İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM TALAŞININ GERİ KAZANIMI VE UÇUCU KÜL TAKVİYELİ ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİT ÜRETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Recep VATANSEVER

Anabilim Dalı: İleri Teknolojiler

Programı: Malzeme Bilimi ve Mühendisliği

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM TALAŞININ GERİ KAZANIMI VE UÇUCU KÜL TAKVİYELİ ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİT ÜRETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Recep VATANSEVER
(521091029)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 Mayıs 2011
Tezin Savunulduğu Tarih : 07 Haziran 2011

Tez Danışmanı : Prof. Dr. E. Sabri KAYALI (İTÜ)
Eş Danışman : Yrd. Doç. Dr. Harun MİNDİVAN (AÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU (İTÜ)
Prof. Dr. M. Lütfi ÖVEÇOĞLU (İTÜ)
Prof. Dr. Mehmet KOZ (MÜ)

HAZİRAN 2011

ÖNSÖZ

Yüksek lisansım boyunca derin bilgi ve birikimleriyle beni yönlendirerek çalışmalarımın düzenli ve tutarlı bir şekilde yürümesini sağlayan, gerek bilimsel gerekse hayata dair konularda yardımlarını esirgemeyen çok değerli hocam Prof. Dr. E. Sabri KAYALI' ya; çalışmam boyunca karşılaştığım zorlukları aşmamda güçlü bilimsel desteklerini esirgemeyen çok değerli hocam Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU' na; çalışmamın her aşamasında yoğun bir şekilde desteğini aldığım, deneysel çalışmaların ilerlemesinde ve tezimin şekillenmesinde emek harcayan çok değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Harun MİNDİVAN' a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Sahip olduğu yüksek bilimsel ve etik değerleriyle çalışmam boyunca görüşlerine sıklıkla başvurduğum ve her seferinde bilgi ve deneyimlerini cömertçe paylaşan çok değerli hocam Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN' a; deneysel metotları öğrenmemde ve cihazların kullanımında bilgi ve tecrübelerine her zaman başvurduğum çok değerli Dr. Özgür ÇELİK'e, Araş. Gör. Onur MEYDANOĞLU' na ve Araş. Gör. Mert GÜNYÜZ' e teşekkür ederim.

Deneysel çalışmaların bir kısmının yapılmasına laboratuvar imkanı sağlayarak destek olan Prof. Dr. M. Lütfi ÖVEÇOĞLU' na, Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN' e, Prof. Dr. Süheyla AYDIN' a, Yrd. Doç. Dr. Nuri SOLAK' a ve Araş. Gör. Hasan GÖKÇE' ye teşekkür ederim.

Mikroyapısal ve kimyasal karakterizasyon testlerinde yardımlarını esirgemeyen teknik personal Sevgin TÜRKELİ' ne ve Z. İnci KOL' a teşekkür ederim.

Bu çalısma finansal olarak Yrd. Doç. Dr. Harun MİNDİVAN yürütücülüğündeki "Sıfıraltı Sıcaklıklarda Mekanik Öğütme Prosesi ile Alüminyum Talaşının Geri Kazanımı ve Uçuçu Kül Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Üretimi" isimli TÜBİTAK projesinden (Proje No: 108M574) desteklenmiştir.

Yüksek lisansım boyunca yardımlarına sıklıkla başvurduğum çok değerli arkadaşım Yük. Müh. Ozan AKÇAKESE' ye teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca her zaman maddi ve manevi olarak yanımda bulunan ve iyi bir eğitim almam için sürekli çabalayan sevgili annem Muradiye VATANSEVER'e ve babam Alaattin VATANSEVER'e özel ve sonsuz teşekkür ederim.

Haziran 2011

Recep Vatansever
Metalürji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ	**iii**
İÇİNDEKİLER	**v**
KISALTMALAR	**vii**
ÇİZELGE LİSTESİ	**ix**
ŞEKİL LİSTESİ	**xi**
ÖZET	**xv**
SUMMARY	**xvii**
1. GİRİŞ	**1**
2. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI	**3**
2.1 Alüminyumun Genel Özellikleri	3
2.2 Alüminyum Alaşımlarının Genel Sınıflandırılması	6
2.2.1 Dövme Alüminyum Alaşımları	6
2.2.2 Döküm Alüminyum Alaşımları	13
3. ALÜMİNYUM TALAŞLARININ GERİ KAZANIMI	**15**
3.1 Direkt Dönüşüm Yöntemiyle Alüminyum Talaşlarının Geri Kazanımı	15
3.2 Direkt Dönüşüm Yönteminin Safhaları	17
4. MEKANİK ALAŞIMLAMA VE ÖĞÜTME	**19**
4.1 Değirmen Türleri	20
4.1.1 SPEX Çalkalamalı Değirmen	21
4.1.2 Planeter Bilyalı Değirmen	21
4.1.3 Atritör Değirmen (Sürtünmeli Aşındırma Değirmeni)	22
4.1.4 Ticari Değirmenler	23
4.1.5 Yeni Tasarım Değirmenler	23
4.2 İşlem Değişkenleri	23
4.2.1 Değirmen Tipi	24
4.2.2 Öğütme Konteyneri	24
4.2.3 Öğütme Hızı	25
4.2.4 Öğütme Zamanı	26
4.2.5 Öğütme Cisimleri	26
4.2.6 Bilya – Toz Ağırlık Oranı	27
4.2.7 Şişeciğin Doluluk Oranı	27
4.2.8 Öğütme Atmosferi	27
4.2.9 İşlem Denetim Gereçleri (İDG)	28
4.2.10 Öğütme Sıcaklığı	29
4.3 Alaşımlama Mekanizması	30
4.3.1 Sünek – Sünek Bileşen Sistemi	33
4.3.2 Sünek – Gevrek Bileşen Sistemi	34
4.3.3 Gevrek – Gevrek Bileşen Sistemi	36
5. UÇUCU KÜLLER	**39**

5.1 Uçucu Küllerin Tanımı..... 39
5.2 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması..... 39
5.3 Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri..... 40
5.4 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri..... 42
5.5 Uçucu Küllerin Alüminyum Matrisli Kompozitte Kullanımı……..... 43
5.5.1 Uçucu Kül ile Matris Arasındaki Muhtemel Kimyasal Reaksiyonlar……...……. 44
5.5.2 Uçucu Kül Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri…….. 44
5.5.3 Uçucu Kül Takviyeli Kompozitlerin Korozyon Davranışı..... 50
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR..... 53
6.1 Deneysel Malzemeler..... 53
6.2 Deneysel Malzemelerin Üretim Yöntemi..... 53
6.3 Mikroyapısal Karakterizasyon Çalışmaları……..... 59
6.3.1 Metalografik İncelemeler..... 59
6.3.2 XRD İncelemeleri..... 59
6.3.3 Yoğunluk ve Elektrik İletkenliği Ölçümleri..... 59
6.4 Mekanik Özelliklerin Karakterizasyonu..... 60
6.4.1 Sertlik Ölçümü..... 60
6.4.2 Basma Deneyi..... 61
6.5 Korozyon Deneyi..... 61
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEMELER..... 63
7.1 Metalografik İnceleme Sonuçları……..... 63
7.2 XRD Sonuçları……. 66
7.3 Yoğunluk ve Elektrik İletkenliği Ölçüm Sonuçları…….. 68
7.3.1 Yoğunluk Ölçümü Sonuçları…… 68
7.3.2 Elektriksel İletkenlik Ölçümü Sonuçları…….. 70
7.4 Mekanik Deney Sonuçları……..…….. 71
7.4.1 Sertlik Deneyi Sonuçları…….. 71
7.4.2 Basma Deneyi Sonuçları…….. 75
7.5 Korozyon Deneyi Sonuçları……..……... 79
7.5.1 Talaş Ağırlık Oranının Korozyon Davranışına Etkisi…….. 85
7.5.2 Uçucu Kül Ağırlık Oranının Korozyon Davranışına Etkisi……. 86
8. GENEL SONUÇLAR..... 89
KAYNAKLAR..... 92
EKLER..... 99
ÖZGEÇMİŞ..... 133

KISALTMALAR

AA : The Aluminum Association, USA (Alüminyum Birliği)
ASTM : American Society for Testing and Materials
ISO : International Organization for Standardization
BS : British Standards (İngiliz Standartları)
NF : French Standards (Fransız Standartları)
CSA : Canadian Standards Association (Kanada Standartları Birliği)
MA : Mechanical alloying (Mekanik alaşımlama)
MM : Mechanical milling (Mekanik öğütme)
MD : Mechanical disordering (Mekanik düzensizleşme)
GKÇ : Gerilmeli korozyon çatlaması
BTO : Kriyoöğütme işleminde öğütücü bilya/karışım ağırlık oranı
İDG : İşlem denetim gereçleri. Kriyoöğütme işleminde yüzey etkin maddeler olarak görev yapan organik bileşikler. Katı, sıvı veya gaz olabilirler.
ODS : Oksit dispersiyonu ile sertleştirilmiş

ÇİZELGE LİSTESİ

		Sayfa
Çizelge 2.1:	Yüksek saflıktaki (≥ % 99.95) alüminyumun bazı önemli fiziksel özellikleri…….....	3
Çizelge 2.2:	Mukavemetlendirme mekanizmalarının aluminyum alaşımlarına etkisi….....	5
Çizelge 2.3:	Alüminyum dövme ve döküm alaşımlarının sınıflandırılması…….....	6
Çizelge 2.4:	6061 Alüminyum alaşımının farklı standartlardaki karşılıkları…….	10
Çizelge 2.5:	6061 alaşımının kimyasal bileşimi….....	10
Çizelge 2.6:	Alclad 6061 (7072 giydirmeli) alaşımının kimyasal bileşimi…….....	10
Çizelge 2.7:	6061 alaşımının farklı ısıl işlem durumlarında genel özellikleri……...	11
Çizelge 2.8:	6061-T6 veya T651 alaşımının çeşitli sıcaklıklardaki tipik mukavemet değerleri….....	12
Çizelge 5.1:	C ve F tip uçucu küllerin kimyasal bileşimleri (% ağırlık).....	41
Çizelge 5.2:	TS 639 ve ASTM C 618 standartlarına göre uçucu küllerin kimyasal bileşim oranları……	41
Çizelge 6.1:	Yatağan termik santralı uçucu külün kimyasal analizi……...	57
Çizelge 7.1:	6061 alüminyum alaşımı ile üretilen kompozitlerin karşılaştırılması. Teorik değerler literatürden alınmıştır...	79
Çizelge A.1:	BS EN 515: 1993 standardına göre alüminyum alaşımları için temel ısıl işlem simgeleri…….....	101

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa
Şekil 3.1:	(a) Geleneksel ve (b) direkt dönüşüm yöntemlerinde oluşan kayıplar…….....	16
Şekil 3.2:	Geleneksel ve direk dönüşüm yöntemlerininaşamaları……	17
Şekil 4.1:	Mekanik alaşımlama sırasında bilya-toz-bilya çarpışması…..	30
Şekil 4.2:	Kararlı – hal koşullarında küçük parçacıkların birbiri ile kaynaklanma ve büyük parçacıkların kırılma eğiliminden ötürü parçacık boyut dağılımı dardır……	31
Şekil 4.3:	Öğütme süresi ile incelen parçacık ve tane boyutu. Küçülme hızı artan öğütme enerjisiyle, bilya/toz ağırlık oranıyla ve düşen sıcaklıkla birlikte yükselir……..	32
Şekil 4.4:	Sünek – sünek bileşen sisteminin öğütülmesinde sarmallı hale gelmiş katmanlı yapıyı gösteren tarama elektron mikrografı (Ag-Cu)……..	34
Şekil 4.5:	Mekanik alaşımlamada kullanılan değişik nitelikteki başlangıç tozlarının deformasyon karakteristikleri……..	35
Şekil 4.6:	Sünek – gevrek toz kombinasyonunun öğütme sırasındaki mikroyapısal dönüşümünün şematik gösterimi. Bu tipik bir oksit dispersiyonu ile sertleştirme durumudur…….	35
Şekil 4.7:	Mekanik öğütülmüş α_2-titanyum aluminit matris içindeki Er_2O_3 parçacıklarının üniform dispersiyonunu gösteren geçirimli elektron mikroskobu görüntüsü……	36
Şekil 4.8:	Si – Ge toz karışımının 12 saat süreyle mekanik alaşımlanması sonunda yumuşak germanyum matris içinde daha sert silisyum parçacıklarını gösteren taramalı elektron mikroskobu görüntüsü…….....	37
Şekil 6.1:	İncelenen talaşlara uygulanan termal temizleme işlemine ait akım şeması……..	53
Şekil 6.2:	Talaş kırma cihazı…….....	54
Şekil 6.3:	(a) 200-400 µm ve (b) 400-600 µm arası sınıflandırılan talaşların partikül boyut dağılımı…….	54
Şekil 6.4:	Malvern Mastersizer 2000-S partikül boyut analiz cihazı…..	55
Şekil 6.5:	Union HD-01 marka atritör cihazı……...	55
Şekil 6.6:	Kalsine edilmiş uçucu külün partikül boyut dağılımı……..	56
Şekil 6.7:	Original ve kalsine edilmiş uçucu küle ait XRD paterni. K-Kuvars (SiO_2); M - Müllit ($3Al_2O_3.2SiO_2$)……..	57
Şekil 6.8:	(a) Disk üretiminde kullanılan kalıp ve soğuk preslenen parçanın şematik, (b) Soğuk preslenen ve ardından 350°C'de ekstrüde edilen numune görüntüsü……...	58

Şekil 6.9: (a) 100 ton kapasiteli dikey eksenli hidrolik pres ve ısıtma kontrol sistemi, (b) ekstrüzyon kalıbı……... 58
Şekil 7.1: Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağ. or. 100/1; ağ. %20 kül – ağ. %40 saf Al toz – Ağ. %40 AA6061 talaş; ort. talaş boyutu 190 μm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme……. 63
Şekil 7.2: Kriyoöğütmenin mikroyapıya etkisi…… 64
Şekil 7.3: Talaş boyutunun talaş ile tozun bağlanmasına etkisi……... 64
Şekil 7.4: Artan uçucu kül takviyesinin mikroyapıya etkisi. Kriyoöğütülmüş ve bilya/toz ağırlık oranı 32/1 olan numuneler. Matriste talaş/Al toz oranı 1/1' dir…… 65
Şekil 7.5: Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 100/1 ve ortalama talaş boyutu 190 μm olan bazı numunelerin X – ışını kırınım desenleri (XRD)……... 66
Şekil 7.6: Kriyoöğütülmüş ve bilya/toz ağırlık oranı 32/1 olan bazı numunelerin X – ışını kırınım desenleri (XRD)…….. 67
Şekil 7.7: Elle karıştırılmış ve ortalama talaş boyutu 190 μm olan bazı numunelerin X – ışını kırınım desenleri (XRD)…….. 67
Şekil 7.8: 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan oluşan kompozit malzemelerin yoğunluklarının talaş ağırlık oranına göre değişimi…..…….. 68
Şekil 7.9: 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan oluşan kompozit malzemelerde talaş ağırlık oranı ile birlikte boşluk hacim oranının değişimi……..... 68
Şekil 7.10: Uçucu kül takviyesi yapılmış 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan oluşan kompozit malzemelerin yoğunluklarının uçucu kül ağırlık oranına göre değişimi…..... 69
Şekil 7.11: Uçucu kül takviyesi yapılmış 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan oluşan kompozit malzemelerdeki boşluk hacim oranlarının uçucu kül ağırlık oranına göre değişimi…. 69
Şekil 7.12: 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan oluşan kompozit malzemelerin elektriksel iletkenliklerinin talaş ağırlık oranına göre değişimi……... 70
Şekil 7.13: Uçucu kül takviyesi yapılmış 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan oluşan kompozit malzemelerin elektriksel iletkenliklerinin uçucu kül ağırlık oranına göre değişimi…… 71
Şekil 7.14: 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan oluşan kompozit malzemelerin sertlik değerlerinin talaş ağırlık oranına göre değişmesi…….…… 72
Şekil 7.15: Azot tayini testi. Kriyoöğütülmüş numunelerde saf Al tozunun ağırlık oranının artmasıyla numunedeki azot oranı artmıştır……..... 73
Şekil 7.16: Uçucu kül takviyesi yapılmış 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan oluşan kompozit malzemelerin sertlik değerlerinin uçucu kül ağırlık oranına göre değişmesi……... 74
Şekil 7.17: 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan müteşekkil kompozit malzemelerin akma dayanımlarının talaş ağırlık oranına göre değişmesi…….…… 75
Şekil 7.18: 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan müteşekkil kompozit malzemelerin basma dayanımlarının talaş ağırlık oranına göre değişmesi…….…… 77

Şekil 7.19: Uçucu kül takviyesi yapılmış 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan oluşan kompozit malzemelerin akma dayanımlarının takviye edilen uçucu külün ağırlık oranı ile değişmesi…….. 77
Şekil 7.20: Uçucu kül takviyesi yapılmış 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan oluşan kompozit malzemelerin basma dayanımlarının takviye edilen uçucu külün ağırlık oranı ile değişmesi…….. 77
Şekil 7.21: Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 100/1 ve ortalama talaş 190 μm olan numuneler. Korozyon deneyi boyunca zamanla meydana gelen ağırlık kayıplarının farklı toz-talaş ağırlık oranına sahip numunelere göre değişimi…….. 80
Şekil 7.22: Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 100/1 ve ortalama talaş boyutu 190 μm olan numuneler. Korozyon deneyi boyunca zamanla meydana gelen ağırlık kayıplarının farklı uçucu kül – toz – talaş ağırlık oranına sahip numunelere göre değişimi……... 80
Şekil 7.23: Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 32/1 ve ortalama talaş boyutu 190 μm olan numuneler. Korozyon deneyi boyunca zamanla meydana gelen ağırlık kayıplarının farklı toz – talaş ağırlık oranına sahip numunelere göre değişimi…. 81
Şekil 7.24: Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 32/1 ve ortalama talaş boyutu 190 μm olan numuneler. Korozyon deneyi boyunca zamanla meydana gelen ağırlık kayıplarının farklı uçucu kül – toz – talaş ağırlık oranına sahip numunelere göre değişimi……... 81
Şekil 7.25: Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 32/1 ve ortalama talaş boyutu 660 μm olan numuneler. Korozyon deneyi boyunca zamanla meydana gelen ağırlık kayıplarının farklı toz – talaş ağırlık oranına sahip numunelere göre değişimi…. 82
Şekil 7.26: Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 32/1 ve ortalama talaş boyutu 660 μm olan numuneler. Korozyon deneyi boyunca zamanla meydana gelen ağırlık kayıplarının farklı uçucu kül – toz – talaş ağırlık oranına sahip numunelere göre değişimi……... 83
Şekil 7.27: Elle karıştırılmış ve ortalama talaş boyutu 190 μm olan numuneler. Korozyon deneyi boyunca zamanla meydana gelen ağırlık kayıplarının farklı toz – talaş ağırlık oranına sahip numunelere göre değişimi……... 83
Şekil 7.28: Elle karıştırılmış ve ortalama talaş boyutu 190 μm olan numuneler. Korozyon deneyi boyunca zamanla meydana gelen ağırlık kayıplarının farklı uçucu kül – toz – talaş ağırlık oranına sahip numunelere göre değişimi…….. 84
Şekil 7.29: Elle karıştırılmış ve ortalama talaş boyutu 660 μm olan numuneler. Korozyon deneyi boyunca zamanla meydana gelen ağırlık kayıplarının farklı toz – talaş ağırlık oranına sahip numunelere göre değişimi……... 85

Şekil 7.30: Elle karıştırılmış ve ortalama talaş boyutu 600 μm olan numuneler. Korozyon deneyi boyunca zamanla meydana gelen ağırlık kayıplarının farklı uçucu kül-toz-talaş ağırlık oranına sahip numunelere göre değişimi……..... 85
Şekil 7.31: Uçucu kül ilavesiz ve farklı özellikteki numunelerde talaş oranı ile korozyon kaybının değişimi (48. Saat sonunda)…… 86
Şekil 7.32: Farklı ağırlık oranlarında uçucu kül takviyesi yapılmış numunelerde uçucu kül ağırlık oranı ile korozyon kaybının değişimi (48. Saat sonunda)……. 87
Şekil 7.33: Korozyon deneyinde korozif çözeltinin pH değerinin zamanla değişmesi……... 87
Şekil 7.34: Korozyon deneyinde korozif çözeltinin elektriksel iletkenliğinin zamanla değişmesi……. 88
Şekil B.1: Optik mikroskopla çekilen mikroyapı görüntüleri……... 103
Şekil C.1: Al – N denge diyagramı……... 117
Şekil D.1: Korozyon yüzeyi SEM görüntüleri…….. 119

ALÜMİNYUM TALAŞININ GERİ KAZANIMI VE UÇUCU KÜL TAKVİYELİ ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİT ÜRETİMİ

ÖZET

Bu çalışmada, sıfıraltı sıcaklıklarda mekanik öğütme işlemi ile alüminyum alaşımı talaşlarının geri kazanımı ile uçucu kül takviyeli ve uçucu kül takviyesiz alüminyum matrisli kompozit malzeme üretimi incelenmiştir. Bu amaçla, kriyojenik öğütme işleminin, değişen talaş ağırlık oranının, değişen talaş boyutunun ve değişen uçucu kül ağırlık oranının kompozit malzemenin mekanik özelliklerine (sertlik, basma dayanımı, akma dayanımı v.b.) ve korozyon davranışına etkisi araştırılmıştır.

Öncelikle, bileşimi ve safsızlık oranlarına göre ayrılan 6061 alüminyum alaşımı talaşlarına termal temizleme uygulanmıştır. Termal temizleme uygulanan talaşlar talaş kırma cihazında kırılarak ortalama talaş boyutu 190 μm ve 660 μm olarak sınıflandırılmıştır. Daha sonra, bağlayıcı faz olarak ortalama parçacık boyutu 27 μm olan saf alüminyum tozu kullanılarak değişen talaş ağırlık oranlarına sahip toz – talaş karışımları hazırlanmıştır. Ayrıca, eşit ağırlık oranına sahip Al tozu ve 6061 alaşımı talaşı içeren ve değişen ağırlık oranlarında uçucu külden oluşan karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımların bir kısmı atritörde sıvı azot ortamında 2 saat süreyle kriyojenik şartlarda öğütülmüş, diğer bir kısmı da seramik havanda 5-10 dakika süreyle elle karıştırılmıştır. Karışımlar 700 MPa basınç altında 10 dakika süreyle tek yönlü olarak soğuk preslenerek 30 mm çapında ve 20 mm yüksekliğinde diskler haline getirilmiştir. Daha sonra, 100 ton kapasiteli dikey eksenli hidrolik pres yardımıyla 350 ºC' de 9:1 oranında ekstrüde edilerek 10 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda numuneler elde edilmiştir.

Hazırlanan numunelerin mikroyapısal karakterizasyonu (metalografik inceleme, XRD analizi, yoğunluk ve elektrik iletkenliği ölçümü), mekanik özellik karakterizasyonu (sertlik ölçümü ve basma deneyi) ve korozyon deneyi yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, uçucu kül hacim oranının artması ile yoğunluk ve elektrik iletkenliği düşmekte, boşluk hacim oranı artmaktadır. Fakat, kriyoöğütme işlemiyle ve kriyoöğütmedeki öğütücü bilya/karışım ağırlık oranının artmasıyla kompozitteki boşluk hacim oranındaki artış daha az gerçekleşmektedir. Kriyoöğütme işleminde en yüksek bilya/toz ağırlık oranına sahip numunelerin sertlik, akma ve basma dayanımı değerleri diğer numunelerden daha yüksektir. Bu numunelerde, uçucu kül takviye oranı yaklaşık ağ. % 5 olduğunda mekanik özellikler en yüksek değerde iken artan uçucu kül takviyesi ile düşmektedir.

RECYCLING OF THE ALUMINUM CHIPS AND FLY ASH REINFORCED ALUMINUM MATRIX COMPOSITE PRODUCTION

SUMMARY

In this thesis, recycling of aluminum alloy chips by mechanical milling process at subzero temperatures and production of aluminum matrix composite with and without fly ash addition was investigated. For this purpose, the effects of cryomilling process, the size and amount of chips and wt. % fly ash to the mechanical properties (hardness, compressive strength, compressive yield strength, etc.) and corrosion behaviour of the composite specimens were examined.

At first, seperated 6061 Al alloy chips according to the composition and their impurities were cleaned by thermal method. Then, chips were comminuted at the cutting device and classified as 190 μm and 660 μm chip size. Using the pure Al powder that has average particle size 27 μm as a binder phase, powder – chips mixtures with different amount of chips were prepared. Additionally, blends that have different wt. % fly ash with the same weight ratio of pure Al powder and 6061 alloy chips were prepared. Some of this mixtures were cryomilled at the attritor type mill in liqued nitrogen environment for 2 hours, other mixtures were prepared by hand mixing in the ceramic bowl for 5 – 10 minutes. All mixtures were pressed in the one direction under 700 MPa pressure for 10 minutes and brought in to the 30 mm diameter and 20 mm height cylindirical disk. Then, these disks were extruded to 10 mm diameter and 50 mm length samples with 9:1 extrusion ratio at 350 ºC by using 100 tonnes capacity vertical axis hydraulic press.

Microstructural characterizations (metallographic examination, XRD analysis, density and electrical conductivity measurement), mechanical properties characterizations (hardness measurement and compression test) and corrosion test of these samples were performed. According to the experimental results, density and electrical conductivity decrease and porosity level increases with the increased wt % fly ash in the composites. However, porosity level decreases with the cryomilling process and increasing ball/powder weight ratio at the cryomilling. Hardness, compressive yield strength and compressive strength of the cryomilled specimens that have bigger ball/powder weight ratio are supreme when compared with others. Mechanical properties of these composites have highest values when fly ash reinforcement ratio is about 5 wt. % whereas mechanical properties decrease with the increasing fly ash content.

1. GİRİŞ

Teknik ve ekonomik sebeplerden ötürü hafif yapısal metallere olan ilgi artarak devam etmektedir [1]. Düşük yoğunluk, düşük elektrik direnci, yüksek ısıl iletkenlik, yüksek özgül dayanım ve mükemmel işlenebilirlik özellikleri alüminyum ve alüminyum alaşımlarını en önemli hafif metallerden biri yapmaktadır. Ayrıca, koruyucu oksit tabakası sayesinde atmosferik korozyona karşı dirençleri yüksek olan alüminyum alaşımları manyetiklik özelliği göstermez [2]. Yapısal ve yapısal olmayan uygulamalarda alüminyum alaşımlarının kullanımına olan talebin artmasıyla, yarı mamullerin talaşlı imalatında oluşan alüminyum talaşlarının geri kazanımının önemi artmaktadır. Alüminyum talaşlarının geleneksel yöntemle (ergitilerek) geri kazanımı yüksek ergitme kaybı, yüksek enerji tüketimi ve yüksek işletme maliyetinden ötürü ekonomik değildir [3,4].

Geleneksel geri kazanıma alternatif olarak direkt geri dönüşüm yöntemi önerilmiştir. Alüminyum alaşımı talaşlarının direkt dönüşümle geri kazanımı yöntemi talaşların ayrılması, kesme cihazında boyutlarının ufaltılması, bağlayıcı faz ile karıştırılması, takviye fazı olarak seramik parçacıklarının ilave edilmesi (istenirse), yüksek enerjili bilyalı değirmende öğütülmesi, soğuk preslenmesi ve sıcak ekstrüde edilmesi safhalarını kapsamaktadır [5-9]. Bununla birlikte, bu çeşit bir direkt dönüşüm yöntemiyle geri kazanılan malzemelerin mekanik özellikleri metalürjik usullerle üretilenlere kıyasla biraz daha düşüktür. Bunun nedeni, yapıda boşluk kalması ve zayıf bağlanmadır [9-11].

Malzemedeki boşluk hacim oranını azaltmak ve bağlanmayı arttırmak için kriyoöğütme, sıcak presleme ve ardından çok-eksenli dövme proseslerinin uygulanabilirliği incelenmiştir [12, 13]. Geleneksel direkt dönüşüm yönteminin tersine bu yöntemde toz parçacıklarına büyük ölçüde ısı aktarımı söz konusu değildir. Sıfıraltı sıcaklıklarda yürütülen kriyoöğütme işleminin ardından düşük sıcaklıkta (300 – 350 ^{o}C) gerçekleştirilen sıcak deformasyonla daha yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip kompozit malzemeler elde edilebileceği belirtilmiştir.

Ülkemizde her yıl tonlarca uçucu külün depolandığı alanlarda su ve hava kirliliği tehlikesi her zaman mevcut olup, yeraltı ve yüzey suları çözünmüş tuzlar ve ağır metal iyonları ile kirlenme tehlikesi altındadır. Dünyada yılda yaklaşık 80 milyon ton uçucu kül ortaya çıkmasına rağmen, ekonomik kayıplar ve ciddi boyutlarda çevre kirliliğine yol açan bu atık ürünlerin ne yazık ki çok az bir kısmı değerlendirilmektedir [14].

Bu tezde geleneksel yönteme alternatif olarak düşük maliyetle ve ergitme olmaksızın alüminyum talaşlarının kırılarak sıfıraltı sıcaklıklarda mekanik öğütme prosesi ile geri kazanımı ve çok düşük maliyetli uçucu kül ilave edilerek hem mukavemeti hem de süneklik özelliği yüksek kompozit malzeme üretimi amaçlanmıştır. Böylece, Türkiye'deki alüminyum talaşlarının ve termik santral atığı uçucu küllerin kompozit üretiminde değerlendirilebilmesi araştırılacak, en uygun üretim koşulları belirlenecek ve uçucu kül, istifade edilebilir bir malzeme olarak endüstrinin hizmetine sunulacaktır.

2. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

2.1 Alüminyumun Genel Özellikleri

Alüminyumun en dikkat çekici karakteristiği çok yönlü bir malzeme olmasıdır. İnceltilmiş yüksek safiyetteki alüminyumdan en kompleks alaşımlara doğru gidildikçe fiziksel ve mekanik özellikler kayda değer ölçüde geliştirilebilir. Üç yüzden fazla alüminyum alaşımının bileşimi yaygın olarak tanınmaktadır. Buna ilave olarak, hem uluslararası hem de tedarikçi/müşteri arasında çeşitli alaşım kodlama sistemleri mevcuttur [15].

Çizelge 2.1' de saf alüminyumun genel özellikleri verilmiştir. Görünüm, hafiflik, şekillendirilebilirlik, fiziksel özellikler, mekanik özellikler ve korozyon direnci gibi özellikleri alüminyum ve alaşımlarını geniş kullanım alanları için en ekonomik ve ilgi çekici malzeme kılmaktadır [15].

Çizelge 2.1: Yüksek saflıktaki (≥ % 99.95) alüminyumun bazı önemli fiziksel özellikleri [16].

Özellik	**Değer**
Isıl nötron kesiti	0.232 ± 0.003 barns
Latis sabiti (birim kübün kenar uzunluğu)	4.0496 x 10^{-10} m (298 K' de) (24.85 ºC)
Yoğunluk (katı)	2.699 g/cm^3 (latis aralıklarından gidilerek hesaplanan teorik yoğunluk) 2.697 – 2.699 g/cm^3 (polikristalin malzeme)
Yoğunluk (sıvı)	2.357 g/cm^3 (972 K' de) (698.85 ºC) 2.304 g/cm^3 (1173 K' de) (899.85 ºC)
Uzama katsayısı	23 x 10^{-6} /K (293 K' de)
Isıl iletkenlik	2.37 W · cm^{-1} · K^{-1} (298 K' de) (24.85 º)
Hacimsel özdirenç (elektriksel)	2.655 x 10^{-8} Ω · m
Manyetik yatkınlık (molar)	16 x 10^{-3} m^3 · mol^{-1} (298 K' de) (24.85 ºC)
Yüzey gerilimi	868 dyne/cm (ya da mN/m)(ergime noktasında)
Viskozite	0.012 poise (ergime noktasında)
Ergime noktası	933.5 K (660.35 ºC)
Kaynama noktası	2767 K (2493.85 ºC)
Ergime ısısı	397 J/g

Çizelge 2.1 (devamı): Yüksek saflıktaki (≥ % 99.95) alüminyumun bazı önemli fiziksel özellikleri [16].

Özellik	**Değer**
Buharlaşma ısısı	1.08×10^{-4} J · g^{-1} · K^{-1}
Isı sığası	0.90 J · g^{-1} · K^{-1}

2.7 g/cm^3 yoğunluk değeriyle hafif metaller sınıfına giren alüminyum çeliğin (7.83 g/cm^3), bakırın (8.93 g/cm^3) ya da pirincin (8.53 g/cm^3) yoğunluğunun yaklaşık 3'te 1'i kadardır. Çelikle kıyaslandığında görece düşük çekme mukavemetine sahip olan alüminyum, mukavemet-ağırlık oranı dikkate alındığında oldukça iyi bir durumdadır. Alüminyum, ağırlık faktörünün önemli rol oynadığı havacılık ve otomotiv sanayi uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. [15, 17].

$$\text{Mukavemet-ağırlık oranı} = \frac{\text{Çekme mukavemeti}}{\text{Yoğunluk}} \qquad \textbf{(1.1)}$$

Atmosfer, su (tuzlu su dahil), petrokimyasal ve pek çok diğer kimyasal çevrelerde alüminyum mükemmel korozyon direnci sergilemektedir [15].

Alüminyum yüzeylerinin yansıtıcılığı yüksek olabilir. Işıma enerjisi (elektromanyetik dalga olarak dolaşan enerji), görünür ışık, ışıma ısısı (ışıma yoluyla iletilen ısı) ve elektromanyetik dalgalar etkili bir biçimde yansıtılırken, anotlanmış (anotlama: Metal parçalarının yüzeyindeki doğal oksit tabakasının kalınlığını arttırmak için uygulanan elektrolitik pasifleştirme işlemi) yüzeyler yansıtıcı veya soğurucu olabilmektedir. Parlatılmış alüminyumun yansıtabilirliği, bu parçaların çeşitli dekoratif ve fonksiyonel uygulamalarda tercih edilmelerine neden olmaktadır [15].

Alüminyumun genel olarak elektriksel ve ısıl iletkenliği mükemmeldir. Bununla birlikte elektriksel direnci yüksek olan özel alaşımlar da mevcuttur. Yüksek elektriksel dirence sahip olan bu alaşımların kullanım alanına yüksek torklu elektrik motorları örnek verilebilir. Aynı tel uzunluğu, aynı direnç ve aynı voltaj değerinde bir alüminyum telin kesiti bakır telin kesitinden yaklaşık 1.6 kat daha büyük iken ağırlık olarak yaklaşık yarısına eşittir. Yüksek voltajlı ve uzun iletken teller gibi uygulamalar için gereken iletkenlik ve mekanik dayanım kriterleri, ortasından çelik geçirilen alüminyum kabloları ile yerine getirilmektedir. Alüminyum alaşımlarının ısıl iletkenlik değerlerinin bakır alaşımlarının yaklaşık % 50 – 60' ı kadar olması hasebiyle alüminyum alaşımlarının ısı değiştiricilerinde, buharlaştırıcılarda, elektrikli

ısıtıcı gereç ve malzemelerinde, otomotiv silindir kapak ve radyatörlerinde kullanımı daha avantajlıdır [15].

Alüminyum ferromanyetik davranış göstermez. Bu özellik elektrik ve elektronik endüstrisi için önemlidir. Alüminyum piroforik (pyrophoric) değildir. Yani, havada kendiliğinden parlayıp yanmaz. Bu özellik, çabuk tutuşan veya patlayan malzemelerle çalışılması durumunda önem kazanmaktadır. Ayrıca, zehirli etkiye sahip olmamasından ötürü alüminyum, yiyecek kaplarında ve içecek kutularında yaygın bir biçimde kullanılmaktadır [15].

Bazı alüminyum alaşımları mukavemet bakımından yapısal çelikleri (düşük karbonlu çelikler) geçmektedir. Fakat, saf alüminyum ve belirli alüminyum alaşımlarının sertlik ve mukavemet değerlerinin aşırı düşük olduğunu belirtmek gerekir [15].

Alaşım elementlerinin çok az miktarda da olsa ilavesi alüminyumun fiziksel özelliklerini büyük ölçüde değiştirir. Çeşitli mukavemetlendirme mekanizmaları ile saf alüminyumun mekanik özellikleri çok büyük oranlarda arttırılabilir (Çizelge 2.2) [17].

Çizelge 2.2: Mukavemetlendirme mekanizmalarının aluminyum alaşımlarına etkisi [17].

Malzeme	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	% Uzama	$\frac{\text{Akma dayanımı(alaşım)}}{\text{Akma dayanımı(saf)}}$
Saf tavlı Al (% 99.999 Al)	45	17	60	
Ticari saflıkta Al (tavlı, % 99 Al)	90	34.5	45	2.0
Katı çözelti sertleştirmesi (% 1.2 Mn)	110	41	35	2.4
% 75 soğuk deformasyon (saf Al)	165	152	15	8.8
Dispersiyon sertleştirmesi (% 5 Mg)	290	152	35	8.8
Yaşlandırma (% 5.6 Zn - % 2.5 Mg)	572	503	11	29.2

Alüminyum yorulma sınırı göstermediğinden nihai olarak kırılma oldukça düşük gerilmelerde meydana gelebilir. Ergime noktası düşük olduğu için yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilmez. Alüminyum alaşımları düşük sertliğe ve buna bağlı olarak düşük aşınma direncine sahiptirler [17].

2.2 Alüminyum Alaşımlarının Genel Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları üretim yöntemine göre dövme alüminyum alaşımları ve döküm alüminyum alaşımları olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Dövme alüminyum alaşımları, ingot olarak üretilen alaşımın plastik şekil verme yöntemleri ile yarı mamul ya da mamül haline getirilmesi ile elde edilirler. Döküm alüminyum alaşımları ise bileşimi ve özellikleri ayarlanmış sıvı metalin kalıba dökülmesi ile elde edilirler.

Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılmasında Alüminyum Birliği (AA) tarafından geliştirilen bir simgeleme sistemi kullanılmaktadır (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3: Alüminyum dövme ve döküm alaşımlarının sınıflandırılması [17].

Dövme Alaşımları	**Alaşım**	**Yaşlandırma Isıl İşlemi**
1xxx[a]	Ticari saflıkta Al (> %99 Al)	Yaşlanamaz
2xxx	Al-Cu	Yaşlanabilir
3xxx	Al-Mn	Yaşlanamaz
4xxx	Al-Si ve Al-Mg-Si	Yaşlanabilir (Eğer Mg var ise)
5xxx	Al-Mg	Yaşlanamaz
6xxx	Al-Mg-Si	Yaşlanabilir
7xxx	Al-Mg-Zn	Yaşlanabilir
8xxx	Diğer elementler (Li, Sn, Zr veya B)	Yaşlanabilir
9xxx	Kullanılmayan Seri	-
Döküm Alaşımları		
1xx.x[b]	Ticari saflıkta Al (> %99 Al)	Yaşlanamaz
2xx.x	Al-Cu	Yaşlanabilir
3xx.x	Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si	Bazıları Yaşlanabilir
4xx.x	Al-Si	Yaşlanamaz
5xx.x	Al-Mg	Yaşlanamaz
6xx.x	Kullanılmayan seri	-
7xx.x	Al-Mg-Zn	Yaşlanabilir
8xx.x	Al-Sn	Yaşlanabilir
9xx.x	Kullanılmayan seri	-

a: İlk hane ana alaşım elementini; ikinci hane modifikasyonu; ve son iki hane % Al konsantrasyonunun ondalık kısmını göstermektedir (örneğin, 10<u>60</u>: % 99.<u>6</u> Al alaşımı anlamına gelir).
b: Son hane ürünün şeklini belirtir. 1 veya 2 ingot (saflığa bağlı olarak) olduğunu; 0 döküm olduğunu belirtir.

2.2.1 Dövme Alüminyum Alaşımları

1xxx Serisi Alüminyum Alaşımları:

% 99 ve daha üstü saflıktaki alüminyumun başta elektriksel ve kimyasal olmak üzere pek çok uygulamaları mevcuttur. Bu serideki alüminyumların karakteristik özellikleri

mükemmel korozyon direnci, yüksek ısıl ve elektriksel iletkenlik, düşük mekanik özellikler ve mükemmel işlenebilirliktir. Deformasyon sertleşmesiyle orta seviyede bir dayanım artışı elde edilebilir. Başlıca safsızlıklar demir ve silisyumdur. Kimyasal araç – gereçler, yansıtıcılar, ısı değiştiricileri, elektriksel iletkenler ve kondansatörler, ambalaj folyoları, mimari uygulamalar ve dekoratif süslemeler tipik kullanım alanlarıdır [15].

2xxx Serisi Alüminyum Alaşımları:

2xxx serisi alaşımlarında temel alaşımlama elementi bakır ile birlikte ikinci alaşımlama elementi olarak sıklıkla magnezyum kullanılmaktadır. Bu alaşımlarda en uygun özellikleri elde etmek için çözeltiye alma ısıl işlemi uygulamak gerekir. Bu serideki alaşımların mekanik özellikleri, çözeltiye alma işlemiden sonra, düşük karbonlu çeliklerinkine benzer olmakta ya da onları geçmektedir. Bazı durumlarda mekanik özelliklerin daha fazla yükselmesi için çökelti sertleşmesi işlemi (yaşlandırma) uygulanmaktadır. Bu işlem akma dayanımını yükseltirken, yüzde uzamayı azaltmaktadır. Çekme dayanımı üzerindeki etkisi büyük değildir. 2xxx serisi alaşımlarının korozyon dirençleri diğer pek çok alüminyum alaşımınınki kadar iyi değildir. Belirli şartlarda tanelerarası korozyona maruz kalabilirler. Bu yüzden, sac formunda olan 2xxx serisi alaşımlarının üzeri genellikle yüksek saflıkta alüminyum veya 6xxx serisinden magnezyum – silisyum alaşımları ile giydirme (Alclad sheet) usulü kaplanır. Bu giydirme işlemi alttaki metale galvanik koruma sağlamakta ve korozyon direncini büyük ölçüde artırmaktadır. Yüksek dayanım – ağırlık oranları gerektiren parça ve yapılar için 2xxx serisi alaşımları özellikle uygundur. Çoğunlukla, traktör ve uçak jantlarında, traktör süspansiyon parçalarında, uçak gövdesi, kanat yüzeyleri ve 150 ºC'in üzerinde iyi dayanım değerleri gerektiren yapısal parçaların imalinde kullanılmaktadır. 2219 alaşımı dışında bu serideki alaşımların kaynaklanabilirliği sınırlıdır. Bununla birlikte, bu serideki bazı alaşımların talaşlı işlenebilirliği üst düzeydedir [15].

3xxx Serisi Alüminyum Alaşımları:

3xxx serisi alaşımlarında ana alaşım elementi mangandır. Bu serideki alaşımlar genellikle ısıl işlemle sertleştirilemezler fakat 1xxx serisi alaşımlarından yaklaşık % 20 daha mukavemetlidirler. Mangan ancak kısıtlı bir yüzdede (yaklaşık % 1.5' e kadar) alüminyuma etkin bir şekilde ilave edilebildiği için başlıca alaşım elementi

olarak kullanıldığı sadece birkaç alaşım vardır. Bununla birlikte, bunların üçü – 3003, 3X04 ve 3105 – iyi işlenebilirlik gerektiren orta dayanım uygulamaları için genel amaçlı alaşımlar olarak yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bu uygulamalara örnek olarak meşrubat kutuları, mutfak kab-kacakları, ısı değiştiricileri, depolama tankları, tente, mobilya, otoyol işaret levhaları, çatı malzemeleri ve diğer mimari uygulamalar gösterilebilir [15].

4xxx Serisi Alüminyum Alaşımları:

4xxx serisi alaşımlarının ana alaşım elementi silisyumdur. Yeterli miktarlarda (% 12' ye kadar) ilave edilebilen silisyum, gevreklik oluşturmadan ergime sıcaklığının önemli ölçüde düşmesine neden olmaktadır. Bu sebepten ötürü, Al – Si alaşımları kaynaklanan metalin ergime sıcaklığından daha düşük ergime bölgelerinde alüminyum kaynağı için kaynak teli ve sert lehimleme alaşımları olarak kullanılmaktadır. Bu serideki pek çok alaşım ısıl işlemle sertleştirilemez, fakat ısıl işlemle sertleştirilebilen kaynaklama alaşımları ile kaynak edildikleri zaman, bunlar bazı alaşım bileşenlerini arttırmakta ve sonrasında ısıl işleme kısıtlı ölçüde cevap verebilmektedir. 4032 alaşımı düşük ısıl genleşme katsayısı ve yüksek aşınma direnci ile dövme motor pistonları üretimi için çok uygundur [15].

5xxx Serisi Alüminyum Alaşımları:

5xxx serisi alaşımlarının esas alaşım elementi magnezyumdur. Magnezyumun esas alaşım elementi olarak ya da mangan ile kullanılması durumunda orta – yüksek mukavemetli ve deformasyonla sertleşebilen bir alaşım elde edilmektedir. Magnezyumun sertlik artışındaki etkisi manganın etkisinden kayda değer biçimde daha fazladır. Yaklaşık % 0.8 Mg' un etkisi yaklaşık % 1.25 Mn' ın etkisine eşittir. Bu durumda, alaşıma magnezyumdan daha fazla ilave edilebilir. Bu serideki alaşımlar iyi kaynak kabiliyetine ve deniz atmosferinde iyi korozyon direncine sahiptirler. Bununla birlikte, yüksek magnezyum içerikli alaşımlarda gerilmeli korozyon çatlaması (GKÇ) hassasiyetini önlemek için soğuk deformasyon miktarında ve müsaade edilebilir güvenli çalışma sıcaklığında (yaklaşık % 3.5' in üzerinde Mg içeren alaşımlar için çalışma sıcaklığı yaklaşık 65 ºC' tan fazla olmamalıdır) [15].

Magnezyum içeriği arttıkça alaşımlardaki katı çözeltilerin aşırı doygunluğu artmaktadır ve katı çözeltilerin fazlalık gelen aşırı magnezyumu, matrise göre anodik

olan, Mg_2Al_3 fazı olarak çökelme eğilimindedir. Bu fazın tane sınırları boyunca sürekli bir ip şeklinde çökelmesi ve diğer taraftan, tane içinde çok az veya hiç çökelti olmaması gerilmeli korozyon çatlaması hassasiyetinin artması ile sonuçlanabilir. Bu hassas mikroyapı 5xxx serisi alaşımlarında magnezyum içeriğine, tane yapısına, deformasyon sertleşmesi miktarına ve takip eden süre/sıcaklık geçmişine bağlıdır. Görece düşük magnezyum içeren alaşımlar, örneğin 5052 ve 5454 (magnezyum içerikleri sırasıyla % 2.5 ve % 2.7) aşırı doygunlukları orta seviyede olduğu için yükselen sıcaklık ile gerilmeli korozyon çatlamasına karşı dirençleri etkilenmez. Tersine, magnezyum içeriği yaklaşık % 3 sınırını aşan alaşımlar deformasyon sertleşmesi temperinde oldukları zaman ısıtılmaları halinde veya oda sıcaklığında çok uzun süreler tutulmaları halinde bile hasas yapılar oluşabilir. Örneğin, % 1 gerdirilmiş levha durumunda olan 5083 – O (% 4.5 magnezyum) alaşımının mikroyapısına bakıldığında, göreceli olarak, tane sınırlarında sürekli bir ip şeklinde çökelmiş ikinci – faz partikülleri bulunmaz ve gerilmeli korozyon çatlaması (GKÇ) hassasiyeti yoktur. Diğer taraftan, Al-Mg denge diyagramındaki solvüs eğrisinin altına kadar uzun süre ısıtıldığında tane sınırlarında sürekli çökeltiler oluşmakta ve bu da GKÇ hassasiyetini arttırmaktadır [16].

6xxx Serisi Alüminyum Alaşımları:

6xxx serisi alaşımları yaklaşık olarak magnezyum silisid (Mg_2Si) oluşumunun gerektirdiği oranlarda silisyum ve magnezyum içermektedirler. Bu sayede ısıl işlemle sertleşebilmektedirler. 2xxx ve 7xxx serisi alaşımları kadar güçlü olmasa da 6xxx serisi alaşımları iyi şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik, talaşlı işlenebilirlik ve korozyon direncine sahip orta seviyede mukavemetli alaşımlardır. Isıl işlemle sertleştirilebilen bu gruptaki alaşımlar T4 temperinde (çözeltiye alma ısıl işlemi fakat çökelti sertleştirmesi işlemi değil) şekillendirilebilir ve şekillendirmenin ardından çökelti sertleştirmesi ısıl işlemi tüm T6 özelliklerine vakıf olacak şekilde mukavemetlendirilebilirler. Kullanım alanları mimari uygulamalar, bisiklet şasileri, ulaşım ve taşıma araçları, köprü küpeşteleri ve kaynaklı yapılar olarak sıralanabilir [15].

6061 ve Alclad 6061 Alaşımının (1.0Mg-0.6Si-0.30Cu-0.20Cr) karakteristik özellikleri çok iyi korozyon direnci, çok iyi kaynak edilebilirlik (kaynaklı bölgede mukavemet değerleri düşmektedir), yaşlandırma ısıl işlemi ile sertleştirilebilme,

ortalama yorulma dayanımı olarak sıralanabilir. T4 ısıl işlemine tabi tutulmuş olanlarda soğuk şekil alma kabiliyeti iyidir. Çok karmaşık kesitler için uygun değildir [18].

Çizelge 2.4' te 6061 alüminyum alaşımının farklı standartlardaki karşılıkları verilmiştir.

Çizelge 2.4: 6061 Alüminyum alaşımının farklı standartlardaki karşılıkları [15, 18].

Alüminyum Birliği (AA)	Amerika (ASTM)	ISO	Birleşik Krallık (BS)	Fransa (NF)	Kanada (CSA)
6061	6061	AlMg1SiCu	H20 (eski) 6061 (yeni)	A-G5UC (eski) 6061 (yeni)	GS11N

Çizelge 2.5 ve Çizelge 2.6' da, sırasıyla, 6061 alüminyum alaşımının ve Alclad 6061 (7072 giydirmeli) alüminyum alaşımının kimyasal bileşimleri verilmiştir.

Çizelge 2.5: 6061 alaşımının kimyasal bileşimi [15].

Elementler	**% Ağırlık**
Si	0.40 – 0.80
Fe	0.7 En fazla
Cu	0.15 – 0.40
Mn	0.15 En fazla
Mg	0.8 – 1.2
Cr	0.04 – 0.35
Zn	0.25 En fazla
Ti	0.15 En fazla
Diğerleri (teker teker)	0.05 en fazla
Diğerleri (toplam)	0.15 en fazla
Geri kalan	Al

Çizelge 2.6: Alclad 6061 (7072 giydirmeli) alaşımının kimyasal bileşimi [15].

Elementler	**% Ağırlık**
Si	0.70 En fazla + Fe
Cu	0.10 En fazla
Mn	0.10 En fazla
Mg	0.10 En fazla
Zn	0.8-1.3
Diğerleri (teker teker)	0.05 en fazla
Diğerleri (toplam)	0.15 en fazla
Geri kalan	Al

6061 alüminyum alaşımları, mukavemet, kaynaklanabilirlik ve korozyon dayanımının gerektiği yerlerde kullanılmaktadır. Trenlerdeki ağır iş gören parçalarda, kamyon şasilerinde, gemi imalatında, köprülerde, askeri köprülerde,

uçaklarda, borularda, direk ve kulelerde, taşımacılıkta, ısıtma kazanı imalatında; Motorlu teknelerde, havacılık uygulamalarında, helikopter pervane kaplamalarında; Perçinlerde kullanılmaktadır. Ürün biçimleri levha, çubuk, boru, profil kesit, dövme ve düşük sıcaklıkta çarpmayla üretilen küçük külçeler olarak sıralanabilir [15, 18].

Farklı ısıl işlem durumlarında olan 6061 ve Alclad 6061 (7072 giydirmeli) alüminyum alaşımlarına ait genel mekanik özellikler Çizelge 2.7' de verilmiştir. BS EN 515: 1993 standardına göre alüminyum alaşımları için temel ısıl işlem simgeleri Çizelge A.1' de verilmiştir.

Çizelge 2.7: 6061 alaşımının farklı ısıl işlem durumlarında genel özellikleri [15' den derlenmiştir].

Özellikler	**Isıl İşlem Durumu**		
	O	**T4, T451**	**T6, T651**
Kütle özellikleri			
Yoğunluk, g/cm^3, (20 °C'de)	2.70	2.70	2.70
Mekanik özellikler			
Çekme mukavemeti, MPa	124	241	310
Çekme mukavemeti, MPa ***(Alclad 6061)***	117	228	290
Akma mukavemeti, MPa	55	145	276
Akma mukavemeti, MPa ***(Alclad 6061)***	48	131	255
% uzama;			
1.6 mm kalınlığında numune için	25	22	12
13 mm çapında numune için	30	25	17
% uzama ***(Alclad 6061)***;			
1.6 mm kalınlığında numune için	25	22	12
13 mm çapında numune için	-	-	-
Kayma mukavemeti, MPa	83	165	207
Kayma mukavemeti, MPa ***(Alclad 6061)***	76	152	186
Sertlik,			
Brinell sertliği[a], HB	30	65	95
Vickers sertliği[b], HV	30	75	111
Elastiklik modülü, GPa			
Çekmede	68.9	68.9	68.9
Basmada	69.7	69.7	69.7
Yorulma dayanımı[c], MPa	62	97	97
Isıl özellikler			
Tam sıvılaşma sıcaklığı, °C	652	652	652
Tam katılaşma sıcaklığı, °C	582	582	582
Isıl genleşme katsayısı, Lineer, μm/m · K, (20 – 100 °C aralığında)	23.6	23.6	23.6
Özgül ısı, J/kg · K, (20 °C'de)	896	896	896
Isıl iletkenlik, W/m · K, (25 °C'de)	180	154	167
Elektriksel özellikler			
Elektriksel iletkenlik, % IACS, (20 °C'de)	47	40	43
Elektriksel direnç, nΩ · m, (20 °C'de)	37	43	40

Çizelge 2.7 (devamı): 6061 alaşımının farklı ısıl işlem durumlarında genel özellikleri [15' den derlenmiştir].

Özellikler	**Isıl İşlem Durumu**		
	O	**T4, T451**	**T6, T651**
Üretim özellikleri			
Çözeltiye alma sıcaklığı, °C	530	530	530
Yaşlandırma sıcaklığı, °C			
Haddelenmiş veya çekilmiş ürün[d]	160	160	160
Ekstrüzyon veya dövme ürün[e]	175	175	175

a: Veriler 500 kg yük, 10 mm çapında bilya ve 30 saniye yükleme sonucunda elde edilmiştir
b: Brinell sertlik değerlerinden dönüştürülmüştür.
c: Veriler R. R. Moore test tipine uygun olarak tam ters yönde gerilmenin de uygulandığı $5x10^8$ çevrime karşılık gelmektedir.
d: Haddelenmiş veya çekilmiş ürünlerin yaşlandırılması bu sıcaklıkta 18 saat tutularak yapılmaktadır.
e: Ekstrüzyon veya dövme ürünlerinin yaşlandırılması bu sıcaklıkta 8 saat tutularak yapılmaktadır.

T6 veya T651 ısıl işlem durumlarındaki 6061 alüminyum alaşımının farklı sıcaklıklardaki mukavemet ve kopma uzaması değerleri Çizelge 2.8' de verilmiştir.

Çizelge 2.8: 6061-T6 veya T651 alaşımının çeşitli sıcaklıklardaki tipik mukavemet değerleri [15].

Sıcaklık		**Çekme mukavemeti**		**Akma mukavemeti (ε = % 0.2 plastik)**		**% Uzama**
°C	**F**	**MPa**	**Ksi**	**MPa**	**ksi**	
-196	-320	414	60	324	47	22
-80	-112	338	49	290	42	18
-28	-18	324	47	283	41	17
24	75	310	45	276	40	17
100	212	290	42	262	38	18
149	300	234	34	214	31	20
204	400	131	19	103	15	28
260	500	51	7.5	34	5	60
316	600	32	4.6	19	2.7	85
317	700	24	3	12	1.8	95

7xxx Serisi Alüminyum Alaşımları:

% 1 ila % 8 arasında katılan çinko, 7xxx serisi Al alaşımlarının ana alaşım elementidir ve beraberinde ilave edilen az miktarda magnezyum ile birleştiği zaman ısıl işlemle sertleşebilen orta ila çok yüksek mukavemetli alaşımlar oluşmaktadır. Genellikle, bakır ve krom gibi diğer alaşım elementleri az miktarda ilave edilir. 7xxx serisi alaşımları uçak gövdesi yapılarında, hareketli kısımlarda ve diğer yüksek

gerilmeli parçalarda kullanılmaktadır. Yüksek mukavemetli 7xxx alaşımları gerilmeli korozyon çatlamasına (GKÇ) daha düşük direnç göstermektedir. Bu yüzden daha iyi dayanım, korozyon direnci ve kırılma tokluğu kombinasyonunu sağlamak için çoğu kez az miktarda aşırı yaşlandırılmış olarak kullanılmaktadır [15].

2.2.2 Döküm Alüminyum Alaşımları

Alüminyum döküm alaşımları yüksek dökülebilirlik özelliği ile tüm döküm alaşımları arasında döküme en elverişli gruplardan biridir. Döküm alüminyum alaşımları aşağıdaki özelliklerinden ötürü tercih edilmektedir:

- İnce kesitlerin doldurulabileceği iyi akışkanlık,
- Diğer pek çok metale kıyasla düşük ergime sıcaklığı,
- Döküm çevriminin kısalmasına yardımcı olan ergimiş alüminyumdan kalıba hızlı ısı transferi,
- Alüminyum ve alaşımlarında kayda değer oranda çözünen tek gaz hidrojendir. Alüminyum içindeki hidrojen çözünürlüğü üretim yöntemleri ile kolaylıkla kontrol edilebilmektedir,
- Pek çok alüminyum alaşımı göreceli olarak sıcak gevrek çatlaması ve sıcak yırtılma eğilimi göstermez,
- Kimyasal kararlılık,
- Nihai döküm yüzeyi iyidir: Parlak, biraz benekli ya da hiç lekesiz.

Döküm alüminyum alaşımları yaygın olarak basınçlı döküm, kokil kalıp, yaş kum, kuru kum, hassas döküm, alçı kalıba döküm yöntemleriyle üretilmektedir. Alüminyum alaşımları ayrıca vakumda döküm, düşük basınçlı döküm, savurmalı döküm ve modelle alakalı olan yitik köpük prosesi gibi yöntemler ile de dökülebilmektedir.

Döküm alüminyum alaşımları dövme alüminyum alaşımları ile aynı alaşım sistemine sahiptir. Döküm alaşımları, gerinim sertleşmesi (deformasyon sertleşmesi) hariç, dövme alaşımlarına uygulanan mekanizmalar ile mukavemetlendirilebilir ve ısıl işlem ile mukavemetlendirme durumuna göre dövme alaşımları ile aynı şekilde yaşlanabilir ve yaşlanamaz olmak üzere ikiye ayrılırlar.

Döküm alüminyum alaşımlarının büzülmeden ötürü husule gelen çekinti ve boşlukları kolayca besleyebilmek için yeterli akıcılığa sahip olmaları gerekmektedir.

Bunun için de döküm alüminyum alaşımlarının mukavemet arttırıcı elementlere ilave olarak kâfi miktarda ötektik yapıcı elementler (genellikle silisyum) içermesi gerekmektedir [19].

3. ALÜMİNYUM TALAŞLARININ GERİ KAZANIMI

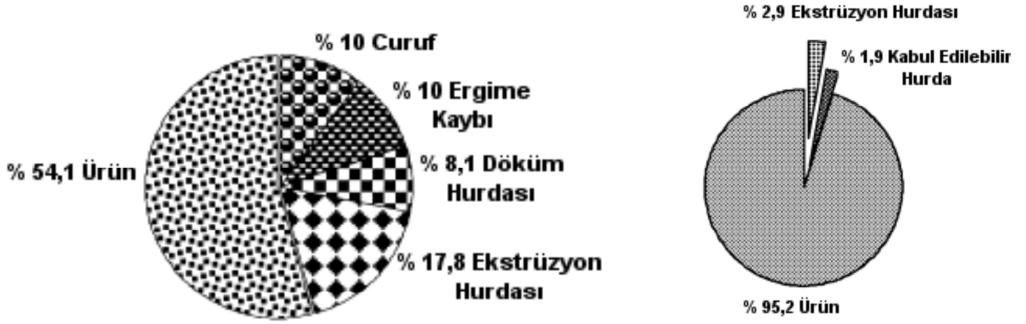
3.1 Direkt Dönüşüm Yöntemiyle Alüminyum Talaşlarının Geri Kazanımı

Alüminyumun talaşlı imalatı sırasında talaş şeklinde önemli ölçüde hurda oluşmaktadır. Metal hurdaları arasında alüminyum talaşlarının geleneksel geri dönüşüm yöntemiyle geri kazanılması çok zordur. Alüminyum talaşlarının uzamış spiral şekilli olması ve diğer metal hurdalarına göre küçük boyutlarda olması bunun ana sebeplerini oluşturmaktadır. Aynı zamanda alüminyum talaşları düşük yoğunluğa sahip oldukları için taşınmaları da zordur. Alüminyum talaşlarının yüzeyleri geniş oldukları için oksit tabakası ve talaşlı imalat sırasında kullanılan yağ ile kaplıdır. Bu faktörler de geri kazanımı zorlaştırmaktadırlar. Talaşların yüzey alanı/hacim oranı yüksektir. Yüzeydeki oksit tabakasının varlığı ve geri kazanım sırasında oluşan oksit tabakası yüzey alanına bağlıdır. Bu oksit tabakaları kütle kaybına sebep olarak geri kazanım verimini düşürürler [20].

Ergitme sırasında düşük metal kaybı ve taşınabilirlik açısından metal hurdanın kütlesel yoğunluğu yaklaşık 1 kg/dm^3 olmalıdır. Bu şartlar altında yeniden ergitme sırasında ortalama metal kaybı yaklaşık % 20 civarındadır ve geleneksel geri kazanma yöntemleri yüksek enerji tüketimi, yüksek çalışma maliyeti ve çok sayıda başka işlemlere yol açmaktadır (Şekil 3.1a). Ergitmeden sonra yapılan döküm, kesme ve hadde veya ekstrüzyon işlemlerinden ötürü yeniden ek hurda oluşmaktadır. Sonradan yapılan ergitme işlemi sırasında oluşan hurda ağırlıkça metal kaybının % 25' ine karşılık gelmektedir [3-5, 10, 20].

Geleneksel yöntemlerle alüminyum talaşlarının geri kazanımı oldukça güç olup, direkt dönüşüm yöntemine göre daha fazla malzeme kaybı olmaktadır. Geleneksel yöntemde geri kazanılan ürün miktarı sisteme beslenen hurda miktarının % 54'ü iken direkt dönüşüm yönteminde geri kazanılan ürün miktarı sisteme beslenen hurda miktarının % 95'dir. Yeniden değerlendirilebilir metal miktarının zamana bağlı olarak artması ve tüketiminin günümüzde çok yüksek olması metalik talaşın geri kazanımını önemli kılmaktadır. Ergitme sırasında talaşın nemi ve kirliliğinden dolayı

ergimiş metal patlaması gibi tehlikeler, duman ve cüruf gibi çevresel sorunlar oluşmaktadır. Ayrıca yüksek enerji tüketimi ve oksidasyonla metal kaybından dolayı düşük geri kazanım verimliliği ergitme işleminin dezavantajlarıdır [3-5, 10, 20]. Örneğin alüminyum talaşının geleneksel olarak ergitilerek geri kazanılmasında tüketilen enerji ton başına 16-19 GJ iken, kompaktlama ile alüminyum talaşının doğrudan geri kazanımı için 5-6 GJ gereklidir [5].



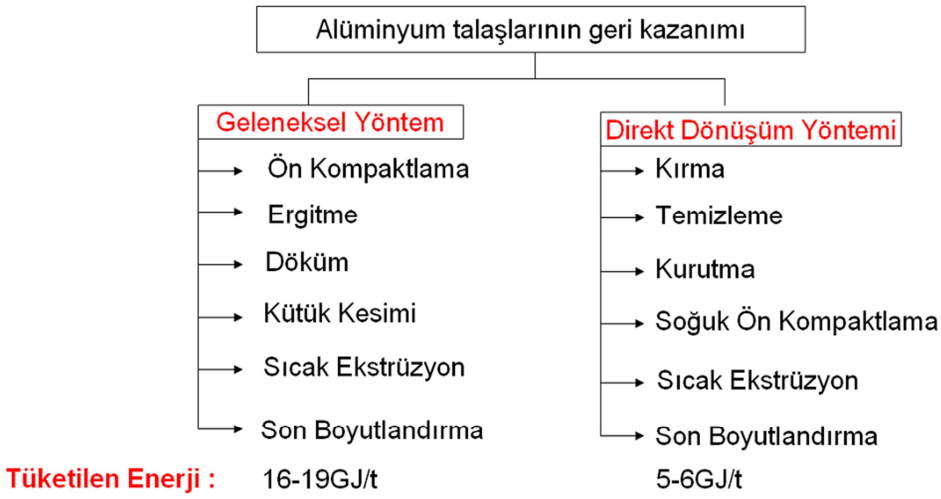
(a) **(b)**

Şekil 3.1: (a) Geleneksel ve (b) direkt dönüşüm yöntemlerinde oluşan kayıplar [10].

Direkt dönüşüm yöntemi ile metalik talaşların % 95'i geri kazanılabilir (Şekil 3.1b). Metalik talaşların direkt kompakt metale dönüştürülmesi sayesinde düşük iş gücü maliyeti, enerji tasarrufu, çevreye saygı ve metal kaynaklarının korunumu sağlanmış olacaktır [3-5, 10, 20]. Geleneksel ve direkt dönüşüm yöntemlerinin akış şeması Şekil 3.2'de verilmiştir. Metalik talaşın direkt dönüşümü sayesinde % 40 kadar malzemeden, % 26-31 enerji ve % 16-60 iş gücünden tasarruf sağlanmış olunur [3]. Son yıllarda yapılan bilimsel araştırmalar, direkt dönüşüm yöntemi ile alüminyum oksit [6], tungsten [21], demir-krom [22], karbon [20], silisyum karbür [20] ve bor karbür [23] takviyeli metal matrisli kompozitler üretilebileceğini göstermiştir.

Alternatif geri kazanım yöntemlerinde değirmen sistemi ile metalik talaşları toza dönüştüren malzeme dönüşümünde toz boyutu 1 ila 4 mm arasında değişmektedir. Geleneksel mekanik öğütme sırasında kaçınılmaz olan yüksek sıcaklık ince taneli mikroyapıda toparlanma ve yeniden kristalleşmeye yol açmaktadır [24]. Sıfıraltı sıcaklıkta mekanik öğütme sırasında sistem sürekli olarak sıvı azotla (77 K) beslendiğinden dolayı toparlanma ve yeniden kristalleşme etkisi giderilerek ince taneli yapılar elde edilecek ve daha hızlı tane incelmesi gerçekleşecektir. Bu çalışmada, önerilen sıfıraltı sıcaklıklarda çalışabilen mekanik öğütme cihazı ile

inceltilen alüminyum talaşlarının soğuk preslenip ardından sıcak ekstrüde edilmesi ile direkt dönüşümü ve sanayide bol miktarda bulunan alüminyum talaşının geri kazanımı sağlanmış olacaktır.



Şekil 3.2: Geleneksel ve direk dönüşüm yöntemlerinin aşamaları [5].

3.2 Direkt Dönüşüm Yönteminin Safhaları

Direkt dönüşüm yöntemi temel olarak talaşları hazırlama, karıştırma, kompaktlama, ekstrüde etme safhalarını kapsamaktadır. Alüminyum talaşlarının hazırlanması safhasında talaşlar öncelikle bileşimlerine ve safsızlık oranlarına göre ayrılır. Üretim sürecinde kullanılan soğutucu ve yağlayıcıların talaş yüzeyinden temizlenmesi kimyasal veya ısıl yöntemle gerçekleştirilmektedir. Temizlenen talaşlar, talaş kesme veya kırma cihazında ufak parçalara ayrılmaktadır. Hazırlanan talaşlara bağlayıcı ve/veya takviye fazı olarak ilaveler yapılarak bir karışım hazırlanmaktadır. Hazırlanan karışım, yaygın olarak, atritör tip öğütme değirmeninde belli bir süre öğütülmektedir. Karıştırılan ve öğütülen kompozit karışımı soğuk veya sıcak olarak preslenmektedir. Bu aşamada amaca göre sinterleme de yapılmaktadır. Nihai aşama olarak, kompozit malzemedeki boşluk hacim oranını azaltmak, fazlar arasındaki bağlanmayı arttırmak ve proses süresince oluşmuş olan alüminyum oksit tabakasını belirli oranda kırmak için ekstrüzyon işlemi uygulanmaktadır [20]. (Alüminyum oksit tabakasını kırmak istemenin nedeni, gevrek olan oksit fazının sürekliliğini bozarak, sürekliliğin bozulduğu yerlerde uygulanan yükün sünek matris tarafından karşılanarak soğurulması suretiyle malzemenin tokluğunu arttırmaktır.)

4. MEKANİK ALAŞIMLAMA VE ÖĞÜTME

Toz karışımlarının yüksek enerjili bilyalı değirmenlerde işlem görmesini ifade eden ve yaygın olarak kullanılan iki terim vardır: Mekanik alaşımlama (MA) ve mekanik öğütme (MM). Mekanik alaşımlama, toz karışımının (farklı metallerin veya alaşımların) birlikte öğütüldüğü ve homojen bir alaşım elde etmek için malzeme taşınımını da içeren bir işlemdir. Diğer taraftan, saf metaller, intermetalikler veya önalaşımlı tozlar gibi üniform bileşimli (genellikle stokiyometrik) tozların öğütülmesinde halihazırda kimyasal homojenlik varolduğu için malzeme taşınımına ihtiyaç yoktur. Böyle bir işleme mekanik öğütme denir. İntermetaliklerde uzun – mesafeli düzenin bozulması ile düzensiz intermetalik ya da amorf faz oluşmasına mekanik düzensizleşme (MD) denir [24, 25]. Mekanik öğütmenin mekanik alaşımlamaya göre avantajı, tozların zaten alaşımlı olmasından ötürü parçacık boyutunun küçülmesi ve/veya diğer dönüşümlerin gerçekleşmesi için sadece mekanik etkinin yeterli olmasıdır. Bu da işlem süresini kısaltmaktadır. Örneğin, aynı etkiyi oluşturmak için mekanik öğütmede gerekli süre mekanik alaşımlama için gerekli sürenin yarısı kadardır. Ayrıca, tozların mekanik öğütülmesinde işlem süresinin kısalmasına bağlı olarak toz bileşenlerinin oksidasyonu mekanik alaşımlamaya göre daha azdır [26].

Mekanik alaşımlama işlemi, tozların doğru oranda karıştırılması ve bu toz karışımının öğütme değirmenine yerleştirilmesi ile başlamaktadır. Öğütme işlemi genellikle kromlu çelik bilyalar ile yapılmaktadır. Öğütme işleminin süresi kimyasal bileşimde kararlılık oluşana kadar seçilebilir. Kararlı halden kasıt her bir toz parçacığının kimyasal bileşiminin başlangıç toz karışımında bulunan elementlerin oranı ile aynı olmasıdır. Öğütülen toz, katı cisim (bulk) şeklinde birleştirilir ve istenen mikroyapı ve özellikleri sağlamak için ısıl işlem uygulanır. Ham madde, öğütücü değirmen ve işlem değişkenleri mekanik alaşımlama işleminin önemli bileşenleridir [24].

MA' da kullanılan ham maddeler yaygın olarak parçacık boyutu 1-200 μm aralığında değişen ticari saflıktaki tozlardır. Fakat, öğütücü bilya çapından küçük olmak

kaydıyla toz parçacık boyutu çok kritik değildir. Bunun nedeni toz parçacık boyutunun zamanla üstel olarak düşmesi ve öğütmeye başladıktan sadece bir kaç dakika sonra bir kaç mikron mertebesine kadar küçük değerlere ulaşmasıdır. Toz formundaki ham maddeler saf metaller, master alaşımları, ön-alaşımlı tozlar ve refrakter bileşikleri gibi geniş kategorilere ayrılmaktadırlar. Dispersiyonla sertleştirilmiş malzemeler genellikle karbür, nitrür ve oksit katkısı ihtiva ederler. Oksit katkılı olan en yaygın olanıdır ve oksit – dispersiyonu ile sertleştirilmiş (ODS) malzemeler olarak bilinirler. Mekanik alaşımlamanın erken evrelerinde bağlayıcı ya da matris olarak iş görmesi için toz karışımının hacmen en az % 15'i basma ile deforme olabilen sünek metal tozu içerirdi. Fakat son yıllarda tamamen gevrek malzemeler alaşım oluşumu ile sonuçlanacak şekilde başarıyla öğütülmüştür. Bu sayede öğütme sırasında sünek metal tozu ihtiyacı ortadan kalkmıştır. Dolayısıyla yeni alaşımlar üretmek için sünek – sünek, sünek – gevrek ve gevrek – gevrek toz karışımları öğütme işlemi ile mekanik olarak alaşımlanabilmektedir. Son zamanlarda katı toz parçacıkları ve sıvı karışımları da öğütülmüş durumdadır [24].

Metal tozları sıvı ortamında öğütülürse ıslak öğütme; sıvının bulunmadığı bir ortamda öğütülürse kuru öğütme denir. Kriyojenik sıcaklıklarda sıvı kullanılarak yapılan dondurumlu öğütme (cryomilling) de ıslak öğütmeye örnektir. Daha ince öğütülmüş ürünler elde etmek için ıslak öğütmenin kuru öğütmeye göre daha uygun bir yöntem olduğu gösterilmiştir. Çünkü, ıslak öğütmede çözücü molekülleri yeni oluşan yüzeylere adsorbe olurlar ve bu parçacıkların yüzey enerjilerini düşürürler. Toz parçacıklarının daha az topaklanması durumu da ıslak ıslak öğütmenin yararlı bir yanıdır. Islak öğütme sırasında kuru öğütmeye göre amorflaşmanın daha hızlı olduğu gösterilmiştir. Bunlarla birlikte, ıslak öğütmenin dezavantajı tozdaki kirliliğin daha yüksek oluşudur. Bu yüzden mekanik alaşımlamaların çoğu kuru ortamda yürütülmektedir [24].

4.1 Değirmen Türleri

Mekanik alaşımlanmış tozların üretiminde çeşitli türlerde yüksek enerjili değerimenler kullanılmaktadır. Bunlar kapasite, öğütme verimi, soğutma, ısıtma ve benzeri ayarlamaları ile birbirinden ayrılmaktadırlar.

