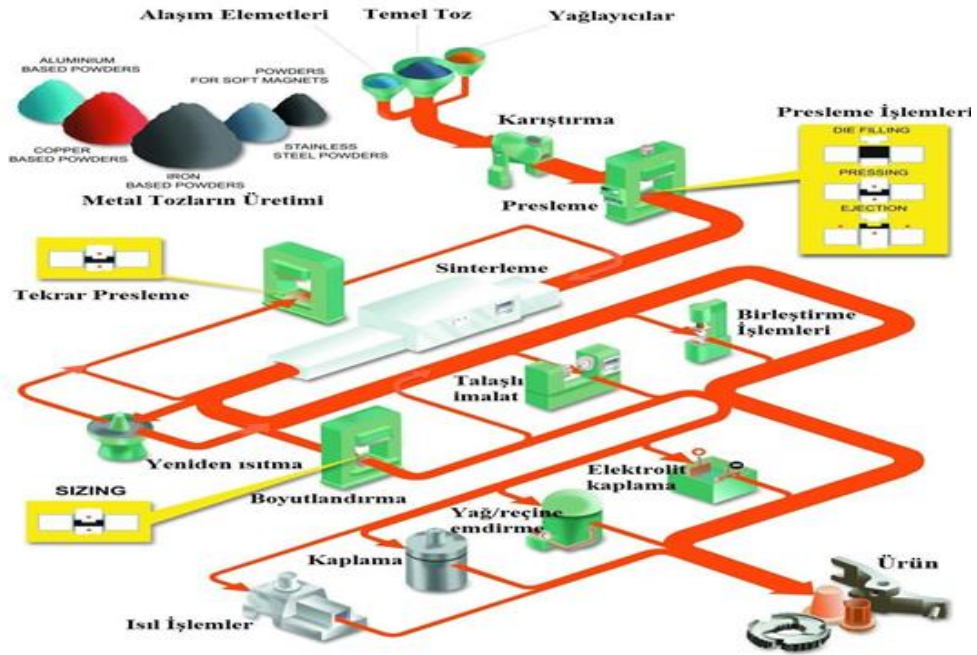
2. TOZ METALURJİSİ TEKNOLOJİSİ

2.1. Toz Metalurjisi (T/M)

T/M, metallerin veya metal alaşımlarının ince tozlar halinde üretilip işlenmesi ve bu tozların çeşitli yöntemlerle sıkıştırılarak veya sinterleme yoluyla katı cisimler haline getirilmesi sürecidir. Bu teknoloji, yüksek performanslı, hassas toleranslara sahip ve kompleks geometrilere sahip parçaların üretiminde kullanılır. Bu yöntem malzeme istafını minimize ederek yüksek hassasiyet ve verimlilik sağlar.

Bir diğer ifadeyle, metalleri ince toz formuna getirip, belirli oranda karıştırılarak, oda sıcaklığında hassas kalıplarda önceden belirlenmiş teknik değerlere uygun basınçlarda preslenmesi ve ardından kontrollü atmosfer koşullarında sinterlemek suretiyle parça üretme yöntemidir [5].

Bu yöntem toz üretimi, elde edilen tozların harmanlanması, tozların sıkıştırılması, sinterleme ve isteğe bağlı ek işlemler (infiltrasyon, yağ emdirme, çapak alma, vb.) gibi çeşitli aşamalardan oluşmaktadır. Bu tekniğe ait şematik gösterim şekildeki gibidir (Şekil 2.1.) [5].



Şekil 2.1. T/M yöntemiyle parça üretim akış şeması [1].

2.1.1. Toz metalurjisinin temel adımları

1. Toz Üretimi: Metallerin ve alaşımlarının ince tozlar halinde üretilmesidir. Bu, atomizasyon, mekanik öğütme, kimyasal çökeltme gibi yöntemlerle yapılabilir.
2. Karıştırma ve Hazırlama: Farklı metal tozlarının ve bağlayıcı rolünü üstlenen ilave malzemelerin homojen görünümlü bir toz karışımı şekline dönüştürülmesi.
3. Kalıplama: Toz karışımının bir kalıba doldurularak istenen şeklin elde edilmesi.
4. Sinterleme: Kalıplanmış tozların yüksek sıcaklıkta (ancak erime noktalarının altında) ısıtılmasıdır. Bu işlem sırasında, toz parçacıkları birbiriyle birleşerek mikro yapısal olarak sağlam ve yoğun bir yapı oluşturur.
5. Son İşlemler: Gerekirse, sinterlenmiş parçaların mekanik işleme, yüzey işlemleri veya termal işlemler gibi son işlemlerden geçirilmesi.

2.1.2. Toz metalurjisinin diğer imalat metotlarına göre avantajları

- Çok hassas toleranslarla ve karmaşık şekillerle parça üretimi yapılabilir.
- Üretim sürecinde malzeme israfı minimaldir.
- Üretilen parçaların mikro yapısı üzerinde iyi bir kontrol sağlanabilir.
- Farklı malzemeler birleştirilerek özelleştirilmiş özelliklere sahip alaşımlar oluşturulabilir.
- Talaş kaldırma işlemi olmadığından malzemedan kayıp olmaz.
- Yüzey kalitesi iyi parçalar üretilir.
- Malzeme özellikleri farklı tozlar karıştırıldığından başka bir imalat yöntemiyle yapmak mümkün değildir.
- Tozlardan dolayı mikro yapıdaki boşluklara sıcak yağlama işlemiyle yağ eklenir.
- Yüksek maliyet gerektirdiğinden seri imalatla kullanışlıdır.

2.1.3. Toz metalurjisinin diğer imalat metotlarına göre dezavantajları

- İmal edilen parça modelinde büyük farklılık olmaz.
- Parçalar preslendiğinden dolayı mikro yapısı tamamen homojen

olmayabilir.

- Bu homojenliği sağlamak için farklı yöntemler kullanılır.
- Seri retim yapmayan fabrikalarda ekonomik olarak fazla olduğundan kullanılmaz. Kullanılan kalıpların maliyeti yüksektir.
- Tolerans değerleri diğer işlemlere göre farklılık gösterir.

2.1.4. Toz metalurjisinin uygulama alanları

- Otomotiv Sanayi: Motor parçaları, dişliler, rulmanlar.
- Havacılık ve Uzay Endüstrisi: Hafif ve sağlam parçalar, ısıya dayanıklı bileşenler.
- Elektronik: Manyetik malzemeler, kontak malzemeleri.
- Tıbbi Cihazlar: İmplantlar, cerrahi aletler.

T/M, retim sürecinin verimliliği ve üretilen ürünlerin kalitesi açısından modern endüstrilerde kritik bir öneme sahiptir. Bu imalat tekniğiyle üretilen bazı parçalar görülmektedir (şekil 2.2.).



şekil 2.2. T/M ile imal edilen bazı parçalar.

2.2. Toz retimi

T/M’de, malzemelerin toz halinde üretilip çeşitli işlemlerle şekillendirilmesi ve kullanılması içeren bir bilim ve mühendislik dalıdır. Toz retim yöntemleri, farklı malzemeler için çeşitli teknikler kullanılarak toz haline getirilmesini sağlar.

T/M ile toz üretimi farklı metallerin ve alaşımların toz haline getirilmesi için kullanılan çeşitli yöntemleri içerir. Kullanılan bu yöntemler tozların özelliklerini belirlediği için oldukça önem arz etmektedir. Tozların özellikleri doğrudan preslenme tutumunu, sinterleme tutumunu ve üretilen malzemenin özelliklerini etkilemektedir [11].

Kompozit malzemelerin toz üretiminde kullanılan bu yöntem, kullanılan tozların pek çok özelliğini tayin eder. Kullanılan tozların geometrik yapısı üretim tekniğine bağlı olarak üçgensel, dairesel, karmaşık gibi farklılıklar gösterebilir. Aynı şekilde tozun yüzey şekli de kullanılan üretim tekniğine göre farklılık göstermektedir. Sonuç olarak; T/M ile kompozit malzemeler özelliklerine en uygun yöntem belirlenerek toz haline getirilmektedir. Kullanılan bu yöntemlerden başlıcaları aşağıda sıralanmıştır [13].

Toz üretiminde yaygın olarak kullanılan metotlar;

- Mekanik yöntemler
 - Talaşlı üretim
 - Öğütme
 - Mekanik alaşımlama
- Kimyasal yöntemler
- Atomizasyon yöntemi
- Elektrolitik ayrıştırma yöntemi

2.2.1. Mekanik yöntemler

Mekanik yöntemleme teorisinde temel amaç tozları en küçük boyuta çevirmektir. Bu metot dışardan darbe gerektirir. 4 temel unsur vardır. Bunlar; darbe, sürtünme ile aşınma, kayma (kesme) ve basmadır [11].

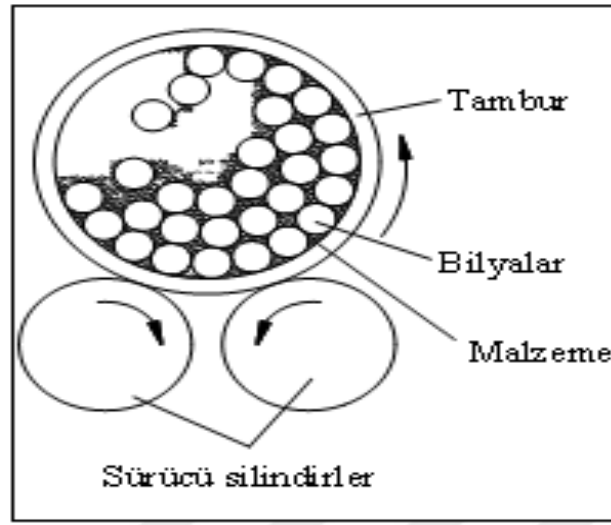
2.2.1.1. Talaşlı üretim

Talaşlı üretim malzemelerin kesme, delme, tornalama, frezeleme gibi yöntemlerle istenilen şekil ve boyuta getirilmesi sürecidir. Karmaşık ve büyük tozlar bu yöntem ile üretilir. Sonrasında, öğütülerek istenilen boyutlarda ince tozlar haline getirilir. Örnek olarak, yüksek karbonlu çelik toz üretimi verilebilir [13].

2.2.1.2. Öğütme

T/M ile toz üretim yöntemi olmasıyla beraber, diğer yöntemlerle üretilen tozların parçalanması için de kullanılan öğütme, genellikle bilyalı değirmenlerde

yapılmaktadır. Bu yöntemde, temel prensip kırılacak parçayla sert bir cisim arasında bir çarpışma oluşturmaktır (Şekil 2.3.) [21].

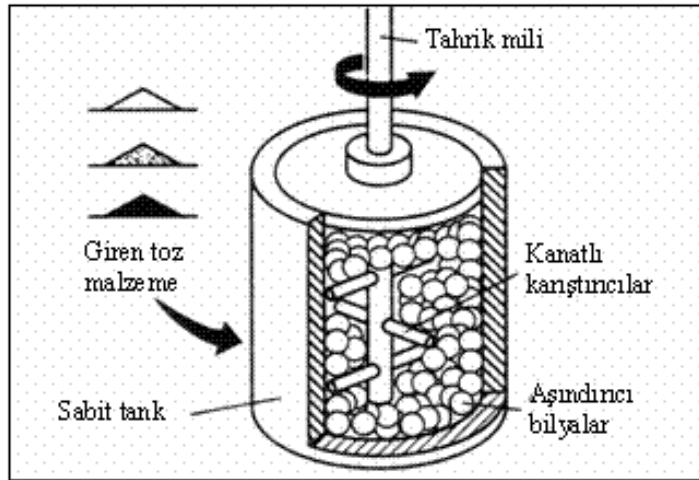


Şekil 2.3. Bilyalı değirmen ve öğütme [21].

Öğütülecek malzeme, içerisinde büyük çaplı sert ve korozyona karşı mukavemetli bilyaların olduğu kaba, önceden iri bir şekilde parçalanmış olarak koyulur. Kaba taneli parçalanacak malzeme öğütücü hazne içerisinde geniş çaplı, sert ve korozyona karşı mukavemetli bilyalar ile birlikte harmanlanarak veya döndürülerek, oluşan darbenin etkisiyle çok daha küçük toz şekline dönüşür. (Şekil 2.3) [21].

Öğütülecek olan malzeme gevrek bir malzeme ise, değirmen içerisinde bulunan bilyaların da çarpışmasıyla çok küçük tozlar haline gelir. Öğütülecek malzeme sünek bir malzeme ise, bilyalarla çarpışma neticesinde şekil değiştirerek yassılaşırlar. Sonuç olarak; elde edilen toz karışımının homojen bir karışım olması için kap içine konulacak malzemenin miktarı, boyutu ve bilyaların şekli oldukça önem arz etmektedir. Bilyaların hacmi, kap hacminin yaklaşık yarısı kadar olmalıdır ve öğütülecek malzeme miktarı da kap hacminin yaklaşık % 25'ine denk gelmelidir. Örnek olarak; demir – silisyum ve demir – krom gibi kırılğan malzeme olan demir alaşımları, mekanik olarak bilyalı değirmenlerde öğütülürler [21].

2.2.1.3. Mekanik alaşımlama



Şekil 2.4. Mekanik alaşımlama yöntemi [21].

Mekanik alaşımlama (M/A) tekniği, malzeme mühendisliğinde yenilikçi çözümler sunan ve çeşitli endüstrilerde kullanılan bir tekniktir. Bu yöntemin gelişmesi daha dayanıklı ve performanslı malzemelerin üretilmesine katkı sağlar. Katı ve kuru haldeki metal tozlarının bağlarının döndürmenin de etkisiyle mikro yapılarının birbirine kaynaklanması ve bu kaynakların kopmasını sağlayarak daha ince ve homojen bir mikroyapıda yüksek mukavemetli kompozit malzemelerin üretildiği bir imalat yöntemidir. M/A tekniğinde tozlar kapalı bir hazne içerisine konulur ve cihaz çalıştırılır (Şekil 2.4). Tozlar, shaft kolları ve içerisinde uygun şekilde büyüklükte seçilen bilyalar yardımı ile öğütülerek homojen halde küçük mikroyapıda ince toz haline dönüştürülür [21].

2.2.2. Kimyasal yöntemler

Kimyasal yöntemlerle toz üretimi, çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılan metal, seramik ve kompozit tozlarının üretilmesi amacıyla kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemler, belirli bir malzemenin özelliklerine ve istenen nihai ürün özelliklerine bağlı olarak seçilir. Başlıca kimyasal toz üretim yöntemleri şunlardır.

2.2.2.1. Kimyasal çöktürme

- Gaz Fazı Çöktürme (CVD): Gaz fazındaki bileşiklerin, bir yüzey üzerine kimyasal reaksiyonlar sonucu katı hale geçerek çökmesi işlemidir. Örneğin, titanyum tetraklorür ($TiCl_4$) gazı, hidrojen (H_2) gazı ile reaksiyona girerek titanyum tozu oluşturabilir.

- **Sıvı Fazı Çöktürme:** Çözeltideki iyonların bir reaktif ile reaksiyona girerek çözeltiden katı olarak ayrılmasıdır. Örneğin, kalsiyum karbonat (CaCO_3) tozu, kalsiyum klorür (CaCl_2) ve sodyum karbonat (Na_2CO_3) çözeltilerinin karıştırılması ile çöktürülebilir.

2.2.2.2. Elektrolitik yöntemler

Elektrolitik çöktürme, bir elektrolit çözeltisi içerisindeki metal iyonlarının bir katoda (negatif elektrot) çekilerek metal tozu şeklinde birikmesi işlemidir. Bu yöntem genellikle bakır, nikel ve demir gibi metallerin üretiminde kullanılır.

2.2.2.3. Redüksiyon

Metal oksitlerin, hidrojen veya karbon gibi indirgeyici gazlarla reaksiyona girerek saf metal tozu haline getirilmesidir. Örneğin, demir oksit (Fe_2O_3) hidrojen ile reaksiyona girerek demir tozu ve su buharı oluşturur.

2.2.2.4. Termal degradasyon

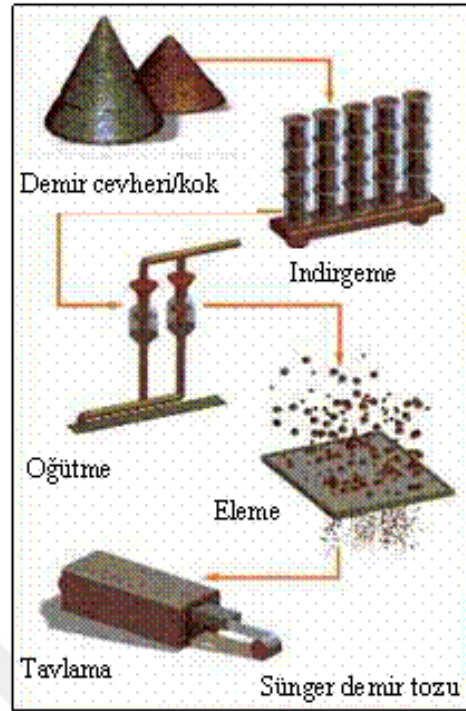
Bir bileşiğin yüksek sıcaklıklarda termal olarak ayrışması yoluyla toz üretimidir. Örneğin, amonyum paratungstatın (APT) yüksek sıcaklıklarda termal olarak ayrışması sonucu tungsten tozu elde edilebilir.