4.1.1 SPEX Çalkalamalı Değirmen

Tek seferde 10 – 20 g toz öğütebilen SPEX çalkalamalı değirmen çoğunlukla laboratuvar araştırmalarında ve alaşım eleme amaçlı kullanılmaktadır. Bu değirmenler SPEX CertPrep, Matuchan, NJ tarafından imal edilmektedir. En çok kullanılan türü tek şişecikli (vial) olanıdır. Şişecik sertleştirilmiş çelik, alümina, tungsten karbür, zirkonya, paslanmaz çelik, silisyum nitrür, akik, plastik ve metakrilattan imal edilebilir. Şişeciğin içine numune ve öğütme bilyaları konur; kelepçe ile sıkıştırılır ve devirli bir enerjiyle dakikada binlerce kez ileri – geri hareketi ile sallanır. İleri – geri sallanma hareketi şişeciğin sonlarında yanal hareket ile kombine olur, böylece hareket 8 sayısı ya da sonsuzluk işareti gibi olur. Şişeciğin her bir sallanmasında bilyalar numuneye ve şişecik sonuna çarparak hem numuneleri öğütürler hem de karıştırırlar. Kelepçe hareketinin genliği (yaklaşık 5 cm) ve hızı (yaklaşık 1200 devir/dakika) sebebiyle bilya hızları yüksektir (yaklaşık olarak 5 m/s) ve bu yüzden bilyaların çarpma kuvveti fevkalade büyüktür. Bu nedenle bu değirmenler yüksek enerjili öğütücüler olarak nitelendirilirler [24].

4.1.2 Planeter Bilyalı Değirmen

Mekanik alaşımlama deneylerinde kullanılan diğer bir değirmen planeter bilyalı değirmendir (pulveristte). Aynı anda bir kaç yüz gram tozun öğütülmesi yapılabilir. Bu cihaz Fritsch GmbH Almanya tarafından üretilmektedir. Planeter bilyalı değirmen, adını gezegen – benzeri hareket eden şişeciklerinden alır. Bu şişecikler dönen bir destek diskinin üzerinde durmakta ve özel bir hareket mekanizması bunların kendi eksenleri etrafında dönmelerini sağlamaktadır. Destek diskinin dönmesiyle şişecikler kendi eskenleri etrafında dönmekte ve böylece bir merkezkaç kuvveti oluşmaktadır. Oluşan bu merkezkaç kuvveti öğütülecek malzeme ve öğütücü bilyalardan müteşekkil şişecik içeriğine etki etmektedir. Şişeciklerin ve destek diskinin zıt yönlerde dönmesinden ötürü merkezkaç kuvveti değişimli olarak benzer ve zıt yönlerde etki etmektedir. Bu durum, öğütücü bilyaların şişeciğin iç duvarına sürtünerek hareket etmesini (sürtünme etkisi) ve bu suretle malzemenin öğütülmesini sağlamaktadır. Hareketin devamında, öğütücü bilyalar şişeciğin iç duvarından ayrılarak şişeciğin içerisinde serbestçe hareket etmek suretiyle karşı duvara çarparlar (çarpma etkisi). Şişecik ve öğütücü bilyalar sekiz farklı malzemeden imal edilebilir: akik (kuvars türü), silisyum nitrür, sinterlenmiş korundum, zirkonya, kromlu çelik,

Cr – Ni çelik, tungsten karbür ve plastik poliamid. Planeter bilyalı değirmende bilyaların çizgisel hızı SPEX değirmene göre daha fazla olsa bile, çarpışma sıklığı SPEX değirmende çok daha fazladır. Bundan ötürü, SPEX değirmen ile kıyaslandığında planeter bilyalı değirmen (Fritsch Pulverisette) daha düşük enerjili olarak nitelendirilir [24].

4.1.3 Atritör Değirmen (Sürtünmeli Aşındırma Değirmeni)

Geleneksel bilyalı değirmen, içi küçük çelik bilyalarla yarı dolu ve dikey olarak dönen bir tamburdan oluşmaktadır. Tamburun dönmesiyle bilyalar metal tozlarına çarparak tozları öğütürler. Öğütme oranı dönme hızıyla birlikte artar. Bununla birlikte, yüksek dönme hızlarında çelik bilyalara etkiyen merkezkaç kuvveti yerçekimi kuvvetini aşar ve bilyalar tamburun duvarına sanki kenetlenmiş gibi durur. Bu noktada öğütme olmaz. Bir atritör (yüksek enerji üretebilen bilyalı bir değirmen), dikey bir tambur ve içerisinde bir seri pervaneden (kol) oluşmaktadır. Güçlü bir motor öncelikle karıştırıcı şaftı döndürür. Karıştırıcı şaftın dönmesiyle üzerindeki pervaneler dönmeye başlayarak tambur içindeki çelik bilyaları ve öğütülecek malzemeyi karıştırırlar. Birbirlerine dik açılarla yerleştirilmiş olan bu pervaneler çarpmak suretiyle bilyalara enerji verirler. Tozlardaki boyut küçülmesinin nedeni bilyalar arasındaki çarpışma, bilyalar ve konteyner duvarları arasındaki çarpışma ve bilyalar, karıştırıcı şaft ve pervaneler arasındaki çarpışmadır. Toz parçacıklarının birbiri ile çarpışmaları ve bilyalara sürtünmeleri de boyut ufalmasına katkı sağlamaktadır. Atritörler aynı anda 0.5 – 40 kg arasında tozu öğütebilirler. Ticari atritörler Union Process, Akron, OH, USA tarafından üretilmektedir. Öğütme cisimlerinin (bilya, çubuk v.b.) hızı (yaklaşık 0.5 m/s) Fritsch veya SPEX değirmenden daha düşük olduğu için atritörlerin enerjisi daha düşüktür. Değişik büyüklük ve kapasitede atritörler mevcuttur. Öğütme tankı (ya da konteyneri) paslanmaz çelikten ya da iç kısmı alumina, silisyum karbür, silisyum nitrür, zirkonya, kauçuk ve poliüretan ile kaplanmış paslanmaz çelikten üretilmektedir. Öğütme cisimleri çeşitlilik arzetmektedir: Steatit seramik ($3MgO.4SiO_2.H_2O$), mullit ($3Al_2O_3.2SiO_2$), silisyum karbür, silisyum nitrür, sialon seramik (yüksek sıcaklık refrakter malzemesi), alumina, zirkonyum silikat ($ZrSiO_4$), zirkonya, paslanmaz çelik, karbon çeliği, kromlu çelik ve volfram karbür. Bir atritörün çalışması basittir. Öğütülecek tozlar, içinde öğütme cisimleri duran tankın içine yerleştirilir. Bu karışım, üzerinde pervaneleri (kollar) bulunan bir şaft ile 250 devir/dakika hızla

karıştırılır. Bu, öğütme cisimlerinin malzeme üzerine hem kesme hem de çarpma kuvveti uygulamasına sebep olur. Laboratuvar atritörleri geleneksel bilyalı değirmenlerden on kata kadar daha hızlı çalışabilmektedir [24].

4.1.4 Ticari Değirmenler

Mekanik alaşımlamada kullanılan ticari değirmenlerin boyutları yukarıda bahsedilen değirmenlerden çok daha büyüktür. Ticari amaçlı üretimde kullanılan bilyalı değirmenlerin kapasiteleri 1250 kg' a kadar varmaktadır. Öğütme süresi değirmenin enerjisindeki artışla azalmaktadır. SPEX değirmen ile 20 dakikalık öğütmenin düşük enerjili değirmen tipinde olan Invicta BX 920/2 ile yapılan 20 saatlik öğütmeye eşdeğer olduğu bildirilmiştir. Deneyimler sonucu, SPEX değirmen ile sadece bir kaç dakika alan bir öğütme işleminin bir atritörde saatler ve ticari değirmende bir kaç gün alabildiği görülmüştür. Bununla birlikte, ayrıntılar farklı değirmenlerin verimine bağlı olarak değişebilmektedir [24].

4.1.5 Yeni Tasarım Değirmenler

Son yıllarda özel amaçlı pek çok yeni tasarım değirmenler geliştirilmiştir: Çubuklu değirmen, titreşimli çerçeveli değirmen (vibrating frame mill) v.b. Cihazlar çeşitli üreticilerden temin edilebilir: Dymatron, Cincinnati, OH, USA; Super Misuni NEV – MA – 8 Nisshin Giken, Tokyo, Japonya (sıvı azot püskürterek çok düşük öğütme sıcaklıklarından elektrikle ısıtarak 300 ºC aralığında sıcaklık kontrolü sağlar); Uni – Ball – Mill, Australian Scientific Instruments, Canberra, Avustralya (Ayarlanabilir mıknatıslar yardımıyla alan yeğinliğini kontrol etmek suretiyle bilyaların çarpışma şiddetini ve mahiyetini kontrol etmek mümkündür); HEMill M.B.N. srl, Roma, İtalya; Zoz Maschinenbau GmbH, Kreuztal, Almanya [24].

4.2 İşlem Değişkenleri

Mekanik alaşımlama karmaşık bir işlemdir. Bu yüzden istenen faz ve/veya mikroyapıyı elde etmek için çok sayıdaki işlem değişkeninin optimize edilmesi gerekir. Tozların nihai yapısına tesir eden bazı önemli işlem değişkenleri şunlardır:

- Değirmen tipi,
- Öğütme konteyneri,
- Öğütme hızı,

- Öğütme zamanı,
- Öğütme cisimlerinin tipi, boyutu ve boyut dağılımı,
- Bilya/toz ağırlık oranı,
- Şişeciğin boyutu,
- Öğütme atmosferi,
- Proses kontrol gereçleri ve
- Öğütme sıcaklığı.

Tüm bu işlem değişkenleri tamamıyla bağımsız değildir. Örneğin, en uygun öğütme zamanı değirmen tipine, öğütme cisimlerinin boyutuna, öğütme sıcaklığına, bilya/toz ağırlık oranına bağlıdır.

4.2.1 Değirmen Tipi

Mekanik alaşımlama için değişik tipte değirmen kullanılabilir. Bu değirmenler kapasiteleri, işlem hızları, öğütme sıcaklığının değiştirilmesi ile işlemi kontrol altında tutabilme kabiliyeti ve tozlardaki kirliliklerin en aza indirilmesindeki etkinlik gibi kıstaslarla ayrılırlar. Toz türüne, miktarına ve nihai yapı gereksinimlerine bağlı olarak uygun bir değirmen seçilir. SPEX çalkalayıcı değirmen yaygın olarak alaşım eleme amacıyla kullanılmaktadır. Fritsch Pulverisette planeter bilyalı değirmen veya atritörler büyük miktarlarda toz öğütülmesinde kullanılmaktadır. Özel uygulamalar için özel tasarım değirmenler kullanılabilir [24].

4.2.2 Öğütme Konteyneri

Öğütme konteynerlerinin (öğütme kazanı, şişecik) hangi malzemeden yapıldığı önemlidir. Öğütme cisimlerinin konteynerin iç duvarına çarpmasıyla bazı malzeme parçacıkları kopabilir ve toza karışabilir. Eğer öğütme konteynerinin malzemesi toz karışımından farklı ise bu olay tozu kirletebilir veya bileşimini değiştirebilir. Öte yandan iki malzeme benzer ise toza karışan ilave miktarda elementi dengelemek için uygun tedbirler alınmadığı takdirde toz kimyasal olarak değişebilir. Sertleştirilmiş çelik, takım çeliği, sertleştirilmiş kromlu çelik, temperlenmiş çelik, paslanmaz çelik, WC – Co, WC – astarlanmış çelik (WC – lined steel), yatak çelikleri öğütme konteyneri imalinda en çok kullanılan malzemelerdir. Özel maksatlar için kullanılan bazı malzemeler bakır, titanyum, sinterlenmiş korundum, itriya dengeli zirkonya (Y_2O_3 - ZrO_2), kısmi dengeli zirkonya + itriya, safir (α-Al_2O_3), akik (kuvars çeşidi,

SiO_2), sert porselen, Si_3N_4 ve Cu-Be olarak sayılabilir Öğütme konteynerinin özellikle iç tasarımı ve şekli çok önemlidir. Düz uçlu ve yuvarlak uçlu SPEX değirmen konteynerleri bulunmaktadır. Düz uçlu şişecikte yuvarlak uçlu şişeciğe göre önemli ölçüde daha yüksek alaşımlama oluştuğu müşahede edilmiştir [24].

4.2.3 Öğütme Hızı

Değirmenin daha hızlı dönmesiyle toza daha yüksek enerji geçeceğinin farkına varmak kolaydır. Fakat, değirmenin tasarımına bağlı olarak çalıştırılabilecek en yüksek hızda belirli kısıtlamalar olabilir. Örneğin, geleneksel bilyalı değirmende dönme hızı arttıkça bilyaların hareket hızı artar. Kritik bir hızın üzerinde bilyalar şişeciğin iç duvarına mıhlanmak suretiyle şişecikle birlikte dönme hareketi yaparlar. Diğer bir deyişle, bilyalar aşağı düşerek çarpma kuvveti uygulama görevini yerine getiremezler. Bu nedenle en yüksek hız, kritik değerin hemen altında olmalıdır. Böylece bilyalar maksimum yükseklikten düşerek maksimum çarpma enerjisi üretirler [24].

Öğütme hızının ulaşabileceği üst değerle ilgili bir başka sınırlama yüksek hızın (veya öğütme yoğunluğunun) şişeciğin sıcaklığını yüksek bir değere artırabileceğidir. Bu hal, bazı durumlarda avantaj olabilir. Örneğin, tozların türdeşleşmesi ve/veya alaşımlanması için difüzyonun gerekli olduğu durumlarda sıcaklığın artması bir avantaj sayılabilir. Fakat, bazı durumlarda sıcaklığın yükselmesi dezavantaj olabilir, çünkü artan sıcaklık taşınım işlemini hızlandırırarak aşırı doymuş katı çözeltilerin veya öğütme sırasında oluşan diğer yarı dengeli fazların ayrışmasına neden olur. Ayrıca, yüksek sıcaklıklar tozda kirlilik ortaya çıkarabilir. Nanokristal oluşumu süresince, yüksek öğütme yoğunluklarında dinamik yeniden kristalleşmenin artması nedeniyle ortalama tane boyutunun arttığı ve iç gerinmenin düştüğü görülmüştür [24].

Calka ve diğerleri vanadyum ve karbon tozlarının farklı enerji seviyelerinde birlikte öğütüldüklerinde tozun nihai yapısının farklı olduğunu gözlemlemişlerdir. Çok düşük öğütme enerjisinde (veya hızında) tozun nanoboyutlu vanadyum taneleri ve amorf karbondan oluştuğu ve tavlama ile V_2C veya V + VC karışımı oluştuğunu görmüşlerdir. Orta enerji seviyesinde, öğütülmüş toz nanoyapılı olmakta ve tavlanınca VC'e dönüşmüştür. En yüksek enerji seviyesinde VC doğrudan öğütmeyle oluşmuştur. Benzer olarak, Ni – Zr toz karışımının yüksek enerjili öğütülmesi ile

tamamen amorf faz oluşurken, düşük ve orta öğütme enerjilerinde kristalin ve amorf faz karışımı oluşmuştur [24].

4.2.4 Öğütme Zamanı

Öğütme zamanı en mühim işlem değişkenidir. Genelde zaman, toz parçacıklarının kırılması ve soğuk kaynaklanması arasında dengeli bir hal elde etmek için ayarlanmaktadır. Gerekli zaman kullanılan değirmen tipine, öğütme yoğunluğuna, bilya/toz ağırlık oranına ve öğütme sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Öğütme süresi tüm bu işlem değişkenlerinin her bir kombinasyonuna ve özel toz sistemine göre belirlenmek durumundadır. Tozun gereğinden daha uzun sürelerde öğütülmesi durumunda kirliliğin artacağı ve bazı istenmeyen fazların oluşacağının anlaşılması gerekir. Bu nedenle tozun gerektiği sürede öğütülmesi esastır [24].

4.2.5 Öğütme Cisimleri

Sertleştirilmiş çelik, takım çeliği, sertleştirilmiş kromlu çelik, temperlenmiş çelik, paslanmaz çelik, WC – Co, yatak çelikleri öğütme cisimleri olarak en çok kullanılan malzemelerdir. Bilyaların toz üzerinde yeterli çarpma kuvvetini yaratabilmesi için öğütme ortamının yoğunluğu yüksek olmalıdır. Öğütme kabı için bazı özel malzemeler kullanılmaktadır. Bunlar bakır, titanyum, niobyum, zirkonya, akik, itriya dengeli zirkonya, kısmi dengeli zirkonya + itriya, safir (mavi korundum, α-Al_2O_3), silisyum nitrür (Si_3N_4) ve Cu – Be olarak sıralanabilir. Kirlilik bulaşmasını önlemek adına öğütme kabının ve öğütme cisimlerinin mümkün olduğunca öğütülen toz karışımı ile aynı (veya benzer) malzemeden olması istenir [24].

Öğütme ortamının boyutu da öğütme verimi üzerinde etki sahibidir. Yaygın kanı, daha büyük ve ağır bilyaların toz parçacıklarına daha fazla çarpma enerjisi aktarmasından ötürü, büyük boyutlu (ve yüksek yoğunluklu) öğütme ortamının daha kullanışlı olduğu yönündedir. Öğütme ortamının boyutu ile tozun nihai yapısı arasındaki ilişkinin incelendiği bazı çalışmalarda, küçük bilyaların daha yoğun sürtünme etkisi oluşturdukları ve bunun da amorf yapı oluşumunu desteklediği öne sürülmüştür. Bu çalışmalar, ‘hafif’ öğütme koşullarının (daha küçük boyutlu bilya, daha düşük enerjili öğütme ve daha küçük bilya/toz ağırlık oranı) amorflaşma veya yarıkararlı faz oluşumu için daha iyi olduğu yönünde bir öngörü oluşturmuştur [24, 27].

4.2.6 Bilya – Toz Ağırlık Oranı

Bilya – toz ağırlık oranı (BTO) öğütmede önemli bir değişkendir. Bu oran değişik araştırmacılar tarafından 1:1' den 220:1' e kadar çeşitlendirilmektedir. SPEX değirmen gibi küçük kapasiteli bir değirmende bilyanın ağırlığının tozun ağırlığına oranı genellikle 10:1 olarak alınmaktadır. Fakat, öğütme işlemi atritör gibi büyük kapasiteli bir değirmende yürütülürse bilya – toz ağırlık oranı 50:1' in üzerinde hatta 100:1 olarak alınmaktadır [24].

Bilya – toz ağırlık oranı öğütmede özel bir faz oluşturma için gerekli zaman üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bilya – toz ağırlık oranının yükselmesiyle gerekli zaman kısalmaktadır. Örneğin, Ti-%33 Al toz karışımının SPEX değirmende öğütülmesinde amorf faz oluşumu bilya – toz ağırlık oranı 10:1 olduğunda 7 saatte; 50:1 olduğunda 2 saatte; 100:1 olduğunda 1 saatte gerçekleştirilmiştir. Bilya – toz ağırlık oranı yüksek olduğunda, bilyaların ağırlık oranının artmasından mütevellit birim zamandaki çarpışma sayısı artmakta ve böylece toz parçacıklarına daha fazla enerji taşınarak daha hızlı alaşımlama husule gelmektedir. Açığa çıkan yüksek enerjiden ötürü oluşan daha fazla ısının tozun yapısını değiştirebilmesi de mümkündür. Sıcaklığın oldukça yükselmesi durumunda oluşan amorf fazın kristalize olması dahi mümkündür [24].

4.2.7 Şişeciğin Doluluk Oranı

Toz tanecikleri arasındaki alaşımlama bunlar üzerinde uygulanan çarpma kuvvetleriyle meydana geldiğinden öğütme konteynerinin içinde bilya ve toz parçacıklarının serbestçe dönme hareketi yapabilecekleri yeterli boşluk bulunmalıdır. Bu yüzden şişeciğin toz ve bilyalar ile doluluk oranı önemlidir. Eğer bilyaların ve tozun miktarı çok az olursa üretim hızı çok düşük olur. Diğer taraftan, eğer miktar çok fazla olursa bilyaların hareketi için yeterli boşluk olmayacak ve çarpma enerjisinde azalma olacaktır. Bu nedenle şişeciğin tam doldurulmamasına dikkat edilmelidir. Genellikle şişecik hacminin yaklaşık %50' si boş bırakılmaktadır [24].

4.2.8 Öğütme Atmosferi

Öğütme atmosferinin başlıca etkisi tozun kirlenmesi üzerinedir. Bu nedenle, tozlar ya vakuma alınmış ya da argon veya helyum gibi soygazlar ile doldurulmuş konteynerlerde öğütülmektedir. Azot gazı metal tozlarıyla tepkimeye girdiği için,

nitrür üretimi amaçlanmadıkça, öğütme sırasında kirliliği önleyici ortam olarak kullanılamaz. Yüksek sıcaklıktaki argon, tozların oksidasyonu ve/veya kirlenmesini önlemek için kullanılan en yaygın ortamdır. Azot ortamında oksidasyonun genellikle önlenebildiği veya en aza indirilebildiği de gözlenmiştir. Fakat bu, titanyum ve alaşımları gibi reaktif tozların öğütülmesinde geçerli değildir. Oksijen atmosferinde 20 saat öğütülen Ti – 48Al – 2W (% ağırlık olarak) tozunda ağırlıkça % 1.5 oksijen birikirken, aynı toz aynı süre azot ortamında öğütülünce ağırlıkça % 4.7 oksijen biriktiği gözlenmiştir [24].

Genellikle, tozların şişeciğe yüklenmesi ve boşaltılması iç atmosfer kontrollü eldivenli kabinlerde (glove box) gerçekleştirilir. Bazen de öğütme işlemi vakuma alınmış eldivenli kabinin içine yerleştirilen değirmende yürütülür [24].

Özel amaçlar için değişik öğütme ortamları kullanılmaktadır. Nitrür üretimi için azot veya amonyak atmosferi kullanılmaktadır [28]. Hidrür üretimi için hidrojen atmosferi kullanılmaktadır [29]. Özellikle tozların reaktif tabiatlı olması halinde şişecik içinde havanın varlığının tozda oksit ve nitrür oluşturduğu gösterilmiştir. Bu yüzden öğütmenin tepkimeye girmeyen soygaz atmosferinde yapılmasına dikkat edilmelidir. Atmosfer türünün nihai fazın tabiatını da etkilediği görülmektedir. Örneğin, Cr – Fe toz karışımı argon atmosferinde öğütüldüğünde amorf faz oluşmamış ve x-ışını kırınım deseninde Cr dorukları kalmıştır [30]. Diğer taraftan, argon ihtiva eden hava atmosferinde ya da azot atmosferinde öğütülmesi halinde tozun tamamen amorf hale geldiği görülmüştür. Benzer olarak, oksijenin Ni – Nb sisteminde amorflaşma hızını arttırdığı gösterilmiştir [31].

4.2.9 İşlem Denetim Gereçleri (İDG)

Öğütme süresince maruz kaldıkları ağır plastik deformasyondan ötürü özellikle sünek toz parçacıkları birbirlerine soğuk kaynaklanırlar. Ama toz parçacıkları arasındaki doğru alaşımlama ancak parçaçıkların soğuk kaynama ve kırılma arasındaki bir dengede tutulmasıyla gerçekleşebilir. Soğuk kaynaklanmayı en aza indirmek için öğütme sırasında toz karışımına bir işlem denetim gereci (yağlayıcı ya da yüzey etkin madde) ilave edilir. İDG’ ler katı, sıvı ve gaz olabilir. İDG’ ler zorunlu olmamakla birlikte çoğunlukla yüzey etkin madde olarak görev yapan organik bileşiklerdir. Yüzey etkin maddeler parçacıkların yüzeylerine tutunarak

soğuk kaynaklanmayı önlerler ve katı malzemenin yüzey gerilimini düşürürler. Böylece topaklanmaya engel olurlar [24].

Uygulamada işlem denetim gereçleri yüklenen toplam tozun ağırlıkça yaklaşık % 1 – 5' i arasında kullanılmaktadır. En önemli işlem denetim gereçleri stearik asit, hekzan, metanol ve etanoldür. Öğütme konteynerinde hava bulunması durumunda veya öğütmenin çok düşük sıcaklıklarda (kriyoöğütme) yapılması halinde kaynaklanma en aza inmektedir. Bunun en olası nedeni bu derece düşük sıcaklıklarda toz parçacıklarının gevrekliğinin yükselmesidir. Hidrojen atmosferinde öğütülen ymk yapılı metal tozları hidrür fazı oluşumundan mütevellit daha gevrek olurlar ve birbirlerine ve konteynerin iç duvarına yapışmazlar [24].

4.2.10 Öğütme Sıcaklığı

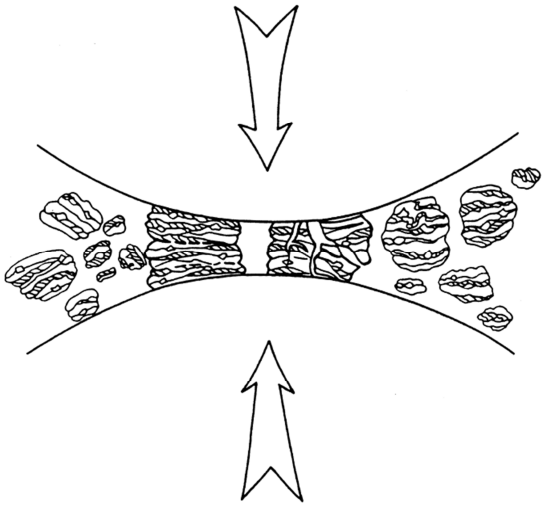
Alaşımlarda faz oluşumu sırasında difüzyon önemli bir yer tuttuğu için nihai fazın katı çözelti, intermetalik, nanoyapılı ya da amorf faz olup olmadığına bakmaksızın öğütme sıcaklığı her alaşım sistemi için önemli bir etkiye sahiptir. Sıcaklık değişimi ya öğütme kabının içine sıvı azot damlatmak suretiyle sıcaklığı düşürmek ya da elektrikli ısıtıcıya sahip öğütme kabı kullanılarak sıcaklığı yükseltmek şeklinde olur. Öğütme sıcaklığının katı çözünürlük derecesini ne şekilde etkilediğini ve amorf ya da nanokristalin yapı oluşumunu etkileyip etkilemediğini inceleyen bazı çalışmalar yapılmıştır. Nanokristal oluşumu sırasında öğütme sıcaklığının yükselmesiyle malzemenin ortalama tane boyutunun arttığı görülmüştür [32]. Yükselen öğütme sıcaklığı ile katı çözünürlük seviyesinin düştüğü bildirilmiştir [33].

Mekanik alaşımlamada amorflaşma, toz parçacıklarının kendi aralarında mikro – difüzyon çiftleri oluşturmaları ve ardından katı – hal amorflaşma reaksiyonları ile gerçekleşir. Bu nedenle sıcaklığın yükselmesi amorflaşma kinetiğini hızlandırmalıdır [24].

Mekanik öğütmede amorf faz oluşumu mekanik alaşımlamadaki mekanizmadan farklıdır. Mekanik öğütmedeki amorflaşma, nanokristalin yapı oluşumu sırasında artan tane sınırı enerjisine bağlı olarak meydana gelmekte ve düşen öğütme sıcaklığı ile amorflaşma kinetiği artmaktadır. Yükselen öğütme sıcaklığı ile tane boyutu büyümekte, amorflaşma süresi uzamakta ve seçilen sıcaklığa göre bazen amorflaşma meydana gelmemektedir. Bununla birlikte, öğütme sıcaklığına paralel olarak amorflaşma kinetiğin hem arttığı hem de azaldığı gözlemler bildirilmiştir [24].

4.3 Alaşımlama Mekanizması

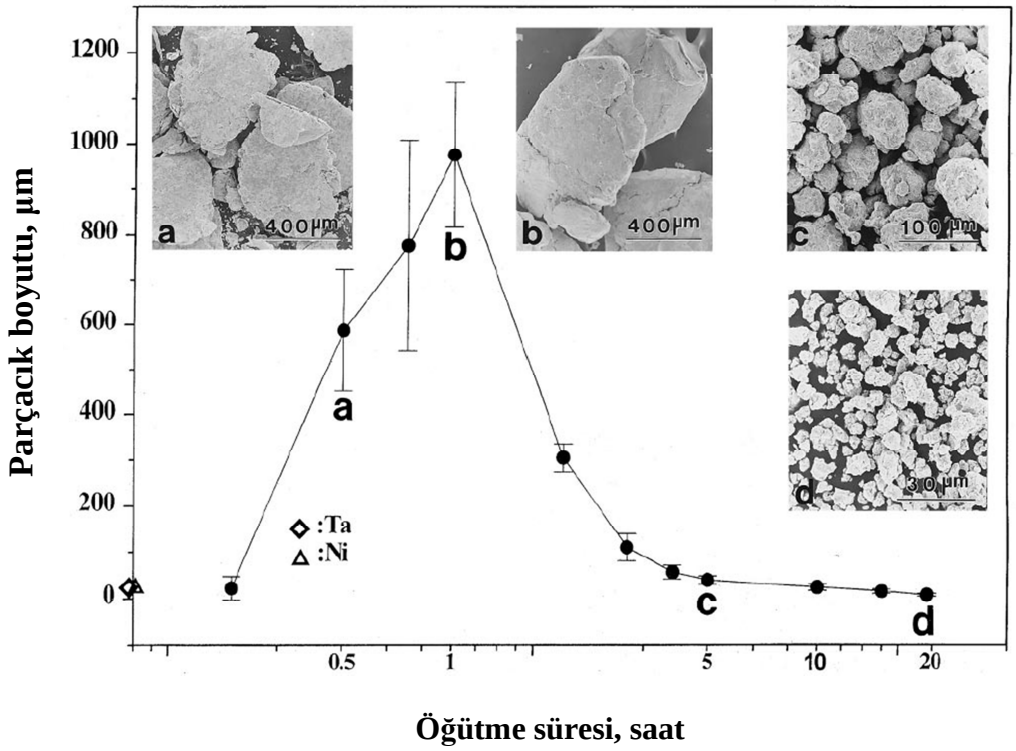
Yüksek enerjili öğütme süresince toz parçacıkları tekrar tekrar yassılaşır, soğuk kaynaklanır, kırılır ve tekrar kaynaklanır. İki çelik bilya çarpıştığında bir miktar toz bunların arasında sıkışmaktadır. Genellikle, her çarpışmada 0.2 mg ağırlığında ve takribi 1000 parçacık içeren bir küme bilyalar arasında sıkışmaktadır (Şekil 4.1). Çarpışma kuvveti toz parçacıklarını plastik şekil değişimine uğratarak deformasyon sertleşmesine ve kırılmaya neden olmaktadır. Yeni oluşan yüzeyler parçacıkların kaynaklanmasına imkan vermekte ve bu da parçacık boyutunun büyümesine sebep olmaktadır. Öğütmenin erken evrelerinde parçacıklar yumuşak olduğu için (eğer sünek – sünek veya sünek – gevrek malzeme kombinasyonu kullanılıyorsa) kaynaklanma ve daha büyük parçacıklar oluşturma eğilimi yüksektir. Bu suretle parçacık boyutları önemli ölçüde artmakta ve bazen başlangıç boyutunun üç katına kadar varmaktadır. Bu aşamada karakteristik olarak kompozit parçacıkları başlangıç bileşenlerinin çeşitli kombinasyonlarından meydana gelen katmanlı bir yapı oluştururlar. Devam eden deformasyon ile parçacıklar deformasyon sertleşmesine uğrarlar ve yorulma mekanizması ile ve/veya pulsu çatlakların (fragile flakes) parçalanması ile kırılırlar. Bu mekanizmayla oluşturulan kırık parçalar kuvvetli aglomerasyon kuvvetlerinin yokluğunda ufalmaya devam ederler. Bu aşamada, kırılma eğilimi soğuk kaynaklanma eğiliminden daha baskındır. Öğütme bilyalarının devam eden çarpışma hareketi nedeniyle toz parçacıkların yapısı kararlı bir şekilde incelmekte fakat parçacıkların boyutu aynı kalmaya devam etmektedir. Netice olarak katmanlararası mesafe azalmakta ve parçacıktaki katman sayısı artmaktadır [24].



Şekil 4.1: Mekanik alaşımlama sırasında bilya – toz – bilya çarpışması [34].

Geleneksel bilyalı değirmende parçacık boyutu küçülme verimi yaklaşık % 0.1 gibi çok küçük bir değerdedir. Yüksek enerjili bilyalı öğütmede bu verim bir hayli yükselmekte ancak hala % 1' in altında kalmaktadır. Kalan enerjinin büyük bir kısmı ısı formunda kaybolurken ufak bir kısmı da toz parçacıklarının elastik ve plastik deformasyonunda rol oynamaktadır [24].

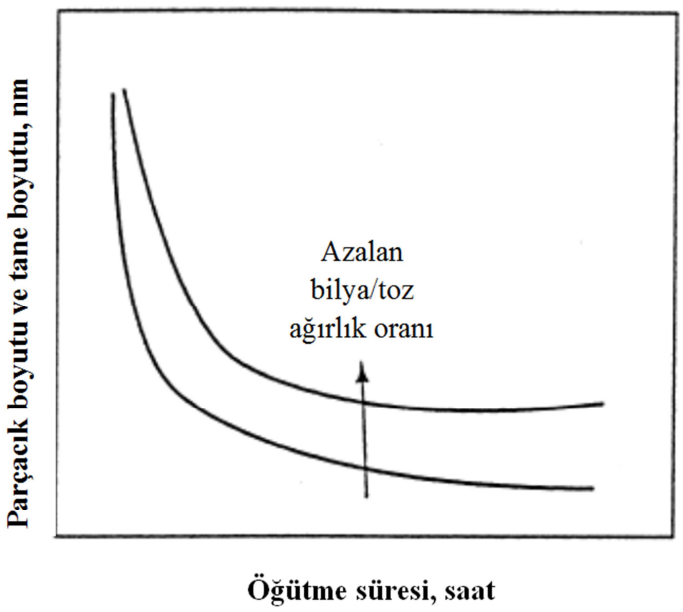
Belirli bir öğütme süresi sonunda kompozit parçacıklarının ortalama boyutunu artırma eğiliminde olan kaynaklanma hızı ile parçacıkların ortalama boyutunu küçültme eğiliminde olan kırılma hızı arasında bir denge kurulması ile kararlı durum yakalanır. Küçük parçacıklar deformasyona karşı kırılmadan dayanabilirler ve daha büyük parçaların oluşumu yönünde kaynaklanma eğilimindedirler. Çok ince ve çok kaba parçacık oluşumunun aynı anda ilerlemesi ile genel eğilim ortalama bir boyuta doğru gider. Bu aşamada her bir toz parçacığı, büyük ölçüde, başlangıç bileşenlerinin hepsini başlangıçtaki karışım oranı ile içermekte ve biriken birim şekil değiştirme enerjisi nedeniyle sertlikleri en üst düzeye ulaşmaktadır. Bu aşamada parçacık boyut dağılımı dardır. Bunun nedeni, ortalamadan büyük olan parçacıkların küçülme hızı ile ortalamadan küçük olan kırık parçacıkların aglomere olarak büyüme hızlarının aynı olmasıdır (Şekil 4.2) [24].



Şekil 4.2: Kararlı – hal koşullarında küçük parçacıkların birbiri ile kaynaklanma ve büyük parçacıkların kırılma eğiliminden ötürü parçacık boyut dağılımı dardır [24].

Mekanik alaşımlamada parçacıklara yoğun bir deformasyon uygulanmaktadır. Bu durum dislokasyonlar, boşluklar, dizilim hataları gibi çeşitli kristal yapı hatalarının varlığı ve artan tane sınırından açıkça anlaşılmaktadır. Bu kristal yapı kusurları, çözünen elementlerin matrise yayınırlığını arttırmaktadırlar. Bundan başka, incelmiş bir mikroyapı difüzyon mesafesini azaltmaktadır. Ayrıca, öğütme sırasında sıcaklıktaki küçük artış difüzyon davranışına ilave bir katkı yapmakta ve netice olarak bileşen elemetler arasında doğru alaşımlama meydana gelmektedir. Bu alaşımlama genellikle oda sıcaklığında gerçekleştirilmektedir. Fakat bazen alaşımlamanın oluşabilmesi için mekanik alaşımlanmış tozlar yüksek bir sıcaklığa ısıtılır. Bu, intermetaliklerin oluşmasının istendiği durumlar için kısmen doğrudur [24].

Herhangi bir sistemde istenen yapının oluşması için gerekli süre bileşenlerin başlangıçtaki parçacık boyutuna ve karakteristiğine olduğu kadar mekanik alaşımlama işleminin yürütüldüğü teçhizata ve işlem parametrelerine de bağlıdır. Fakat, pek çok durumda, iç yapının (parçacık boyutu, kristalit boyutu, katmanlararası mesafe v.b.) incelme hızı işlem süresi ile kabaca logaritmik olarak değiştiği için parçacığın başlangıç boyutu görece önemsizdir. Birkaç dakikadan bir saate kadar geçen süre içinde katmanlararası mesafe genellikle çok küçülmekte ve kristalit (veya tane) boyutu nanometre (1 nm = 10^{-9} m = 10 Å) mertebesine inmektedir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3: Öğütme süresi ile incelen parçacık ve tane boyutu. Küçülme hızı artan öğütme enerjisiyle, bilya/toz ağırlık oranıyla ve düşen sıcaklıkla birlikte yükselir [24].

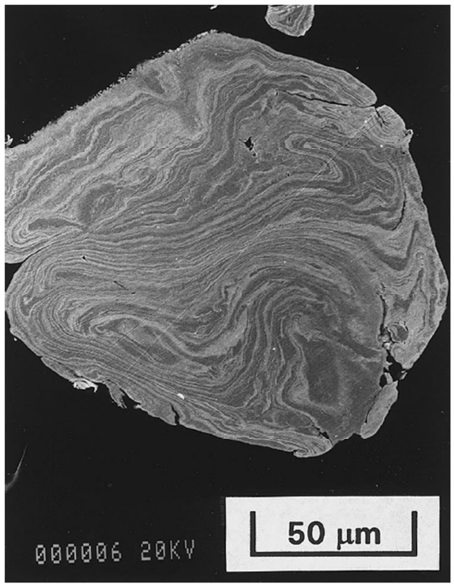
Mekanik alaşımlamayı üç farklı metal ve alaşım kombinasyonunda uygulamak mümkündür: (i) sünek – sünek, (ii) sünek – gevrek ve (iii) gevrek – gevrek sistemler.

4.3.1 Sünek – Sünek Bileşen Sistemi

Sünek – sünek malzeme eşlemesi mekanik alaşımlama için en iyi malzeme kombinasyonudur. Benjamin' e göre alaşımlamanın oluşabilmesi için sünek malzemenin ağırlık oranının en az % 15 olması gerekmektedir. Çünkü doğru alaşımlama toz parçacıklarının tekrarlanan soğuk kaynaklanmaları ve kırılmaları ile meydana gelmektedir. Parçacıklar sünek değil ise soğuk kaynaklanma meydana gelemez [24].

Benjamin ve Volin iki farklı sünek malzeme içeren bir sistemin alaşımlama mekanizmasını ilk olarak tanımlayan araştırmacılardır [35]. Mekanik alaşımlamanın ilk aşamasında, sünek bileşenler, mikro – dövme işlemi ile katmanlı bir yapı oluşturacak şekilde yassılaşırlar. Aynı zamanda bir, iki parçacık kalınlığında az miktarda toz, bilyaların yüzeylerine kaynak olmaktadır. Tozların öğütme cisimlerinin üzerine kaplanması öğütme cisimlerinin aşırı derecede aşınmasını önlemesi ve bilyaların aşınmasından doğan tozdaki kirlilik artışının azaltılması açısından bir avantajdır. Fakat, heterojen bir ürünün oluşmasına mâni olmak için bilyaların yüzeyindeki toz tabakasının kalınlığı en düşük seviyede tutulmalıdır. Mekanik alaşımlamanın bir sonraki aşamasında, bu yassılaşmış olan parçacıklar birbirleri ile soğuk kaynaklanmakta ve bileşen metallerin katmanlı kompozit yapısını oluşturmaktadır. Bu aşamada parçacık boyutunda bir artış gözlenmektedir. Mekanik alaşımlama süresi ilerledikçe kompozit toz parçacıkları deformasyon sertleşmesine maruz kaldıkları için sertlik ve kırılganlıkları artar. Bu nedenle parçacıklar kendi içlerinde eş-eksenli olarak parçalara ayrılırlar. İlerleyen öğütme ile birlikte kaynaklanmış katmanların düz ince levhalar şeklinde olan yapısı sarmallı bir yapıya dönüşür (Şekil 4.4). Bu sarmallı yapının nedeni özel bir yönelim tercihi göstermeyen eş – eksenli toz parçacıklarının birbirleri ile gelişigüzel kaynaklanmalarıdır. Difüzyon mesafesinin düşmesi (katmanlararası mesafe), latis içi hata yoğunluğunun artması, öğütme süresince husule gelen sıcaklık artışı gibi faktörlerin birleşmesiyle alaşımlama bu aşamada başlar. Sertlik ve parçacık boyutunun bir doyma değerine ulaşma eğiliminde olduğu bu aşama 'kararlı durum aşaması' olarak adlandırılmaktadır. Daha ileri öğütmede katı çözeltilerin, intermetaliklerin ve hatta

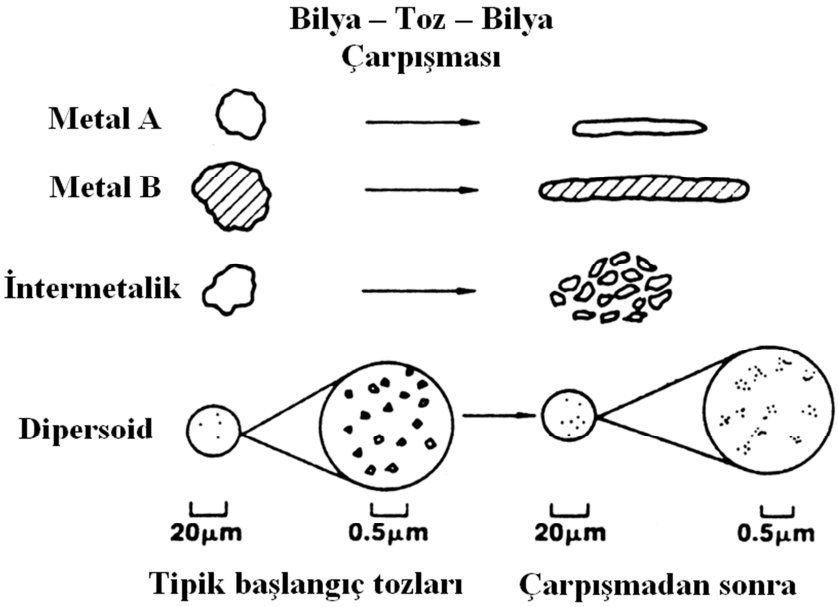
amorf fazların oluşumu ile sonuçlanan atomik seviyede doğru alaşımlama meydana gelmektedir. Bu aşamada katmanlararası mesafe çok azalır ve artık optik mikroskop altında görülemeyecek boyutlara inceler [24].



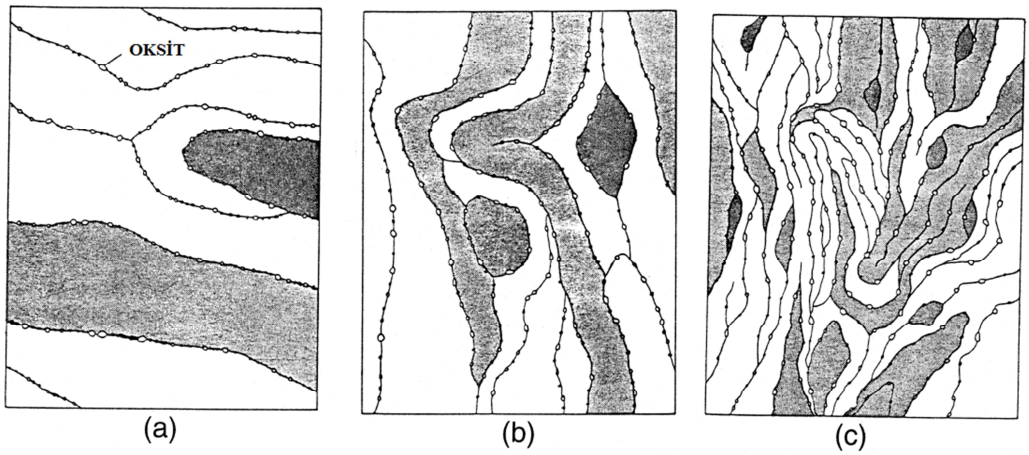
Şekil 4.4: Sünek – sünek bileşen sisteminin öğütülmesinde sarmallı hale gelmiş katmanlı yapıyı gösteren tarama elektron mikrografı (Ag – Cu) [24].

4.3.2 Sünek – Gevrek Bileşen Sistemi

Gevrek oksit parçacıklarının sünek matris içine dağılmasından ötürü geleneksel ODS (oksit dispersiyonu ile sertleştirilmiş) alaşımları bu gruba dahildirler. Bu tür sistemlerin mikroyapısal gelişimi Benjamin ve diğerleri [34] tarafından tanımlanmıştır. Öğütmenin başlangıç aşamasında, sünek metal tozu parçacıkları bilya – toz – bilya çarpışmaları ile yassılaşırken oksit veya intermetalik parçacıklar parçalanarak ufalanırlar (Şekil 4.5). Gevrek faza ait bu kırık parçacıklar sünek bileşenlerin yüzeylerine batma, emilme (occlusion) eğilimindedirler ve sünek parçacıklar arasında sıkışıp kalarak katmanlararasında konumlanmaktadırlar (Şekil 4.6a). Öğütmenin devamında sünek parçacıklar deformasyon sertleşmesine uğramakta, katmanlar sarmal şekilli olmaya ve incelmeye başlamaktadır (Şekil 4.6b). Tek tek parçacıkların bileşimi başlangıç toz karışımındaki bileşim oranına ulaşma eğilimindedir. Devam eden öğütme ile katmanlar daha da incelmekte, katmanlararası mesafe azalmakta ve eğer gevrek parçacıklar sünek matris içinde çözünmüyorlarsa ODS alaşımlarında olduğu gibi matris içine üniform bir şekilde disperse olmaktadırlar (Şekil 4.6c).



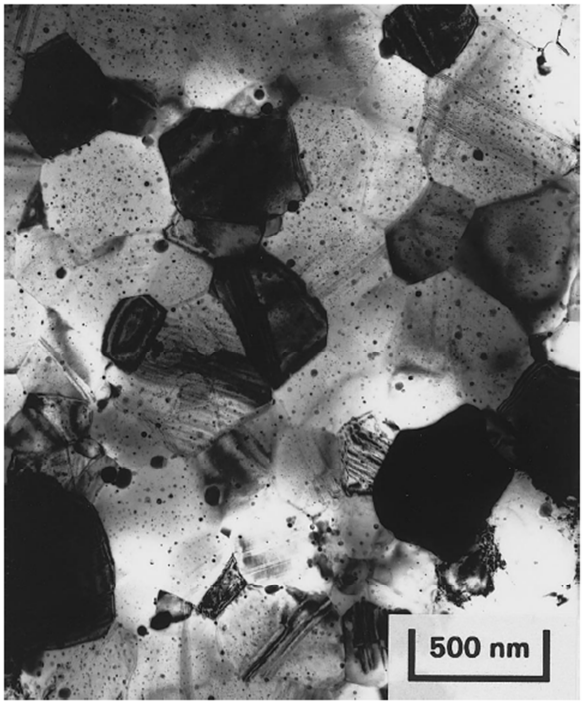
Şekil 4.5: Mekanik alaşımlamada kullanılan değişik nitelikteki başlangıç tozlarının deformasyon karakteristikleri [34].



Şekil 4.6: Sünek – gevrek toz kombinasyonunun öğütme sırasındaki mikroyapısal dönüşümünün şematik gösterimi. Bu tipik bir oksit dispersiyonu ile sertleştirme durumudur [24].

Şekil 4.7' de mekanik öğütülmüş α_2 – titanyum alüminit matris içerisine disperse olmuş Er_2O_3 parçacıklarını gösteren tipik bir geçirimli elektron mikrografı görülmektedir. Diğer taraftan, eğer gevrek faz matris içinde çözünebilir ise sünek ve gevrek bileşenler arasında alaşımlama gerçekleşmekte ve bu durumda kimyasal homojenlik de sağlanmaktadır. Saf Zr (sünek) ve $NiZr_2$ intermetalik (gevrek) toz parçacıkları karışımının öğütülmesiyle amorf faz oluşumu bu tip sistemlere tipik bir örnek teşkil etmektedir. Sünek – gevrek bileşen sisteminde alaşımlamanın oluşup oluşmaması gevrek bileşenin sünek matris içindeki katı çözünürlüğü ile çok yakından alakalıdır. Eğer gevrek bileşen önemsenmeyecek bir katı çözünürlüğe sahip

ise alaşımlama oluşması olası değildir (demir içindeki bor gibi). Sonuç olarak, sünek – gevrek bileşenlerin mekanik alaşımlanması için gevrek parçacıkların parçalanıp ufalanarak daha kısa difüzyon mesafelerine olanak sağlamaları yetmeyip aynı zamanda sünek matris bileşeni içindeki katı çözünürlüğünün de makul ve makbul bir değerde olması gerekmektedir [24].



Şekil 4.7: Mekanik öğütülmüş α_2-titanyum aluminit matris içindeki Er_2O_3 parçacıklarının üniform dispersiyonunu gösteren geçirimli elektron mikroskobu görüntüsü [24].

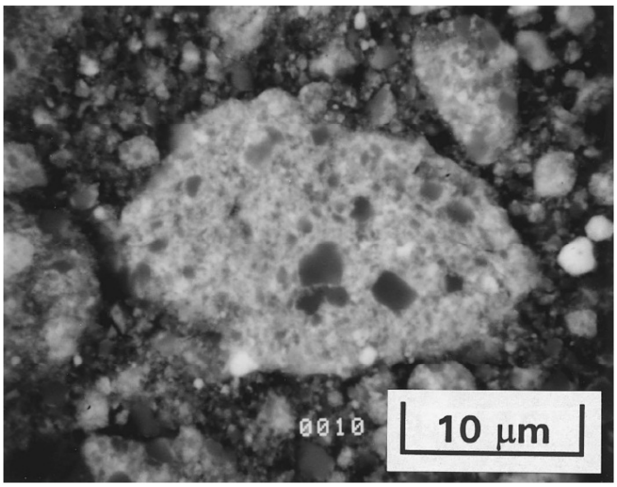
4.3.3 Gevrek – Gevrek Bileşen Sistemi

İlk intiba aksi istikamette olsa da Si – Ge ve Mn – Bi gibi gevrek – gevrek bileşen sistemlerinde alaşımlamanın oluştuğu bildirilmiştir. Gevrek intermetalik karışımların öğütülmesi ile amorf fazlar elde edilmiştir. Önceden bahsedildiği gibi, öğütme sırasında gevrek bileşenler parçalanmakta ve parçacık boyutu devamlı surette küçülmektedir. Bununla birlikte, çok küçük boyutlarda toz parçacıkları sünek tarz davranış sergilemekte ve boyutlarının daha fazla küçülmesi mümkün olmamaktadır. Buna ‘ufalanma limiti’ (limit of comminution) denilmektedir [24].

Gevrek – gevrek bileşen sistemlerinin öğütülmesi sırasında daha sert (daha gevrek) olan bileşenin parçalandığı ve daha yumuşak (daha az gevrek) bileşene gömüldüğü gözlemlenmektedir. Buna örnek olarak daha sert Si parçacıklarının daha yumuşak Ge matrisi içine gömülmeleri örnek olarak gösterilebilir (Şekil 4.8). Gevrek – gevrek

sistemlerde (Si – Ge) çok düşük sıcaklıklarda, örneğin sıvı azot ortamında, alaşımlama oluşmazken sünek – sünek ve sünek – gevrek sistemlerde çevre – altı sıcaklıklarda alaşımlamanın oluştuğu ortaya konmuştur. Bu durumun nedeni, granüler gevrek – gevrek tane yapısının katmanlı geometriye sahip sünek – sünek yapısına kıyasla daha uzun difüzyon mesafeleri oluşturması ve/veya sünek – sünek sistemlerdeki yoğun plastik deformasyonun difüzyonu desteklemesi olabilir. Gevrek bileşenlerin öğütülmesi sırasında malzeme taşınımına katkı sağlayabilecek olası mekanizmaların (plastik deformasyonda dahil olabilir) teşekkülünde aşağıdaki faktörlerin etkisi bulunabilir [24]:

i. Bölgesel sıcaklık yükselmesi,
ii. Hatasız hacimlerde mikro deformasyon oluşumu,
iii. Yüzey deformasyonu,
iv. Öğütme süresince tozlarda oluşan hidrostatik gerilme hali .



Şekil 4.8: Si – Ge toz karışımının 12 saat süreyle mekanik alaşımlanması sonunda yumuşak germanyum matris içinde daha sert silisyum parçacıklarını gösteren taramalı elektron mikroskobu görüntüsü [24].

5. UÇUCU KÜLLER

5.1 Uçucu Küllerin Tanımı

Düşük kalorili olmaları nedeniyle endüstride yakıt olarak kullanılmayan kömürler toz haline getirilerek termik santrallerde yakılarak elektrik enerjisi elde etmekte kullanılır. Bir termik santralde üç çeşit atık madde elde edilir [36]:

1. Baca gazları ile taşınamayan, yakma sırasında tabana düşen ve aglomere olan küller (taban külleri),
2. Siklon tipi ocaklarda, yanan kömür külünün ergimesi ve su ile soğutularak uzaklaşan küller (ergimiş kül veya cüruf),
3. Baca gazları ile sürüklenen ve hava gazları ile temas ederek ani soğuma ile puzolanik özellik kazanan küller.

Termik santrallerde kullanılan taşkömürünün % 10-15' i, linyit kömürünün ise % 20-50' si kül olarak ortaya çıkmaktadır. Yanma sonucu ortaya çıkan külün % 75-85' i baca gazları ile kazandan çıkar ve bu atıklar uçucu kül olarak tanımlanır [37]. Uçucu küllerin tane boyutları 0.5-150 µm arasında olup çok ince kül parçacıkladır [36].

5.2 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Termik santrallerde yakıt olarak ülke kaynaklarına göre taş kömürü veya linyit kömürü kullanılmaktadır. Bu yüzden uçucu küller orijinlerine göre iki ana gruba ayrılırlar [38, 39].

1. Taş kömürü uçucu külleri: 3 ila 100 µm tane boyutunda tamamen kuru olarak elde edilir.
2. Linyit kömürü uçucu külleri: Toprak alkali metalleri taşkömürü uçucu külüne oranla daha fazladır.

5.3 Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri

Uçucu küller, kimyasal yapılarına göre dört ana sınıfa ayrılmaktadır [36].

1. Silikat-alümina esaslı uçucu küller: Yapılarının büyük bir kısmını kuvars (SiO_2) ve bir miktar alümina (Al_2O_3) meydana getirmektedir. Genellikle taş kömürü kaynaklı uçucu küller bu sınıfa girmektedir.
2. Silikat-kalsit esaslı uçucu küller: Yapılarındaki ana oksitler, kuvars ve kalsittir ($CaCO_3$). Fakat kalsit miktarı oldukça yüksektir.
3. Sülfür-kalsit esaslı uçucu küller: Yapılarının büyük bir bölümü kükürt trioksit (SO_3) ve kalsitten meydana gelmiştir. Bu sınıfa genellikle linyit kömürü kaynaklı uçucu küller girmektedir.
4. Sınıflandırılamayan uçucu küller: Termik santraldeki yakma sisteminin homojensizliğinden kaynaklanan ve belirli bir kimyasal yapıya sahip olmayan küllerdir. Kimyasal yapıları sürekli değişebilmektedir.

Uçucu küller camsı, içi boşluklu (cenosphere, hollow spheres) veya dolu küresel tanecikler (solid glassy sphere) ile süngerimsi mineral parçacıklar ve yanmamış taneciklerden meydana gelir. Genellikle bir uçucu kül SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 (Fe_2O_3 veya Fe_3O_4 şeklinde), K_2O, CaO, MgO, TiO_2, SO_3, Na_2O ve eser miktarda berilyum, germanyum, fosfor, molibden ve bordan oluşmaktadır [14, 40]. Yanma biçimine bağlı olarak esas elemanlar, silis ve alüminyum veya kireç ve kükürt trioksit olabilir. Demir oksit, manyezit, sodyum ve potasyum ve titan sekonder olarak bulunur. Fe_2O_3, CaO ve MgO ateşten uzak olduğu oranda azalmakta, dolu küresel taneler artmakta ve birim hacim fazlalaşmaktadır.

Mineralojik analizlerde genel olarak uçucu kül içindeki silisin bir kısmı kuvartz kristalleri halinde, diğer bir kısmı ise alüminyumla birleşerek müllit ($2SiO_2$. $3Al_2O_3$) geri kalanın ise camsı yapıda olduğu saptanmıştır. Demirin kısmen manyetit (Fe_2O_4) ve hematit (Fe_2O_3), geri kalanın da camsı fazda olduğu görülür [41]. Genellikle ideal şartlarda elde edilen uçucu küllerin % 66 – 88'i camsı yapıda olmakta ve içerisindeki SiO_2, Al_2O_3 toplamı % 70 – 88, geri kalan kısmı demir, kalsiyum, magnezyum, sodyum, potasyum ve titanyumdan meydana gelmektedir.

Uçucu küllerdeki karbon miktarları yanma olayına bağlı olarak değişmektedir. Yanmanın iyi olduğu termik santrallerde karbon yüzdesi çok düşük (1 – 3) olmasına

karşın eski tip santrallerde bu oran % 10'a kadar yükselmektedir. Uçucu küller genellikle % 2 – 5 arasında suda çözünür. Çözelti kalsiyum ve sülfat nedeniyle alkali reaksiyon verir. Magnezyum, sodyum, potasyum ve silikat iyonları suda az çözünürler. İyi bir uçucu külde suda çözünen madde miktarı az olmalıdır [42]. C ve F tipi uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları % ağırlık olarak Çizelge 5.1' de; TS 639 ve ASTM C 618 standartlarına göre küllerin kimyasal bileşim oranları Çizelge 5.2' de verilmiştir [43, 44]. İki uçucu kül sınıfı arasında en çok dikkati çeken kimyasal fark, "F" sınıfı uçucu küllerde SiO_2 ve Al_2O_3 oranı yüksektir, "C" sınıfı uçucu küllerde ise CaO miktarı % 10'un üzerindedir. Şayet CaO miktarı % 10'dan fazla ise bu tür küller "yüksek kireçli uçucu kül", % 10'dan küçükse "düşük kireçli uçucu kül" olarak adlandırılmaktadır [36].

Çizelge 5.1: C ve F tip uçucu küllerin kimyasal bileşimleri (% ağırlık) [36].

Kimyasal Bileşim	**C – Tipi Uçucu Kül (% ağırlık)**	**F – Tipi Uçucu Kül (% ağırlık)**
SiO_2	33 – 61	33 – 65
Al_2O_3	8 – 26	11 – 33
Fe_2O_3	4 – 10	3 – 31
CaO	14 – 37	0.6 – 13
MgO	1 – 7	0 – 5
K_2O	0.3 – 2.0	0.7 – 5.6
Na_2O	0.4 – 6.4	0 – 3.1
TiO	0.9 – 2.8	0.7 – 5.6
SO_3	0.5 – 7.3	0 – 4
FeO/LOI*	0.2 – 1.4	1 – 12

*Yanma kaybı

Çizelge 5.2: TS 639 ve ASTM C 618 standartlarına göre uçucu küllerin kimyasal bileşim oranları [43, 44].

Kimyasal bileşim	TS 639' a göre miktar (% Ağırlık)	ASTM standartlarına göre miktar (% ağırlık)	
		F tipi	C tipi
SiO_2+Al_2O_3+ Fe_2O_3	70 min	70 min	50 max
MgO	5 max		
SO_3	5 max	5 max	5 max
Nem	3 max	3 max	3 max
Isıtma kaybı	10 max	12 max	6 max

5.4 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

Görünüş: Uçucu küllerin renkleri açık ve koyu gri ile siyah arasında değişmektedir. Küldeki karbon, demir ve nem miktarı küllerin görünüşünü etkilemektedir. Mikroskop altında incelendiklerinde süngerimsi, gözenekli veya gözeneksiz, küresel veya aglomere tanelerden meydana geldikleri görülmektedir. Linyit kömürü uçucu külleri, taş kömürü uçucu küllerinden daha koyudur. İyi yanmış uçucu küller, iyi yanmamış uçucu küllerden daha açık renktedir. İyi yanmamış küllerin koyu rengi, yapılarında mevcut yanmamış karbondan ileri gelmektedir.

Tane boyutu: Uçucu küllerin tane boyutu, kullanılan kömürün cinsine ve öğütülme derecesine bağlı olarak değişmektedir. Taş kömürü uçucu küllerinin tane boyutu, linyit kömürü uçucu küllerinin tane boyutundan daha küçüktür. Tane boyutuna etki eden ikinci faktör ise, tane boyutu küçük olan uçucu küllerin mümkün olabildiğince bacadan kaçmasına engel olunarak tutulmasıdır. Bacadan kaçan küller ne kadar iyi yakalanırsa o oranda ince taneli küller elde edilmektedir. Elektrofiltrelerde daha ince uçucu küller tutulduğu için, elektrofiltrelerde tutulan uçucu küllerin tane boyutu, siklonlarda tutulanlardan daha küçüktür. Uçucu küllerin elastisite modülü ve sertliği tane boyutuna bağlı olarak değişmektedir. Örneğin 150-250 µm tane boyundaki uçucu küllerin elastisite modülü 126 GPa, 5-10 µm aralığındaki uçucu küllerin elastisite modülü ise 98 GPa olarak belirlenmiştir. Tane boyutu büyük olan uçucu küllerin (120 µm) sertliği 160-400 kg/mm^2 olup geniş aralıkta değişmektedir. Daha küçük tane boyutuna sahip uçucu küllerde (10 µm) sertlik değişimi 250-270 kg/mm^2 olup saçılım azalmaktadır [14]. Tane boyutu dar aralıkta saçılım gösteren uçucu kül (53-106 µm) takviyeli alüminyum matrisli kompozitin mekanik özellikleri aynı hacim oranında geniş aralıkta tane boyutuna sahip uçucu kül (0.5 - 400 µm) takviyeli kompozite göre daha yüksektir [45, 46].

Özgül ağırlık: Özgül ağırlığı 2.0 ila 2.5 g/cm³ arasında değişen dolu küresel taneli uçucu küller seçilen matris malzemesinin direngenlik, mukavemet ve aşınma direncini iyileştirmekte ve yoğunluğu düşürmektedir. İçi boşluklu uçucu küller ise 0.4 - 0.7 g/cm³ arasında yoğunluğa sahip olup yoğunluğu çok düşük kompozit üretmede tercih edilmektedir [14].

Karbon miktarı: İyi yanma olan termik santrallerde karbon miktarı çok düşük olmaktadır. Eski tip santrallerde bu oran % 10'a yükselmekte, yenilerde % 3'ün

altında kalmaktadır. Antrasit yakan santrallerde yanma problemi nedeniyle karbon miktarları yüksektir. Uçucu külün karbon miktarı kızdırma kaybı değerinden az olmaktadır. Kızdırma kaybı değeri 0.9 ile çarpıldığında yaklaşık olarak karbon miktarı bulunabilmektedir. Uçucu küllerdeki karbon, yanıcı olmayan karbon tanelerinin yüzeyi üzerinde ince karbon tabakası veya ayrı taneler bulunmaktadır. Uçucu küllerdeki karbon tanelerinin tane boyutu çoğu zaman diğer tanelerden daha büyüktür.

Manyetik özellikleri: Uçucu küllerin içerisine bir mıknatıs sokulduğunda, bir miktar uçucu kül mıknatısa yapışır. Mıknatıs bir hava akımına tutularak manyetik olmadığı halde yapışan taneler uzaklaştırılır. Bu deney birkaç defa yapıldıktan sonra uçucu küllerin % 25'inin mıknatısta kaldığı görülür. % 7.7 Fe_2O_3 içeren bir uçucu külde, mıknatısa yapışan kısım yaklaşık olarak % 6.8 olmaktadır. Kimyasal analizde; mıknatısta bulunan kısmın % 63'ünün Fe_2O_3 olduğu, mıknatısa yapışmayan kısımdaki Fe_2O_3 miktarının ise % 4 olduğu tespit edilmiştir.

Puzolanik özellikleri: Uçucu küller kireç ve su ile karıştırıldığında hidratasyon sonucunda kalsiyum-silikat-hidrat jeli oluşarak bağlayıcılık kazanabilme özellikleri, içerisindeki $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ miktarına ve inceliklerine bağlıdır. Uçucu küllerde puzolanik özelliğin esası olan bu dayanım kazanma özelliği oldukça yavaş olarak ortaya çıkar. Artan süreyle birlikte, uçucu küllerin puzolanik özellikleri artmaktadır. Ayrıca, CaO miktarı yüksek uçucu küller daha iyi puzolanik özellik gösterir.

5.5 Uçucu Küllerin Alüminyum Matrisli Kompozitte Kullanımı

Ülkemizde her yıl tonlarca uçucu külün depolandığı alanlarda su ve hava kirliliği tehlikesi her zaman mevcut olup, yeraltı ve yüzey suları çözünmüş tuzlar ve ağır metal iyonları ile kirlenme tehlikesi altındadır. Dünyada yılda yaklaşık 80 milyon ton uçucu kül ortaya çıkmasına rağmen, ekonomik kayıplar ve ciddi boyutlarda çevre kirliliğine yol açan bu atık ürünlerin ne yazık ki çok az bir kısmı değerlendirilmektedir [14]. Uçucu küller, genellikle uygunluklarına bağlı olarak tuğla, çimento ve beton yapımında kullanılmaktadır. Son zamanlarda yapılan bazı çalışmalar, alüminyum matrisli kompozitlerde ucuz bir takviye elemanı olarak uçucu külün kullanımı üzerine yoğunlaşmıştır [40, 47-49]. Farklı oranlarda uçucu kül takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerde, uçucu kül oranının artmasıyla mekanik

özelliklerde (sertlik, aşınma direnci, mukavemet) iyileşme, korozyon direncinde azalma görülmüştür [48, 50].

5.5.1 Uçucu Kül ile Matris Arasındaki Muhtemel Kimyasal Reaksiyonlar

Geleneksel sıvı faz üretim yöntemi (700 °C – 850 °C) ile üretilen uçucu kül-alüminyum kompozitlerde reaksiyon kinetiğine bağlı olarak uçucu külün ana bileşenlerini oluşturan SiO_2, Al_2O_3 ve Fe_2O_3, Mg içeren ergimiş alüminyum matriste Al ve Mg ile reaksiyona girerek aşağıdaki arayüzey reaksiyonları ($MgAl_2O_4$, ötektik Si ve demir esaslı metaller arası bileşikler) oluşmaktadır [40, 51-53]. Bu reaksiyon ürünleri örneğin uçucu külde bulunan karbonun sıvı alüminyumla etkileşimi sonucu ortaya çıkan Al_4C_3 fazı korozyon hassasiyetini artırmakta [54], matris/takviye arayüzey özelliklerini ve mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemektedir.

$$2Al_{(s)} + Mg_{(s)} + 2SiO_{2\,(k)} \rightarrow MgAl_2O_{4\,(k)} + 2Si_{(k)} \quad \Delta G_{1000K} = -440{,}7\ kJmol^{-1} \quad \textbf{(5.1)}$$

$$3Mg_{(s)} + 4Al_2O_{3\,(k)} \rightarrow 3MgAl_2O_{4\,(k)} + 2Al_{(s)} \quad \Delta G_{1000K} = -257{,}6\ kJmol^{-1} \quad \textbf{(5.2)}$$

$$2Al_{(s)} + 3/2SiO_{2\,(k)} \rightarrow 3/2\ Si_{(k)} + Al_2O_{3\,(k)} \quad \Delta G_{1100K} = -302{,}3\ kJmol^{-1} \quad \textbf{(5.3)}$$

$$2Al_{(s)} + Fe_2O_{3\,(k)} \rightarrow 2Fe_{(k)} + Al_2O_{3\,(k)} \quad \Delta G_{1000K} = -784{,}2\ kJmol^{-1} \quad \textbf{(5.4)}$$

1200°C üzerindeki sıcaklıklarda ise uçucu külün tamamı reaksiyona girerek $MgAl_2O_4$ fazı oluşmakta ve $MgAl_2O_4$ fazı ya ara yüzeyde ya da matris içinde dağılmaktadır. Sonuç olarak sıvı faz üretim sırasında uçucu kül ile alüminyum matris arasındaki reaksiyon ürünleri, uçucu kül partiküllerin kimyasal içeriğine ve üretim sıcaklığına bağlı olduğundan tamamen yoğun, hiçbir içyapı kusuru içermeyen üniform bir kompozit üretmek mümkün değildir.

Sıfıraltı sıcaklıkta sıvı azot ortamda mekanik öğütme sırasında, takviye-matris arasındaki oluşması muhtemel ara yüzey reaksiyonların önüne geçilerek mekanik ve termal kararlılık özellikleri iyileştiren 2 ila 10 nm boyutunda alüminyum nitrit ve oksi-nitrit partiküllerin oluşumu sağlanmış olacaktır [24, 55].

5.5.2 Uçucu Kül Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Ramachandra ve Radhakrishna [50], yaptıkları çalışmada karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen alüminyum esaslı metal matrisli kompozit malzemenin özelliklerine uçucu kül ilavesinin etkisini incelemişlerdir. Uçucu kül oranının

artmasıyla kayma aşınması direnci, ıslak erozyon aşınması direnci, kitle sertliği ve çekme mukavemeti artarken, yoğunluk, yüzde uzama ve süneklik değerleri azalmıştır.

Başka bir çalışma yine benzer sonuçlara işaret etmektedir. Mehandra ve Radhakrishna [48], yapmış oldukları çalışmada uçucu kül içeriğinin geleneksel döküm teknikleriyle (karıştırmalı döküm) üretilen Al – % 4.5 Cu matrisli kompozit malzemenin mekanik özellikleri ve korozyon davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Uçucu kül oranının artmasıyla sertlik, çekme mukavemeti, basma mukavemeti, darbe dayanımı, kuru aşınma direnci ve ıslak erozyon aşınması direnci artarken, yoğunluk azalmıştır

Thein ve diğerlerinin [7] yaptıkları çalışmada oda sıcaklığında 10, 20, 30, 40 saatlik sürelerde mekanik öğütme yöntemi ile magnezyum talaşlarının geri kazanımı ve bu yolla kompozit malzeme üretimini incelemişlerdir. Başlangıç malzemesi olarak magnezyum talaşı (> % 99.9 saflıkta), toz aluminyum (% 99.5 saflıkta) ve nanoyapılı alüminyum nitrür (AIN, % 99 saflıkta) kullanılmıştır.

Bu çalışmanın [7] devamında, bileşimi Mg – % 5 Al – % x AIN (x = 1, 2 ve 5) olarak belirlenen kompozit karışımları farklı tane inceltmelerini sağlamak için farklı sürelerde öğütmelere tabii tutularak tane boyutunun (öğütme süresinin) mekanik özelliklere olan etkisi incelenmiştir. Öğütme işleminin ardından soğuk presleme ile oluşturulan 35 mm çapındaki kompakt numuneler 500 ºC' de 2 saat sinterlenmiş ve son olarak 25:1 oranında sıcak ekstrüde edilerek 7 mm çaplı numuneler elde edilmiştir. Çekme testi sonuçlarına göre 20 saat mekanik alaşımlama yapılmış numunede deformasyon yumuşaması davranışı ile birlikte en yüksek dayanım değeri elde edilmiştir. 40 saat mekanik öğütme yapılmış olan Mg – % 5 Al – % 1 AIN numunesi % 37 uzama göstererek en yüksek süneklik değerini vermiştir. Mekanik öğütme işlemi yapılmamış ve 10 saat mekanik öğütme yapılmış numuneler deformasyon sertleşmesi davranışı gösterirken, 20, 30 ve 40 saat mekanik öğütmeye tabii tutulmuş numuneler deformasyon yumuşaması davranışı sergilemişlerdir. 20 saatlik mekanik öğütmeye kadar tane incelmesi ve partikül dispersiyonu ile mukavemet artmakta ama daha fazla öğütme sürelerinde tane boyutu Hall–Petch bağıntısındaki kritik değerin altına düşmekte ve dislokasyon kontrollü mukavemet kazanma mekanizması yerini zayıflama mekanizmasına bırakmakta bu da dayanım değerlerinin düşmesine neden olmaktadır. Bu olgu nanoyapılı Mg alaşımlarındaki

deformasyon davranışlarının dislokasyon kontrollü plastik deformasyon ile izah edilemeyeceğini ortaya koymaktadır. Değişen oranlarda (% 1, 2 ve 5 AIN) takviye yapılmasının dayanım üzerinde önemli bir etkisi gözlenmemiştir.

Sherafat ve diğerleri [11], Al7075 alaşımı talaşlarının ticari saflıktaki Al tozları ile karıştırılarak toz metalürjisi yoluyla direkt geri dönüşümünü ve geri kazanılan malzemenin mekanik özelliklerine Al tozunun ve miktarının etkisini incelemişlerdir. Al tozunun bu çalışmadaki işlevleri: Yumuşak bir matris görevi görür, talaş parçalarının birbirine daha iyi bağlanmasını destekleyen bağlayıcı görevi görür, malzeme içindeki boşlukların azalmasına katkı sağlar. Başlangıç malzemesi olarak 1 mm – 1 mm – 0.11 mm boyutlarında Al7075 talaşı ve ortalama çapı 45 μm olan ticari saflıktaki hava-püskürtmeli (air-atomized) Al tozu kullanılmıştır. Hazırlanan talaşlar ağırlıkça % 20 – 90 aralığında değişen oranlarda Al tozu ile karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımın birleştirilmesi ve pekiştirilmesi önce çelik kalıp içerisinde 240 MPa basınç altında soğuk basılarak ve ardından 300 – 500 ℃ aralığında 12:1 oranında sıcak ekstrüde edilerek gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın [11] sonuçları, talaş oranı yüksek ve kaliteli numuneler üretmek için sıcak ekstrüzyon işleminin 500 ℃' den daha yüksek sıcaklıklarda yapılması gerektiğini göstermiştir. Çünkü bu sıcaklıklarda alüminyum talaşları ile alüminyum tozları arasında oluşan güçlü bağlanma mekanik özellikleri arttırmaktadır. Numunelerdeki talaş oranı arttıkça dayanım değeri artmış ve süneklik azalmıştır. Daha yüksek ekstrüzyon sıcaklıkları nihai üründe daha iyi yüzey kalitesi, daha yüksek bağıl yoğunluk, daha yüksek çekme mukavemeti ve süneklik elde edilmesini sağlamıştır. Yükselen ekstrüzyon sıcaklığı ile beraber toz partikülleri ile talaş parçaları arasında daha güçlü bir bağlanma oluştuğu için dayanım ve süneklik değerlerinin her ikisi de artmaktadır. Fakat artan sıcaklık ile birlikte hem talaş hem de Al tozu bölgesinin sertliği düşmüştür. Sabit sıcaklıkta talaş ve toz bölgelerinin sertliğinin talaş miktarına bağlı olmadığı görülmüştür. Sabit bir ekstrüzyon sıcaklığında Al tozu oranı arttıkça dayanımın düştüğü ve sünekliğin arttığı gözlenmiştir. Ağırlıkça % 60 oranında talaş içeren numunenin aynı şartlarda üretilmiş ve hiç talaş içermeyen numuneye göre dayanımı iki kat fazla (248 MPa) ve sünekliği ise yarısı (% 14,4) kadar olduğu görülmüştür.