2.2.2.5. Sol-jel yöntemi

Bu yöntem, metal alkoksitlerin hidrolizi ve polimerizasyonu ile oluşturulan bir jel yapının kurutulması ve ardından kalsinasyon işlemleriyle toz haline getirilmesini içerir. Bu yöntemle çok ince ve homojen tozlar elde edilebilir.

Sünger-demir tozu kimyasal yöntemle üretilen uygulamaya örnek olarak verilebilir. Sünger demir, demir oksit cevherinin uygun şekilde indirgenerek süngerimsi bir yapıya dönüştürülmesiyle elde edilir. Magnetit (Fe_3O_4), kok ve kireç taşı ile harmanlanır ve seramik kaplara konulur. Oluşan karışım seramik kaplar içerisinde $1260\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki fırınlarda 68 saat bekletilir [13].

İndirgenme işleminin sona ermesiyle, sünger demir elde edilmiş olur. Aşağıdaki şekilde bu teknik ile üretilen demir tozu gösterilmiştir (Şekil 2.5.).



Şekil 2.5. Kimyasal yöntem kullanılarak demir tozu imalatı [13].

T/M ile üretim yönteminde toz üretimi genellikle katı sıvı gaz fazlarında yapılmaktadır. Metal tozu üretim yöntemleri arasında en uygun olanı oksit redüksiyonuyla üretim tekniğidir. Süreç, manyetik separatörden geçirilmiş demir oksit (magnetit) gibi saf bir oksit ile başlar. Böylelikle, oksitler genellikle öğütme ile daha ince tozlar haline getirilir. Öğütülen oksit doğrudan hidrojene (H) temas ettirilirse, indirgenme olayı meydana gelir. Oksitlerin indirgenmesi, karbonmonoksit (CO) veya hidrojen (H) gibi indirgeyici gazların termokimyasal reaksiyonları ile meydana gelir. Bu indirgenme süreci termodinamik ve kinetik açıdan önemli olduğundan sıcaklık bu süreçte kritik rol oynar [15].



Kapalı bir sistemde ürünün indirgeyiciye olan son oranını denge sabiti belirler [15].

$$(K = \text{PH}_2\text{O} / \text{PH}_2) \quad (2.2)$$

Denge çizgisinin alt kısmında metal stabil kalır ve indirgeme bu bölgede gerçekleşir. FeO ve H₂ içeren bir kapalı ve ısıtılmış kaptaki tepkime denge noktasına ulaşana kadar devam eder ve ardından durur. Eğer ortamda oluşan su sürekli olarak uzaklaştırılırsa, FeO'nun indirgenmesi devam eder. Kinetik açıdan bakıldığında, redükleyici gazın redüklenen metal üzerine yavaşça nüfuz ettiği gözlemlenir. Redüksiyon reaksiyonu, birçok prosese eş zamanlı olarak bağlıdır. Saf metal elde etmek için gazın oksit ara yüzeyi ile etkileşimi, içe

doğru hareket etmelidir. Bu nedenle gaz, malzemenin daha iç kısmına doğru nüfuz etmelidir. Redüksiyon hızı, gazın iç kısma difüzyon hızı, dışarı doğru difüzyon hızı veya ara yüzeyde gerçekleşen kimyasal reaksiyon hızı ile sınırlıdır. Kimyasal üretim yöntemleri arasında katının gazla bozunması, ısıl bozunma, sıvıdan çökeltme, gazdan çökeltme ve katı/katı tepkime sentezi bulunmaktadır [16].

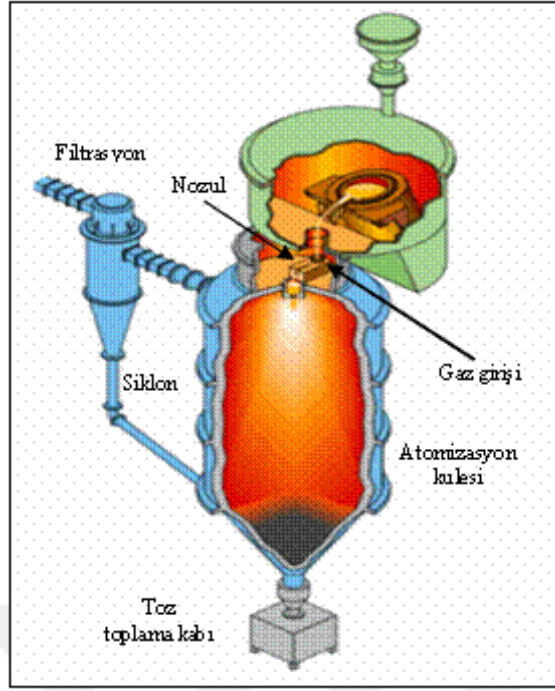
2.2.3. Atomizasyon yöntemi

Atomizasyon yöntemi, bir sıvının ince damlacıklar halinde parçalanarak bir gaz ortamına dağıtılması sürecidir. Bu yöntem, çeşitli endüstriyel ve bilimsel uygulamalarda kullanılır ve birkaç farklı şekilde gerçekleştirilebilir.

Atomizasyon yöntemi, metal tozlarının imalatında sıkça tercih edilen bir yöntemdir. Bu teknik, metalin sıvı haldeyken küçük damlacıklar halinde püskürtülmesi ve ardından hızlı bir şekilde katılaşması prensibine dayanır. Atomizasyon, özellikle metal tozlarının eşit boyutlarda ve homojen bir şekilde üretilmesini sağlar. Başlıca atomizasyon yöntemleri şunlardır.

2.2.3.1. Gaz atomizasyonu

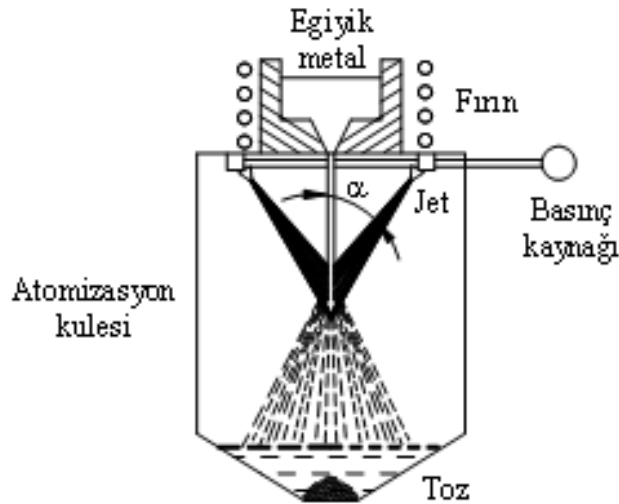
Eriyen metal, yüksek basınçlı gaz (genellikle argon, azot veya hava) ile püskürtülür. Gazın etkisiyle metal damlacıkları çok küçük parçalara ayrılır ve hızla soğuyarak katılaşır. Bu yöntem, yüksek saflıkta ve homojen yapıda metal tozları üretmek için uygundur (Şekil 2.6.).



Şekil 2.6. Düşey gaz atomizasyonu kesiti [13].

2.2.3.2. Su atomizasyonu

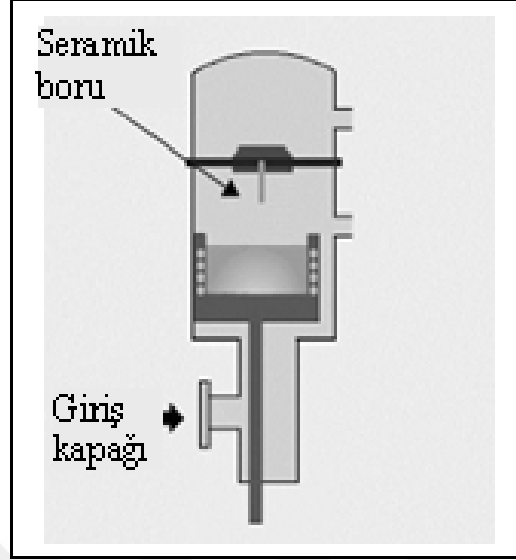
Eriyen metal, yüksek basınçlı su jetleri ile püskürtülür. Su atomizasyonu, gaz atomizasyonuna kıyasla daha iri ve düzensiz partiküllerin üretimine yol açar, ancak daha ekonomik bir yöntemdir. Genellikle demir esaslı alaşımlar için tercih edilir (Şekil 2.7.).



Şekil 2.7. Su atomizasyon işlemi [13].

2.2.3.3. Vakum atomizasyonu

Eriyen metal, düşük basınç altında (vakumda) püskürtülür. Bu yöntem, oksidasyona duyarlı metallerin ve alaşımların üretimi için tercih edilmektedir (Şekil 2.8.).



Şekil 2.8. Vakum atomizasyon yöntemi [13].

2.2.3.4. Santrifüj atomizasyonu

Metal, yüksek hızlı dönen bir disk veya kaptan püskürtülür. Santrifüj kuvvetleri sayesinde metal damlacıkları dışarıya doğru fırlatılarak ince tozlar haline gelir. Bu yöntem, genellikle özel alaşımlar ve yüksek erime noktasına sahip metaller için kullanılır.

2.2.4. Atomizasyon yönteminin avantajları

- Homojen partikül boyutu ve şekli
- Yüksek saflıkta toz üretimi
- Yüksek verimlilik ve tekrarlanabilirlik

2.2.5. Atomizasyon yöntemi uygulama alanları

- Metal tozu ile yapılan 3D baskı teknolojileri
- T/M ile parça üretimi
- Yüzey kaplama ve püskürtme işlemleri
- Elektronik ve manyetik malzemeler

Atomizasyon yöntemi ile üretilen metal tozları genellikle, otomotiv, havacılık, savunma sanayi ve elektronik gibi pekçok alanda geniş çapta kullanılmaktadır. Bu teknik, yüksek kaliteli ve performanslı malzemelerin üretimine olanak tanır.

2.2.6. Elektrolitik ayrıştırma yöntemi

Elektroliz ile toz üretimi, metallerin ve metal alaşımlarının ince tozlar halinde oluşturulması için kullanılan bir metottur. Bu metot, genelde metal iyonlarının su veya uygun bir elektrolit çözelti içinde çözülmesi ve daha sonra elektrik akımı kullanılarak metalin katot üzerinde birikmesiyle gerçekleştirilir. Sürecin ana hatları şunlardır;

2.2.6.1. Elektrolit seçimi

Üretilen tozun türüne bağlı olarak uygun bir elektrolit seçilir. Bu elektrolit genellikle metal tuzları (örneğin, bakır sülfat, çinko klorür) içerir ve iletkenliği sağlamak için asidik veya bazik olabilir.

2.2.6.2. Anot ve katot seçimi

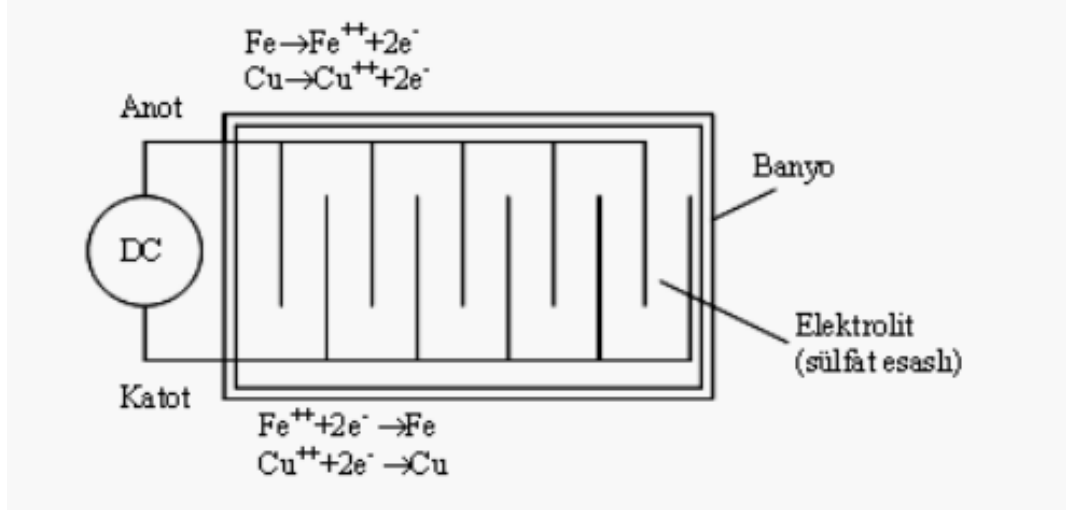
Elektroliz hücresinde, metalin çözündüğü anot (genellikle üretilmek istenen metalin kendisi) ve metalin çöktüğü katot (çoğunlukla paslanmaz çelik veya başka bir uygun iletken malzeme) bulunur.

2.2.6.3. Elektroliz süreci

Elektroliz sırasında, metal iyonları anottan elektrolit içine geçer ve katoda doğru hareket eder. Katotta, bu metal iyonları elektron kazanarak metalik forma indirgenir ve ince tozlar halinde çöker.

2.2.6.4. Toz toplama

Katotta biriken metal tozları, belirli bir süre sonunda toplanır. Bu tozlar daha sonra yıkanarak, kurutularak ve gerekirse ek işlemlerle saflaştırılarak kullanıma hazır hale getirilir (Şekil 2.9.).



Şekil 2.9. Elektrolitik ayırıştırma yöntemi ile toz üretimi

2.2.6.5. Elektrolitik ayırıştırma yönteminin avantajları

- Yüksek Saflık: Elektrolizle elde edilen metal tozları genellikle yüksek saflıkta olur.
- İnce Partikül Boyutu: Bu yöntem, çok ince ve homojen partikül boyutları elde etmek için uygundur.
- Kontrol Edilebilirlik: Elektroliz koşulları (sıcaklık, akım yoğunluğu, elektrolit bileşimi) ayarlanarak tozun özellikleri üzerinde hassas kontrol sağlanabilir.

2.2.6.6. Elektrolitik ayırıştırma yönteminin dezavantajları

- Enerji Tüketimi: Elektroliz işlemi yüksek miktarda elektrik enerjisi gerektirebilir, bu da maliyeti artırabilir.
- Özel Ekipman Gereksinimi: Elektroliz için özel kaplar, elektrotlar ve güç kaynakları gerekir.

2.2.6.7. Elektrolitik ayırıştırma yönteminin uygulama alanları

- Metalurji: Metal tozları, metal enjeksiyon kalıplama, sinterleme ve diğer metalurjik işlemlerde kullanılır.
- Elektronik: İnce metal tozları, elektronik bileşenlerin üretiminde kullanılabilir.
- Kimya Endüstrisi: Katalizör ve diğer kimyasal bileşenlerin üretiminde kullanılabilir.

Elektroliz ile toz üretimi, özellikle yüksek saflık ve spesifik özellikler gerektiren uygulamalar için önemli bir yöntemdir. Bu yöntem, teknoloji ve endüstri alanındaki çeşitli ilerlemeler sayesinde sürekli olarak gelişmektedir.

2.3. Toz Karakterizasyonu

Partikül yani parçacık olarak ifade edilen kavram gerçekte öğütülen tozların en son haline getirilmiş artık daha da öğütmesi söz konusu olmayan toz birimine verilen isimdir. Genelde T/M tekniği, dumandan (0.01- 1 mm) daha büyük ve kumdan (0,1-3 mm) daha küçük partiküller ile ilgilenir. Üretilen çoğu metal tozu yapısal olarak insan saçının çapı (25-200 mm) kadar bir boyutta bulunur. Tarama elektron mikroskobu (SEM) gibi yüksek büyütme özelliğine sahip cihazlarla, küçük mikro yapılarda bulunan metal tozlarının mikro yapıları ve karakteristik özellikleri incelenebilir [5].

2.4. Tozların Karıştırılması

Tozların karıştırılması, çeşitli endüstriyel alanlarda ve laboratuvar uygulamalarında yaygın bir işlemdir. İşlem, homojen bir karışım elde etmek amacıyla farklı toz bileşenlerinin bir araya getirilmesini içerir. T/M imalat tekniği seçilen uygun karıştırma yönteminden sonra üretimi tamamlanan tozlar geniş bir boyut aralığındadır. Elde edilecek malzeme için parçanın doldurma yoğunluğu ve sıkıştırılması için gerekli presleme sebebiyle belirli boyut aralıklarında olması gerekmektedir. Üretimin sona ermesiyle ham toz, farklı tane boyutlarına ayrılır ve burada istenilen boyut aralıkları belirlenerek karıştırılır [15].

Bu süreçte tozların homojen ve istenilen yapılarda bir karışım oluşturulması oldukça önemlidir, çünkü nihai ürünün özellikleri bu karışıma bağlıdır. Tozların karıştırılması aşağıdaki adımları içerir.

2.4.1. Tozların hazırlanması

Farklı metal tozları, katkı maddeleri ve bağlayıcılar gerekli oranlarda temin edilir ve hazırlanır.

2.4.2. Ön karıştırma

Tozlar öncelikle kaba bir şekilde karıştırılır. Bu aşamada genellikle karıştırıcılar veya tamburlar kullanılır. Amaç, tozların homojen bir şekilde dağılmasını sağlamaktır. Aşağıda T/M imalat tekniği ile üretim yapan bir firmanın toz karıştırma bölümü görülmektedir (Şekil 2.10.).



Şekil 2.10. Örnek toz karıştırma bölümü

2.4.3. Islak karıştırma

Bazı durumlarda, tozların homojen bir görünümde harmanlanması için sıvı bağlayıcılar eklenir. Bu yöntem, özellikle ince ve hafif tozların daha iyi karışmasını sağlar.

2.4.4. Karıştırma ekipmanları

Tozları karıştırmak için çeşitli ekipmanlar kullanılır.

- Çift konili karıştırıcılar: Tozların homojen bir görünümde harmanlanmasını sağlar ve genellikle büyük ölçekli üretimlerde kullanılır.
- V-karıştırıcılar: Daha küçük ölçekli üretimlerde tercih edilir ve farklı tozların karışımında etkilidir.
- Çarklı karıştırıcılar: Özellikle metal tozlarının karışımında kullanılır.
- Yoğun karıştırıcılar: Çok ince tozların karışımında kullanılır ve yüksek hızda karıştırma sağlar.

2.4.5. Homojenizasyon

Toz karışımı belirli bir süre harmanlanarak homojen bir görünüm elde edilir. Bu süreç, tozların eşit dağılımını ve karışımın her noktasında aynı özelliklerin olmasını sağlar.

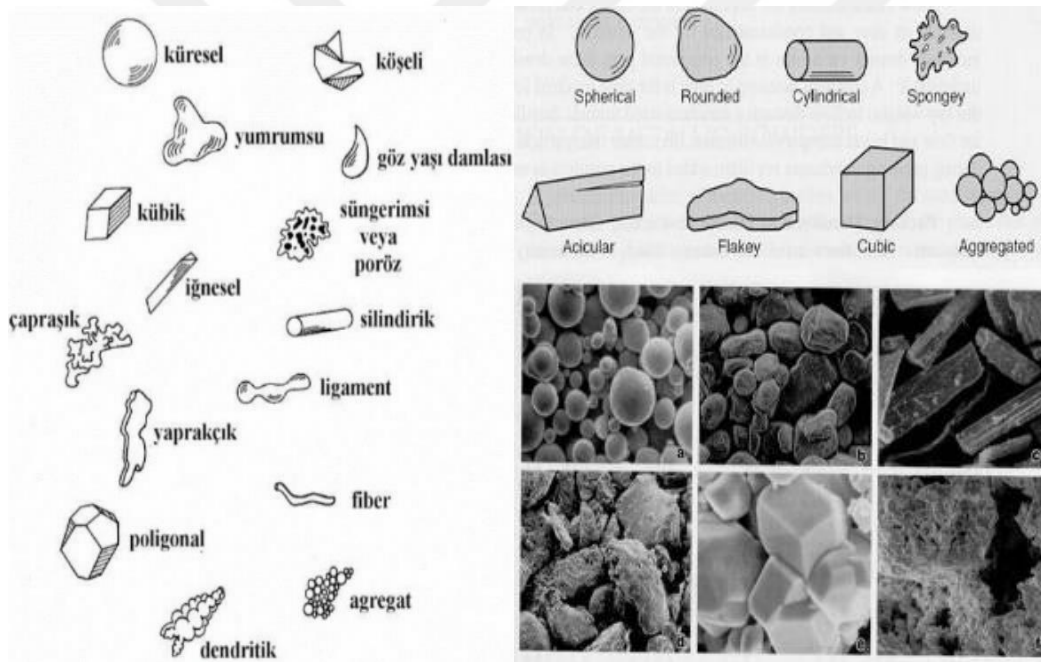
2.4.6. Kalite kontrol

Karışımın homojenliği ve istenen değerlere sahip olup olmadığı analiz edilir. Bu analizler genellikle mikroskopik analizler ve kimyasal bileşim testleri içerir.

2.4.7. Depolama ve kullanım

Homojen olarak karıştırılan tozlar, sıkıştırma (presleme) ve sinterleme gibi sonraki üretim adımlarına geçene kadar uygun sıcaklık, nem, atmosfer koşullarında saklanır.

T/M’de karıştırma işlemi, nihai ürünün mekanik, kimyasal ve fiziksel özelliklerini doğrudan etkiler. Bu nedenle, karıştırma sürecinde kullanılan ekipmanlar ve yöntemler dikkatle seçilmeli ve optimize edilmelidir. Karıştırılacak metal tozları küresel, iğneli, kübik, silindirik gibi farklı formlarda olabilir. Aşağıda farklı formlarda ki toz şekilleri görülmektedir (Şekil 2.11.).



Şekil 2.11. Toz şekilleri [5].

2.5. Presleme

Toz metalürjisinde presleme, metal tozlarının belirli bir şekle dönüştürülmesi için uygulanan bir prosedürdür. Bu süreçte, metal tozları bir kalıp içerisine konumlandırılır ve yüksek basınç ile sıkıştırılarak kompakt bir yapı oluşturulur. Presleme işlemi genellikle iki ana aşamada gerçekleşir.

2.5.1. Soğuk presleme

Soğuk presleme, metal tozlarının oda sıcaklığında preslenmesidir. Bu yöntem, genellikle aşağıdaki adımlardan oluşur:

- Toz hazırlığı: Metal tozları karıştırılır ve gerektiğinde bağlayıcılar eklenir.
- Kalıp Dolumu: Hazırlanan toz karışımı, istenen şekli verecek kalıba yerleştirilir.
- Presleme: Yüksek basınç uygulanarak tozlar sıkıştırılır ve kompakt bir yapı oluşturulur.

2.5.2. Sıcak presleme

Sıcak presleme, metal tozlarının yüksek sıcaklıklarda preslenmesidir. Bu yöntem, tozların sinterleme sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta preslenmesiyle gerçekleşir ve aşağıdaki adımlardan oluşur.

- Toz hazırlığı: Soğuk preslemede olduğu gibi, tozlar karıştırılır ve bağlayıcılar eklenir.
- Kalıp Dolumu: Hazırlanan toz karışımı kalıba yerleştirilir.
- Presleme ve Sinterleme: Tozlar hem yüksek sıcaklıkta ısıtılır hem de yüksek basınç uygulanarak preslenir. Bu aşamada sinterleme de gerçekleşir ve metal tozları arasında güçlü bağlar oluşur.

Aşağıda T/M tekniği ile üretim yapılan bazı metal tozlarının presleme sonuçları verilmiştir (Tablo 2.1.).

Tablo 2.1. Toz malzemeler için presleme basınçları [18].

Preslenen Malzeme	Ton / inch²	Basınç (Mpa)
Alüminyum	5 - 20	69 - 276
Prinç	30 - 50	414 - 687
Bronz	15 - 20	207 - 276
Karbon	10 - 12	138 - 165
Karbürler	10 - 30	138 - 414
Alümina	8 - 10	110 - 138
Ferritler	8 - 12	110 - 165
Demir (düşük yoğunluk)	25 - 30	345 - 414
Demir (orta yoğunluk)	30 - 40	414 - 552
Demir (yüksek yoğunluk)	35 - 60	483 - 827
Tungsten	5 - 10	69 - 138
Tantalyum	5 - 10	69 - 138

Çoğu metal tozu için presleme basıncı genellikle 100-800 MPa arasındadır. Presleme sırasında kullanılan tipik basınç aralıkları malzemeye göre değişir. Tablo 2.1. de görüldüğü üzere; en yüksek değerler demir ve prinç malzemesinde gözükmemektedir.

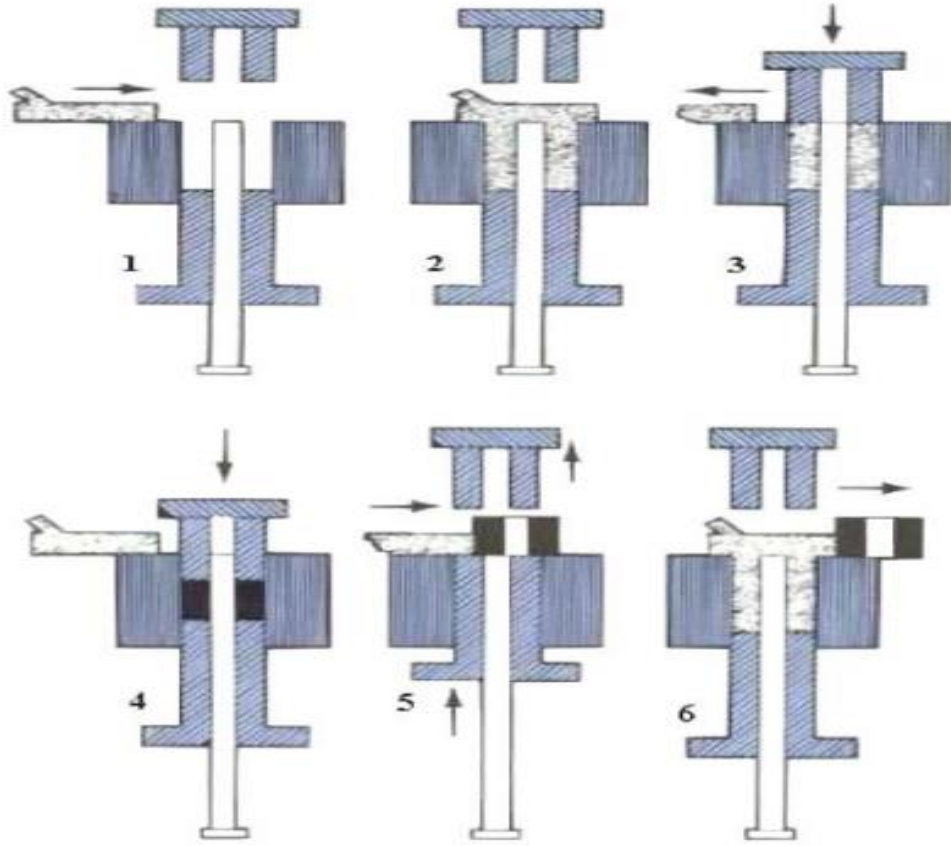
Uygulanan presleme basınçları, tozların daha sıkı bir şekilde paketlenmesini sağlar ve nihai ürünün yoğunluğunu artırır. Yüksek basınçla, toz parçaları arasında bağlanmayı kolaylaştırır, böylece mekanik dayanım artar. Uygulanan basınç miktarı ürünün boyutsal stabilitesini, sertliğini ve mukavemetini doğrudan etkiler.

Küçük boyutlu tozlar, daha büyük yüzey alanına sahiptir ve bu yüzden bağlanma daha kolaydır. Düzensiz şekilli veya pürüzlü tozlar, sıkışma sırasında sürtünme yaratabilir. Tozun nem içeriği ve bağlayıcılar, akışkanlık ve bağlanma mekanizmasını etkiler.

Presleme işlemi, toz metalurjisi, seramik üretimi ve kompozit malzeme imalatında ürün kalitesini belirleyen kritik bir adımdır. Basınç parametrelerinin doğru seçimi, hem üretim maliyetini azaltır hem de istenen özelliklere sahip bir ürün elde edilmesini sağlar.

2.5.3. Presleme yöntemleri

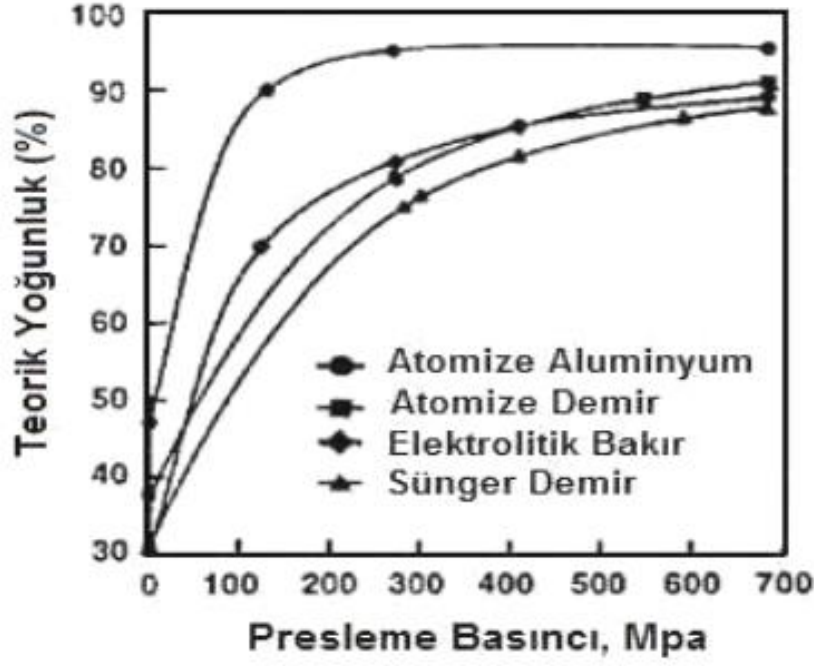
- Tek eksenli presleme: Metal tozları sadece tek bir yönde preslenir (Şekil 2.12.).



Şekil 2.12. T/M’de tek yönlü preslemeye ait işlem kademeleri [18].

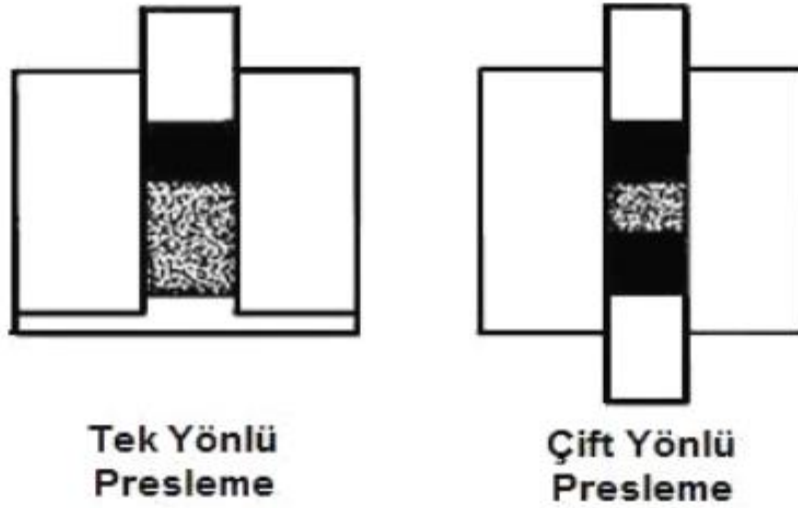
- Çok eksenli presleme: Metal tozları birden fazla yönde preslenerek daha homojen bir yoğunluk sağlanır.
- İzostatik presleme: Tozlar, her yönden eşit basınç altında preslenir. Bu yöntem daha homojen yoğunluk ve yapısal bütünlük sağlar.

Metal tozları preslenirken, oluşan bağlar arası mesafeler azaldığından teorik yoğunluk artar (Şekil 2.13.).



Şekil 2.13. Metal tozlarında presleme basıncının teorik yoğunluğa etkisi [18].

Tek yönlü preslemede, metal tozları sadece tek bir yönde preslenir. Çok yönlü preslemede ise birden fazla yönde preslenerek daha homojen bir yoğunluk sağlanır. Aşağıda bu yöntemlerin yoğunluk değişimi şematik olarak gösterilmiştir (Şekil 2.14.).



Şekil 2.14. Metal tozlarının tek ve çift yönlü preslenme sırasında yoğunluk değişiminin şematik gösterimi [18].

- Avantajlar:
 - Kompleks şekiller ve detaylı parçalar üretilebilir.
 - Düşük malzeme israfı.
 - Homojen mikro yapı.
- Dezavantajlar:
 - Yüksek kalıp maliyetleri.
 - Bazı tozların preslenmesi zor olabilir.
 - Presleme sonrası sinterleme süreci gerekebilir.

T/M de presleme işlemi, endüstriyel kullanımlarda çeşitli uygulamalarda yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlik kazandırır. Bu yöntem, özellikle otomotiv, havacılık, elektronik ve biyomedikal sektörlerinde geniş kullanım alanı bulur. Aşağıda örnek pres makineleri görülmektedir (Şekil 2.15.).



Şekil 2.15. Örnek preshane

2.6. Sinterleme

Sinterleme, toz halindeki malzemelerin, genellikle yüksek sıcaklıkta (ancak malzemenin erime noktasının altında) ısıtılarak birbirine bağlanması ve daha yoğun bir katı malzeme oluşturulması işlemidir. Bu süreç, metal, seramik ve bazı polimerlerin işlenmesinde yaygın olarak kullanılır.