Sherafat ve diğerleri [56], iki fazlı Al – Al7075 kompozit malzemesinin mekanik özelliklerini ve deformasyon davranışını incelemişlerdir. Saf alüminyum tozu ile

Al7075 talaşları mekanik olarak karıştırıldıktan sonra 500 °C' de sıcak ekstrüzyon işlemine tabii tutulmuştur. Çekme ve basma testi sonuçları, toz alüminyum içeriğinin artmasıyla çekme ve basma dayanımının düştüğünü; sünekliğin ve şekillendirilebilirliğin arttığını ortaya koymuştur. Yüksek talaş içeren numunelerde toz alüminyumun bağlayıcılık özelliğinin yeterince iyi olmaması sebebiyle mekanik özellikler beklenenden düşük çıkmıştır. Deformasyon sertleşmesi üssünün (n), birim şekil değişiminin ve toz alüminyum oranın bir fonksiyonu olduğu ve artan birim şekil değişimi ile azaldığı görülmüştür. Düşük birim şekil değişimlerinde toz alüminyum miktarı daha düşük olan numunelerin n değeri daha yüksek iken, artan birim şekil değişimi ile birlikte n değerleri hızlı bir düşüş göstermiştir. Yüksek birim şekil değişimlerinde ise numunelerdeki toz alüminyum içeriğinin artmasıyla n değerleri de düzenli bir eğilimle artmıştır. Tüm numuneler için artan birim şekil değişimi ile birlikte n değerleri sıfıra yaklaşmaktadır. Azalan toz alüminyum oranıyla birlikte homojen birim şekil değişimi (% e_u) ve % kopma uzaması (% e_f) azalmıştır. % kopma uzamasındaki düşüşün homojen birim şekil değişimindeki düşüşten daha fazla olduğu görülmüştür. Kırık yüzeyleri, azalan toz alüminyum oranıyla birlikte gevrek kırılma eğiliminin arttığını işaret etmektedir.

Gronostajski ve diğerleri [10], direkt dönüşüm yöntemiyle alüminyum ve alüminyum alaşımı talaşlarından nihai ürün elde edilmesini incelemişlerdir. Başlangıç malzemesi olarak, ASTM 1050 (DIN Al 99.5) saf alüminyum talaşı, EN 5251 (DIN AlMg2Mn0.3) alüminyum alaşımı talaşı ve ASTM 2017 (DIN AlCuMg1) alüminyum alaşımı talaşı kullanılmıştır. Talaşların boyutları kesme cihazında ufaltılarak 5 mm' den uzun olanlar daha sonra kullanılmak üzere ayrılmıştır. Kesmeden sonra daha ileri bir boyut küçültme işlemi olarak atritörde öğütme denenmiştir. Soğuk kaynak oluşumunu engellemek için su, metil alkol ve % 2 çinko stearat ortamında öğütme yapılmıştır. Suda öğütülen parçacıkların en küçük boyuta sahip olduğu ancak yüzeylerinin kalın bir oksit ve hidrat filmi ile kaplandığını ve bu filmin yüksek sıcaklıkta ileri derece bir deformasyon yapılması halinde bile sinterlemeye müsade etmediğini tespit etmişlerdir. Yağlayıcı ve metil alkol kullanılmadan yapılan öğütme işlemi de uzun süre almıştır. Atritörde yapılan taneleme (granulation) işleminin verimsiz olması sebebiyle sinterleme işlemi sadece kesme cihazından elde edilen talaşlara uygulanmıştır. Boyutları 5 mm' den küçük olan talaşlar 210 MPa basınç altında ön-preslendikten sonra 500 °C' de ekstrüzyon

katsayısı $\lambda = 4$ ($\lambda = d_i/d_f)^2$ ve ekstrüzyon hızı 10^{-2} m/s olacak şekilde sıcak ekstrüde edilmiştir. Bunun gibi düşük bir ekstrüzyon hızı talaşlar arasında güçlü difüzyon bağlarının oluşumunu ve matris malzemesinin gözenek ve boşluklara doğru plastik olarak akmasını kolaylaştırmaktadır. Ekstrüde edilen ASTM 2017 alaşımlı numunelerden bir tanesi 500 ºC' de 1 saat boyunca çözeltiye alma işlemi gördükten sonra suda soğutularak 165 ºC' de yaşlandırılmıştır. Direkt dönüşüm yöntemiyle kesme ve basmaya tabi tutulan 1050 saf alüminyum, 5251 ve 2017 alümiyum alaşımı talaşlarından sıcak ekstrüzyon yapılarak elde edilen nihai ürünlerin belirleyici özellikleri düşük gözeneklilik ve % 95' in üzerinde yüksek bağıl yoğunluktur. Ekstrüzyon sıcaklığı ve ekstrüzyon hızı yüksek yoğunluk elde etmek için en önemli parametrelerdir. Yüksek ekstrüzyon sıcaklığı matrisin gözenek ve boşluklara plastik olarak akmasını mümkün kılmaktadır. Görece düşük ekstrüzyon hızları matris malzemesinin gözeneklere doğru akabileceği zamanı uzatmasının yanında difüzyonla taşınım süresini de uzatmaktadır. Direkt dönüştürülmüş Al ve Al alaşımlarının sertlik ve çekme dayanımı özellikleri metalürjik yöntemle üretilenlere nazaran daha düşüktür. Bunun sebebi direkt dönüşüm yönteminde sıcak ekstrüzyon işleminden sonra ergiterek üretmeye göre daha yüksek gözenekliliğin var olmasıdır. Direkt dönüştürülmüş Al ve Al alaşımlarının yüzey kalitesi iyi olup çıplak gözle bakıldığında boşluk görülmemiştir. Direkt dönüşüm yönteminin çevreye zararlı bir etkisinin olmadığı ve bu yolla üretilen malzemelerin dövme ve haddeleme gibi daha ileri plastik şekil verme yöntemleriyle işlenebileceği belirtilmiştir.

Fogagnolo ve diğerleri [6], alüminyum alaşımı talaşlarının soğuk ve sıcak basmayı takiben sıcak ekstrüzyon ile geri kazanılmasını ve aynı zamanda bu yöntemin alüminyum matrisli kompozit talaşlarının geri kazanımında uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Soğuk veya sıcak basılmış numunelerin sıcak ekstrüzyonu talaşların birleştirilmesi için yeterli olmuştur. Mekanik özellikler açısından sıcak basılmış talaşların sıcak ekstrüzyonu daha iyi bir yol iken, düşük maliyet açısından soğuk basılmış talaşların sıcak ekstrüzyonu daha iyi bir yoldur.

Bu çalışmanın [6] ilk safhasında en uygun üretim prosesini bulmak için bileşimi bilinmeyen alüminyum talaşları kullanılmıştır. Daha sonra belirlenen en uygun proses ile Al_2O_3 ile takviye edilmiş AA6061 alüminyum matrisli kompozit üretimi incelenmiştir. Soğuk basmayı takiben sıcak ekstrüzyon ile elde edilmiş Al_2O_3 takviyeli AA6061 matrisli kompozit malzeme, talaşların alındığı ve geleneksel

döküm teknikleriyle üretilmiş evvelki malzeme ile mukayese edilmiştir. Basılabilirlik eğrisini saptamak adına alüminyum alaşımı talaşları farklı basınçlarda soğuk basılmışlardır. Bunun için 25 mm çapında gezici silindirik kalıp (floating cylindrical die) kullanılmıştır. Numuneler öncelikle 650 MPa basınçta soğuk basılmış ve ardından yağlayıcı olarak grafit kullanılan silindirik kalıpta 500 ºC'de sıcak basma işlemine hazır hale getirilmiştir. Sıcak basma iki farklı basınç ve iki farklı sürede uygulanmıştır (400 MPa – 5 dak; 400 MPa – 50 dak; 700 MPa – 5 dak; 700 MPa – 50 dak). Yağlayıcı olarak grafitin kullanıldığı sıcak ekstrüzyon 500 ºC'de 6.25:1 ve 25:1 oranlarında gerçekleştirilmiştir. Basma koşullarının ekstrüde edilmiş malzemelerin özelliklerine etkisini değerlendirmek iki çeşit numune ekstrüde edilmiştir: Soğuk basılmış talaşlar (650 MPa) ve sıcak basılmış talaşlar (500 ºC, 700 MPa, 50 dak).

Aynı çalışmada, sıcak birleştirilmiş (konsolide edilmiş) malzemeler optik ve elektronik mikroskopta ve enerji dispersiyon spektrometresinde analiz edilmişlerdir. Sıcak ekstrüde edilmiş numunelerin çekme dayanımları da ölçülmüştür. Alüminyum alaşımı talaşlarının basılabilirlik eğrisinden en uygun basıncın 650 MPa olduğu ve bu basınçta 2.48 g/cm^3 yoğunluğu olan sıkıştırılmış (kompakt) talaşlar üretilebildiği tespit edilmiştir. Sıcak basılmış alüminyum talaşlarının boyuna kesit görüntülerinden artan basma basıncı veya basma süresi ile birlikte birleşme derecesinin arttığı görülmüştür. En yüksek basınçta ve en uzun süreli sıcak basılmış alüminyum talaşları en iyi birleşmeyi göstermişlerdir. Bununla birlikte yeterli olmayan birleşme derecesini arttırmak için sadece basma kuvvetlerini kapsamayan, aynı zamanda yüksek sıcaklıkta kesme kuvvetlerini de kapsayan bir işlem olarak sıcak ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Ekstrüde edilmiş numunelerin dış görüntüleri, düşük ekstrüzyon oranının soğuk basılmış talaşlarda iyi bir birleşme sağlamadığını ortaya koymuştur. Diğer yandan, yüksek ekstrüzyon oranı ile hem soğuk hem de sıcak basılmış talaşlar için iyi bir birleşme sağlandığı görülmüştür. Soğuk ve sıcak basılmış talaşlardan ekstrüde edilmiş numunelerin mikroyapı görüntüleri her iki yolla da birleştirilen numunelerin iç boşluklar içerdiğini göstermiştir. Mikroyapıda gözüken iki farklı renk, talaşların iki farklı alaşımdan oluştuğunu ve sıcak ekstrüzyon işleminin alaşımların bileşimini homojenize etmediğini ortaya koymuştur. Yarı sayısal EDX analizleri, çinko (% 7) ve magnezyum (% 3) içeren açık renkli kısımların 7xxx serisi alüminyum alaşımı ve magnezyum (% 7) içeren koyu renkli

kısımların 4xxx serisi alüminyum alaşımı olduğunu ortaya koymuştur. Soğuk basılmış talaşlardan ekstrüde edilmiş numunenin çekme mukavemeti 292 MPa; sıcak basılmış talaşlardan ekstrüde edilmiş numunenin çekme mukavemeti 309 MPa olarak ölçülmüştür. Sonuçlar, birleştirmenin layıkıyla yapıldığını teyit etmiştir. İstatistiki değerler açısından soğuk ve sıcak basılmış talaşlardan ekstrüde edilmiş numuneler arasında ciddi bir fark görülmemiştir. Sıcak basmayı takiben sıcak ekstrüzyon yoluyla daha yüksek ortalama çekme dayanımı elde edilse de, soğuk basmayı takiben sıcak ekstrüzyon yolu daha az maliyetli olduğu için fiyat açısından daha uygundur. Alüminyum matrisli kompozit malzeme talaşlarının geri kazanımı için en uygun prosesin soğuk basmayı takiben sıcak ekstrüzyon olduğu sonucuna varılmıştır. Geri kazanılan kompozitin mikroyapı görüntüleri takviye Al_2O_3 partiküllerinin matris malzemesi içine homojen dağıldığını göstermiştir. Talaşlı işleme ve sıcak ekstrüzyon ile mikroyapının incelmesi ve yüksek miktarda alüminyum oksitin matris içine disperse olması nedeniyle geri kazanılan kompozit malzemenin çekme dayanımı ve sertlik değerleri önceki kompozit malzemeninkinden yüksektir. Sonuç olarak, alüminyum kompozit talaşlarının toz haline öğütülmesine ihtiyaç duyulmayan ve takviye fazında birikmenin olmadığı bir geri dönüşüm prosesi uygulanmıştır. Gelişmiş mekanik özellikler elde etmede bu yöntemin etkinliği gösterilmiştir.

5.5.3 Uçucu Kül Takviyeli Kompozitlerin Korozyon Davranışı

Ramachandra ve Radhakrishna [50], karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen alüminyum esaslı metal matrisli kompozit malzemenin korozyon davranışına uçucu kül ilavesinin etkisini incelemişlerdir. Uçucu kül oranının artmasıyla korozyon direnci azalmıştır. Uçucu külün varlığında oyuklanma korozyonunun başladığı ve uçucu kül oranının artmasıyla oyuklanma korozyonunun arttığı tespit edilmiştir.

Benzer bir çalışmada Mehandra ve Radhakrishna [48], uçucu kül içeriğinin geleneksel döküm teknikleriyle (karıştırmalı döküm) üretilen Al – % 4.5 Cu matrisli kompozit malzemenin korozyon davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında uçucu kül oranının artmasıyla korozyon direncinin düştüğünü saptamışlardır.

Bienies ve diğerleri [57], uçucu kül çökeltileri ile takviye edilerek döküm yolu ile üretilmiş alüminyum esaslı AK12 (AlSi12CuNiMg) kompozitini oyuklanma korozyonu davranışı ve korozyon kinetiği açısından incelemişlerdir. Uçucu kül

partiküllerinin oyuklanma korozyonu oluşumunu desteklediğini belirlemişlerdir. Araştırmacılar bu kompozitte oyuklanma korozyonunu destekleyen üç faktör tespit etmişlerdir: tepkimeye girmeyen uçucu küllerin varlığı, gözenek gibi döküm hataları ve alüminyum ile silika (SiO_2) arasındaki tepkime sonucunda oluşan yüksek silisyum içeriği. Bu üç faktör korozyon yüzeyinde oluşan oksit filmin özelliklerini belirlemektedir.

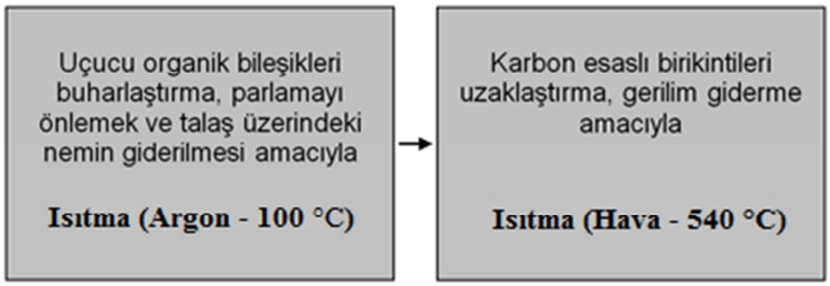
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 Deneysel Malzemeler

Bu çalışmada 6061 alüminyum alaşımı talaşı, saf alüminyum tozu (≥ % 99.5 Al) ve Yatağan termik santrali uçucu baca külü kullanılmıştır. Yatağan uçucu külü, reaktif kireç miktarının % 10' a yakın olması nedeniyle TS EN 197 – 1' e göre W sınıfına (kalkersi uçucu kül) girmektedir. Ancak, ASTM C 618' e göre $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ değerinin % 70' in üzerinde olması nedeniyle F sınıfı küle (silisli) uygun olmakla birlikte, yine CaO' in % 10' u geçmesi sonucunda kireçsi kül sınıfına girmektedir. Buna göre, bu külün her iki uçucu kül sınıfı için de sınırda olduğu düşünülmektedir [36].

6.2 Deneysel Numunelerin Üretim Yöntemi

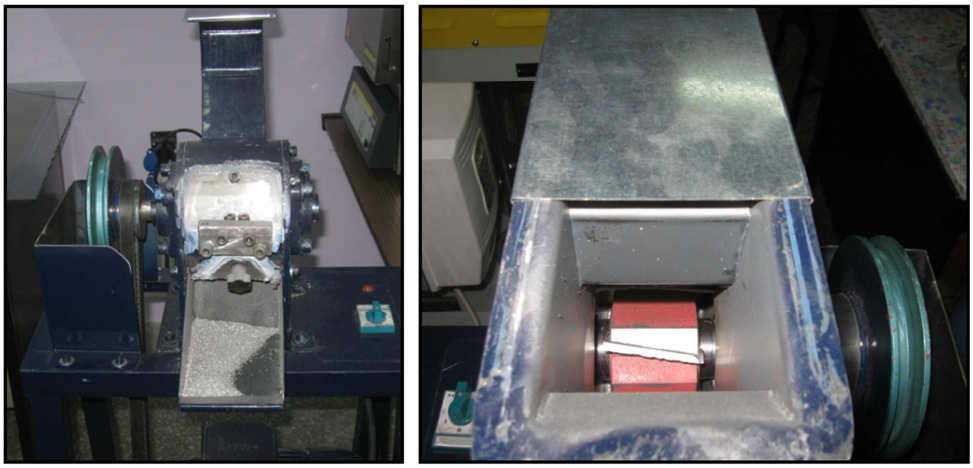
Sanayiden temin edilen 6061 Al talaşları önce sırasıyla argon atmosfer kontrollü fırında 100°C' de 1 saat süreyle tutma ve ardından hava ortamına açık bir fırında 540°C'de 1 saat termal temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Termal temizleme işlemine ait akım şeması Şekil 6.1'de verilmiştir.



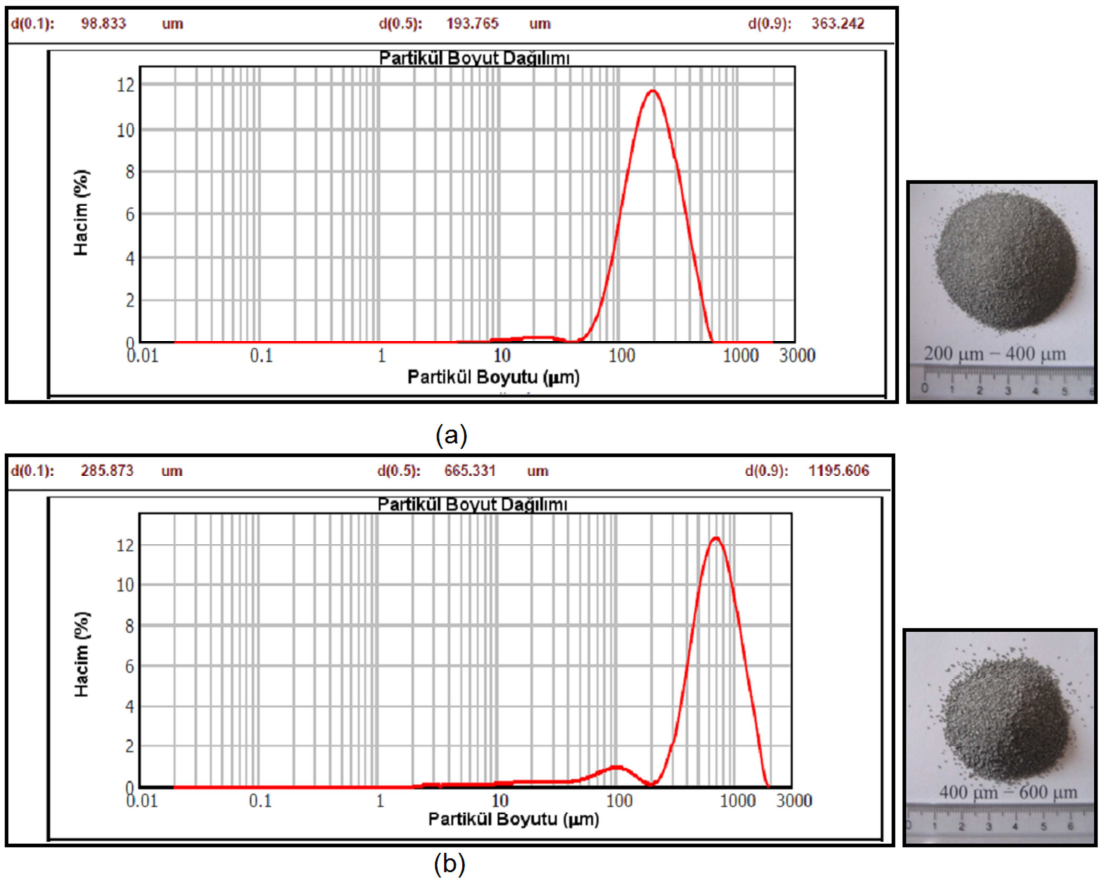
Şekil 6.1: İncelenen talaşlara uygulanan termal temizleme işlemine ait akım şeması.

Termal temizleme işlemine maruz kalan talaşlar daha sonra talaş kırma cihazı (Şekil 6.2) ile kırılmıştır. Kırma sırasında kırıcıya ait kesici parçadan gelebilecek demir esaslı partiküller bir mıknatıs kullanılarak toplanmıştır. Talaşlar elekten geçirilerek sınıflandırıldıktan (200-400 µm ve 400-600 µm arası) sonra her bir talaşın partikül

boyut dağılımı belirlenmiştir. 200-400 µm ve 400-600 µm arası sınıflandırılan talaşların ortalama boyutu sırasıyla 190 µm ve 660 µm olarak ölçülmüştür (Şekil 6.3). Partikül boyut dağılımı lazer kırınımlı boyut analiz cihazı Malvern Mastersizer 2000-S cihazı (Şekil 6.4) ile belirlenmiştir.



Şekil 6.2: Talaş kırma cihazı.



Şekil 6.3: (a) 200-400 µm ve (b) 400-600 µm arası sınıflandırılan talaşların partikül boyut dağılımı.



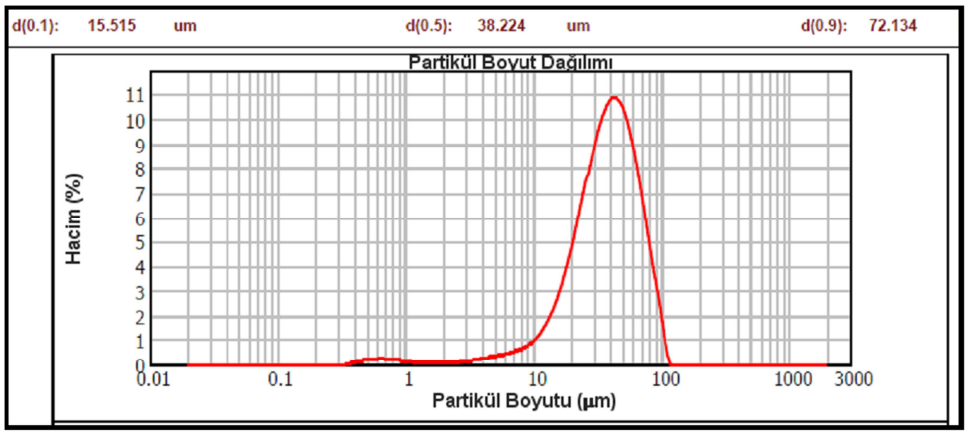
Şekil 6.4: Malvern Mastersizer 2000-S partikül boyut analiz cihazı.

Talaşlar arasında bağlanmayı artırmak [11, 56] için talaşların her birinin içerisine farklı oranlarda ortalama tane boyutu 27 µm olan saf alüminyum tozu ilave edilmiş ve homojen bir karışım sağlamak amacıyla bu yeni toz karışımları (talaş/toz) karıştırıcı olarak paslanmaz çelik bilyaların (440-C) varlığında Union HD-01 marka attritörde (Şekil 6.5) sıvı azot ortamında 2 saat süre ve 200 d/d ile öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Öğütmede kullanılan çelik bilyaların çapı 4,76 mm ve bilya/malzeme ağırlık oranları ise 100:1 ve 32:1' dir. Sıfıraltı sıcaklıkta çalışan attritör cihazı 10 dakika aralıklarla durdurulup, karışımın bulunduğu tankın içine sıvı azot verilmiştir.



Şekil 6.5: Union HD-01 marka atritör cihazı.

Uçucu kül içeren numunelerin üretimi, alüminyum talaşı (%Ağ.50) ve alüminyum tozu (%Ağ.50) karışımına farklı oranlarda ortalama partikül boyutu 38 µm olan (Şekil 6.6) kalsine edilmiş uçucu kül ilave edilerek ve bu karışımın da sıvı azot ortamında 2 saat süre ile öğütülmesiyle gerçekleştirilmiştir.

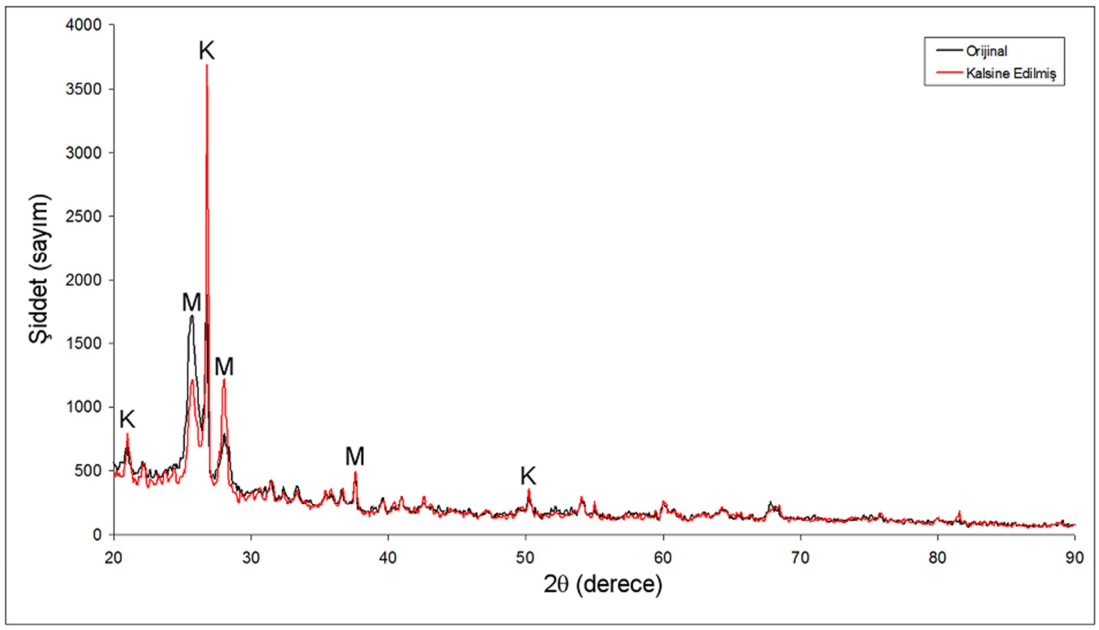


Şekil 6.6: Kalsine edilmiş uçucu külün partikül boyut dağılımı.

Kompozit üretim aşamasında takviye elemanı olarak kullanılmak üzere Yatağan Termik Santrali İşletme Müdürlüğü'nden temin edilen uçucu kül, 900 °C' de 30 dakika süre ile kalsinasyon işlemine tabi tutulmuştur. Termik santralden temin edildiği durumda (orijinal) ve kalsinasyon işlemine tabi tutulan uçucu külün kimyasal kompozisyonları (% Ağırlık) Çizelge 6.1' de, XRD paterni ise Şekil 6.7'de verilmiştir. Kimyasal analizlerin yapılmasında PERKIN ELMER A Analyst 800 model atomik absorpsiyon cihazı kullanılmıştır. İki uçucu kül sınıfı arasında en çok dikkati çeken kimyasal fark, kalsine edilmiş uçucu küllerde oksit bileşiklerden Al_2O_3, TiO_2, Fe_2O_3, CaO, MgO ve element karbon miktarının azalmasıdır (Çizelge 6.1). Uçucu kül bileşenlerinin azalmasıyla alüminyum ile oluşabilecek muhtemel bileşiklerin miktarı da azaldığı için [54, 58, 59] bu çalışmada kalsine edilmiş uçucu kül kullanılmıştır. Orijinal ve kalsinasyon işlemine tabi tutulan uçucu külün XRD paterninde (Şekil 6.7) kuvars ($Si0_2$) ve müllit ($3Al_2O_3.2SiO_2$) fazları mevcut olup, kalsinasyon işlemi ile kristalin müllit pik şiddeti artmaktadır. Müllit fazı, Al_2O_3 - SiO_2 sisteminde normal atmosfer basıncı altında oda sıcaklığından yüksek sıcaklıklara çıkıldığında oluşan tek kararlı fazdır [60].

Çizelge 6.1: Yatağan termik santralı uçucu külün kimyasal analizi.

Oksit Bileşen	**Orijinal**	**Kalsine Edilmiş**
	İçerik (% Ağ.)	
SiO_2	53,52	58,34
Al_2O_3	22,53	20,63
CaO	17,39	15,19
Fe_2O_3	5,77	4,89
MgO	2,56	2,43
TiO_2	1,06	0,98
Element Bileşen	İçerik (% Ağ.)	
C	0,31	0,24

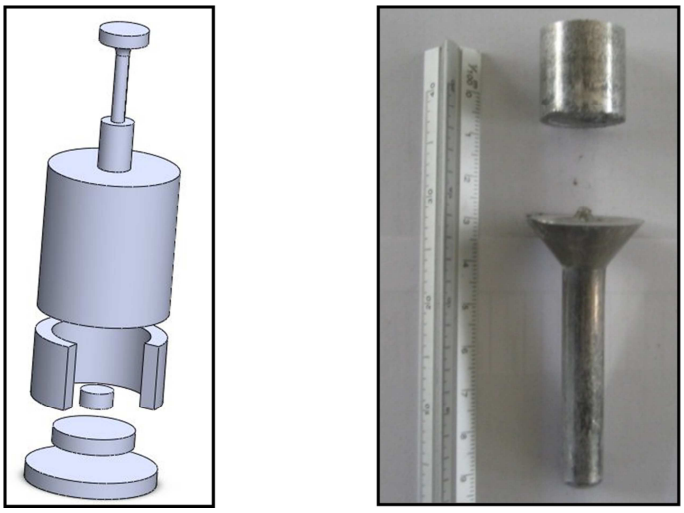


Şekil 6.7: Original ve kalsine edilmiş uçucu küle ait XRD paterni. K - Kuvars (SiO_2); M - Müllit ($3Al_2O_3.2SiO_2$).

Sıvı azot ortamda öğütülmüş olan tozlar, ekstrüzyon işleminden önce Şekil 6.8 (a)' de verilen kalıp içerisinde 700 MPa basınç altında 10 dakika süreyle tek yönlü olarak soğuk preslenerek 30 mm çapında 20 mm yüksekliğinde disk haline getirilmiştir. Bazı araştırmacılar [61] ekstrüzyon sıcaklığına bağlı olarak yüksek sıcaklıkların, sıvı azot ortamında öğütülmüş alüminyum alaşımlarının yeniden kristalleşmesine ve tane büyümesine katkıda bulunduğunu ve ekstrüzyon işleminin düşük sıcaklıkta yapılması durumunda tanelerin ektrüzyon yönüne paralel olacak şekilde <111> yönünde bir yönelim gösterdiğini ve tane boyutunun küçük olacağını belirlemişlerdir. Bu nedenle mikroyapı homojenliğini sağlamak, oksit tabakasını kırarak sünekliği iyileştirmek, tamamen yoğun ve son şekle sahip malzeme üretmek için [3, 5, 6, 9, 10, 20-22] 30 mm çapındaki diskler 100 ton kapasiteli dikey eksenli hidrolik pres yardımı ile 9:1

oranda 350°C’ de sıcak ekstrüze edilerek 10 mm çapında 50 mm uzunluğunda numuneler elde edilmiştir (Şekil 6.8 (b)). Ekstrüzyon işlemi için kullanılan fırın ve kontrol ünitesi Şekil 6.9’ da görülmektedir.

Hazırlanan kompozit numuneleri metalografik incelemeye, faz analizine, yoğunluk ve elektriksel iletkenlik ölçümlerine, mekanik karakterizasyon deneylerine (sertlik, basma ve aşınma) ve korozyon deneyine tabi tutulmuştur.



(a) (b)

Şekil 6.8: (a) Disk üretiminde kullanılan kalıp ve soğuk preslenen parçanın şematik, (b) Soğuk preslenen ve ardından 350°C’de ekstrüde edilen numune görüntüsü.



(a) (b)

Şekil 6.9: (a) 100 ton kapasiteli dikey eksenli hidrolik pres ve ısıtma kontrol sistemi, (b) ekstrüzyon kalıbı.

6.3 Mikroyapısal Karakterizasyon Çalışmaları

Mikroyapı karakterizasyonu, metalografik incelemeler, X-ışınları difraksiyon (XRD) çalışmaları, yoğunluk ve elektriksel iletkenlik ölçümleri ile gerçekleştirilmiştir.

6.3.1 Metalografik İncelemeler

Metalografik incelemeler, standart metalografik prosedüre göre alüminyum ve kompozit malzemeler hazırladıktan sonra Leica marka TCS-SL model ışık mikroskobunda gerçekleştirilmiştir. Metalografik prosedür, reçineye alınan numuneleri sırasıyla (gerektiğinde 60, 120, 240), 400, 600, 800, 1200 ve 2500 mesh SiC zımparada nazik olarak zımparalamadan sonra MD Mol tür çuha kullanılarak parçacık boyutu 3 μm elmas solüsyon ve parlatma sıvısıyla yeterli süre kaba parlatma işlemini, ardından, MD Nap tür çuha kullanılarak kolloidal silika solüsyonu ve damıtık su ile yeterli süre ince parlatma işlemini içermektedir.

6.3.2 XRD İncelemeleri

Oluşan fazların tespiti için alüminyum alaşımı ve uçucu kül takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin XRD kırınım desenleri GBC MMA 027 model X-ışınları cihazında, $2\theta = 20 - 120^{o}$ aralığında, 2^{o}/dak tarama hızında ve 0.02^{o} adım tarama boyutunda CuK_{α} radyasyonu (dalga boyu, $\lambda = 1.54$) kullanılarak elde edilmiştir. Uçucu küllerin X – ışınları kırınım desenleri GBC MMA 027 model X-ışınları cihazında, $2\theta = 20 - 90^{o}$ aralığında, CuK_{α} (dalga boyu, $\lambda = 1.54$) radyasyonu kullanılarak elde edilmiştir.

6.3.3 Yoğunluk ve Elektrik İletkenliği Ölçümleri

Uçucu külün yoğunluğu (ρ_{uk}), Quantachrome Instruments Ultrapycnometer 1000 marka yoğunluk ölçüm cihazı kullanılarak 2.40 g/cm^3 olarak ölçülmüştür. Uçucu kül takviyeli kompozit malzemelerin takviye hacim oranı Eşitlik (6.1) ile hesaplanmıştır. V_{UTHO} uçucu kül takviye hacim oranı, ρ_{al}, ρ_{komp}, ρ_{uk} ise sırasıyla alüminyum, kompozit ve uçucu külün yoğunluk değerleri olarak tanımlanmıştır.

$$\% V_{UTHO} = \frac{\boldsymbol{Vuk}}{\boldsymbol{Vuk + Vtoz + Vtalaş + Vboşluk}} \text{ x } 100 \qquad \textbf{(6.1)}$$

Burada; V_{UTHO}: Kompozit numunesindeki uçucu kül takviye hacim oranı

V_{uk}: Kompozit numunesindeki uçucu külün hacmi

V_{toz}: Kompozit numunesindeki Al tozunun hacmi

$V_{talaş}$: Kompozit numunesindeki 6061 alaşımı talaşının hacmi

$V_{boşluk}$ Kompozit numunesindeki boşluk hacmi

Yoğunluk ölçümleri basit bir yöntem olan hacim-kütle arasındaki ilişki (Eşitlik 6.2) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yöntemle yoğunluk ölçümü, sıvının yer değiştirmesi prensibine (Archimedes) dayanmaktadır. Numunelerin önce havada kuru ağırlığı (m_k), sonra da saf su (m_s) içerisindeki ağırlıkları tartılarak Eşitlik (6.2) yardımı ile yoğunluğu belirlenmiştir [62].

$$\rho = m_k \text{ x } \rho_{H_2O}/(m_k - m_s) \quad \textbf{(6.2)}$$

Teorik ve gerçek yoğunluk (ρ_G) arasındaki farktan (Eşitlik 6.3) numunedeki porozite içeriği (V_P) hesaplanabilir [63, 64]. Teorik yoğunluk hesapları (ρ_T) ise karışım kuralına dayalı olarak numuneyi oluşturan her bir bileşenin yoğunluğu (ρ) ile ağırlıkça yüzdeleri (%W) çarpılarak bulunan değerlerin toplamına eşittir (Eşitlik 6.4).

$$V_p = (\rho_T - \rho_G)\ x\ 100/\rho_T \quad \textbf{(6.3)}$$

$$\rho_T = [(\%\, W)_1\ x\ \rho_1] + [(\%\, W)_2\ x\ \rho_2] + \cdots + [(\%\, W)_n\ x\ \rho_n] \quad \textbf{(6.4)}$$

Elektrik iletkenliği ölçümleri, girdap akımları prensibiyle çalışan HOCKİNG AutoSigma 3000DL model elektriksel iletkenlik ölçüm cihazıyla 500 kHz frekansta ve 8 mm çapında ölçüm probu kullanılarak her bir numunede on ölçüm alınarak yapılmıştır. MS/m (Mega Siemens/metre) birimiyle belirlenen elektrik iletkenliği değerleri % IACS birimine çevrilmiştir.

6.4 Mekanik Özelliklerin Karakterizasyonu

Mekanik özellik karakterizasyonu sertlik, basma deneyleriyle yapılmıştır.

6.4.1 Sertlik Ölçümü

Mikrovickers sertlik testi ASTM E 92 – 82 (2003) standardına uyularak gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri, metalografik numuneler üzerinde tepe açısı $136^o \pm 30"$ olan piramit elmas batıcı uçlu mikrosertlik cihazı ile yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümü HMV SHIMADZU marka mikrosertlik cihazında 15 saniye süreyle uygulanan 500 gr yük altında Vickers sertlik değeri ($HV_{0,5}$) cinsinden

gerçekleştirilmiştir. Sertlik değerleri, en az 20 ölçümün ortalaması alınarak tespit edilmiştir. Sertlik izi mikroyapı bileşenlerinin (talaş, toz ve uçucu kül) hepsini kapsadığından elde edilen mikrosertlik değeri, kompozitin kütlesel sertliğini karakterize etmektedir.