Sinterleme süreci şu adımları içerir:

1. Toz Hazırlama: Kullanılacak malzemenin tozu hazırlanır ve belirli bir tane boyutuna getirilir.
2. Kalıplama: Toz, istenen şekli alacak şekilde bir kalıba doldurulur ve preslenir.
3. Isıtma: Kalıptaki toz, sinterleme sıcaklığına kadar ısıtılır. Bu sıcaklık, toz parçacıklarının yüzeylerinin birbirine bağlanmasını sağlayacak kadar yüksektir, ancak malzemenin erime noktasının altındadır.
4. Soğutma: Isıtma sürecinin ardından malzeme yavaşça soğutulur ve sinterleme işlemi tamamlanır.

Sinterleme işlemi, yüksek yoğunluk, sağlam mekanik özellikler ve azalmış gözeneklilik gibi faydalar sunar. Bu yöntem, özellikle karmaşık şekilli parçaların üretimi için mükemmel bir seçenektir.

Sinterleme sıcaklığının artmasıyla malzemenin elektrik iletkenliği, mukavemet, yoğunluk ve süneklik gibi özellikleri artmaktadır. Aşağıda bazı malzemelerin sinterleme sıcaklıkları ve süreleri verilmiştir (Tablo 2.2.).

Tablo 2.2. Farklı malzemeler için sinterleme sıcaklıkları ve süreleri [18].

Malzeme	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (dk)
Bronz	815	15
Bakır	870	25
Alimünyum	600	20
Prinç	870	20
Demir	1150	25
Nikel	1040	38
Paslanmaz Çelik	1150	40
Semente Karbürler	1460	90
Molibden	2050	120
Tungsten	2350	480
Tantalyum	2400	480
Titanyum	1200	120

Sinterleme sıcaklıkları ve süreleri, kullanılan malzeme, sinterleme yöntemi ve hedeflenen mekanik özelliklere göre değişiklik gösterir. Sinterleme parametrelerini belirlerken, malzemenin mikroyapısı, yoğunluğu ve mekanik özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır. Sinterleme sıcaklıklarının malzemedan malzemeye farklılık göstermesinin temel nedenleri, her malzemenin fiziksel, kimyasal ve kristal yapısının farklı olmasıdır.

Sinterleme sıcaklığı, genellikle malzemenin erime noktasının belirli bir yüzdesi civarındadır. Örneğin, metal tozları için sinterleme sıcaklığı genellikle erime noktasının %60-90'ı civarında olur. Erime noktası yüksek olan malzemeler (örneğin tungsten gibi refrakter metaller), daha yüksek sinterleme sıcaklıklarına ihtiyaç duyar.

Sinterleme sırasında atomlar, malzeme tanecikleri arasında difüzyon yoluyla hareket eder. Difüzyon, sıcaklığa oldukça bağlıdır ve her malzeme için farklıdır. Kristal yapısı, atom bağlarının gücü ve atomların boyutları gibi özellikler difüzyon hızını etkiler.

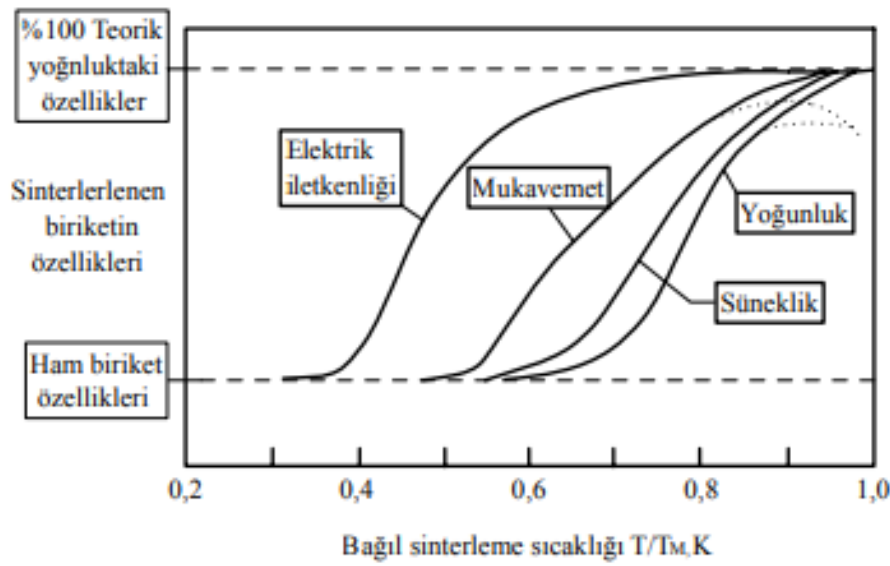
Seramikler gibi iyonik ya da kovalent bağlı malzemeler, daha yüksek bağlanma enerjisine sahip oldukları için metallere göre daha yüksek sinterleme sıcaklıkları gerektirir. Örneğin, alümina (Al_2O_3) gibi seramik malzemeler 1600-1800°C gibi çok yüksek sıcaklıklarda sinterlenirken, bakır gibi metaller 800-1000°C aralığında sinterlenebilir.

Metaller, nispeten düşük sıcaklıklardır. Örneğin, demir tozlarının sinterleme sıcaklığı 1100-1200°C dir. Seramikler, çok yüksek sıcaklıklardır. Örneğin, zirkonya

sinterlemesi için 1200-1500°C gerekebilir. Polimerler ise erime sıcaklıklarının yakınında veya altında, genellikle çok düşük sıcaklıklardır (150-300°C).

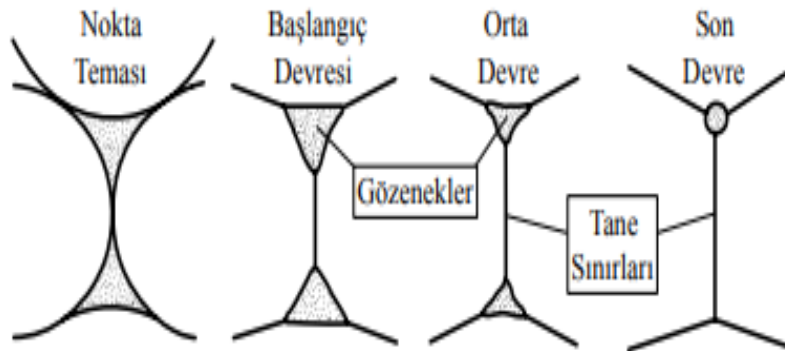
Katkı malzemeleri, sinterleme sıcaklığını düşürmek için kullanılabilir. Örneğin, düşük ergiyen bir metal veya cam fazı eklenmesi, malzeme arası bağlanmayı kolaylaştırır ve daha düşük sıcaklıkta yoğunlaşmayı sağlar.

Tanecik boyutu küçüldükçe, sinterleme sıcaklığı düşebilir çünkü daha küçük tanecikler daha yüksek yüzey enerjisine sahiptir ve difüzyon daha hızlı gerçekleşir.



Şekil 2.16. Sinterleme sıcaklığının toz biriket özelliklerine etkisi [17].

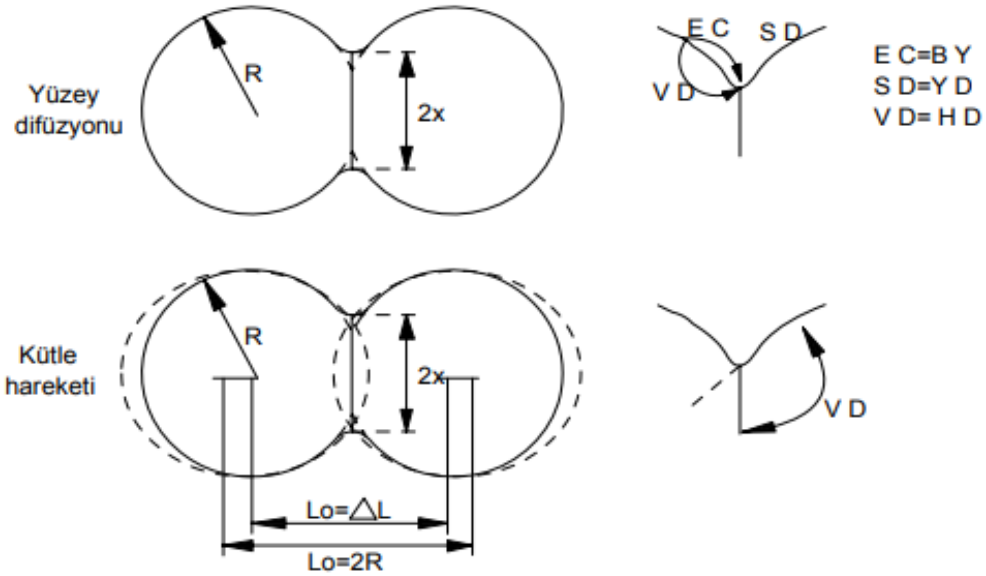
Sinterleme işleminin başında, kullanılan metal tozları nokta teması durumundadır. Numunelere uygulanan sinterleme işlemi başlangıç aşaması, orta aşama ve son aşama olarak 3 farklı şekilde gerçekleşir. (Şekil 2.17.) [17].



Şekil 2.17. Sinterleme işlemi sırasında nokta teması bağlarının ortaya çıkması [17].

Sinterleme işlemini sağlayan itici güç mevcut sistemin iç enerjisindeki düşüştür. Bu düşüşü sağlayan etkenler, partikül temas noktalarının artmasıyla büyüyen alanların sonucu yüzey alandaki azalma, gözeneklerin hacmindeki azalma veya gözeneklerin yuvarlaklaşması, birden fazla bileşen içeren sistemlerde katı fazın sıvı faz içinde çözünmesinden sonra ortaya çıkan konsantrasyon arasındaki farkının ortadan kaldırılmasıdır [17].

Sinterleme işlemi esnasında ortaya çıkan hacimsel değişimler, gözeneklerde ki yapı, şekil ve boyut farklılığı ve tane büyümesi gibi olaylar, mikro yapı içerisinde artan sıcaklıkla ortaya çıkan birtakım atomsal taşınım mekanizmalarıyla gerçekleşir. Yüzey difüzyonu işleminde boyutsal bir değişim olmamaktadır. Ancak Şekil 2.18’de görüldüğü üzere sinterleme sırasında hacim difüzyonu boyutsal değişime sebep olmaktadır. Şekilde, BY = buğulanma-yoğunlaşma, YD = yüzey difüzyonu, VD = gözenek difüzyonu, HD = hacim difüzyonudur [17].



Şekil 2.18. Küreden-küreye sinterlemede; iki tür sinterleme mekanizmasında boyun büyümesi için yüzeyden malzeme taşıma mekanizması, yüzey kaynaklarından sağlanması [17].

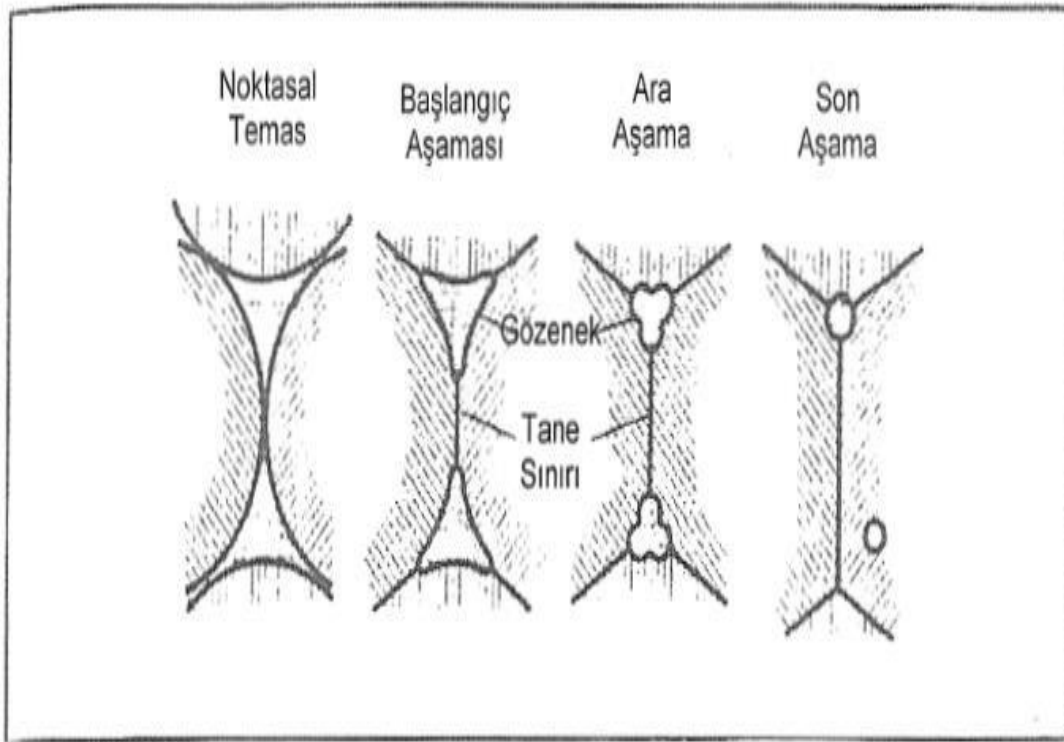
Sinterleme işlemleri genellikle 2 farklı şekilde gerçekleştirilir.

1. Katı faz sinterlemesi
2. Sıvı faz sinterlemesi

2.6.1. Katı faz sinterlemesi

Sinterlemenin tek bir malzemeden oluştuğu işlemlerde katı hal sinterlemesi kullanılmaktadır. Tek fazlı parçacıklardan oluşan kompozitlerin sinterlenmesi esnasında mikroyapıda ortaya çıkan değişiklikler, malzemenin boyutu ile beraber mekanik ve fiziksel özelliklerinde de değişimler ortaya çıkarabilmektedir. Sinterleme işlemi için itici güç sistemini serbest enerjisinin düşürülmesidir. Parçacıkların ve tane boyutlarının büyümesi, toplam tane sınırı alanının azalması, serbest enerjide azalmaya neden olmaktadır.

Sinterleme işleminin başlaması gevfek toz veya tam yoğunluğa yakın partiküller halinde olabilir. Sinterleme evresi, gevfek tozlardan başlayıp küresel gözenek oluşum sürecine kadar devam etmektedir (şekil 2.19.). İlerleyen süreçte boyunların zamanla kaybolduğu, tanelerin büyüyerek gözeneklerin ise küçüldüğü görülmektedir [17].



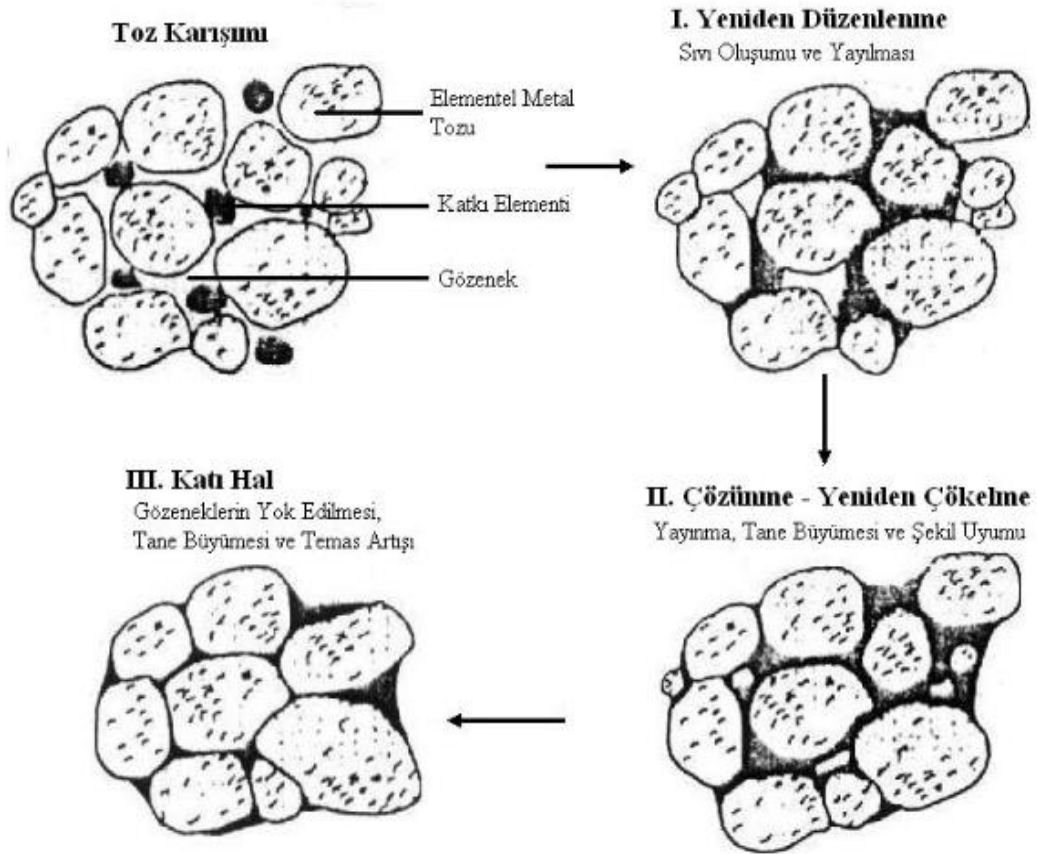
şekil 2.19. Katı faz sinterlemesinin aşamaları [17].

2.6.2. Sıvı faz sinterlemesi

Sinterleme sırasında meydana gelen sıvı faz genelde parçacıklar arası taneleri birbirine bağlayarak yapısında hızlı yayınının oluştuğu lehim meydana getirerek sinter hızını yükseltmektedir. İlk olarak tozlar sıvılaşma noktasına kadar ısıtılır ve katı hal sinterlemesi ile birbirine bağlanarak büyük oranda yapısal olarak yoğunlaşma oluşur.

Diğer kadamede ki yoğunlaşma sıvı fazın etkisi ile bağlantılı olup sıvı fazın katı bağlarını çözmesi neticesinde yeniden yapılanması ile oluşur. Çözelti yeniden çökelme olarak isimlendirilen esnada küçük tane parçacıkları sıvı içerisinde çözünerek yayılır ve sonrasında büyük tanelerin üzerine çöker. Katı tanelerin çözünürlüğü tane boyut aralığı ile ters orantılı olup ilk olarak küçük taneler sıvı faz içerisinde çözünerek zamanla tane sayısı azalır ve tane boyutunda artma gözlemlenir [17].

Sıvı faz sinterlemesinde sıvı faz ortaya çıkması için iki ana mekanizma bulunmaktadır. Bunlardan ilki, en yaygın olan farklı kimyasal bileşimlerde toz kullanılan yöntemdir. Sinterleme işlemi esnasında farklı oran ve yapılarıdaki tozların birbiri ile etkileşimleri sonucu sıvı faz oluşur. İkincisi ise sıvı fazın kompakt tozda bulunan bileşenlerinden birinin ergimesi veya ötektik faz oluşumu ile meydana gelmesidir. Oluşan bu sıvı faz çözünme durumuna göre sinterleme sırasında alaşım oluşumu ile ortadan kalkabilir (geçici sıvı faz sinterlemesi veya reaktif sinterleme) veya sinterleme işlemi süresinde mikroyapıda sürekli olarak bulunabilir (Şekil 2.20.) [19].



Şekil 2.20. Geleneksel sıvı faz sinterleme aşamaları ve mikroyapı değişimleri [20].

2.6.3. Sinterleme atmosferi

Sinterleme atmosferi, metal ve seramik parçaların sinterlenmesi sırasında kullanılan gaz karışımını ifade eder. Bu atmosfer, sinterleme işlemi sırasında malzemenin kimyasal ve fiziksel özelliklerini kontrol etmek için kritik bir rol oynar. Sinterleme atmosferinin ana işlevleri şunlardır.

- Oksidasyonu Önlemek: Sinterleme atmosferi, malzemenin oksitlenmesini önlemek için oksijensiz veya düşük oksijenli olmalıdır. Bu, malzemenin yüzeyinde istenmeyen oksit tabakalarının oluşmasını engeller.
- Karbon Potansiyelini Kontrol Etmek: Karbon içerikli atmosferler, demir esaslı malzemelerin karbürlenmesini veya dekarbürlenmesini kontrol eder. Bu, malzemenin sertliğini ve dayanıklılığını ayarlamak için önemlidir.
- Termal İletim ve Isı Dağılımı: Atmosfer, ısıнын eşit bir şekilde dağıtılmasına yardımcı olur, böylece sinterleme işlemi sırasında malzemenin homojen bir şekilde ısınması sağlanır.
- Reaktif Ortam Sağlamak: Bazı sinterleme işlemlerinde atmosfer, belirli kimyasal reaksiyonları teşvik etmek için aktif bir rol oynar. Örneğin, indirgeme atmosferleri, metal oksitlerin metalik forma dönüşmesini sağlar.

Sinterleme atmosferi genellikle aşağıdaki gazlardan biri veya bir kombinasyonunu içerir. En çok kullanılan sinter atmosferleri şunlardır;

- Hidrojen (H_2): İndirgeme atmosferi sağlamak için kullanılır.
- Azot (N_2): Nötr atmosfer sağlar ve oksidasyonu önler.
- Argon (Ar): İnert atmosfer sağlamak için kullanılır.
- Metan (CH_4) veya Karbon Monoksit (CO): Karbon potansiyelini ayarlamak için kullanılır.

Sinterleme atmosferinin seçimi, sinterlenecek malzemenin türüne, istenen nihai özelliklere ve uygulanan sinterleme yöntemine bağlıdır. Optimal atmosfer koşulları sağlanarak, malzemenin mekanik özellikleri ve yapısal bütünlüğü iyileştirilebilir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Mekanik Alaşımlama Yöntemi

M/A, katı hal reaksiyonlarını ve malzeme özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılan bir toz işleme yöntemidir. Bu yöntem genellikle mikron boyutunda metal tozlarının yüksek enerjili bir değirmende öğütülmesi ile gerçekleştirilir. M/A, bir dizi malzemenin homojen bir şekilde karıştırılması ve yeni, genellikle amorf veya nanokristalin yapıdaki malzemelerin oluşturulması için kullanılır.

M/A işlemi esnasında tozlar için uygulanan yeterli orandaki kuvvet tozları öğütür ve oluşan toz partiküllerin düşük sıcaklıkta aralarında bağlar oluşur. Son tozun iç yapısı, çoğunlukla atomizasyonla oluşan tozlardan daha ince yapıdadır. Mikroyapı seri soğutma yöntemleri ile oluşturulan, birbirine benzeyen boyutta partiküllere sahiptir. Ayrıca, toz partikülleri, bilyeler arasına konumlanır. Bu da mikroyapıda uzamalara sebebiyet vererek mekanik niteliği artırır [21].

Teknik olarak M/A yöntemi, genellikle MMK malzemelerin istihali amacıyla elverişli bir tekniktir. Sebebi ise diğer teknikler ile ele alınan niteliklerden üst düzeyde iyilikte spesiyalite elde etmeye izin veriyor oluşudur. Bu yöntem, takviye partiküllerinin yığılması durumundan uzaklaştırılarak, matris içerisinde takviye malzemesinin homojen bir şekilde yayılmasını sağlamaktır. Bunun ötesinde, bu devamlı darbe sonucunda takviye malzemesinin içinde hata var ise onu ortadan kaldırır ve kompozit malzemenin bir anda deforme olmasını engeller. Bu yöntemin kullanımıyla ve bu tozlarla, yalnızca işlenmemiş halleri değil, farklı tekniklerle ortaya çıkan problemler ortadan kaldırılmış olur. [22].

3.1.1. Mekanik alaşımlama süreci

1. Hazırlık: Alaşım oluşturulacak metal ve/veya seramik tozları hazırlanır. Bu tozlar genellikle mikron boyutunda ve farklı kompozisyonlardadır.
2. Öğütme: Yüksek enerjili bilyalı değirmenlerde tozlar karıştırılır ve öğütülür. Bu aşamada bilyaların kinetik enerjisi tozlara aktarılır ve mekanik deformasyonlar oluşturulur.

3. Soğuma ve Dinlenme: Öğütme işlemi genellikle belirli aralıklarla durdurularak tozların soğumasına izin verilir. Bu, aşırı ısınmanın önlenmesi ve malzeme yapısının bozulmaması için önemlidir.
4. Tekrarlama: Öğütme ve soğuma işlemi, istenen alaşım ve malzeme özellikleri elde edilene kadar tekrarlanır.

3.1.2. Mekanik alaşımlamanın avantajları

- Homojen Mikroyapı: Yüksek enerjiyle yapılan mekanik karıştırma, homojen mikroyapılar oluşturur.
- Amorf ve Nanokristalin Yapılar: Bu yöntem, geleneksel yöntemlerle elde edilemeyen amorf ve nanokristalin yapılar oluşturabilir.
- Yüksek Çözünürlük: M/A, normalde çözünmeyen elementlerin çözünürlüğünü artırabilir.
- Geniş Alaşım Çeşitliliği: Farklı metal ve seramik tozlarını birleştirerek geniş bir alaşım yelpazesi oluşturma imkanı sağlar.

3.1.3. Mekanik alaşımlamanın uygulama alanları

- Havacılık ve Uzay Sanayii: Yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip malzemeler.
- Otomotiv Endüstrisi: Aşınma direnci yüksek ve hafif malzemeler.
- Elektronik ve Manyetik Malzemeler: Özel elektriksel ve manyetik özellikler gerektiren malzemeler.
- Medikal Uygulamalar: Biyouyumlu ve dayanıklı implant malzemeleri.

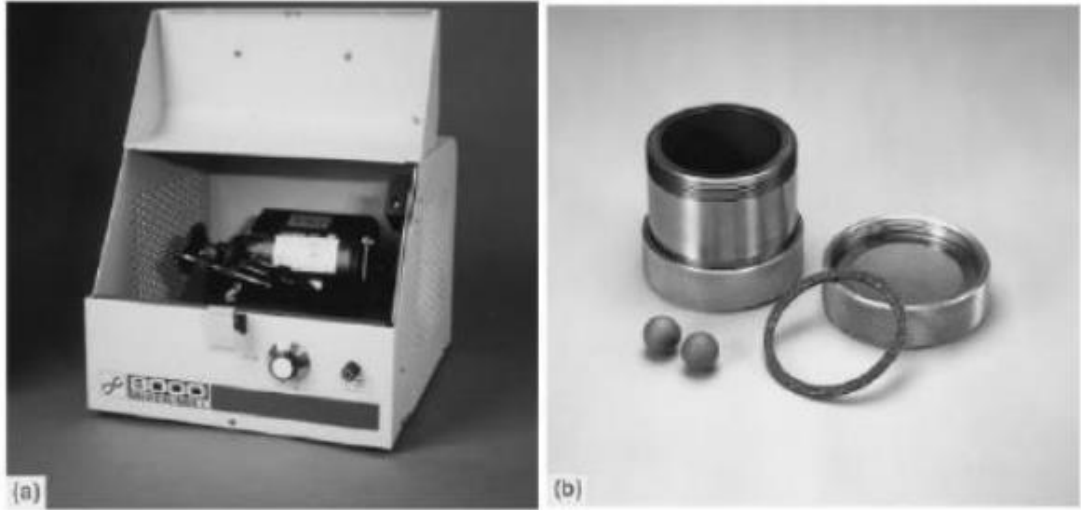
M/A yöntemi, özellikle yeni ve gelişmiş malzeme tasarımında önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır. T/M ve malzeme bilimi alanındaki araştırmalar, bu yöntemin potansiyelini ve uygulama alanlarını sürekli genişletmektedir.

3.2. Kullanılan Öğütücü Türleri

MA'nın önemli bir bölümünü içeren öğütme, tane boyutunu küçültme, karıştırma ve alaşımlama gibi safhaları kapsar. Bu safhalarda amacına yönelik birçok öğütücü kullanılır. Karıştırıcılar veya öğütücüler kapasiteleriyle, öğütme niteliğiyle, ısıtma ve soğutma gibi ek kısımlarıyla değişiklik gösterirler [22].

3.2.1. SPEX tipi öğütücü

SPEX tipi karıştırıcı değirmenler tek seferde yaklaşık 10-20 gr arasında toz öğütebilen laboratuvar çalışmaları sebebiyle kullanılmaktadırlar. Cihaz içerisinde bulunan hazne, tozu ve öğütme bilyelerini hapseder ve dadıkada binlerce sağa-sola ve ileri-geri hareket ederek çalışır. Haznenin bu hareketleri sonucunda bilyeler tozlara çarpar ve haznedeki tozu hem karıştırır hem de öğütür. SPEX tipi öğütücülerin bu şekilde hızlı çalışmasından ötürü sıcaklık artışı ve koruyucu atmosfer karşılaşılan genel problemlerdir. Bu tip M/A cihazlarının yeni çıkan modellerinde öğütme zamanını uzatmak için sıcaklık artışını minimize edecek basınçlı soğutma kullanılmaktadır. Aşağıda SPEX tipi değirmen ve içerisindeki parçaların detaylı görünümü görülmektedir (Şekil 3.1.) [21].



Şekil 3.1. SPEX tipi öğütücü (a) SPEX bilyeli değirmen, (b) SPEX 8000 tipi karıştırıcının; öğütme kabı, kapak, conta ve bilyelerden oluşan öğütme seti [21].

3.2.2. Planetary tipi öğütücü

M/A test cihazıyla kompozit malzeme üretimi yapabilmek için bir diğer karıştırıcı da “planetary” bilyeli değirmendir (Şekil 3.2.). Bu öğütücüde birkaç yüz gram toz tek seferde öğütülebilir. Bu tip öğütücüler içerisinde bulunan haznelerinin gezegen şeklinde hareketinden ötürü “planetary” adını alırlar. Bunlar dönme hareketi yapan bir disk üzerine konumlandırılırlar ve kendi eksenleri etrafındaki salınımlarını, özel bir mekanizmadan alırlar. Haznelerin kendi eksenleri etrafında dönmesiyle oluşan merkezkaç kuvveti ve dönme hareketi yapan destek diskin de oluşturduğu ekstra kuvvetle birlikte, haznenin içerisinde ufalanan kompozitlere ve öğütmeyi kolaylaştıran

bilyelere etki ederler. Hazne ve dönen destek diskı zıt yönlerde döndüğünden merkezkaç kuvvetler sırayla ile benzer ve ters yönde etki gösterir. Yapılan bu mekanik alaşımlama ile, hazne içerisinde bulunan bilyelerin haznenin iç duvarlarından aşağı yönlü kaymasına sebep olur. Sürtünme etkisi, ufalanan kompozit malzeme ve öğütücü bilyelerinin hazne içerisinde duvarlara çarpmasıyla serbest halde dolaşmaya devam eder. Yukarıda tanımlanan SPEX tipi öğütücülere kıyasla daha düşük enerjili öğütücüler olarak düşünülebilir [21].

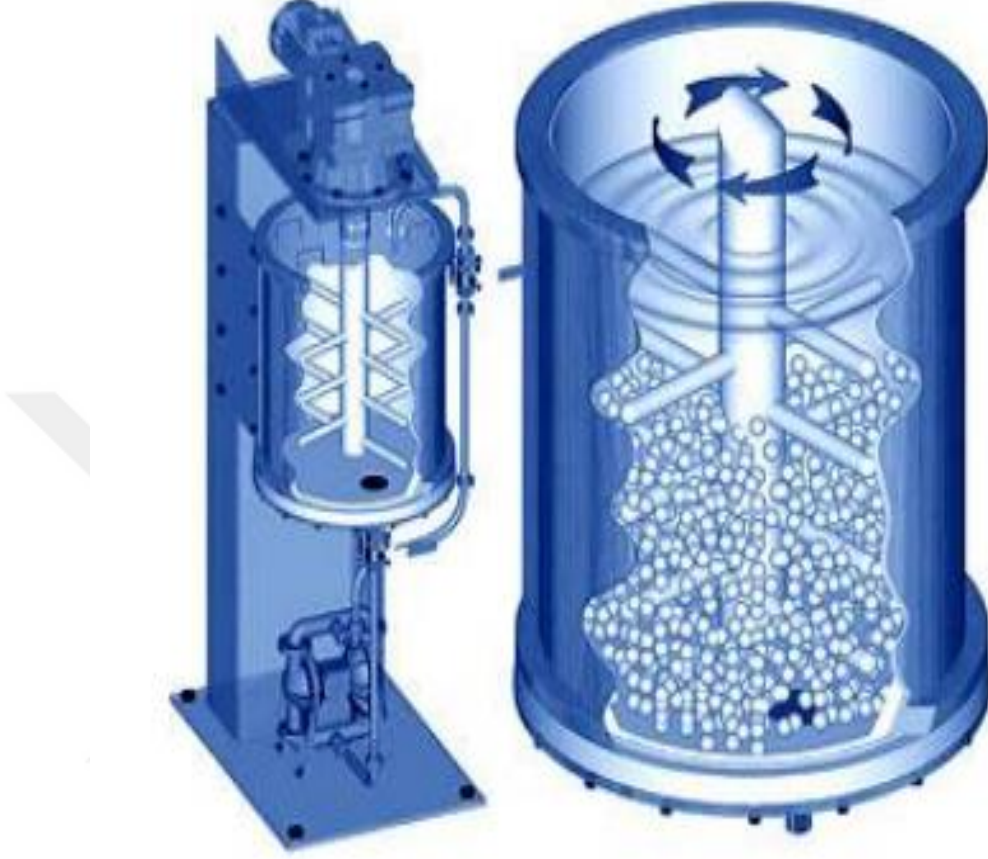


Şekil 3.2. Planetary tipi bilyeli öğütücü değirmen [22].