6.4.2 Basma Deneyi

Basma testlerinde ASTM E9 – 09 standardı gözetilmiştir. Alüminyum alaşımı ve kompozit malzemelerin basma deneyi, DARTEC marka üniversal test cihazında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, deney cihazının çene hızı 1 mm/dk olarak seçilmiştir. Basma deneyi için çapı 10 mm ve yüksekliği 12 – 26 mm arasında değişen numuneler kullanılmıştır.

Basma testi ile elastisite modülü, akma dayanımı, basma dayanımı, birim şekil değişimi değerleri tespit edilebilmektedir. Bu tespit edilen değerler mühendislik değerleridir. Bağıntı (6.5) ve bağıntı (6.6) kullanılarak gerçek gerilme ($\sigma_{gerçek}$) ve gerçek birim şekil ($\varepsilon_{gerçek}$) değişimleri hesaplanmaktadır. Basma testinde numunenin kısalmasından mütevellit birim şekil değişimi negatif işaretlidir [65].

$$\sigma_{\text{gerçek}} = \sigma_{\text{müh}} (1 + \varepsilon_{\text{müh}}) \quad \textbf{(6.5)}$$

$$\varepsilon_{\text{gerçek}} = ln (1 + \varepsilon_{\text{müh}}) \quad \textbf{(6.6)}$$

Gerçek basma ve gerçek çekme gerilmeleri mutlak değer olarak birbirine eşittir. Gerçek çekme gerilmesi mühendislik çekme gerilmesinden büyük ve gerçek basma gerilmesi mutlak değer olarak mühendislik basma gerilmesinden küçüktür.

h_0 ilk yükseklik, d_0 ilk çap olarak kabul edilirse, basma deneyinde, h_0/d_0 oranının artmasıyla aynı birim şekil değişimi için uygulanan yük azalır [66].

6.5 Korozyon Deneyi

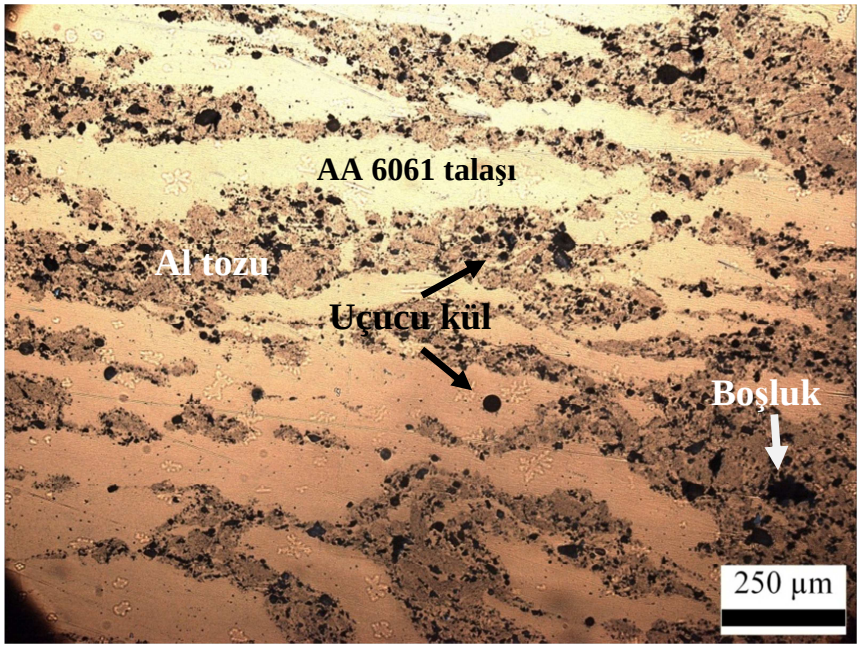
Korozyon deneyleri TS EN ISO 11846 standardına uygun olarak, yüzeyleri temizlenmiş numunelerin ‘1000 ml damıtık su + 30 g NaCI + 10 ml HCI’ çözeltisi içinde 48 saat süreyle tutulmaları ve belirli zamanlarda ağırlıklarının ölçülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 200 ml’ lik cam beherler kullanılmıştır. Kullanılan korozyon çözeltilerinin hacmi numunelerin ilk yüzey alanına göre belirlenmiş olup,

ortalama değeri 0,6 ml/mm^2 olarak alınmıştır. Numunelerin ilk ağırlığı ve yüzey alanı ile kullanılan çözeltilerin ilk hazırlandıkları andaki pH ve elektriksel iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Numunelerin ağırlık değişimleri ile çözeltilerin pH ve elektriksel iletkenlik değişimleri 3. , 6. , 9. , 12. , 24. ve 48. saatte ölçülmüştür. Ölçümler, numunelerin önce akan suda ardından damıtık suda yıkanıp iyice kurutulmalarının ardından yapılmıştır. Çözeltilerin pH değişimleri 'WTW pH/Cond 340i pHmeter' ile ve elektriksel iletkenlik değişimleri de aynı cihaza 'TetraCon 325' probu takılarak ölçülmüştür. Deney sonucunda numunelerde meydana gelen korozyon kayıpları, birim yüzey alanı başına düşen ağırlık kaybı (mg/mm^2) cinsinden değerlendirilmiştir. Korozyon testi sonrası numunelerin yüzeylerinin incelenmesi, hızlandırma voltajı 15kV olan HITACHI marka TM-1000 model taramalı elektron mikroskobunda geri saçılmış elektronlar ile yapılmıştır.

7. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEMELER

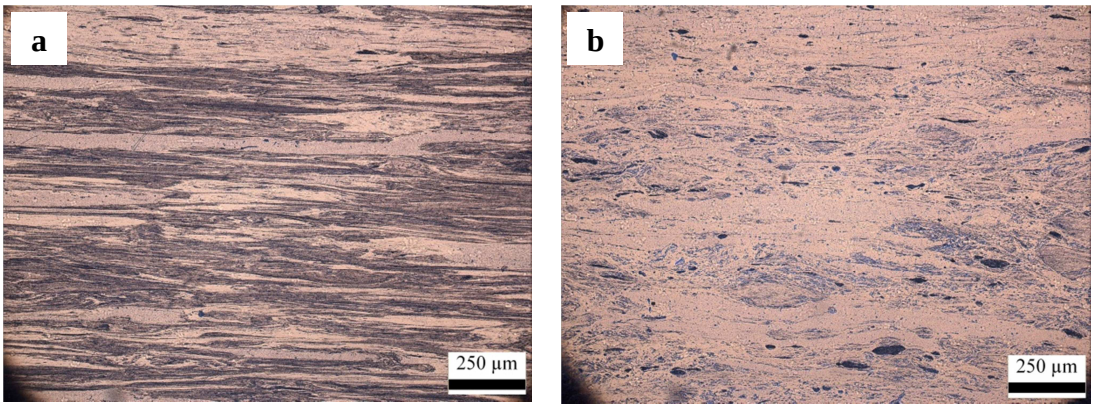
7.1 Metalografik İnceleme Sonuçları

Uçucu kül içermeyen 6061 alüminyum talaşı ve saf alüminyum tozundan oluşan numuneler ile uçucu kül takviyesi yapılmış 6061 alüminyum talaşı ve saf alüminyum tozundan oluşan numunelerin optik mikroskopla görüntülenen mikroyapıları toplu olarak Şekil B.1' de verilmiştir. Genel olarak, mikroyapıdaki açık renkli bölgeler alüminyum alaşımı talaşını, koyu renkli bölgeler alüminyum tozunu, dairesel parçacıklar uçucu külleri, deforme olmuş veya karmaşık şekilli oluşumlar da boşlukları göstermektedir. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde uçucu küllerin büyük bir çoğunlukla alüminyum tozu ile karıştığı, nadir olarak da talaşların yüzeyine battığı görülmektedir (Şekil 7.1).



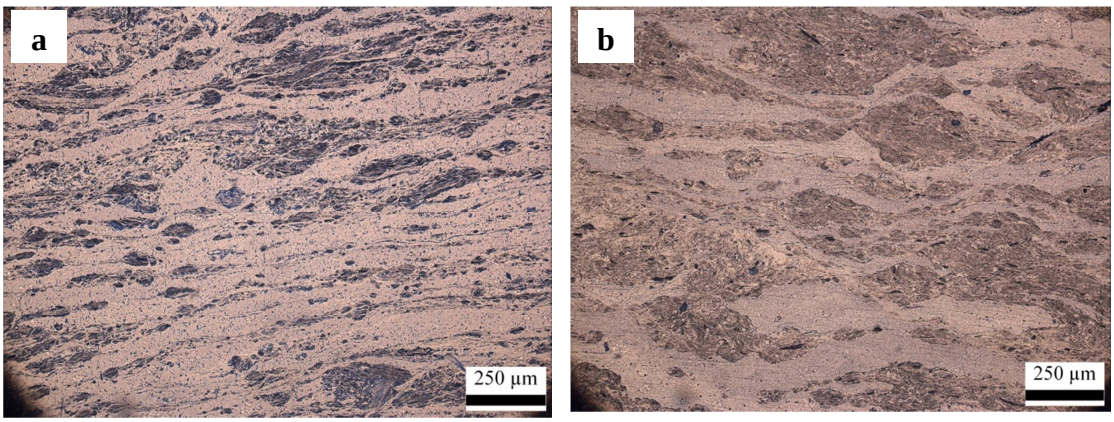
Şekil 7.1: Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 100/1; Ağ. %20 kül – Ağ. %40 saf Al toz – Ağ. %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme.

Kriyoöğütme işleminde bilya/toz ağırlık oranı arttıkça daha homojen ve daha az boşluklu bir yapı elde edilmiştir (Şekil 7.2).

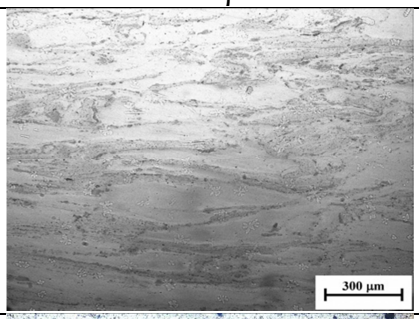
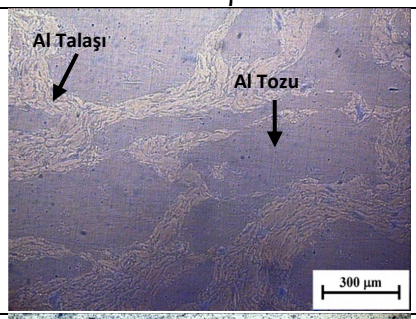
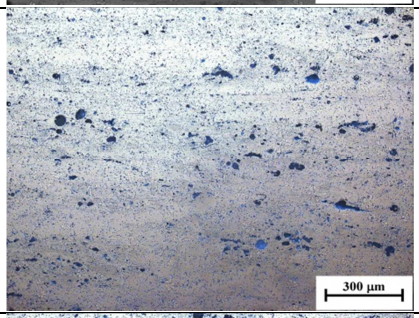
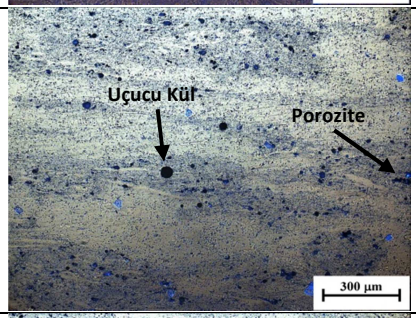
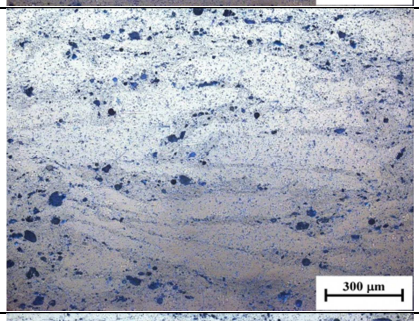
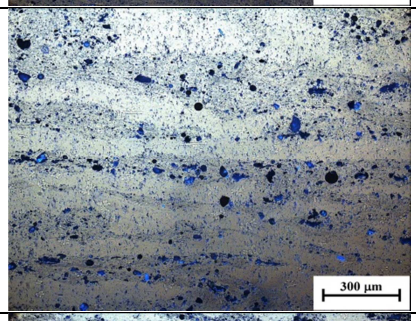
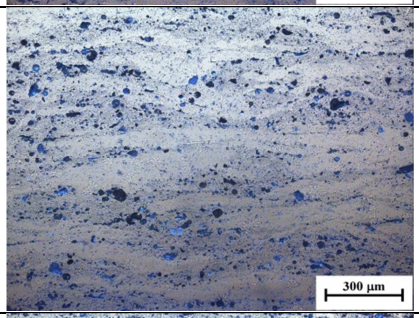
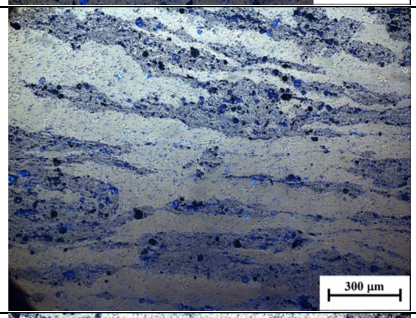
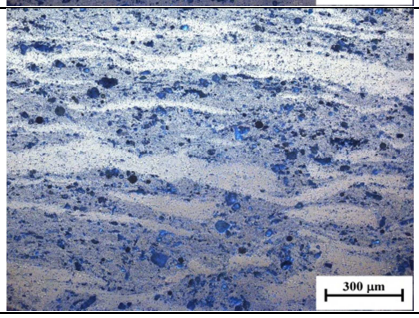
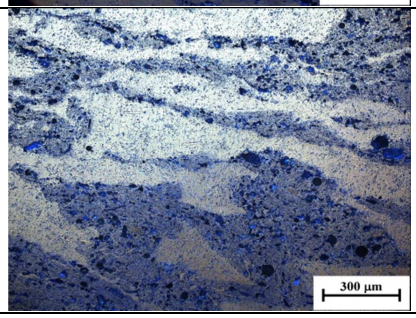


Şekil 7.2: Kriyoöğütmenin mikroyapıya etkisi. (a) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 100/1; ağ. %75 saf Al toz – ağ. %25 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (b) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; ağ. %75 saf Al toz – ağ. %25 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme.

Talaş boyutunun küçülmesiyle, genel olarak, alüminyum talaşlarının ve alüminyum tozlarının daha homojen karıştığı ve daha iyi bağlandığı görülmüştür (Şekil 7.3). Yine, talaş boyutunun küçülmesi ile uçucu küllerin alüminyum tozu içinde daha homojen dağıldığı görülmüştür (Şekil 7.4).



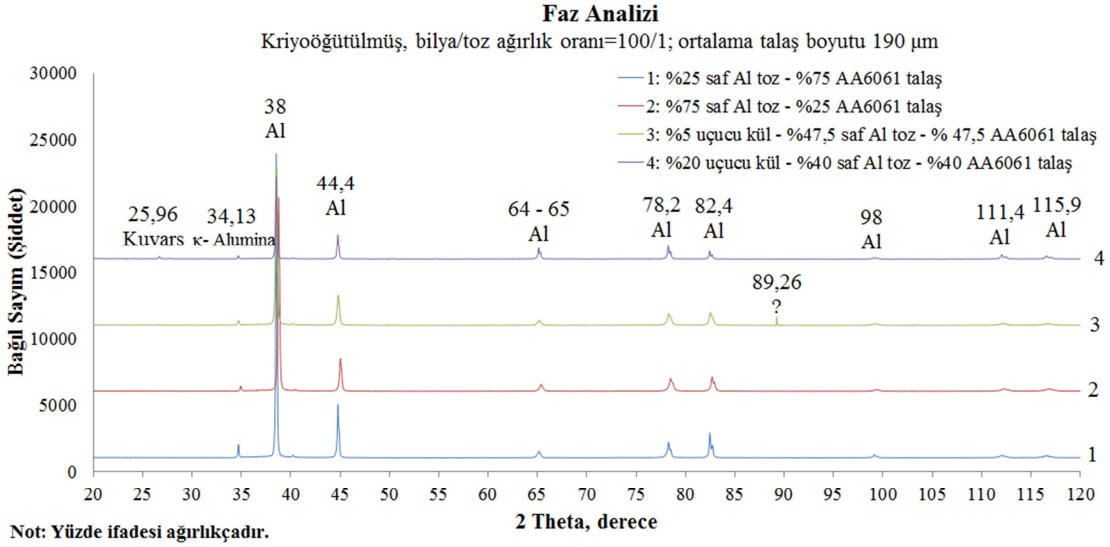
Şekil 7.3: Talaş boyutunun talaş ile tozun bağlanmasına etkisi. (a) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 32/1; ağ. %50 saf Al toz – ağ. %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (b) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; ağ. %50 saf Al toz – ağ. %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; ekstrüzyon kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme.

Uçucu Kül İçeriği (% Ağ.)	Ortalama Talaş Boyutu	
	190 µm	660 µm
0		
5		
10		
15		
20		

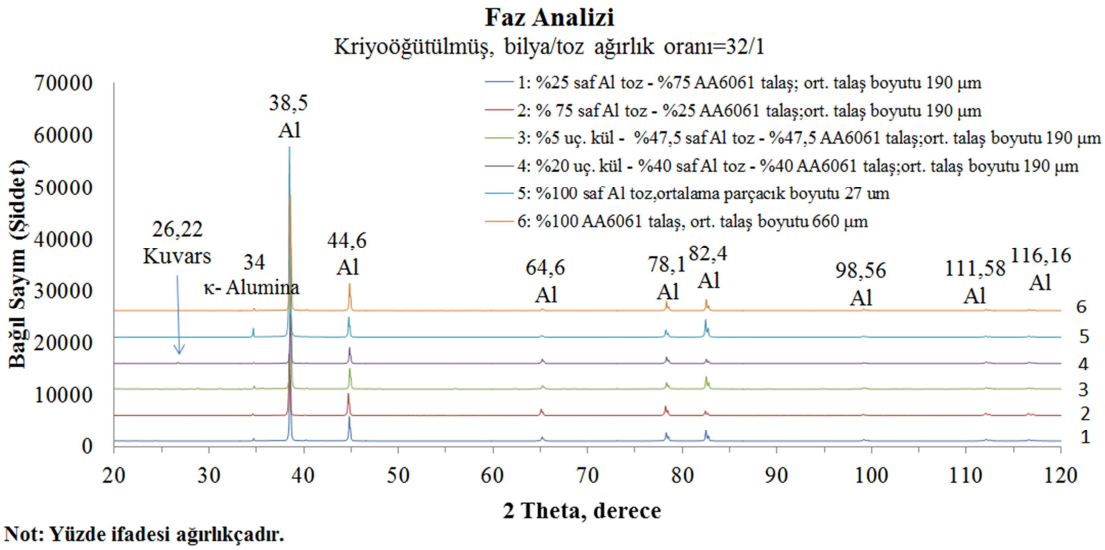
Şekil 7.4: Artan uçucu kül takviyesinin mikroyapıya etkisi. Kriyoöğütülmüş ve bilya/toz ağırlık oranı 32/1 olan numuneler. Matriste talaş/Al toz oranı 1/1' dir.

7.2 XRD Sonuçları

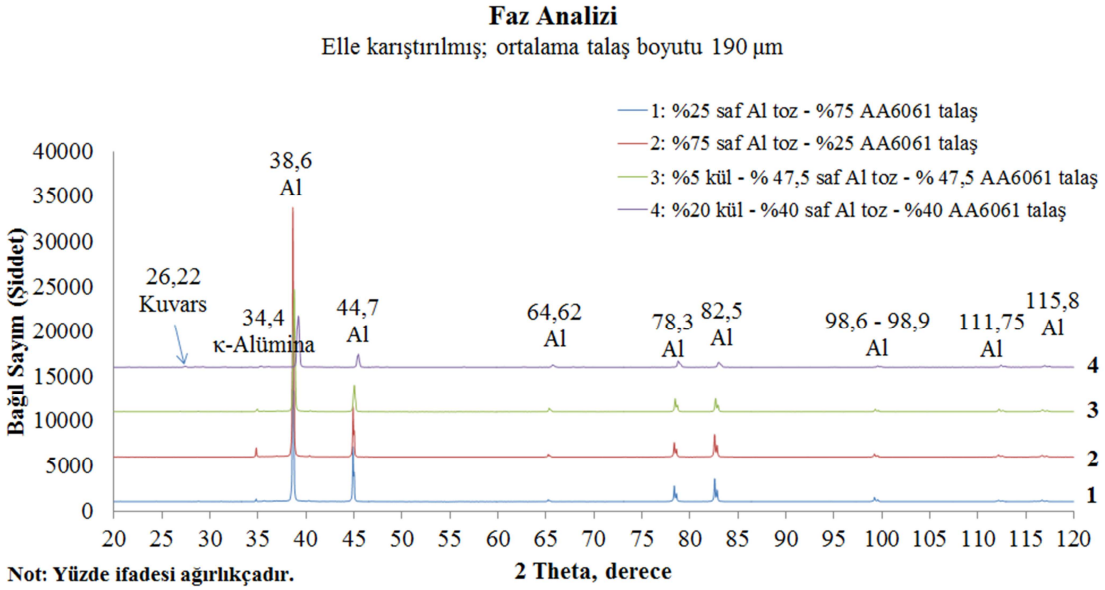
XRD analizi için hazırlanan numuneler kriyoöğütülmüş ve elle karıştırılmış olmak üzere iki ana gruba ve bunların her biri de uçucu kül takviyeli ve uçucu kül takviyesiz olmak üzere iki alt gruba ayrılmıştır. Kriyoöğütülmüş ve uçucu kül takviyesiz olanlar ile elle karıştırılmış ve uçucu kül takviyesiz olanlarda sadece alüminyum piki ve düşük sıcaklıklarda oluşan yarıkararlı kappa-alümina piki tespit edilmiştir (Şekil 7.5, Şekil 7.6, Şekil 7.7). 350 ºC' de 100 ton kapasiteli hidrolik preste yürütülen ekstrüzyon işleminde yaratılan basıncın yarıkararlı kappa-alumina fazının oluşum sıcaklığını düşürdüğü düşünülmektedir. Bu numunelere uçucu kül ilave edilmesi durumunda, yukarıdaki fazlara ilave olarak katılan uçucu kül miktarı nispetinde kuvars piki ortaya çıkmakta ve belirginleşmektedir. Kompozit numunedeki uçucu kül ağırlık oranının % 20 ve % 5 olması hallerinde kompozit içindeki silisyum oksitin hacim oranı, sırasıyla, yaklaşık % 13,5 ve % 3,5 olarak hesaplanmıştır. Yine uçucu kül ağırlık oranının % 20 olması durumunda uçucu külde bulunan alüminyum oksit parçacıklarının kompozit içindeki hacim oranı yaklaşık olarak % 3,17 olarak hesaplanmıştır. Uçucu külden gelen aluminyum oksit pikinin çıkmamasının nedeni uçucu kül takviyesinin en fazla olması durumunda dahi bu fazın kompozit içindeki hacim oranının % 5' in altında kalması olabilir. Silisyum oksit pikinin şiddetinin düşük olmasının nedeni, uçucu külün içinde bulunun kuvars fazının kompozit içindeki hacim oranının düşük olması, öğütme işlemi ile uçucu külün kristal boyutunun küçülmesi ve gittikçe amorf yapıya dönüşmesi olabilir [67].



Şekil 7.5: Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 100/1 ve ortalama talaş boyutu 190 µm olan bazı numunelerin X – ışını kırınım desenleri (XRD).



Şekil 7.6: Kriyoöğütülmüş ve bilya/toz ağırlık oranı 32/1 olan bazı numunelerin X – ışını kırınım desenleri (XRD).



Şekil 7.7: Elle karıştırılmış ve ortalama talaş boyutu 190 µm olan bazı numunelerin X – ışını kırınım desenleri (XRD).

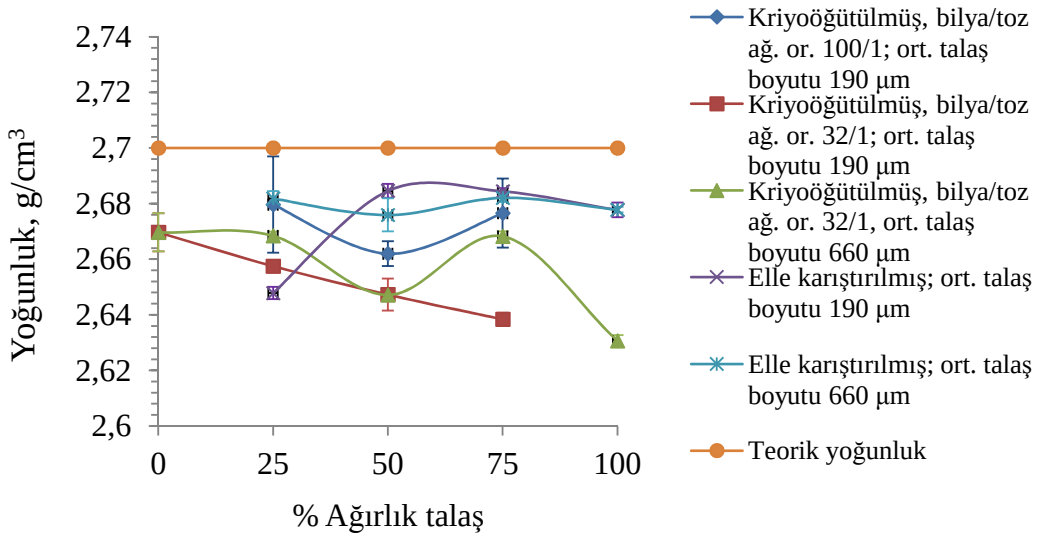
Geleneksel sıvı faz üretim yöntemi (700 °C - 850 °C) ile üretilen uçucu kül takviyeli alüminyum kompozitlerde reaksiyon kinetiğine bağlı olarak arayüzey reaksiyonları oluşması söz konusudur. Uçucu külü oluşturan SiO_2, Al_2O_3 ve Fe_2O_3 esas bileşenleri Mg içeren ergimiş alüminyum matristeki Al ve Mg ile reaksiyona girerek arayüzey reaksiyon oluşumu gözlenmektedir [40, 51, 53]. Diğer taraftan, alüminyumun katı fazda olduğu sıcaklıklarda öğütme ve plastik deformasyon işlemi gibi adımlarla üretilen alüminyum matrisli kompozitlerde matris/takviye elemanı arasında reaksiyon ürünlerinin oluşmadığı literatürde [68, 69] bildirilmiştir. Bu çalışmada da, sıvı azot ortamda öğütme ve ardından 350°C'de ekstrüde edilerek üretilen

alüminyum alaşımları ve alüminyum matrisli kompozitlerin XRD analizinde ara yüzey reaksiyon oluşumu görülmemiştir.

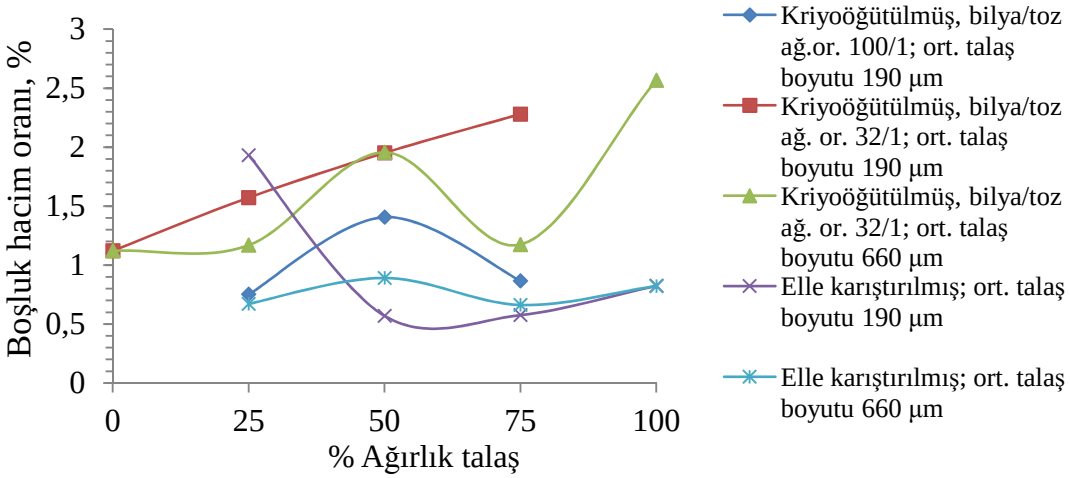
7.3 Yoğunluk ve Elektrik İletkenliği Ölçüm Sonuçları

7.3.1 Yoğunluk Ölçümü Sonuçları

Sadece 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf alüminyum tozundan ibaret numunelere bakıldığında, elle karıştırılmış olanların kriyoöğütülmüş olanlara kıyasla, genel olarak, yoğunlukları daha büyük ve boşluk hacim oranları daha küçüktür (Şekil 7.8 ve Şekil 7.9).

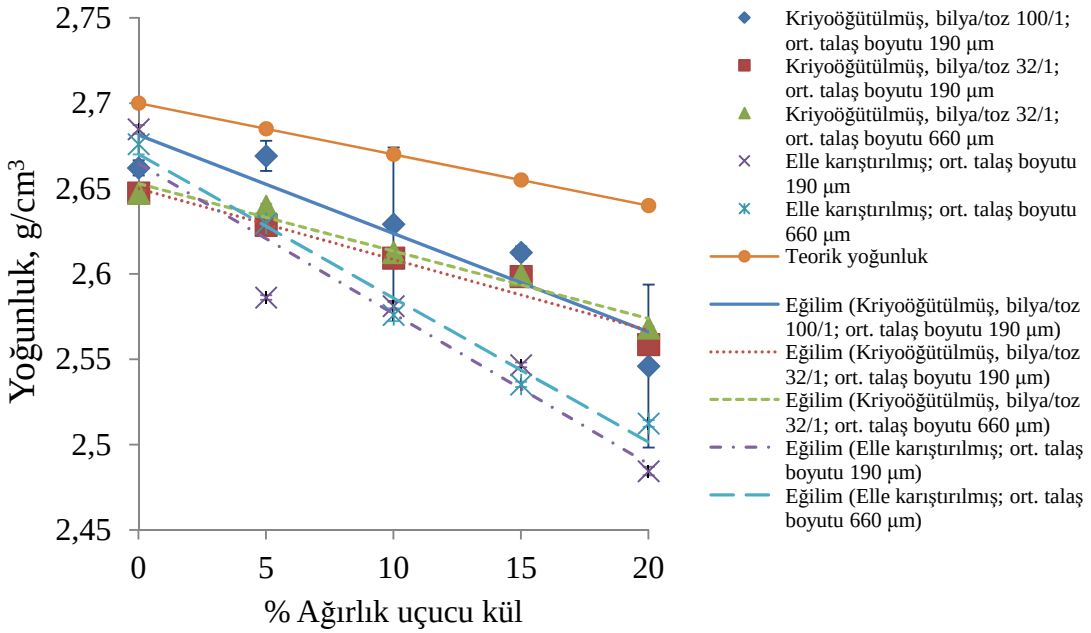


Şekil 7.8: 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan oluşan kompozit malzemelerin yoğunluklarının talaş ağırlık oranına göre değişimi.

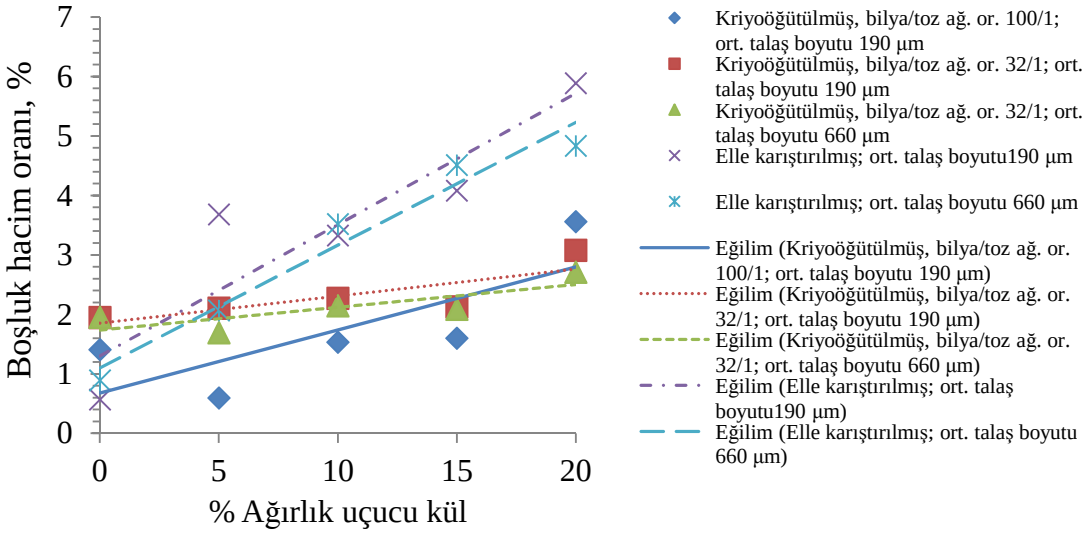


Şekil 7.9: 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan oluşan kompozit malzemelerde talaş ağırlık oranı ile birlikte boşluk hacim oranının değişimi.

Uçucu kül takviyeli numunelere bakıldığında, kriyoöğütülmüş olanların elle karıştırılmış olanlara kıyasla, genel olarak, yoğunlukları daha büyük ve boşluk hacim oranları daha küçüktür (Şekil 7.10 ve Şekil 7.11). Uçucu kül takviyesi yapılan hem kriyoöğütülmüş hem de elle karıştırılmış numunelerde uçucu külün ağırlık oranı (ya da hacim oranı) arttıkça kompozitin yoğunluğu düşmekte ve boşluk hacim oranı artmaktadır.



Şekil 7.10: Uçucu kül takviyesi yapılmış 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan oluşan kompozit malzemelerin yoğunluklarının uçucu kül ağırlık oranına göre değişimi.



Şekil 7.11: Uçucu kül takviyesi yapılmış 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan oluşan kompozit malzemelerdeki boşluk hacim oranlarının uçucu kül ağırlık oranına göre değişimi.

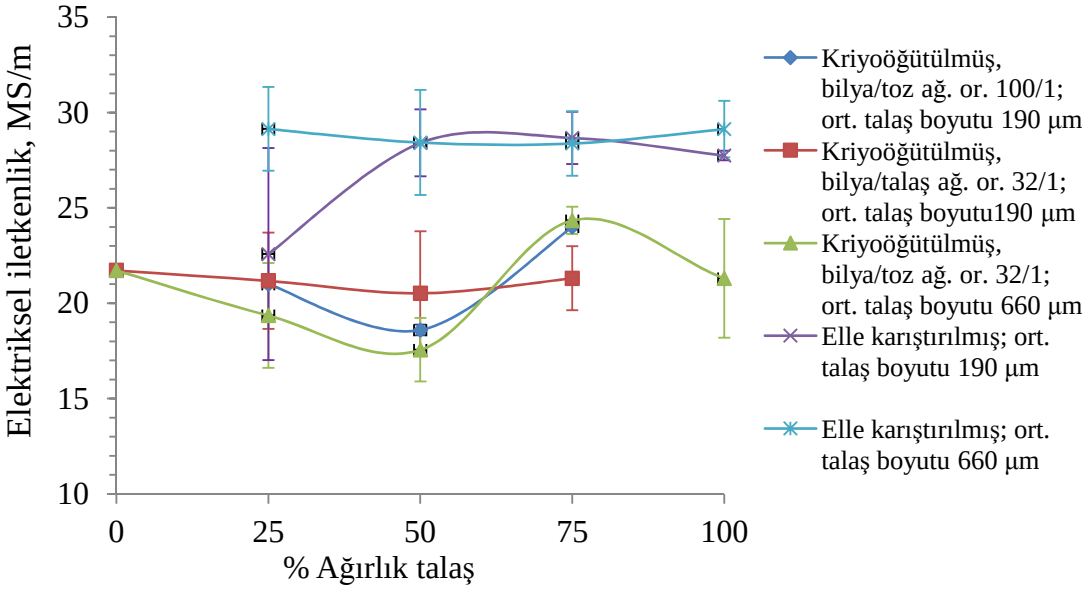
Kriyoöğütülmüş numunelerde bilya/toz ağırlık oranı arttıkça boşluk hacim oranı azalmakta ve yoğunluk artmaktadır (Şekil 7.10 ve Şekil 7.11).

Talaş boyutuyla ya da talaş ağırlık oranıyla yoğunluk arasında açık bir ilişki tespit edilememiştir.

7.3.2 Elektriksel İletkenlik Ölçümü Sonuçları

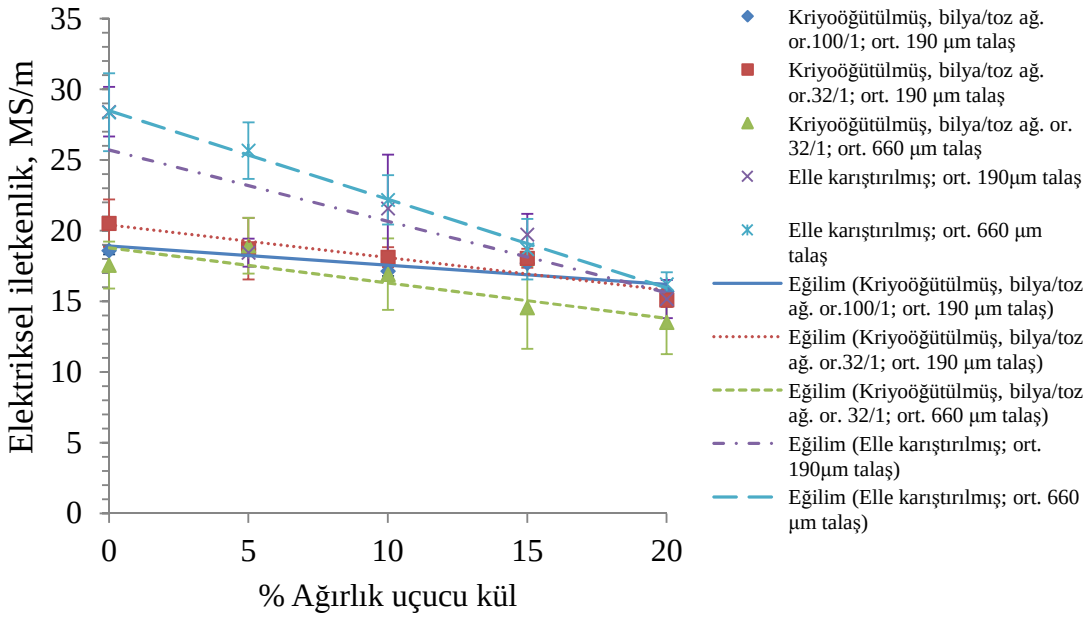
Elektrik iletkenliği ölçümleri, mikroyapı bileşenlerinin üniform dağılıp dağılmadığını ve porozitenin mevcudiyeti hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır [70]. Kütlesel yoğunluk ölçümleri ile elektriksel iletkenlik ölçümleri karşılaştırmalı incelendiğinde boşluk hacim oranıyla elektriksel iletkenliğin ters orantılı olarak değiştiği görülmüştür.

Uçucu kül takviyesiz numunelere bakıldığında, elle karıştırılmış olanların kriyoöğütülmüşlere nazaran elektriksel iletkenliklerinin daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 7.12). Numunelerde talaş ağırlık oranının değişmesiyle elektriksel iletkenlikte oluşan değişim, yoğunlukta görülen değişim ile doğru orantılıdır.



Şekil 7.12: 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan oluşan kompozit malzemelerin elektriksel iletkenliklerinin talaş ağırlık oranına göre değişimi.

Uçucu kül takviyeli numunelere bakıldığında, uçucu kül ağırlık oranının artmasıyla elektriksel iletkenlik azalmaktadır (Şekil 7.13). Bu durum, uçucu külün yüksek elektrik direngenliğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır [71].



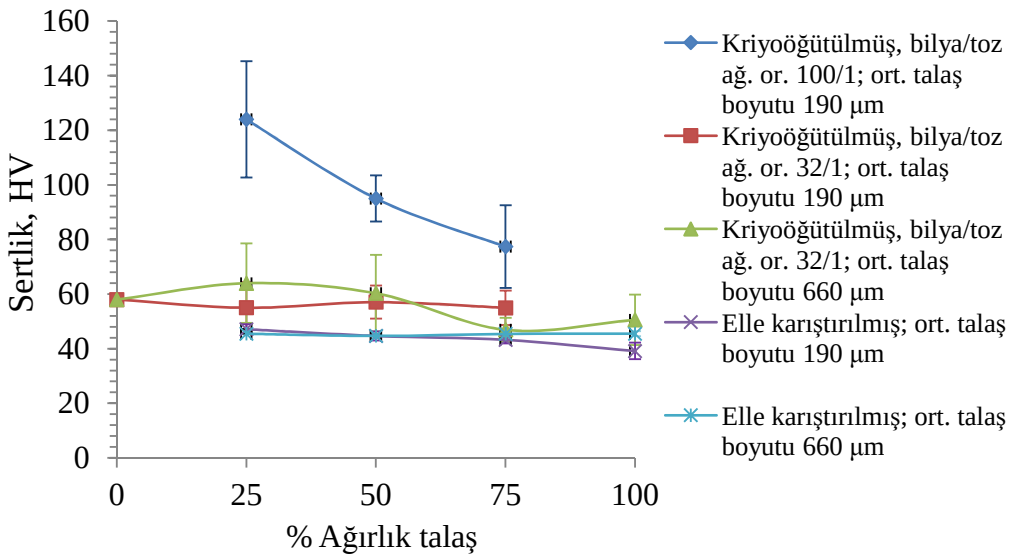
Şekil 7.13: Uçucu kül takviyesi yapılmış 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan oluşan kompozit malzemelerin elektriksel iletkenliklerinin uçucu kül ağırlık oranına göre değişimi.

Düşük uçucu kül ağırlık oranlarında elle karıştırılmış numunelerin elektriksel iletkenlikleri kriyoöğütülmüş olanlara nazaran genel olarak daha yüksektir. Artan uçucu kül ağırlık oranıyla birlikte hem elle karıştırılmış hem de kriyoöğütülmüş numunelerin elektriksel iletkenlikleri azalmakta ve uçucu kül takviye hacim oranının en yüksek olduğu değerde hemen hemen aynı seviyeye gelmektedir. Ağırlıkça % 20 uçucu kül takviyesi yapılan elle karıştırılmış numunelerdeki boşluk hacim oranı yaklaşık % 5.5 düzeyinde, kriyoöğütülmüş numunelerde ise yaklaşık % 3 düzeyinde olmasına rağmen elektriksel iletkenliklerinin neredeyse aynı olmasında kriyoöğütülmüş numunelerde oluşmuş olması muhtemel yalıtkan özellikteki alüminyum nitrür (AIN) fazının etkisi olabilir [72].

7.4 Mekanik Deney Sonuçları

7.4.1 Sertlik Deneyi Sonuçları

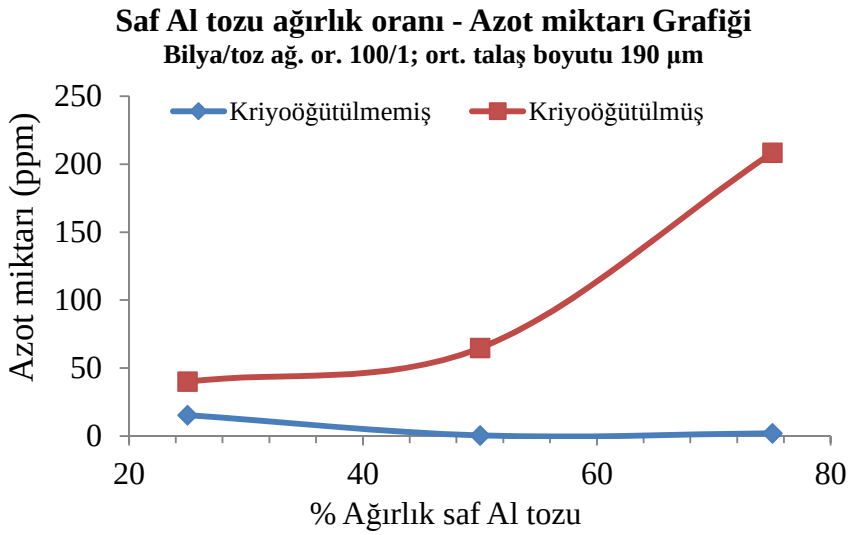
Şekil 7.14' e bakıldığında kriyoöğütme işleminin sertlik artışı üzerinde olumlu bir etkisinin olduğu ve bilya/toz ağırlık oranının artmasıyla sertliğin arttığı görülmektedir. Talaş boyutunun sertlik üzerinde açık bir etkisi görülmemektedir.



Şekil 7.14: 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan oluşan kompozit malzemelerin sertlik değerlerinin talaş ağırlık oranına göre değişmesi.

Kriyoöğütme işlemi, düşük sıcaklıkta gerçekleştirilen yüksek enerjili bir öğütme işlemidir. Bilya/toz ağırlık oranı arttıkça öğütülen karışıma aktarılan enerji de artmaktadır. Öğütülen karışıma aktarılan enerji arttıkça deformasyon miktarı artmakta, parçacık boyutu incelmekte [73] ve malzemenin kütlesel sertliği artmaktadır. Sıvı azot ortamında yürütülen yüksek enerjili öğütmede mekanik alaşımlama yoluyla alüminyum nitrür (AIN) oluştuğu bazı çalışmalarda gösterilmiştir [74]. Şekil 7.15' te kriyoöğütülmüş numunelerde saf Al tozu oranının artmasıyla numunedeki azot oranının arttığını gösteren azot tayini testi sonuçları görülmektedir. Şekil C.1' deki Al – N denge diyagramından düşük sıcaklıklarda azotun alüminyum içindeki katı çözünürlüğünün olmadığı görülmektedir [75]. Bu durumda, yapıdaki azot alüminyum nitrür (AIN) fazı şeklinde bulunmalıdır. Oluşan alüminyum nitrürün az miktarda ve yerinde alaşımlamayla (in situ) matris içinde çökelti parçacıkları şeklinde yer aldığı bildirilmiştir [76].

Mekanik alaşımlama sırasında öğütülen karışıma aktarılan enerjinin artmasının (bilya/toz ağırlık oranının artmasının) alüminyum nitrür oluşumunu desteklediği düşünülmektedir. Bu durum, kriyoöğütülmüş ve bilya/toz ağırlık oranı 100/1 olan gruptaki numunelerin sertliklerinin bilya/toz ağırlık oranı 32/1 olan gruptaki numunelerin sertliklerinden daha yüksek olmasının nedenlerinden biri olabilir.

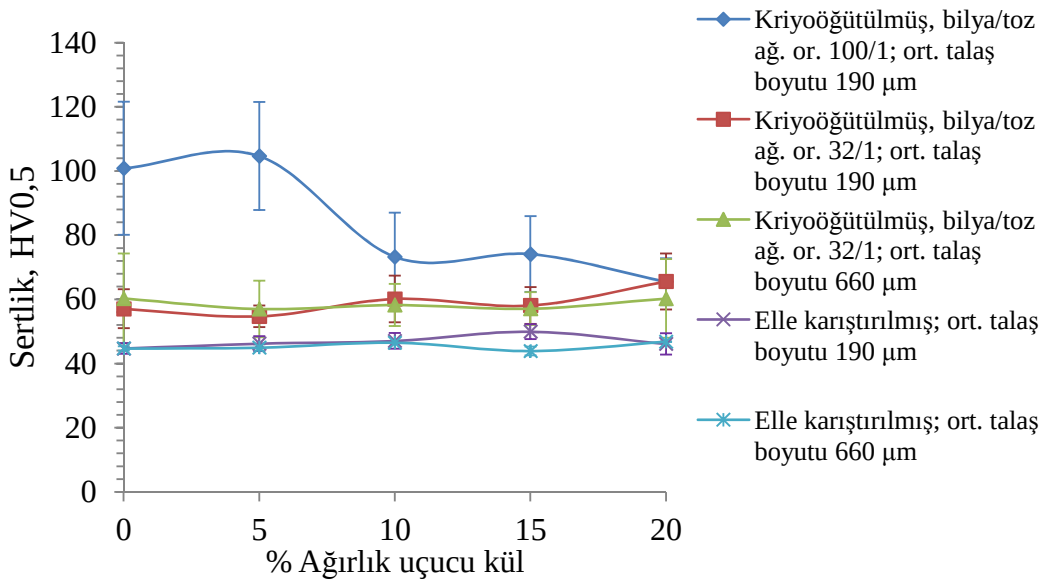


Şekil 7.15: Azot tayini testi. Kriyoöğütülmüş numunelerde saf Al tozunun ağırlık oranının artmasıyla numunedeki azot oranı artmıştır.

Bir toz/talaş harmanının sıvı azot ortamında öğütülmesi sırasında alüminyum nitrürün oluşmasının daha muhtemel olduğu yapı bileşeni toz alüminyumdur. Çünkü, toz alüminyumun azot ile tepkimeye girebilecek serbest yüzey alanı talaşınkinden daha fazladır.

Kriyoöğütülmüş ve bilya/toz ağırlık oranı 100/1 olan grupta talaş ağırlık oranının artmasıyla sertlik azalmakta iken diğer gruplardaki sertlik düşüşü çok daha azdır. Genel olarak sertlik düşüşünün sebebi, artan talaş ağırlık oranı ile birlikte bağlayıcı (saf alüminyum tozu) oranının azalması, AIN çökeltilerinin azalması ve bağlanma bakımından talaş/toz arayüzeyine göre daha zayıf olması muhtemel talaş/talaş arayüzeyinin artması olabilir.

Şekil 7.16' de uçucu kül takviyeli numunelerin mikrosertlik ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Elle karıştırılmış gruplardaki numunelerin sertlikleri, uçucu kül takviyesiz numunelerde olduğu gibi yine en düşük çıkmıştır (yaklaşık 45 Vickers civarında) ve uçucu kül takviye oranıyla açık bir değişim göstermemiştir. Kriyoöğütülmüş ve bilya/toz ağırlık oranı 32/1 olan gruplardaki numunelerin sertlikleri, uçucu kül takviyesiz numunelerde olduğu gibi yine 60 Vickers civarındadır ve değişen uçucu kül ağırlık oranıyla açık bir değişim göstermemektedir. Kriyoöğütülmüş ve bilya/toz ağırlık oranı 100/1 olan gruptaki numunelerin sertlikleri, uçucu kül takviyesiz numunelerde olduğu gibi yine en yüksek olanlardır.



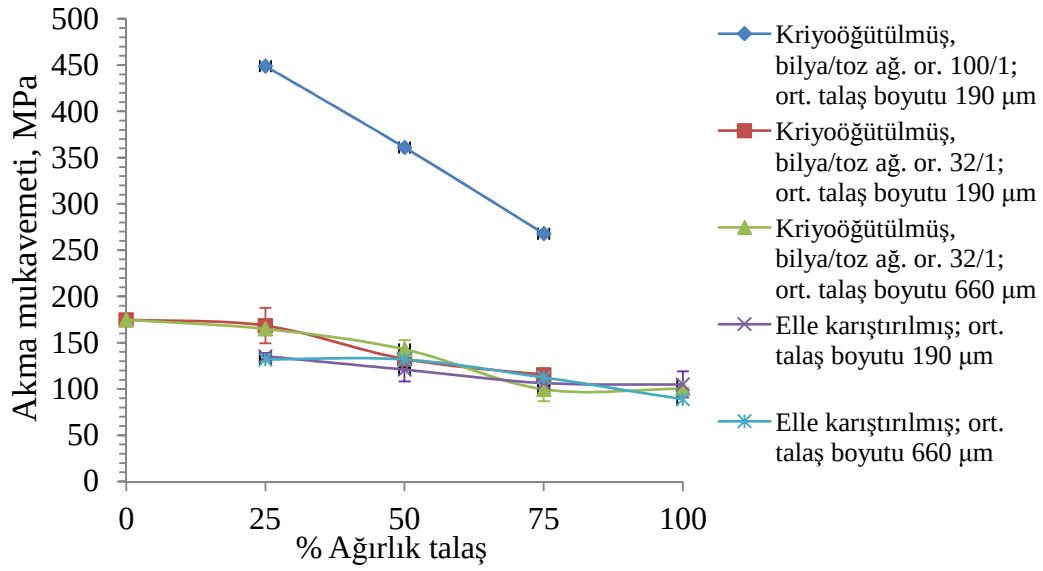
Şekil 7.16: Uçucu kül takviyesi yapılmış 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan oluşan kompozit malzemelerin sertlik değerlerinin uçucu kül ağırlık oranına göre değişmesi.

Kriyoöğütülmüş ve bilya/toz ağırlık oranı 100/1 olan ağırlıkça % 50 AA 6061 talaşı ve % 50 saf alüminyum tozundan oluşan numuneye ağırlıkça % 5 uçucu kül takviyesi yapılınca ortalama sertliğinde % 3.6 ila 20 arasında bir artış gözlenmiştir. Uçucu kül takviye oranının artmasıyla ortalama sertlik düşmüştür. Uçucu kül takviye oranı ağırlıkça % 10, % 15 ve % 20 olduğunda ortalama sertlik değerleri sırasıyla yaklaşık olarak % 20 ila 27, % 6 ila 26.5 ve % 29 ila 35 arasında azalmıştır.

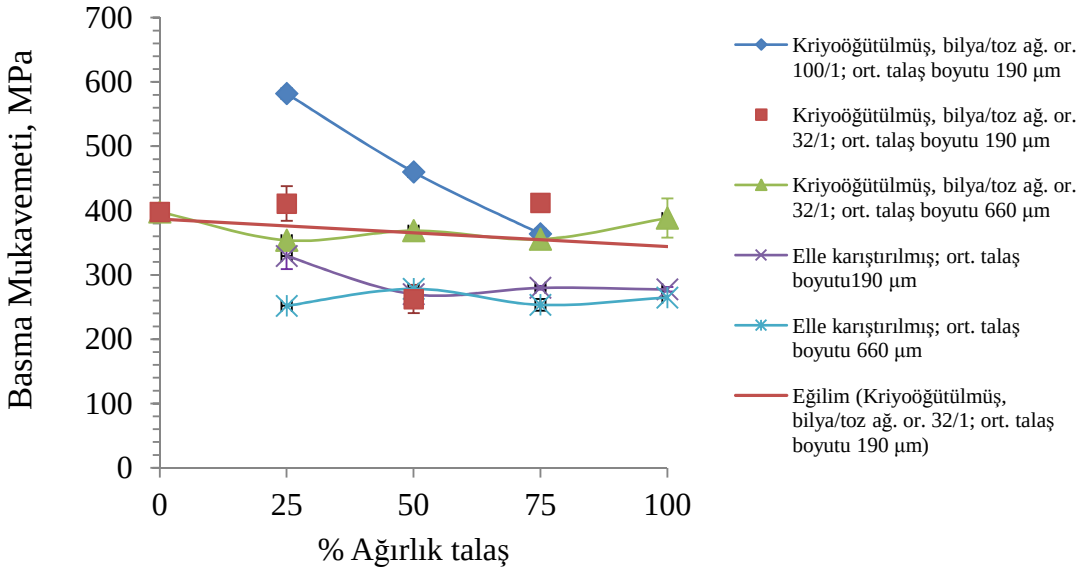
Gruplara göre numunelerin sertliklerinin oluşumunda iki faktör öne çıkmaktadır. Bunlar öğütme sırasındaki deformasyon oranı ve ekstrüde edilmiş numunedeki boşluk hacim oranıdır. Deformasyonun etkisini şu şekilde görebiliriz. Karıştırılırken plastik deformasyona uğramamış olan elle karıştırılmış numunelerin sertlikleri en düşük, kriyoöğütülmüş ve bilya/toz ağırlık oranı 32/1 olan gruptaki numunelerin sertlikleri daha yüksek ve kriyoöğütülmüş ve bilya/toz ağırlık oranı 100/1 olan gruptaki numunelerin sertlikleri en yüksektir. Boşluk hacim oranının etkisini de şu şekilde görebiliriz. Kriyoöğütülmüş numunelerde uçucu kül takviye oranının değişmesiyle sertlikte meydana gelen değişim, boşluk hacim oranının değişimiyle büyük bir tutarlılık içindedir. Elle karıştırılmış numunelerde bu ilişkinin açıkça görülemeyişinin nedenleri, sertlik izlerinin olabildiğince boşluksuz yerlerden alınması ya da homojen bir dağılımı olmayan numune içinde olası büyük boşluklar olabilir.

7.4.2 Basma Deneyi Sonuçları

6061 alüminyum talaşı ve saf alüminyum tozundan müteşekkil kompozit malzemelerin basma testi sonucunda elde edilen mühendislik akma mukavemeti ve mühendislik basma mukavemeti değerleri sırasıyla şekil 7.17 ve şekil 7.18' de verilmiştir.



Şekil 7.17: 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan müteşekkil kompozit malzemelerin akma dayanımlarının talaş ağırlık oranına göre değişmesi.



Şekil 7.18: 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan müteşekkil kompozit malzemelerin basma dayanımlarının talaş ağırlık oranına göre değişmesi.

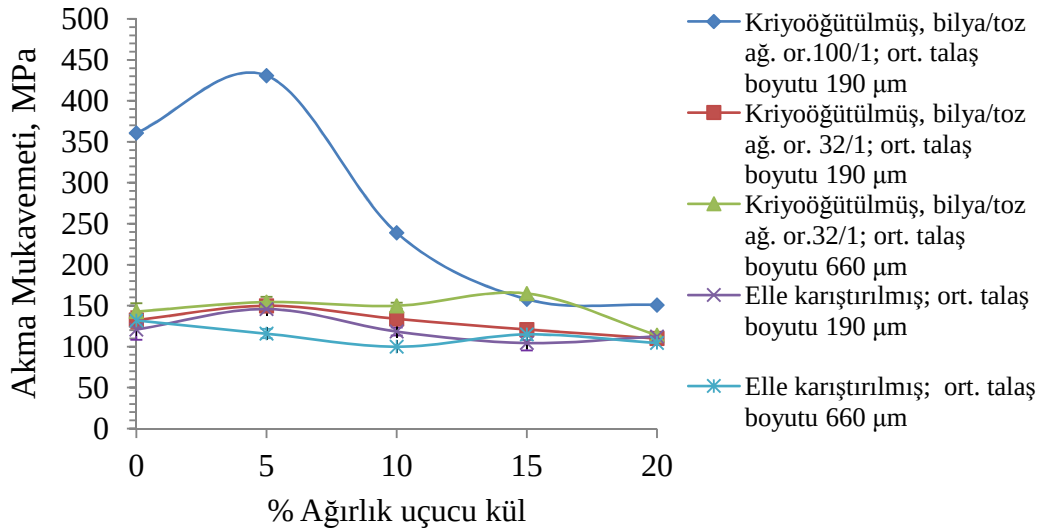
Şekil 7.17 ve Şekil 7.18' den görüldüğü gibi, elle karıştırılmış gruplardaki numunelerin akma ve basma mukavemetleri diğer gruplara nazaran en düşüktür.

Kriyoöğütülmüş ve bilya/toz ağırlık oranı 32/1 olan gruplardaki numunelerin akma ve basma dayanımları, elle karıştırılmış numunelerinkinden daha yüksektir ve talaş ağırlık oranı ile açık bir ilişki içinde değildir. Kriyoöğütülmüş ve bilya/toz ağırlık oranı 100/1 olan numunelerin akma ve basma dayanımları en yüksektir ve talaş ağırlık oranı arttıkça belirgin bir biçimde düşerek, kriyoöğütülmüş ve bilya/toz ağırlık oranı 32/1 olan gruplardaki numunelerin seviyesine düşmüştür.

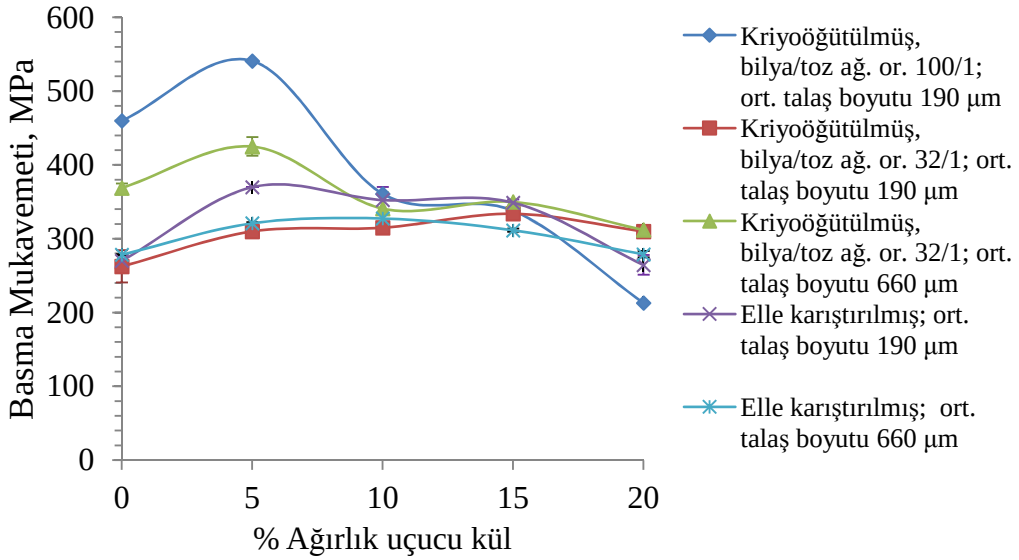
Bilya/toz ağırlık oranı 100/1 olan grup, kriyoöğütme sırasında en fazla enerji aktarılan ve en çok deformasyona uğrayan gruptur. Genel olarak, bu grup üyelerinin boşluk hacim oranı diğer gruplardaki numunelerden daha düşüktür ve sertlikleri daha fazladır. Talaş ağırlık oranı arttıkça bağlayıcı (saf Al tozu) oranı azalmakta ve talaş parçalarının birbirine daha fazla temas etmesiyle talaş/talaş arayüzeyi artmaktadır. Talaş/talaş arayüzeyindeki tutunmanın talaş/toz arayüzeyindeki tutunmaya göre daha zayıf olması muhtemeldir. Çünkü, 540 ºC' ta ısıl temizlemeye tabi tutulan talaş parçalarının yüzeyinde yarıkararlı bir alümina fazı oluşmaktadır. Numuneler her ne kadar 350 ºC' ta ekstrüde edilmiş olsa da oluşan oksit tabakasının kalınlığına bağlı olarak difüzyon hızı azalmakta ve arayüzey reaksiyonları istenilen düzeyde gerçekleşememektedir. Bu da bir kompozit malzemede fazlar arasındaki tutunmayı olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Uçucu kül takviyeli numunelerin mühendislik akma ve mühendislik basma mukavemetleri sırasıyla Şekil 7.19 ve Şekil 7.20' de verilmiştir.

Kriyoöğütülmüş ve bilya/taz ağırlık oranı 100/1 olan grupta uçucu kül takviye oranı ağırlıkça % 5 olduğu zaman akma ve basma dayanımları sırasıyla % 16 ve % 15' lik bir artış göstermiştir. Aynı grupta, uçucu kül takviye oranının daha da artmasıyla hem akma dayanımı hem de basma dayanımı süratle düşerek diğer gruplarla yaklaşık olarak aynı seviyeye gelmiştir. Uçucu kül takviyesi ağırlıkça % 5 olduğu zaman nispeten az miktardaki uçucu kül parçacıklarının toz alüminyum içindeki dağılımı daha homojen olmaktadır. Takviye oranı arttıkça uçucu kül parçacıklarının toz alüminyum içindeki dağılımı daha heterojen olmakta ve biraraya gelerek topaklanma eğilimi artmaktadır. Ayrıca, uçucu kül takviye oranı arttıkça numunelerin içindeki boşluk hacim oranı da artmaktadır. Bu faktörler, uçucu kül takviye oranının artmasıyla birlikte mukavemet değerlerinde görülen değişimin anlaşılmasına yardımcı olmaktadır.



Şekil 7.19: Uçucu kül takviyesi yapılmış 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan oluşan kompozit malzemelerin akma dayanımlarının takviye edilen uçucu külün ağırlık oranı ile değişmesi.



Şekil 7.20: Uçucu kül takviyesi yapılmış 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan oluşan kompozit malzemelerin basma dayanımlarının takviye edilen uçucu külün ağırlık oranı ile değişmesi.

Kriyoöğütülmüş ve bilya/toz ağırlık oranı 32/1 olan gruplardaki numunelerin ortalama akma dayanımları, elle karıştırılmış olan gruplardaki numunelerin ortalama akma dayanımlarından biraz daha fazladır ve bu eğilim artan uçucu kül takviye oranıyla birlikte hemen hemen sabit kalmaktadır (Şekil 7.17). Her iki numune

grubunda da uçucu kül takviye oranının artmasıyla akma mukavemetinde az da olsa bir düşme eğilimi görülmüştür.

Tüm numune grupları için uçucu kül takviyesi ağırlıkça % 5 olduğu zaman basma mukavemetinin % 13 ila % 27 arasında arttığı görülmüştür (Şekil 7.20). Yine aynı şekilden takip edilebileceği gibi uçucu kül ağırlık oranının % 5' i geçmesiyle birlikte basma mukavemetlerinde azalma ve/veya sabit kalma eğilimi görülmüştür. Kriyoöğütülmüş ve bilya/toz ağırlık oranı 32/1 olan numunelere baktığımızda, uçucu kül ilavesiz durumda ve ağırlıkça % 5 ile % 10 uçucu kül ilaveli durumda ortalama talaş boyutu 660 μm olan numunelerin ortalama talaş boyutu 190 μm olan numunelere göre basma dayanımları daha yüksek çıkmıştır. Bunda, ortalama talaş boyutu 190 μm olan numunelerdeki ortalama boşluk hacim oranının ortalama talaş boyutu 660 μm olan numunelerdeki ortalama boşluk hacim oranından yaklaşık olarak % 8 daha fazla olması rol oynamış olabilir. Bununla birlikte, deneme sayınının arttırılmasıyla daha kesin yargılara varılacaktır.

Tüm numune grupları göz önünde bulundurulduğunda, akma veya basma mukavemeti ile ortalama talaş boyutu arasında açık bir ilişki görülememiştir.

Kriyoöğütülmüş, öğütücü bilya/karışım ağırlık oranı 100/1, ortalama talaş boyutu 190 μm olan ve bileşimleri ağ. % 75 saf Al tozu – ağ. % 25 AA 6061 talaşı ve ağ. % 5 uçucu kül - % 47.5 saf Al tozu – ağ. % 47.5 AA 6061 talaşı olan kompozitlerin basma mukavemetleri sırasıyla 580 MPa ve 540 MPa mertebelerinde ölçülmüştür. Elde edilen bu değerler kriyoöğütme işleminin yerine elle karıştırmanın uygulandığı geleneksel direkt dönüşüm yöntemi ile üretilen numunelerin dayanım değerlerinden çok daha fazladır. Sherafat ve diğerlerinin [11, 56] 7075 alüminyum alaşımı talaşı ile gerçekleştirdikleri benzer bir direkt dönüşüm çalışmasında elde ettikleri en yüksek mühendislik basma mukavemeti değeri ağ. % 40 saf Al tozu – ağ. % 60 AA 7075 talaşı numunesi için yaklaşık 250 MPa civarındadır. Bu çalışma ile Sherafat ve diğerlerinin elde ettiği sonuçlar arasındaki farklar, uygulanan kriyoöğütme işlemi ile tane boyutunun incelmesine, daha küçük boyutlu talaş kullanımı ile daha homojen bir dağılım ve daha iyi bir bağlanma oluşmasına, soğuk preslemenin daha yüksek basınçta yürütülmesiyle daha iyi pekişmiş bir yapı elde edilmesine ve sıcak ekstrüzyon işleminin nispeten düşük sıcaklıkta, 350 ºC' de, gerçekleştirilmesiyle tane kabalaşmasının önüne geçilmesine bağlanmaktadır.

Kriyoöğütülmüş, öğütücü bilya/karışım ağırlık oranı 100/1, ortalama talaş boyutu 190 μm olan ve tüm numuneler arasında mekanik özellikleri ve korozyon direnci en yüksek olan iki numunenin değerleri 6061 alüminyum alaşımı ile karşılaştırmalı olarak Tablo 7.1' de verilmiştir. Bu tabloya göre, 6061 alüminyum alaşımına nazaran uçucu kül takviyesiz numunede mekanik özellikler önemli ölçüde yükselirken maliyet hala yüksektir. Uçucu kül takviyeli kompozitte ise mekanik özelliklerin önemli ölçüde yükselmesinin yanında maliyet de büyük oranda azalmaktadır.

Çizelge 7.1: 6061 alüminyum alaşımı ile üretilen kompozitlerin karşılaştırılması. Teorik değerler literatürden alınmıştır [77].

Özellik	**6061-T651 Alüminyum alaşımı** (Teorik Değerler)	Uçucu kül ilavesiz numune **(Ağ. %75 saf Al toz – Ağ. %25 AA6061 talaş)** (Deneysel veriler)	Uçucu kül takviyeli kompozit **(Ağ.%5 kül – Ağ.%47.5 saf Al toz – Ağ.%47.5 AA6061 talaş)** (Deneysel veriler)
Yoğunluk (g/cm^3)	2,7	2,679	2,669
Boşluk hacim oranı (%)	-	0,75	0,60
Sertlik (HV)	111	124	118,7
Akma Mukavemeti (MPa)	~ 235	449	431
Basma Mukavemeti (MPa)	~ 280	582	541
Korozyon Kaybı (mg/mm^2)	-	~ 0.035	~ 0.072
Maliyet	**Yüksek:** Ergitme Döküm Dövme Diğer işlemler	**Yüksek:** % 75 saf Al tozu kullanımı %25 talaş kullanımı	**Düşük:** % 27.5'lik saf Al tozu tasarrufu % 22.5 daha fazla talaş kullanımı % 5 uçucu kül kullanımı

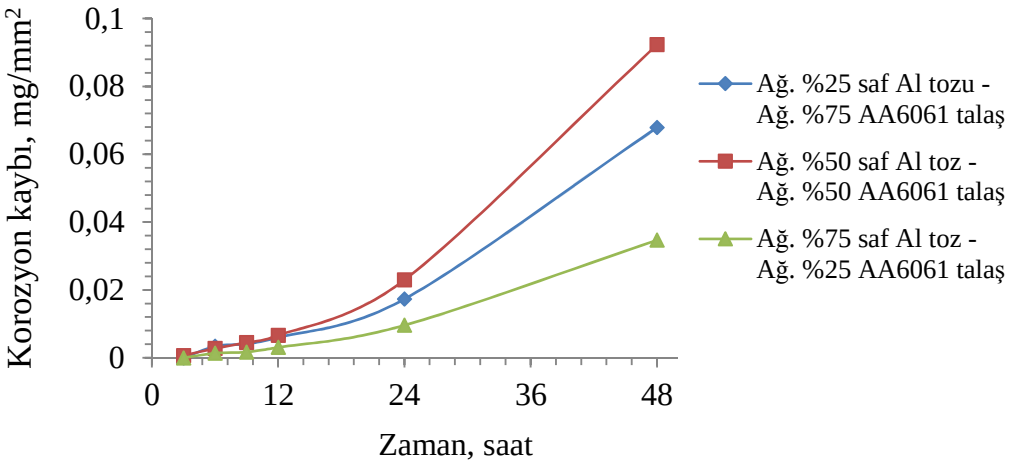
7.5 Korozyon Deneyi Sonuçları

Korozyon testi sonrasında numune yüzeylerinden alınan taramalı elektron mikroskobu görüntüleri toplu olarak Şekil D.1' de verilmiştir.

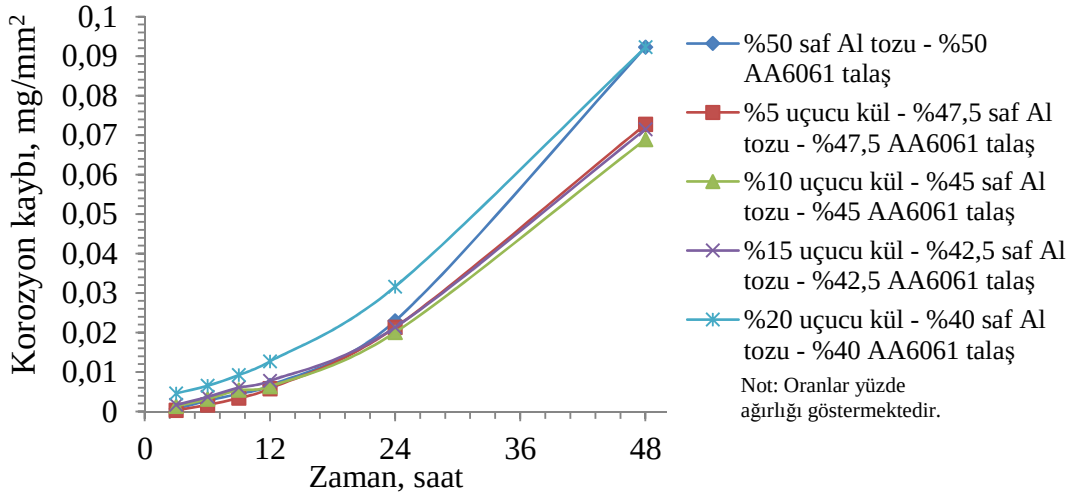
Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 100/1 ve ortalama talaş boyutu 190 μm olan numuneler:

Bu gruba mensup olup değişen oranlarda 6061 alüminyum talaşı ve saf alüminyum tozundan müteşekkil kompozitlerde zamana bağlı olarak husule gelen ağırlık kayıpları Şekil 7.21' de verilmiştir. Saf Al tozu ağırlık oranının en fazla olduğu numunede korozyon kaybı zamanla en az artışı göstermiştir. Talaş ağırlık oranının artmasıyla ağırlık kaybı daha fazla artma eğilimindedir. Fakat, ağ. %50 talaş içeren numunenin korozyon kaybının en fazla artışı göstermesinde boşluk hacim oranının en fazla olmasının etkisi olabilir.

Bu gruba ait olan uçucu kül takviyeli numunelerde zamana bağlı olarak meydana gelen korozyon kayıpları Şekil 7.22'de verilmiştir. Uçucu kül miktarının en yüksek olduğu numunede korozyon kaybı tüm zaman dilimlerinde en yüksek değerde seyretmiştir. Bununla birlikte, uçucu kül takviyesiz numunenin korozyon kaybı 24. saatten sonra daha hızlı bir artma eğilimi göstererek 48. saat sonunda ağ. %20 uçucu kül içeren numune ile aynı seviyeye ulaşmıştır. Literatürde uçucu kül takviye oranının artmasıyla dökme alüminyum alaşımlarının oyuklanma korozyonu eğiliminin arttığı bildirilmiştir [57].



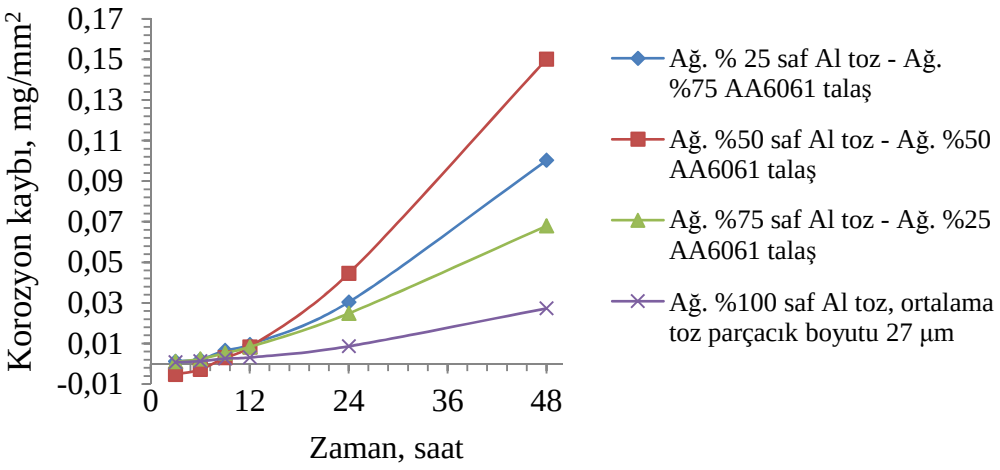
Şekil 7.21: Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 100/1 ve ortalama talaş boyutu 190 μm olan numuneler. Korozyon deneyi boyunca zamanla meydana gelen ağırlık kayıplarının farklı toz – talaş ağırlık oranına sahip numunelere göre değişimi.