3.2.3. Atritör tipi öğütücü

Bir diğer M/A yönteminde kullanılan öğütücü çeşidi de atritör tipi öğütücülerdir. Bu tip öğütücüler içerisinde birkaç farklı karıştırıcılar bulunan dikey şekilde bir silindirden oluşur. Biri diğerine göre dik konumlandırılan öğütücüler, kazan içerisinde bulunan öğütmeye yardımcı bilyelere enerji verir. Bilyelerin, hazne duvarıyla, kendileri arasında ve karıştırıcı dönen şaft arasındaki çarpışmalarıyla tozların hacminin daralmasına sebep olur. Çalışma şekli şu şekildedir. Bir motor vasıtasıyla öğütücü cihaz çalıştırılır ve mil dönmeye başlar. Oluşan dönmenin etkisiyle, bilyeler ve tozlar harmanlanmaya başlayarak ve karıştırma işlemi devam eder. Atritör tipi öğütücüler, içerisinde tek seferde birçok miktarda tozun (0,1 kg.'dan 40 kg'a kadar) öğütülebildiği değirmenlerdir (Şekil 3.3.). M/A işlemi farklı atmosfer şartlarında

yapılabilir. Atritör tipi öğütücülerle yapılan M/A işleminde, cihazın dış bölümünde dolaşan soğutma sıvısı vasıtasıyla işlem devam ederken artan sıcaklıkta kontrol altında tutulmaktadır [21].



Şekil 3.3. Atritör tipi (dikey) bilyeli öğütücü değirmen [21].

Aşağıda M/A tekniğinde kullanılan bazı işlem kontrol katkısı kimyasal formülleri ve farklı çalışmalarda kullanılan miktarları görülmektedir (Tablo 3.1.).

Tablo 3.1. İşlem kontrol katkısı, kimyasal formülleri ve farklı çalışmalarda kullanılan miktarları [22].

İşlem Kontrol Katsayısı	Kimyasal Formül	Miktar
Alkol	-	-
Benzen	C ₆ H ₆	-
C wax	H ₃₅ C ₁₇ CONHC ₂ H ₄ NHCOC ₁₇ H ₃ 5	1,5 %ağ
Didodesil dimetil amonyum sülfat	C ₂₈ H ₅₉ NO ₂	-
Didodesil dimetil amonyum asetat	C ₃₆ H ₇₅ NO ₂	-
Dodesin	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ CH ₃	-
Etanol	C ₂ H ₅ OH	4 %ağ
Etilenbisdistearamid Nopcowax-22 DSP	C ₂ H ₂ -2(C ₁₈ H ₃₆) ₁₀	2 %ağ
Grafit	C	0,5 %ağ
Heptan	CH ₃ (CH ₂) ₅ CH ₃	0,5 %ağ
Hekzan	CH ₃ (CH ₂) ₄ CH ₄	-
		5 %ağ
Lityum-1,2 bisdodecyloxy carbonyl sulfasuccinate	-	-
Metanol	CH ₃ OH	-
		1 %ağ
		3 %ağ
		4 %ağ
Oktan	CH ₃ (CH ₂) ₆ CH ₃	1 %ağ
Parafin	-	-
Petrol	-	3 damla
		0,5-2
Polietilen glikol	HO(CH ₂ CH ₂) _n OH	%ağ
Slikon gres	-	-
Sodyum klorit	NaCl	2 %ağ
Sodyum-1,2 bis(dodesilcarbonyl) etan-1-sulfonate	-	-
Stearik asit	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COOH	1 %ağ
		4 %ağ
		0,5-3
		%ağ

İşlem kontrol katkıları karışımlardaki homojenizasyonu sağlamak ve tozların daha kolay şekilde birleşerek tek bir görünüm elde etmek için kullanılmaktadır. Aşağıda bu katkıların ergime ve kaynama noktaları görülmektedir (Tablo 3.2.).

Tablo 3.2. M/A işleminde kullanılan farklı işlem kontrol katkılarının ergime noktaları ve kaynama noktaları [22].

İşlem Kontrol Katsayısı	Ergime Noktası (°C)	Kaynama Noktası (°C)
Dodesin	-12	216,2
Etil asetat	-84	76,5-77,5
Etil alkol	-130	78
Etilen bidisteramit	141	259
Heptan	-91	98
Hegzan	-95	68-69
Metil alkol	-98	64,6
Polietilen glikol	59	205
Stearik asit	67-69	183-184

3.3. Matris Malzemeleri

Matris malzemeleri, kompozit malzemelerdeki iki ana bileşenden biridir. Diğeri ise takviye malzemeleridir. Matris, karışımdaki takviye malzemesini birlikte tutar ve ona şekil verir. Matris malzemeleri genellikle üç ana kategoriye ayrılır.

3.3.1. Polimer matrisler

- Termoset reçineler: Epoksi, polyester, vinil ester gibi. Bu reçineler, sertleştikten sonra geri dönüşümsüz şekilde katı hale gelir.
- Termoplastik reçineler: Polipropilen (PP), polietilen (PE), polikarbonat (PC), naylon (PA) gibi. Bu türler ısıtıldığında erir ve tekrar şekillendirilebilir.

3.3.2. Metal matrisler

Alüminyum, titanyum, magnezyum ve diğer metaller kullanılabilir. Bu tür matrisler yüksek mukavemet ve ısı direnci sağlar, ancak polimer matrislere göre daha ağırdır.

3.3.3. Seramik matrisler

Alümina, silisyum karbür, zirkonya gibi seramik malzemeler kullanılır. Bu matrisler çok yüksek sıcaklıklara dayanabilir ve genellikle yüksek sertlik ve korozyon direncine sahiptir.

Matris malzemesi, kompozitin kullanım amacına, çalışma koşullarına ve gereksinimlere bağlı olarak seçilir. Örneğin, havacılık ve otomotiv endüstrisinde genellikle yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve iyi ısı direnci nedeniyle polimer ve

metal matrisler tercih edilir. Diğer yandan, çok yüksek sıcaklık dayanımı gereken uygulamalarda seramik matrisler kullanılır.

Kompozit malzeme içerisinde bulunan toz karışımlarından matrisin en önemli görevi takviye ve ilave malzemelerine yani bağlayıcılara yükü yönlendirmek ve dağılımını sağlamaktır. Yükün transfer edilmesi matris ve bağlayıcılar arasındaki ara yüzey bağına bağlıdır. Belirlenmiş olan uygulama alanı için matris seçimi; çekme mukavemeti, sıcaklık, yoğunluk ve gevrek-sünek özellik gibi etmenlere bağlıdır. Bununla beraber üretim tekniği ve bu yöntemler arasındaki uyumla da ilişkilidir. Genellikle matris malzemesi olarak; Al, Ti, Mg, Ni, Pb, Fe, Sn, Zn, Ag, ve Si kullanılır. Düşük yoğunluğa sahip Al, Mg, Ti gibi matrisler en sık tercih edilenlerdendir. Bu matrislerle, endüstride en iyi düzeyde kompozit malzemeler üretilir [21].

3.4. Alüminyum ve Alaşımları

Alüminyum, hafifliği, korozyon direnci ve yüksek mukavemeti nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılan bir metaldir. Saf alüminyum birçok uygulama için yeterli mekanik özelliklere sahip olmadığından, genellikle çeşitli elementlerle alaşımlanarak kullanılır.

3.4.1. Alüminyumun özellikleri

- Hafiflik: Alüminyum, çelikten yaklaşık üç kat daha hafiftir.
- Korozyon Direnci: Korozyona dayanıklılığı artırmak için doğal bir oksit tabakası oluşturur.
- İletkenlik: İyi bir elektrik ve ısı iletkenidir.
- Geri Dönüşüm: Alüminyum, kalitesinden ödün vermeden defalarca geri dönüştürülebilir.
- Mukavemet: Saf alüminyumun mukavemeti düşüktür, bu nedenle alaşımlanarak mukavemeti artırılır.

3.4.2. Alüminyum alaşımları

Alüminyum alaşımları, içerdikleri temel alaşım elementlerine bağlı olarak sınıflandırılır. Her alaşım grubunun kendine has özellikleri ve kullanım alanları vardır.

- Seri 1xxx:
 - Özellikler: Yüksek saflıkta (%99 veya daha fazla) alüminyum içerir.
 - Kullanım Alanları: Elektrik ve kimya endüstrisi, folyo ve kablolar.
- Seri 2xxx:
 - Özellikler: Bakır ile alaşımlıdır, yüksek mukavemet ve iyi işlenebilirlik sunar.
 - Kullanım Alanları: Havacılık ve uzay endüstrisi.
- Seri 3xxx:
 - Özellikler: Manganez ile alaşımlıdır, orta mukavemet ve iyi korozyon direnci sağlar.
 - Kullanım Alanları*: İçecek kutuları, pişirme ekipmanları.
- Seri 4xxx:
 - Özellikler: Silisyum ile alaşımlıdır, düşük erime noktası ve iyi döküm özellikleri vardır.
 - Kullanım Alanları: Kaynak telleri ve çeşitli döküm uygulamaları.
- Seri 5xxx:
 - Özellikler: Magnezyum ile alaşımlıdır, yüksek mukavemet ve mükemmel korozyon direnci sunar.
 - Kullanım Alanları: Denizcilik, otomotiv ve yapısal uygulamalar.
- Seri 6xxx:
 - Özellikler: Magnezyum ve silisyum ile alaşımlıdır, iyi mukavemet ve mükemmel işlenebilirlik sunar.
 - Kullanım Alanları: İnşaat, otomotiv, denizcilik.
- Seri 7xxx:
 - Özellikler: Çinko ile alaşımlıdır, en yüksek mukavemeti sağlayan alüminyum alaşımlarıdır.
 - Kullanım Alanları: Havacılık, askeri uygulamalar, spor ekipmanları.
- Seri 8xxx:
 - Özellikler: Diğer elementlerle (örneğin lityum) alaşımlanmıştır.
 - Kullanım Alanları: Özel uygulamalar, pil kaplamaları.

3.4.3. Alüminyum alaşımlarının işlenmesi

Alüminyum alaşımları, farklı işleme yöntemlerine uygunluk gösterir. İşleme yöntemleri arasında dövme, ekstrüzyon, döküm, haddeleme ve işleme bulunur. Hangi işlemin seçileceği, nihai ürünün kullanım amacına ve gereksinimlerine bağlıdır

3.4.4. Alüminyumun kullanım alanları

Alüminyum ve alaşımları, otomotiv, inşaat, elektronik, havacılık ve uzay, denizcilik ve tüketici ürünleri gibi birçok endüstride kullanılır. Hafiflik ve mukavemetin kritik olduğu uygulamalarda tercih edilir.

Doğru alüminyum alaşımlarının seçimi, belirli bir uygulama için gerekli olan mekanik ve fiziksel özelliklerin elde edilmesinde hayati öneme sahiptir. Alaşımlar arasında yapılan seçim, genellikle malzemenin işlenebilirliği, mukavemeti, korozyon direnci ve diğer spesifik özelliklere göre yapılır.

3.5. Titanyum Karbür (TiC)

Titanium karbür tozu (TiC) olarak da bilinen bu bileşik, titanyum ve karbon elementlerinden oluşan bir seramik malzemedir. Özellikle yüksek sertlik, aşınma direnci ve termal iletkenlik gibi özellikleriyle bilinir. Bu özellikler, TiC' ü çeşitli endüstriyel uygulamalarda oldukça kullanışlı hale getirir. Aşağıda TiC' ün önemine dair bazı temel noktalar sıralanmıştır.

- Yüksek Sertlik ve Aşınma Direnci: TiC, aşındırıcı ortamlar için ideal bir malzemedir. Kesici takımlar, aşındırıcılar ve aşınmaya dayanıklı yüzey kaplamalarında yaygın olarak kullanılır.
- Termal Kararlılık: Yüksek sıcaklıklarda bile kararlı yapısını korur. Bu, yüksek sıcaklıklarda çalışan ekipmanlar ve uygulamalar için önemlidir.
- Elektrik ve Termal İletkenlik: İyi bir elektrik iletkeni olmasa da, termal iletkenliği birçok seramik malzemeye göre yüksektir. Bu özellik, termal yönetim uygulamalarında kullanılmasını sağlar.
- Kimyasal Kararlılık: Çoğu asit ve alkaliye karşı dirençli olup, kimyasal olarak stabil bir yapı sunar.

TiC'nin uygulama alanları arasında kesici takımlar, aşınmaya dayanıklı kaplamalar, yüksek sıcaklıkta çalışan fırın bileşenleri ve seramik matriks kompozitler bulunur. Bu özellikleri ve uygulama alanları, TiC' ü endüstride önemli bir malzeme haline getirir.

3.6. Takviye Malzemeleri

MMK malzemelerin imalatında, kolay temin, kullanılan matris malzemesi ile imtizacı, çekme mukavemeti, elastiklik modülü, ısıl kararlılık, ısıl genleşme katsayısı, yoğunluk, ergime sıcaklığı, boyut, yapı, şekil, kimyasal bileşim, partikül yapı gibi özellikler göz önüne alınarak, kimyasal yapılarına göre karbürler, nitritler, oksitler ve diğer (paslanmaz çelik, karbon vs.) olmak üzere dört ana kategoride incelenebilecek takviye malzemeleri kullanılmaktadır [21].

3.7. Sterik Asit

T/M'de sterik asit, genellikle bir bağlayıcı ve yağlayıcı olarak kullanılır. Sterik asit, metal tozlarının işlenmesi sırasında çeşitli rolleri olan uzun zincirli bir yağ asididir. Özellikleri şunlardır;

- **Bağlayıcı:** Metal tozlarını bir arada tutmak ve presleme işleminde dayanıklı yeşil parçalar (preslenmiş ama sinterlenmemiş parçalar) oluşturmak için kullanılır.
- **Yağlayıcı:** Presleme işlemi sırasında kalıp ve metal tozları arasında sürtünmeyi azaltarak kalıbın ömrünü uzatır ve presleme işleminin daha verimli olmasını sağlar.
- **Dağılma Ajanı:** Metal tozlarının homojen bir şekilde karışmasını ve yayılmasını sağlar, bu da nihai ürünün kalitesini artırır.

Sterik asidin bu fonksiyonları, T/M proseslerinde daha düşük presleme basınçları ve daha yüksek yoğunlukta preslenmiş parçalar elde edilmesini mümkün kılar. Ayrıca, sinterleme sırasında sterik asidin buharlaşması veya yanması ile geride temiz metalik bağlar bırakılır, bu da nihai ürünün mekanik özelliklerini iyileştirir.

3.8. Bilyeler

Mekanik alıştırma (MA), toz metalleri yüksek enerjili bilyalı değirmenler kullanarak karıştırmak ve öğütmek suretiyle yeni alaşımlar veya kompozitler elde etme sürecidir. Bu süreçte kullanılan bilyeler (veya öğütme medyası), işlem

performansı ve nihai ürünün özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Aşağıda bilyelerin önemine dair bazı temel noktalar sıralanmıştır.

- **Enerji Aktarımı:** Bilyeler, yüksek enerjili değirmenlerde, toz parçacıklarına kinetik enerji aktarırlar. Bu enerji, partiküllerin kırılmasına, deformasyonuna ve yeniden birikmesine neden olur. Bilyelerin boyutu, yoğunluğu ve malzemesi, aktarılan enerjinin miktarını ve etkinliğini belirler.
- **Aşınma ve Kirlilik:** Bilyeler işlem sırasında aşınabilir ve bu aşınma ürünleri toz karışımına karışabilir. Bu nedenle, bilyelerin malzemesi dikkatle seçilmelidir. Örneğin, çelik bilyeler sert ve dayanıklıdır, ancak bazı durumlarda işlem sırasında demir kontaminasyonu istenmeyebilir. Bu durumda seramik veya tungsten karbür bilyeler tercih edilebilir.
- **Öğütme Verimliliği:** Bilyelerin boyutu ve şekli, öğütme verimliliğini doğrudan etkiler. Daha küçük bilyeler, daha ince bir öğütme sağlayabilirken, daha büyük bilyeler, daha hızlı ve yoğun bir enerji aktarımı sağlar. Bu nedenle, çoğu mekanik alıştırma sürecinde, optimal öğütme verimliliği sağlamak için farklı boyutlarda bilyeler kullanılır.
- **Isıl Etkiler:** Bilyelerin çarpışmaları sonucu oluşan enerji, ısınmaya neden olabilir. Bu ısınma, istenmeyen faz dönüşümlerine veya oksidasyona yol açabilir. Bu nedenle, işlem süresi ve bilye malzemesi gibi faktörler dikkatle kontrol edilmelidir.
- **Malzeme Seçimi ve Uyumluluk:** Bilyelerin malzemesi, işlenen tozların kimyasal ve mekanik özelliklerine uyumlu olmalıdır. Mekanik alıştırma cihazlarında bilyelerin doğru seçimi ve kullanımı, sürecin verimliliği ve elde edilen ürünlerin kalitesi üzerinde kritik bir rol oynar. Bilye malzemesi, boyutu, yoğunluğu ve şekli gibi faktörler, enerji aktarımını, aşınmayı, öğütme verimliliğini ve nihai ürünün saflığını doğrudan etkiler. Bu nedenle, mekanik alıştırma sürecinin optimizasyonu, bilye özelliklerinin dikkatle incelenmesini ve kontrol edilmesini gerektirir.

4. DENEYSEL BULGULAR

4.1. Deneyin Amacı

Bu çalışmada T/M yöntemiyle, M/A test cihazı kullanılarak Alüminyum matrisli TiC takviyeli kompozitlerin üretimi yapılmış ve işlem parametrelerinin öğütülen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Öncelikle matris malzemesi olarak Al7075 tozları, takviye malzemesi olarak ise TiC takviye oranı olarak da ağırlıkça üç farklı oran (% 0, % 1 ve % 5) seçilmiş ve M/A test cihazında karıştırılmıştır. Her karışıma ağırlıkça %0,25 sterik asit eklenerek toz karışımlarının homojenizasyonu sağlanmıştır. Ardından 1, 2, 5 ve 10 saat olarak M/A cihazında karıştırılmıştır. Toz karıştırma işlemleri tamamlandıktan sonra kompozit tozlar 450 MPa basınçta soğuk preslenmiş ve ardından 600 °C de 60 dakika sinterleme yapılarak kompozit numunelerin imalatı tamamlanmıştır. Üretilen bu kompozitlerin; çekme mukavemetleri, çekme dayanımı test cihazında test edilmiş. Sonuçlar kıyaslanarak numunelerin mukavemet değerleri irdelenmiştir.

4.2. Deney Malzemeleri

4.2.1. AA7075 alüminyum tozu

Matris malzemesi olarak; AA7075 Alüminyum makro boyut 49m (Ortalama tane boyutu) tozları seçilmiştir. AA7075 alüminyum, yüksek mukavemetli ve genellikle havacılık ve savunma endüstrilerinde kullanılan bir alüminyum alaşımıdır. Bu alaşım, çinko (Zn) ve magnezyum (Mg) ana alaşım elementlerine sahiptir ve demir (Fe), silikon (Si), bakır (Cu), manganez (Mn), krom (Cr) ve titanyum (Ti) gibi diğer elementleri de içerir (Tablo 4.1.).

Tablo 4.1 AA7075 Tozlarının Ağırlıkça Bileşimi (%) [21].

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Cr	Ti	Al
1,2-2	2,1-2,9	0,3(max)	0,5(max)	0,4(max)	5,1-6,1	0,18-0,28	0,2(max)	87,1-91,4

Isıl işlem ve mekanik özellikleri (Tablo 4.2.). AA7075 alüminyum alaşımı genellikle T6 ısıl işleminden geçirilir, bu da mukavemet ve sertliği artırır. T6 durumu, çözelti ısıl işlemi ve yaşlandırma işlemiyle elde edilir.

Tablo 4.2 AA7075 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri [21].

Teorik Yoğunluk (gr/cm ³)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Akma Mukavemeti (Mpa)	Elastiklik Modülü(Gpa)	Kopma Uzaması (%)	Sertlik (BSD)
2,81	228	103	71,7	16	60

Özetle, AA7075 alüminyum alaşımı, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve iyi işlenebilirlik gibi üstün özellikleri nedeniyle birçok endüstriyel uygulamada tercih edilmektedir. Aşağıda deneylerde kullanılan AA7075 tozu gözükmemektedir (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. AA7075 alüminyum tozu

4.2.2. Titanyum karbür tozu (TiC)

Takviye malzemesi olarak; Titanyum karbür (TiC) nano boyut 40nm (Ortalama tane boyutu) seçilmiştir. Titanyum karbür (TiC) tozu, yüksek sertlik, mükemmel ısı ve kimyasal stabilite özelliklerine sahip bir seramik malzemedir. Bu özellikler, onu çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanışlı kılar. Aşağıda TiC' ün özellikleri şematik olarak verilmiştir (Tablo 4.3.).

Tablo 4.3. TiC alaşımının fiziksel ve mekanik zellikleri

Titanyum Karbür Tozu	
Kimyasal Formülü	TiC
Saflık (%)	99.99
Renk	Siyah
Ortalama Parçacık Boyutu (nm)	790
Gerçek Yoğunluk (g/cm ³)	4,5
Erime Noktası (°C)	3200
Kristal Yapı	Kübik
Zeta Potansiyeli (mV)	25

Titanyum karbür tozu, genellikle titanyum ve karbonun yüksek sıcaklıklarda reaksiyona girmesiyle üretilir.

Karbotermal indirgeme yöntemi: Titanyum dioksit (TiO₂) ve karbonun yüksek sıcaklıkta reaksiyona sokulmasıyla TiC elde edilir.

TiC tozu, çeşitli ileri teknoloji ve mühendislik uygulamalarında kritik bir rol oynar. Özel projeler veya ihtiyaçlar için tozun özellikleri ve kullanımı konusunda detaylı bilgi almak, genellikle üreticiler veya malzeme bilimcilerle yapılan özel danışmanlıklarla mümkündür (şekil 4.2.).



şekil 4.2. Titanyum karbür (TiC) tozu

4.2.3. Bilyeler

Bilyeler deneyde mekanik alaşımlama cihazının içindeki haznede bulunur. Amacı cihaz çalışırken tozlara çarparak homojen bir karışım sağlamaktır. Her saat dilimi sonrasında 10 bilya çekilmiştir. Deneylerde kullanılan bilyeler aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 4.3.).



Şekil 4.3. Bilyeler

4.2.4. Mekanik alaşımlama cihazı

M/A cihazı, tozları homojen bir şekilde karıştırmak için ilgili devir sayısı ve süre belirlenerek çalıştırılan toz öğütme cihazıdır (Şekil 4.4.). Toz karıştırırken cihazda çalışma süresinin yanında kaç dakika çalışıp kaç dakika dinleneceğide belirlenebilmektedir.



Şekil 4.4. Mekanik alaşımlama cihazı

4.2.5. Ölçüm cihazı

Ölçüm cihazı tozların ağırlıklarını ölçmek için kullanılır (Şekil 4.5.). Tozlar camdan bir kase içine konularak ölçülür. Makineye kaseyi önceden koyup kaseyin darası alınması gerekir. Daha sonra toz konarak ölçüsü yazılır.



Şekil 4.5. Ölçüm cihazı

4.2.6. Hazne

Hazne, tozları içine koyup daha sonra mekanik alaşımlama cihazına yerleştirdiğimiz yüksek mukavemetli kapalı kaptır (Şekil 4.6.). Tozlar dışında bilyeler de bu hazne içine yerleştirilir ve karıştırma işlemi için kapatılarak M/A test cihazına bağlanır.



Şekil 4.6. Haznenin görünümü

4.2.7. Sterik asit

İlave malzeme olarak; her karışıma %0,25 oranında sterik asit eklenmiştir. Görevi tozlar arasında kayganlık sağlayarak, daha homojen karışmasını sağlamak ve tozlar arasındaki bağ uyumunu kolaylaştırmaktır. Şekilde gözüktüğü gibi beyaz renktedir (Şekil 4.7.).



Şekil 4.7. Sterik asit eklenmiş toz karışımı

4.2.8. Etil alkol

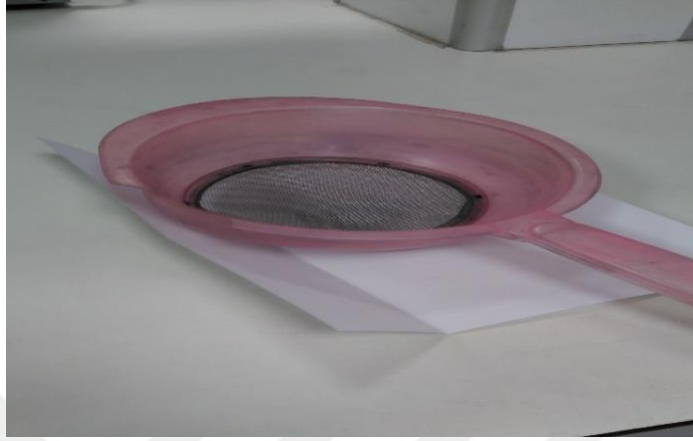
Etil alkol deneyde temizleme yapmak için kullanılır (Şekil 4.8.). Titanyum karbür veya alüminyum bulaşmış akipmanları temizlemek için sıkılarak peçete yardımıyla dezenfekte edilir.



Şekil 4.8. Etil alkol

4.2.9. Elek

Elek deneye başlamadan tozlarımızın tortulanmış kısmını kalmaması için elenerek homojen yapı elde etmek için kullanılır (Şekil 4.9.). Bilyaları elemek içinde kullanılabilir.



Şekil 4.9. Elek

4.2.10. Pres makinesi

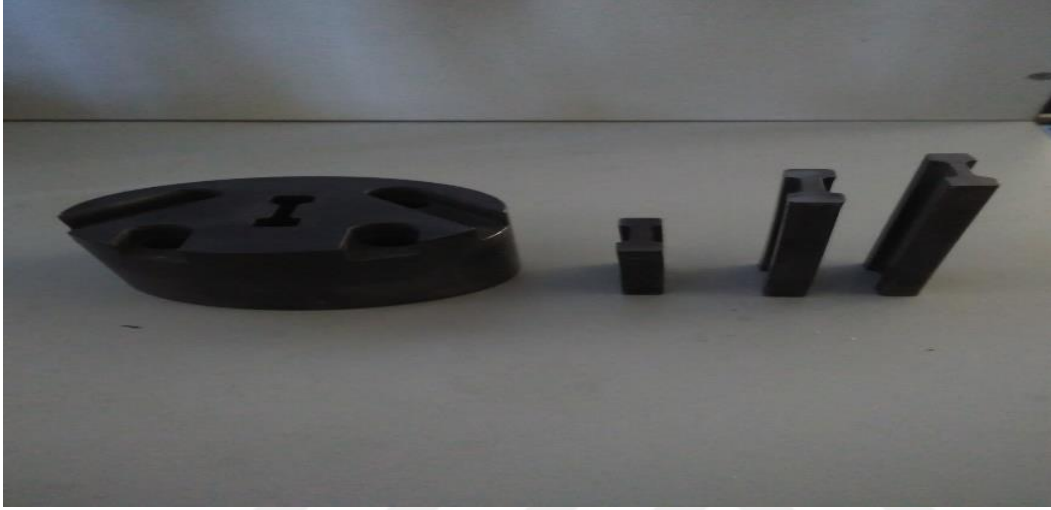
Pres önceden belirlenmiş kalıp bağlanarak içerisine toz karışımı dökülüp 450 Mpa basınç uygulayarak tozların sıkıştırılmasını sağlayan makinedir (Şekil 4.10.). Atölyedeki pres 60 ton kuvvet uygulamakta olup, 450 Mpa basınç uygular.



Şekil 4.10. Pres makinesi

4.2.11. Pres kalıp parçaları

Prese bağlanan istediğimiz numunenin ortaya çıkmasına sağlayan kalıptır (Şekil 4.11.). Alt zımba, üst zımba ve çıkarma aparatından oluşur. Tozlar kalıbın içine dökülür ve preste basılır. Presten çıkan parça ham parçadır ve kırılgan bir yapıdadır. Çıkan parça 600 °C ve 60 dakika sinterlenerek mukavemetlendirilir..Fırında atmosfer kontrolü önemlidir. Aksi halde parça burada yanabilir.



Şekil 4.11. Pres kalıpları

4.2.12. Çekme mukavemeti test cihazı

Çekme dayanımı cihazı işlenmiş parçaların çekme mukavemetini ölçmek ve bu sonuca göre malzeme hakkında bilgi edinmek için kullanılan cihazlardır (Şekil 4.12.). Cihazda malzeme çekme testine tabii tutulur. Bir süre sonra malzeme çekme kuvvetinden dolayı kopar. Malzemenin çekmeye başladığı andan koptuğu ana kadarki süre içinde gerçekleşen olaylar bilgisayardaki ekrandan gözlemlenir. Malzeme hakkında ilgili özellikler belirlenmiş olunur. Çekme testinde oda sıcaklığı 25 derecedir. Çekme 3mm/dak ile çekildi.



Şekil 4.12. Çekme mukavemeti test cihazı

4.2.13. Üretilen parça

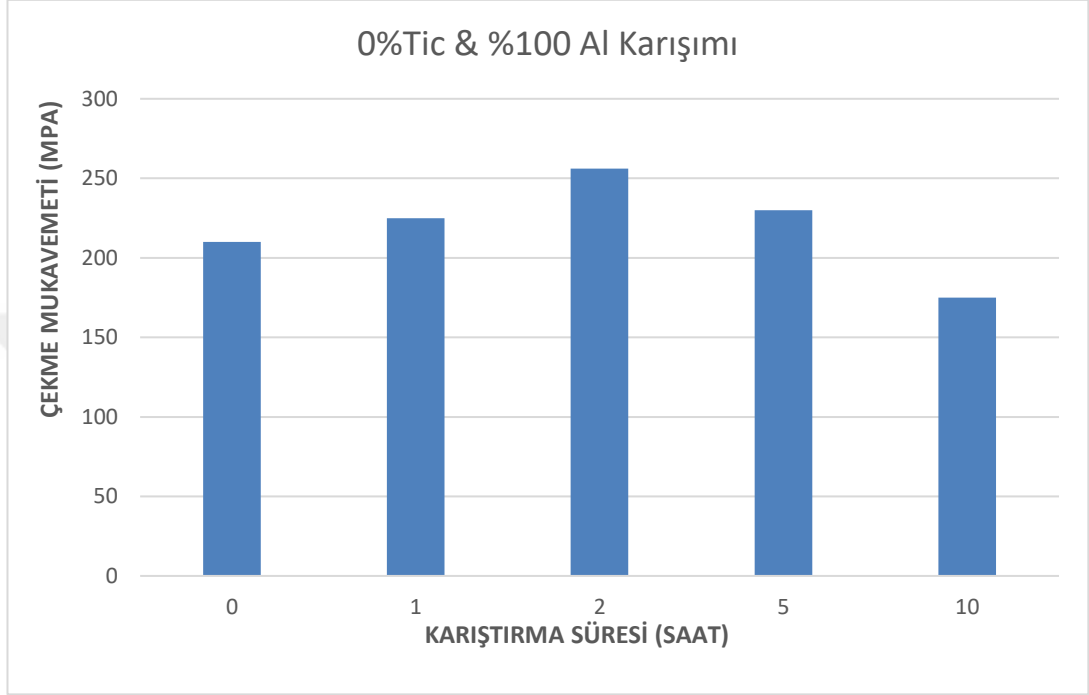
Preste basılan parçamız sinterleme işleminden sonra şekilde görünen parça elde edilmiştir (Şekil 4.13.). Üretilen tüm parçalar sinterleme fırınında sinterlenerek mukavemet kazandırılmıştır. Ardından, çekme testi yapılarak dayanımları değerlendirilmiştir. Farklı saat ve oranlarda karıştırılarak üretilen kompozit malzemeler çekme testi sonunda da farklı değerler göstermiştir. Tüm bu sonuçlar irdelenerek en yüksek mukavemetli numune belirlenmiştir.



Şekil 4.13. Üretilen numunelerden biri

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

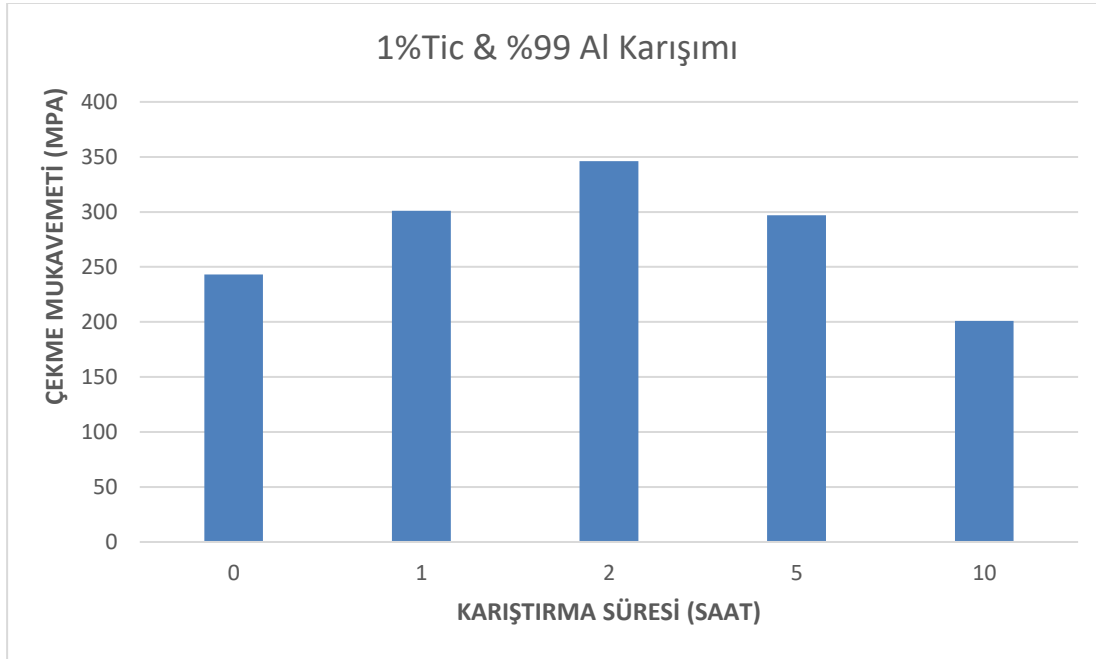
5.1. %0 TiC & %100 Al karışımı



Şekil 5.1. 0% TiC & %100 Al karışımı malzemesi çekme mukavemetinin karıştırma süresi ile değişimi

M/A cihazında üretimi tamamlanan birinci numune için çekme mukavemeti-karıştırma süresi grafiğine bakıldığında en yüksek mukavemetin 2 saat karıştırılan numunede olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 5.1.). Grafik incelendiğinde 2 saate kadar karıştırılan kompozitlerin çekme mukavemetlerinin artırdığı, 2 saatten sonra karışımlarda bu değerin düştüğü gözlemlenmektedir. Bunun ana nedeni, karışımı fazla karıştırmak tozların mikro yapılarında bozulmalara yol açığının göztergesidir.

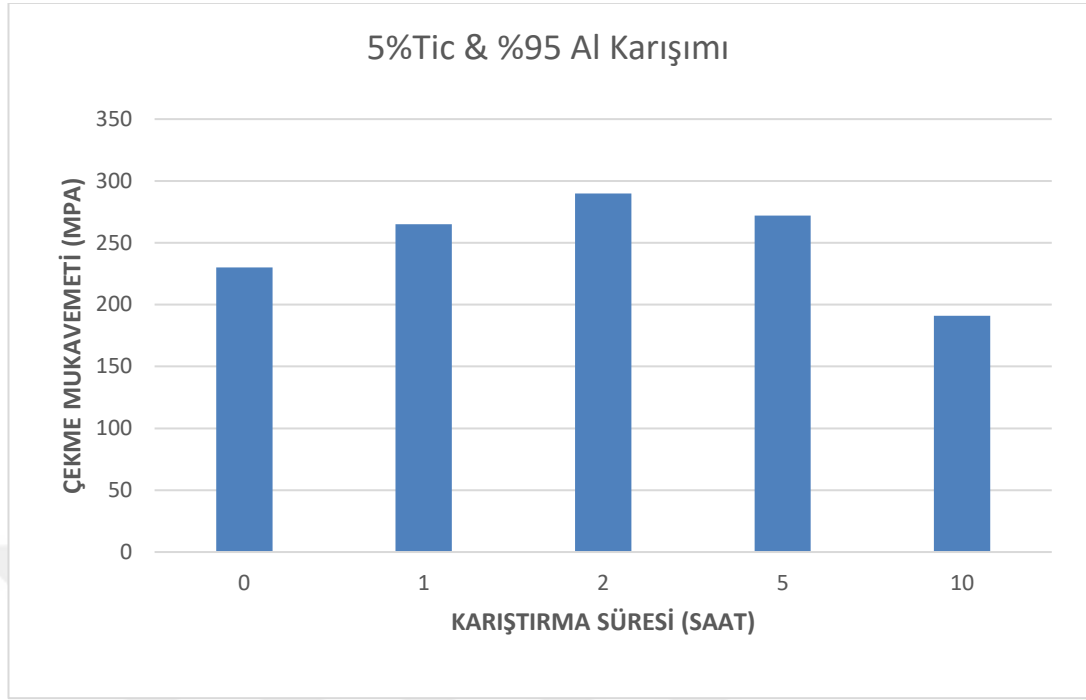
5.2. %1 TiC & %99 Al karışımı



Şekil 5.2. 1% TiC & %99 Al karışımı malzemesi çekme mukavemetinin karıştırma süresi ile değişimi

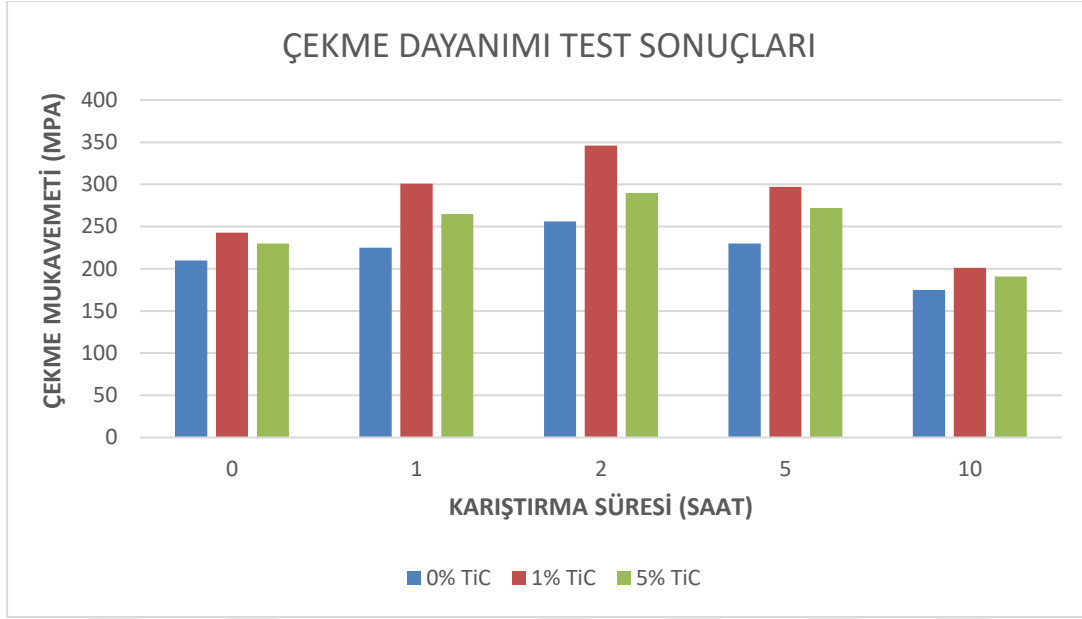
Üretimi tamamlanan bir diğer toz karışımı olan ikinci numune için çekme mukavemeti-karıştırma süresi grafiğine bakıldığında en yüksek mukavemet değerinin birinci numunede olduğu gibi 2 saat karıştırılan numunede olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 5.2.). Grafik irdelendiğinde 2 saate kadar karıştırılan kompozitlerin çekme mukavemetlerinin artırdığı, 2 saatten sonra karışımlarda bu değer düşüyor gözlemlenmektedir. Bunun sebebi, karışımı 2 saatten fazla karıştırmakla, tozlar aralarındaki bağlarda kopmalardan dolayı tozların morfolojisinde bozulmalar gerçekleşmekte ve buna bağlı olarak dayanım düşmektedir.

5.3. %5 TiC & %95 Al karışımı



Şekil 5.3. 5% TiC & %95 Al karışımı malzemesi çekme mukavemetinin karıştırma süresi ile değişimi

Son numune için, çekme dayanımı test sonuçları incelendiğinde ise, en yüksek mukavemet değerinin önceki iki numunede olduğu gibi 2 saat karıştırılan numunede olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 5.3.). Grafik analiz edildiğinde 2 saate kadar karıştırılan kompozit malzemelerin çekme mukavemetlerinin artırdığı, 2 saatten sonra malzemelerin dayanım değerlerinin düştüğü gözlemlenmektedir. Test sonuçlarına bakıldığında, 2 saat karıştırılan tozların, çekme dayanımı değeri maksimum noktada olduğu görülür. Bu değer in fazla olması karışım içerisindeki Al ve TiC toz oranlarının diğer karışımlara göre daha doğru miktarlarda oluşudur. Bu oranda tozlar arası kaynaşma daha iyi şekilde gerçekleşmiştir. Önceki yapılan testlere bakıldığında (Şekil 5.1. ve Şekil 5.2.) her saat için alınan numunelerin, çekme testi sonuçları, üçüncü numunelerin test sonuçlarından düşüktür. Bu karışım hem maksimum çekme dayanımının gözlemlendiği, hem de her saatler için daha yüksek test sonuçlarının olması açısından önemlidir.



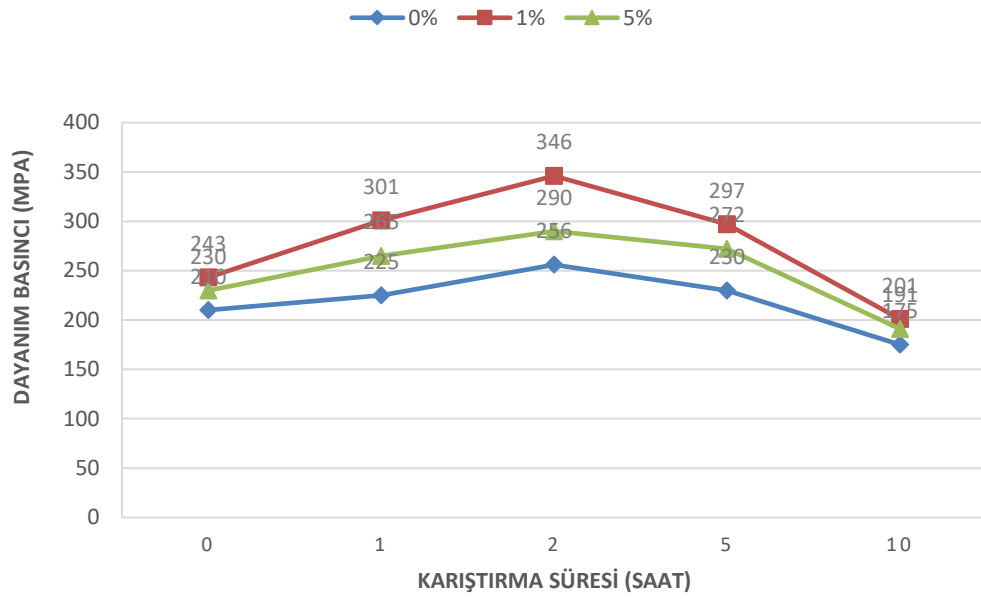
Şekil 5.4. AA7075 matrisli TiC takviyeli kompozit malzemelerin çekme mukavemetinin karıştırma süresi ile değişimi

Al 7075 matrisli, ağırlıkça %0, %1 ve %5 oranında TiC takviyeli ve %0,25 sterik asit ilave katkılı kompozitler malzemeler, 450 MPa basınçta soğuk preslenmiş 600 °C’ de 60 dakika argon atmosferi altında sinterlenerek üretimi yapılmıştır.

Üretilen kompozit malzemelerin, çekme mukavemetleri, çekme dayanımı test cihazında test edilerek sonuçlar irdelenmiştir.

Bütün numuneler için genel sonuca bakıldığında, en yüksek mukavemet değeri %1 TiC takviyeli 2 saatlik karışım numunesinde gözlemlenmiştir (Şekil 5.4.).

ÇEKME DAYANIMI TEST SONUÇLARI



Şekil 5.5. AA7075 matrisli TiC takviyeli kompozit malzemelerin çekme mukavemetinin karıştırma süresi ile değişimi

Şekil 5.5. de görüldüğü üzere her kompozit malzemenin çekme mukavemeti değeri zaman olarak 2 saate kadar artmakta ve daha sonra düşmektedir. En düşük çekme dayanımı değeri %0 TiC takviyeli 10 saatlik karışım numunesinde gözlemlenmiştir Şekil (5.5.). En yüksek çekme mukavemeti değeri ise, 2 saat karıştırılmış olan ve %1 TiC takviyeli kompozit malzemede elde edilmiştir (Şekil 5.5.). Bunun en temel nedeni ise; 2 saate kadar kompozitin yoğunluğunun belli miktarda artması ve daha sonra azalmasıdır (Şekil 5.5.).

Sonuç olarak; T/M yöntemi ile, Al7075 matrisli ve TiC takviyeli tozlar M/A test cihazında karıştırılmıştır. Oluşturulan kompozit malzemeler çekme dayanımı test cihazında çekilerek elde edilen sonuçlar irdelenmiş ve kompozitlerin en mukavemetli olanı belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunun, sanayide T/M yöntemi ile imalat yapan firmalara yol gösterici bir çalışma olduğu söylenebilir. Al7075 ve TiC tozları arası bağların çekim gücü ve bunun neticesinde üretilen kompozitlerin dayanımı hakkında yorum yapmamızı sağlamaktadır. Bu üretim yöntemi ile yapılan imalatın, iyileştirilmesine yol açacağını gözükmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] William, C., Harrigan, Jr., “Commercial processing of metal matrix composites”, Materials Science and Engineering, A244: 75 - 79, 1998.
- [2] Rosso M. “Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties”, Journal of Materials Processing Technology, 175: 364 - 375, 2006.
- [3] Kırmızı, G., Arık, H., Çinici, H., “Experimental study on mechanical and ballistic behaviours of silicon carbide reinforced functionally graded aluminum foam composites”, Composites Part B, 164: 345 - 357, 2019.
- [4] Deuis, R.L., Subramanian, C., Yellup, J.M., “Abrasive wear of aluminium composites - a review”, Wear, 201: 132 - 134, 1996.
- [5] German, R.M., 1994, Powder metallurgy science, 2nd edition, Metal Powder Industries Federation, USA.
- [6] Sabau, E., 2009, Contributions Regarding the Mechanical Behavior of Composite Structures with Polymeric Matrix, Ph. D. Thesis, Technical University of Cluj-Napoca, Cluj.
- [7] Kumdalı F., 2008, “Alüminyum Matrisli B4C Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-2.
- [8] BOCCHINI, G. F., and LINDSKOG, P. F., “Applications and Developments of Sintered Ferrous Materials” Powder Metallurgy-An overview”, The Institute of Metals Series on Powder Metallurgy, 287, (ed: I. Jenkins and J.V. Wood), 1991.
- [9] Şahin, İ. 2014. “Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Matkap ile Delinmesi Konusunda Yapılan Çalışmaların İncelenmesi”, Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 55, sayı 649, s. 9-16[10] Şenel, C. M., Gürbüz, M., Koç, E. 2015. “Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Yeni Nesil Kompozitler,” Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 669, s. 36-47.
- [11] GERMAN, R. M., “Powder Metallurgy of Iron and Steel”, Jhon Willey and Sons, U.S.A., 1998.
- [12] Lawley, A., 1992, Atomization: The production of metal powders, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, USA.
- [13] Ünal, R., 2007, Toz Üretim http://rahmiunal.net/toz/tozuretimi/powder_product.html, adresinden 15 Mart 2024 tarihinde alınmıştır.
- [14] Turan, H., (1993), “Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi”, [Yüksek Lisans Tezi], Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [15] Sarıtaş, S., (1994), Toz metalurjisi, Makine müh. el kitabı, MMO, 2.Baskı, I.Cilt

- [16] Baksan, B., Gürler, R. (2003), Toz Metalurjisinin Savunma Sanayiinde Uygulanması, Osmangazi Üniversitesi, Metalurji Enstitüsü, Eskişehir.
- [17] Özgün, Ö., (2007), “Toz Metalurjisi İle Üretilen Alaşımli Çeliklerin Mikroyapı Ve Mekanik Özellikleri”, [Yüksek Lisans Tezi], Sakarya Üniversitesi.
- [18] Akın, G., (2006). “Toz Metalurjisi Yöntemiyle Alüminyum Matrisli Bor Karbür Takviyeli Kompozitlerin Üretilmesi Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, [Yüksek Lisans Tezi], İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [19] Uslular Hadde (2024, 18 Mart). Sinterleme Nedir, <https://www.uslularhadde.com/sinterleme-nedir> adresinden 26 Nisan 2024 tarihinde alınmıştır.
- [20] Cumbulaltay, M., (2005). “Karbon Katkılı Bakır İçeren Demir Tozu Peletlerinin Sinterleme Sonrası Özellikleri” [Yüksek Lisans Tezi], İstanbul Üniversitesi.
- [21] Nazik, C., (2013), “Alüminyum Matrisli B4c Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, [Yüksek Lisans Tezi], Selçuk Üniversitesi.
- [22] Suryanarayana, C., (2001), “Mechanical alloying and milling”, Progress in Materials Science, 46: 1-184.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Hakan YILMAZ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, Selçuk Üniversitesi, Makine Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : Devam ediyor, Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği
Ana Bilim Dalı, Makine Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2019-2020 yılları arasında Deniz Kuvvetleri Komutanlığı'nda mühendis sınıfı yedek subay olarak çalıştı.
- 2021 yılından itibaren özel sektörde makine mühendisi olarak çalışmaktadır.