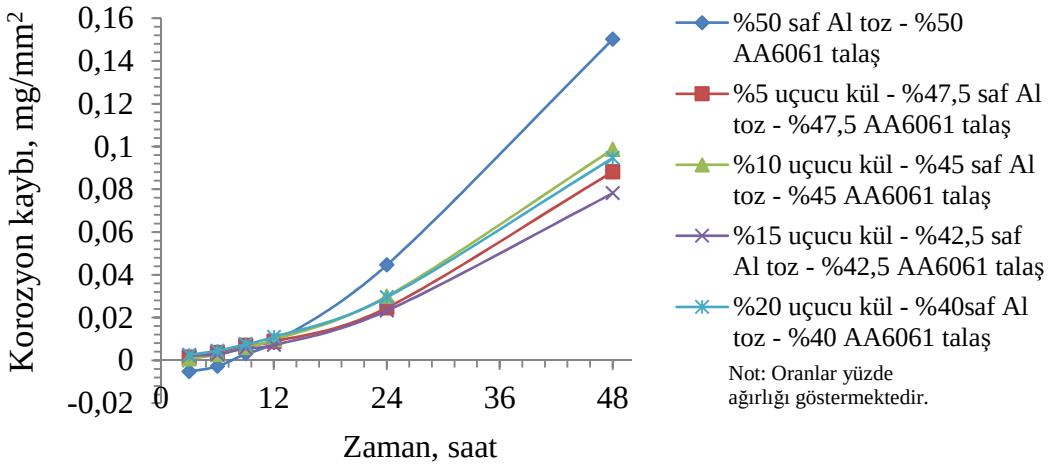
Şekil 7.22: Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 100/1 ve ortalama talaş boyutu 190 μm olan numuneler. Korozyon deneyi boyunca zamanla meydana gelen ağırlık kayıplarının farklı uçucu kül – toz – talaş ağırlık oranına sahip numunelere göre değişimi.

Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 32/1 ve ortalama talaş boyutu 190 µm olan numuneler:

Bu gruba ait AA 6061 talaşı ve saf Al tozundan oluşan numunelerde zamana bağlı olarak meydana gelen korozyon kayıpları Şekil 7.23' te verilmiştir. Kompozit malzemedeki toz ağırlık oranı arttıkça ağırlık kaybındaki artış hızı düşmektedir. Bu gruba ait olan uçucu kül takviyeli numunelerde zamana bağlı olarak meydana gelen ağırlık kayıpları Şekil 7.24' te verilmiştir. Şekil 7.24' e bakıldığında, uçucu kül ilavesiz numunenin en fazla ağırlık kaybına uğradığı görülmektedir. Bununla birlikte, uçucu kül ağırlık oranının korozyon kaybı üzerindeki etkisi açık değildir.



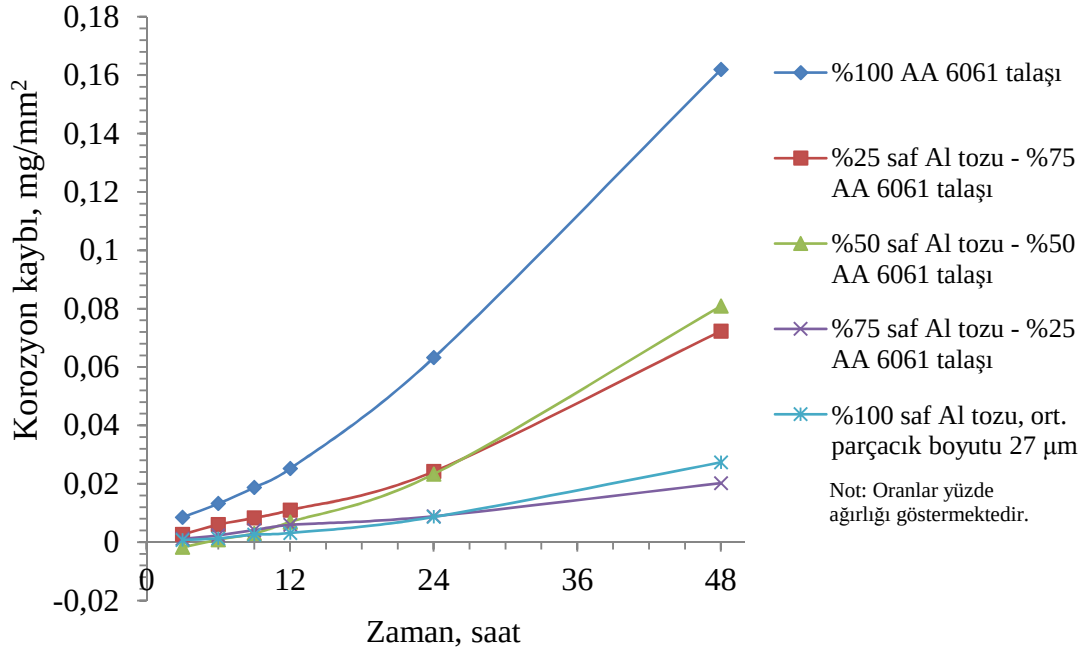
Şekil 7.23: Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 32/1 ve ortalama talaş boyutu 190 µm olan numuneler. Korozyon deneyi boyunca zamanla meydana gelen ağırlık kayıplarının farklı toz – talaş ağırlık oranına sahip numunelere göre değişimi.



Şekil 7.24: Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 32/1 ve ortalama talaş boyutu 190 µm olan numuneler. Korozyon deneyi boyunca zamanla meydana gelen ağırlık kayıplarının farklı uçucu kül – toz – talaş ağırlık oranına sahip numunelere göre değişimi.

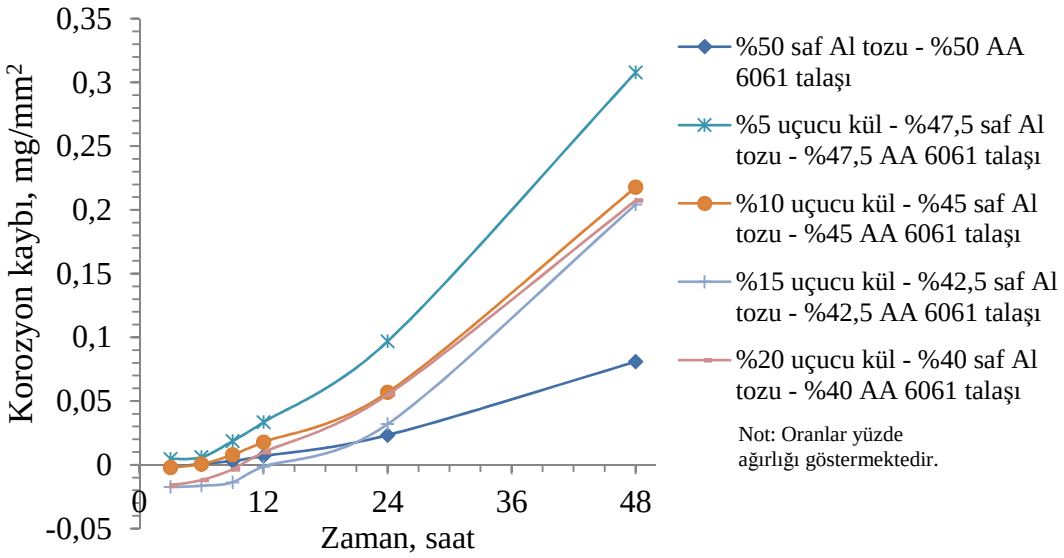
Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 32/1 ve ortalama talaş boyutu 660 µm olan numuneler:

Bu gruba ait AA 6061 talaşı ve saf Al tozundan oluşan numunelerde zamana bağlı olarak meydana gelen korozyon kayıpları Şekil 7.25' te verilmiştir. Buna göre, saf Al tozu içeriği arttıkça numunelerin korozyon kaybı artış hızı düşmektedir.



Şekil 7.25: Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 32/1 ve ortalama talaş boyutu 660 µm olan numuneler. Korozyon deneyi boyunca zamanla meydana gelen ağırlık kayıplarının farklı toz – talaş ağırlık oranına sahip numunelere göre değişimi.

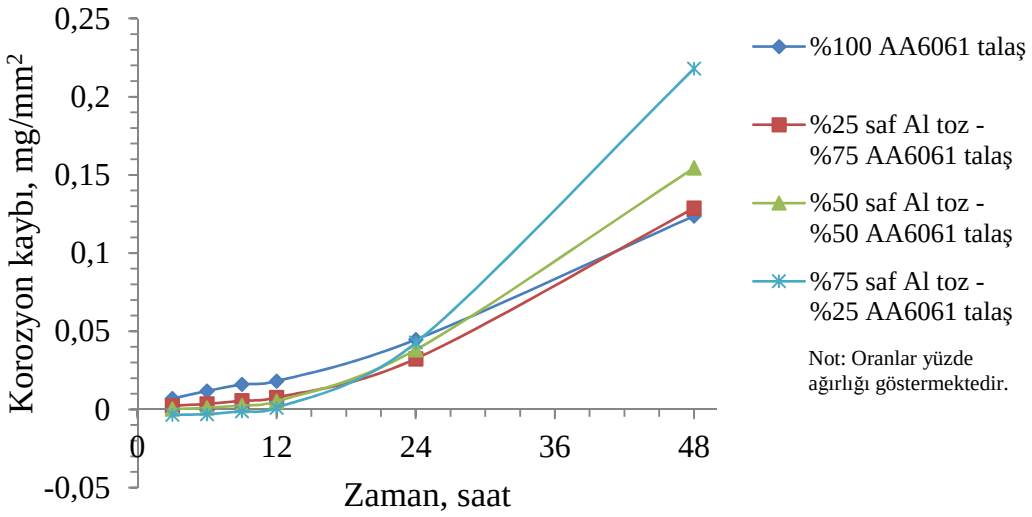
Bu gruba ait olan uçucu kül takviyeli numunelerde zamana bağlı olarak meydana gelen ağırlık kayıpları Şekil 7.26' da verilmiştir. Buna göre, uçucu kül ilavesi yapılmamış numunenin korozyon kaybının zamanla en düşük artışı gösterdiği görülmektedir. En fazla ağırlık kaybı ağırlıkça % 5 uçucu kül içeren numunede meydana gelmiştir. Ağırlıkça % 5' ten fazla uçucu kül takviyesinde korozyon kaybı azalmış ve takviye oranından bağımsız olarak yaklaşık olarak sabit bir değer almıştır.



Şekil 7.26: Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 32/1 ve ortalama talaş boyutu 660 µm olan numuneler. Korozyon deneyi boyunca zamanla meydana gelen ağırlık kayıplarının farklı uçucu kül – toz – talaş ağırlık oranına sahip numunelere göre değişimi.

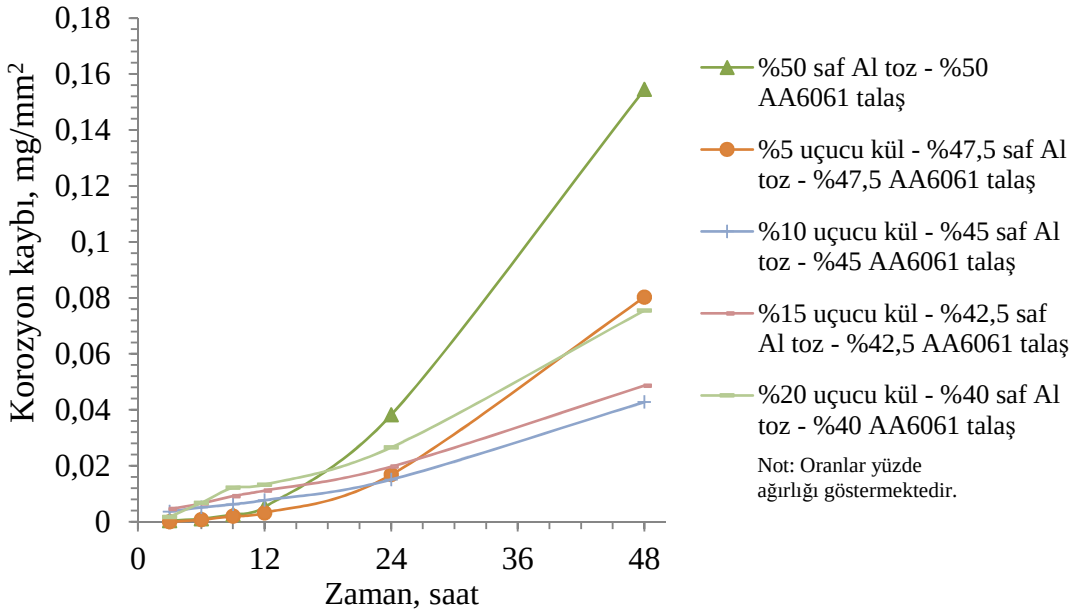
Elle karıştırılmış ve ortalama talaş boyutu 190 µm olan numuneler:

Bu gruba ait AA 6061 talaşı ve saf Al tozundan oluşan numunelerde zamana bağlı olarak meydana gelen korozyon kayıpları Şekil 7.27' de verilmiştir. Buna göre, kompozitlerdeki talaş ağırlık oranının artmasıyla birlikte korozyon kaybındaki artış hızı azalmaktadır. 48. saat sonunda en fazla ağırlık kaybı ağırlıkça % 25 talaştan oluşan numunede gözlenirken, en az kayıp ağırlıkça % 100 talaş içeren numunede görülmüştür.



Şekil 7.27: Elle karıştırılmış ve ortalama talaş boyutu 190 µm olan numuneler. Korozyon deneyi boyunca zamanla meydana gelen ağırlık kayıplarının farklı toz – talaş ağırlık oranına sahip numunelere göre değişimi.

Bu gruba mensup uçucu kül takviyeli numunelerde zamana bağlı olarak meydana gelen ağırlık kayıpları Şekil 7.28' de verilmiştir. Buna göre, uçucu kül ilavesi yapılmamış numunenin korozyon kaybının zamanla en hızlı artışı gösterdiği görülmektedir. Uçucu kül ilavesinin, genel olarak, korozyon kaybının artış hızını düşürdüğü görülmekle birlikte takviye oranı ile korozyon kaybı arasında açık bir ilişki görülmemektedir.



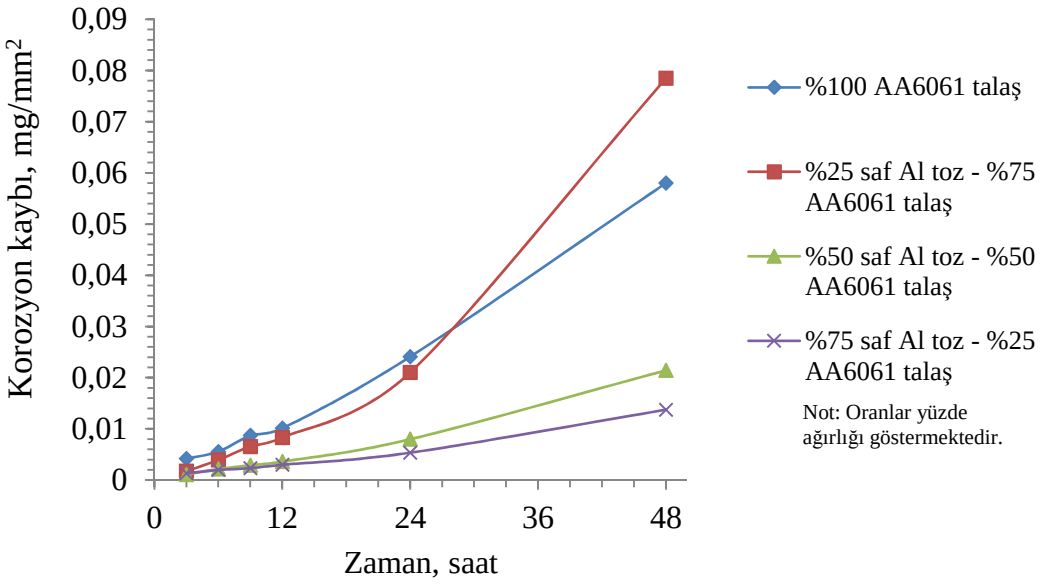
Şekil 7.28: Elle karıştırılmış ve ortalama talaş boyutu 190 µm olan numuneler. Korozyon deneyi boyunca zamanla meydana gelen ağırlık kayıplarının farklı uçucu kül – toz – talaş ağırlık oranına sahip numunelere göre değişimi.

Elle karıştırılmış ve ortalama talaş boyutu 660 µm olan numuneler:

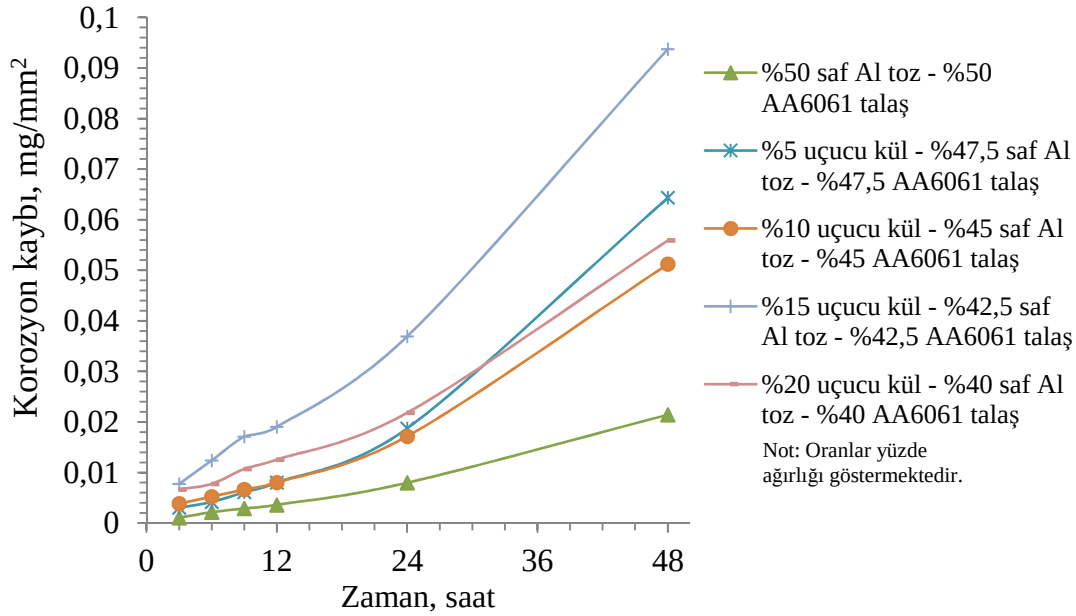
Bu gruba ait AA 6061 talaşı ve saf Al tozundan oluşan numunelerde zamana bağlı olarak meydana gelen korozyon kayıpları Şekil 7.29' da verilmiştir. Buna göre, kompozitlerdeki talaş ağırlık oranının artmasıyla birlikte korozyon kaybındaki artış hızı yükselmektedir. 48. saat sonunda en fazla korozyon kaybı ağırlıkça % 100 ve % 75 talaştan oluşan numunelerde meydana gelirken, ağırlıkça % 25 talaştan oluşan numunede en az kayıp meydana gelmiştir.

Bu grubun üyesi olan uçucu kül takviyeli numunelerde zamana bağlı olarak meydana gelen ağırlık kayıpları Şekil 7.30' da verilmiştir. Buna göre, uçucu kül ilavesi yapılmamış numunenin korozyon kaybının zamanla en küçük artışı gösterdiği görülmektedir. Uçucu kül ilavesinin, genel olarak, korozyon kaybını arttırıcı etkisi

olduğu görülmekle birlikte uçucu kül takviye oranı ile korozyon kaybının değişimi arasında bir bağlantı görülmemektedir.



Şekil 7.29: Elle karıştırılmış ve ortalama talaş boyutu 660 µm olan numuneler. Korozyon deneyi boyunca zamanla meydana gelen ağırlık kayıplarının farklı toz – talaş ağırlık oranına sahip numunelere göre değişimi.

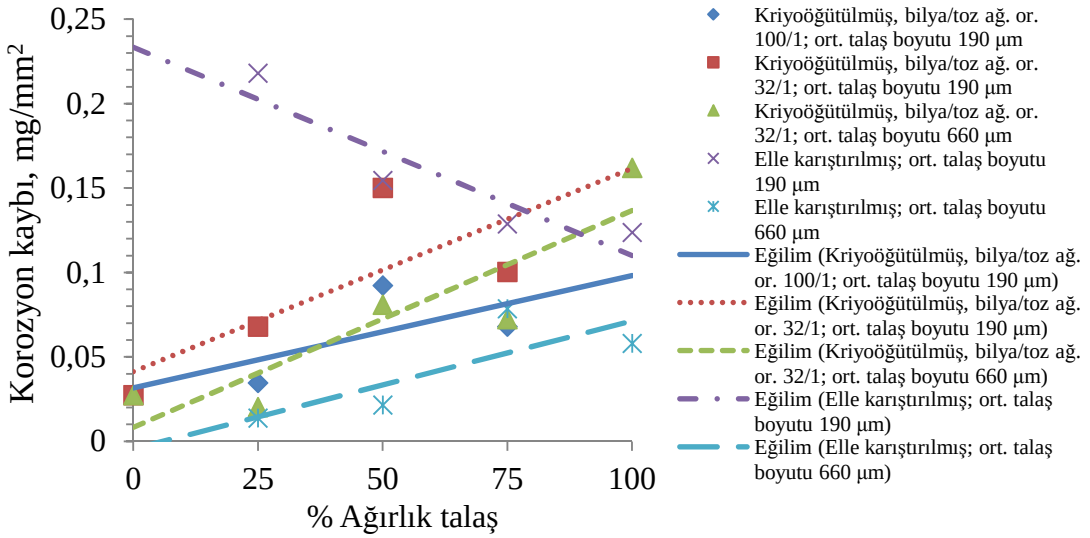


Şekil 7.30: Elle karıştırılmış ve ortalama talaş boyutu 600 µm olan numuneler. Korozyon deneyi boyunca zamanla meydana gelen ağırlık kayıplarının farklı uçucu kül – toz – talaş ağırlık oranına sahip numunelere göre değişimi.

7.5.1 Talaş Ağırlık Oranının Korozyon Davranışına Etkisi

Sadece 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf alüminyum tozundan müteşekkil kompozit numunelerde, genel olarak, talaş ağırlık oranının artmasıyla korozyon

kaybı artma eğilimindedir. Bununla birlikte, elle karıştırılmış ve ortalama talaş boyutu 190 µm olan numunelerde, genel eğilime ters bir şekilde, talaş ağırlık oranının artmasıyla korozyon kaybının azaldığı görülmektedir. Uçucu kül ilavesiz numunelerde korozyon kaybı ile boşluk hacim oranı arasında anlaşılabilir bir ilişki vardır. Talaş ağırlık oranı – korozyon kaybı grafiği (Şekil 7.31) ile talaş ağırlık oranı – boşluk hacim oranı grafiği (Şekil 7.9) arasındaki benzerlik dikkat çekicidir. Buna göre, boşluk hacim oranı arttıkça korozyon kaybı artma eğilimindedir.



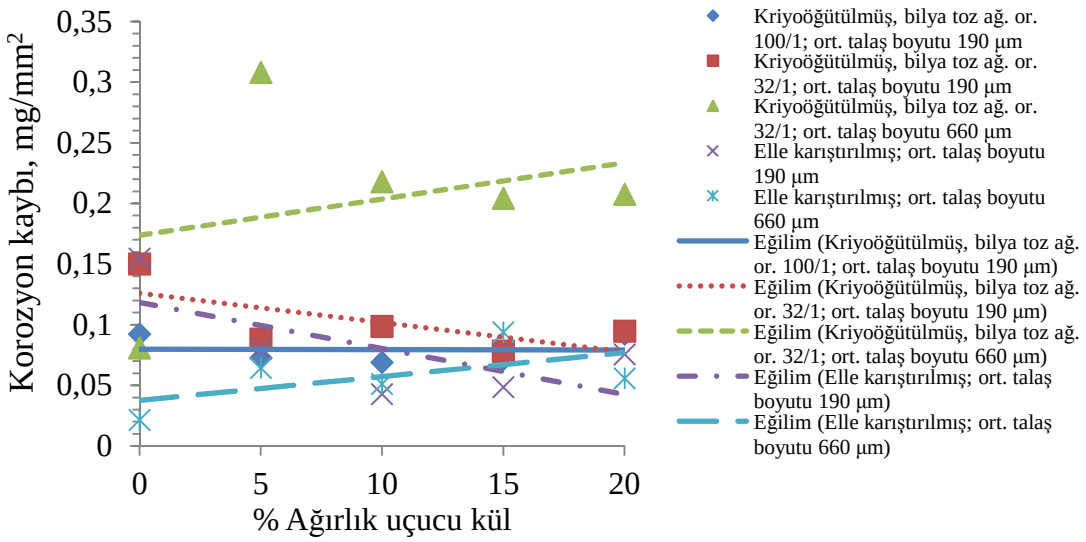
Şekil 7.31: Uçucu kül ilavesiz ve farklı özellikteki numunelerde talaş ağırlık oranı ile korozyon kaybının değişimi (48. Saat sonunda).

7.5.2 Uçucu Kül Ağırlık Oranının Korozyon Davranışına Etkisi

Uçucu kül ağırlık oranının korozyon davranışına etkisi Şekil 7.32' de gösterilmiştir. Büyük talaş boyutunda uçucu kül takviyesinin artmasıyla hem kriyoöğütülmüş hem de elle karıştırılmış numunelerde korozyon kaybı artma eğilimindedir. Küçük talaş boyutunda uçucu kül takviyesinin artmasıyla hem kriyoöğütülmüş hem de elle karıştırılmış numunelerde korozyon kaybı azalma eğilimindedir. Bunun sebebi, küçük talaş boyutunda artan toplam talaş yüzey alanı ile birlikte uçucu küllerin talaş yüzeylerine daha homojen dağılarak tutunmaları ve talaş – toz arayüzeyinin daha az boşluklu olması olabilir.

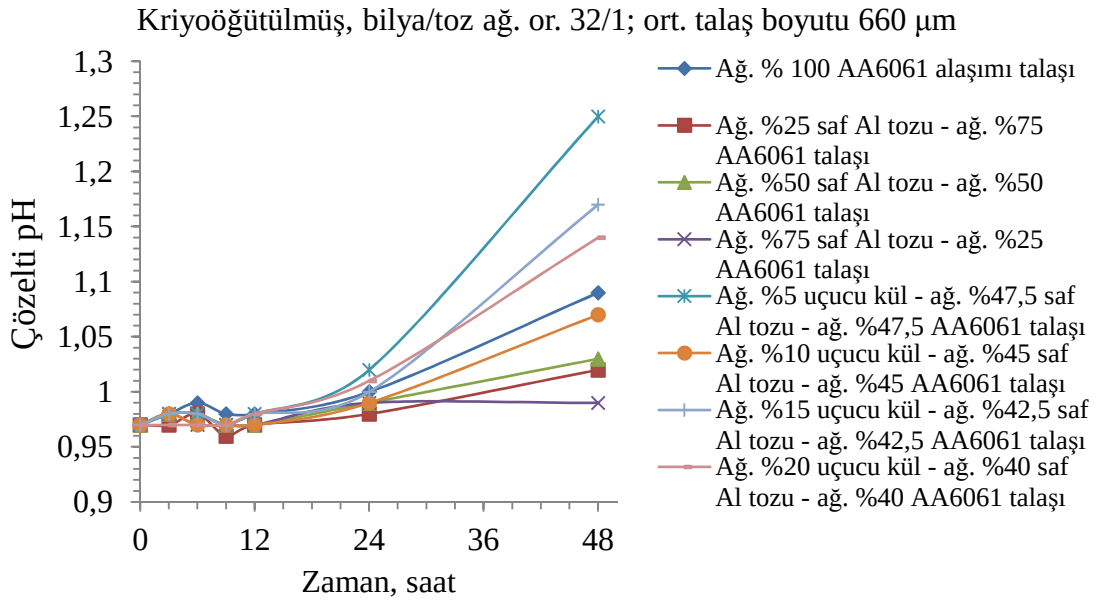
Kriyoöğütülmüş ve bilya/toz ağırlık oranı 100/1 olan numunelerin korozyon kayıpları genel olarak düşüktür ve uçucu kül takviye oranının değişmesiyle fazla bir değişiklik göstermemektedir. Kriyoöğütülmüş ve bilya/toz ağırlık oranı 100/1 olan numunelerin korozyon kayıpları kriyoöğütülmüş ve bilya/toz ağırlık oranı 32/1 olan

numunelere göre daha düşük gerçekleşmiştir. Bunun nedeni, kriyoöğütme işleminde bilya/toz ağırlık oranının artmasıyla öğütülen kompozit karışımına daha fazla enerji aktarılması ve nihai yapının daha az boşluklu ve daha homojen olması olabilir.

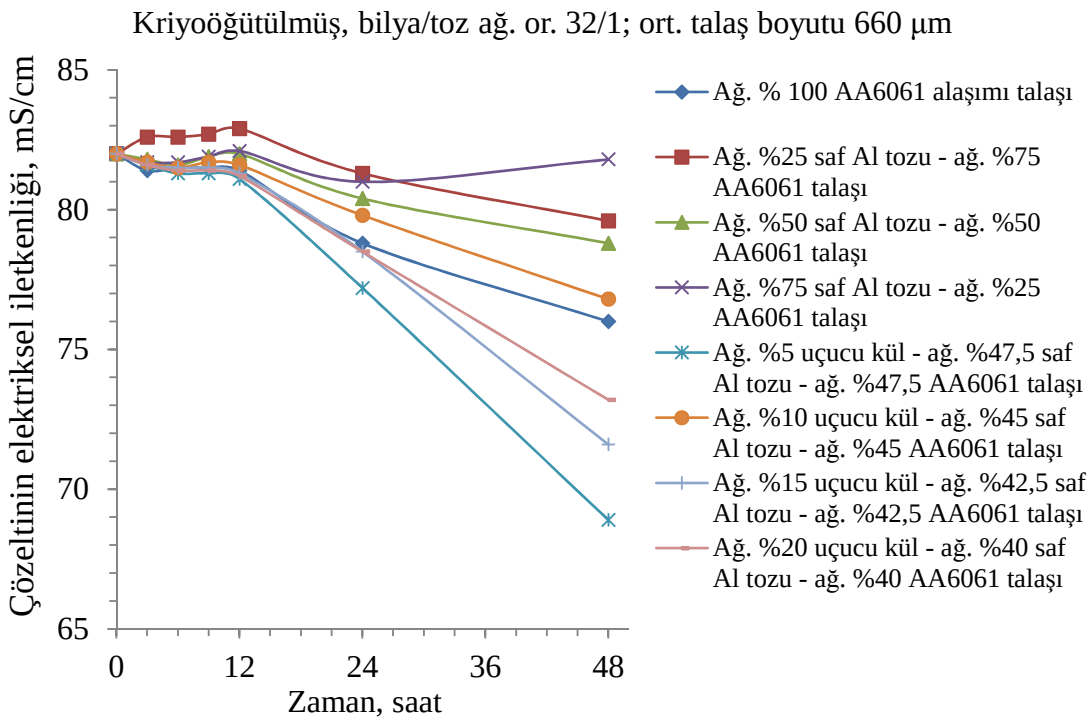


Şekil 7.32: Farklı ağırlık oranlarında uçucu kül takviyesi yapılmış numunelerde uçucu kül ağırlık oranı ile korozyon kaybının değişimi (48. Saat sonunda).

Korozyon deneyi boyunca, genel eğilim olarak, zamanla korozyon çözeltisinin pH değeri artmakta (Şekil 7.33), elektrik iletkenliği değeri ise azalmaktadır (Şekil 7.34). Asitliği ve elektrik iletkenliği en çok azalan çözeltide bulunan kompozit numunedeki ağırlık kaybı en fazladır (bkz. Şekil 7.25 ve Şekil 7.26).



Şekil 7.33: Korozyon deneyinde korozif çözeltinin pH değerinin zamanla değişmesi.



Şekil 7.34: Korozyon deneyinde korozif çözeltinin elektriksel iletkenliğinin zamanla değişmesi.

8. GENEL SONUÇLAR

1. Toz metalürjisiyle kompozit malzeme üretiminde yapıdaki boşluk hacim oranı ve boşluk dağılımı, mekanik özelliklerin ve korozyon davranışının belirlenmesinde önemli etkenler arasındadır. Genel olarak, boşluk hacim oranı arttıkça mekanik özellikler ve korozyon direnci düşmektedir.
2. 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan oluşan karışıma takviye fazı olarak katılan uçucu külün Al tozu ile karıştığı yer yer de talaşa battığı görülmüştür.
3. Uçucu kül takviyeli kompozitlerde uçucu kül takviye oranının artmasıyla yapıdaki boşluk hacim oranı artmaktadır. Fakat, elle karıştırma işlemine nazaran kriyoöğütme işlemi ile daha az boşluklu bir yapı elde edilmiştir. Ayrıca, kriyoöğütme işleminde öğütücü bilya/karışım ağırlık oranının artması yapıdaki boşluk hacim oranının azalmasını ve daha homojen dağılımlı bir yapının oluşmasını sağlamıştır.
4. Talaş boyutunun küçülmesiyle, genel olarak, alüminyum talaşlarının ve alüminyum tozlarının daha homojen karıştığı ve daha iyi bağlandığı görülmüştür. Yine, talaş boyutunun küçülmesiyle uçucu küllerin Al tozu içinde ve talaş sınırlarında daha homojen dağıldığı görülmüştür.
5. Uçucu kül takviyeli kompozitlerde uçucu kül ağırlık oranının artmasıyla elektrik iletkenliği düşmektedir. Bu durum, seramik esaslı uçucu küllerin elektrik direncinin yüksek olmasından ve uçucu kül takviye oranının artmasıyla yapıdaki boşluk hacim oranının artmasından kaynaklanmaktadır.
6. Sıfıraltı sıcaklıklarda yürütülen kriyoöğütme işlemi ve ardından gerçekleştirilen 350 ^{o}C' de ekstrüzyon işlemiyle kompozit numunelere aşırı miktarda ısı aktarımının önüne geçilerek, yüksek sıcaklıklarda oluşması muhtemel, uçucu kül/matris arayüzey reaksiyonlarının oluşması engellenmiştir.
7. Elle karıştırmaya nazaran kriyoöğütme işleminin sertlik artışına katkısı vardır. Ayrıca, kriyoöğütme işleminde bilya/toz ağırlık oranının artmasıyla sertlik artmaktadır.

8. Kriyoöğütülmüş ve öğütücü bilya/karışım ağırlık oranı 100/1 olan uçucu kül takviyesiz numunelerde talaş ağırlık oranının artmasıyla sertlik azalmaktadır. Yine, aynı gruptaki fakat uçucu kül takviyeli kompozitlerde en yüksek sertlik değeri ağ. % 5 uçucu kül ilavesinde elde edilmiş, uçucu külün ağırlık oranının artmasıyla yapıda oluşan boşlukla ters orantılı olarak sertlik değerleri düşmektedir.
9. Öğütücü bilya/karışım ağırlık oranı 100/1 olan numunelerin sıfıraltı sıcaklıklarda kriyoöğütülmesi sıransında mekanik alaşımlama yoluyla alüminyum nitrür (AIN) parçacıklarının oluşmuş olabileceğine dair bulgulara ulaşılmıştır. Farklı ağırlık oranlarında Al tozu ihtiva eden 6061 alüminyum alaşımı talaşı ve saf Al tozundan müteşekkil karışımların yüksek yoğunluklu kriyoöğütme işlemi ile öğütülmeleri halinde saf Al tozunun ağırlık oranının artmasıyla yapıdaki azot miktarının arttığı azot tayini testi ile tespit edilmiştir.
10. Kriyoöğütülmüş ve bilya/toz ağırlık oranı 100/1 olan hem uçucu kül takviyeli hem de uçucu kül takviyesiz kompozitlerin basma ve akma dayanımları diğerlerine kıyasla daha yüksektir. Aynı gruptaki uçucu kül takviyesiz numunelerin basma ve akma dayanımları talaş ağırlık oranının artmasıyla azalmaktadır. Uçucu kül takviyeli numunelerde uçucu kül ilavesi yaklaşık ağ. % 5 olduğunda en yüksek basma ve akma dayanımı elde edilirken artan uçucu kül ağırlık oranı ile bu değerler düşmekte ve ağ. % 20’ ye varınca diğer gruplardaki numunelerin seviyesine düşmektedir.
11. Büyük talaş boyutunda uçucu kül takviyesinin artmasıyla hem kriyoöğütülmüş hem de elle karıştırılmış numunelerde korozyon kaybı artma eğilimindeyken küçük talaş boyutunda uçucu kül takviyesinin artmasıyla hem kriyoöğütülmüş hem de elle karıştırılmış numunelerde korozyon kaybı azalma eğilimindedir. Bunun sebebi, küçük talaş boyutunda artan toplam talaş yüzey alanı ile birlikte uçucu küllerin talaş yüzeylerine daha homojen dağılarak tutunmaları ve talaş – toz arayüzeyinin daha az boşluklu olmasıdır. Kriyoöğütülmüş ve bilya/toz ağırlık oranı 100/1 olan numunelerin korozyon kayıpları genel olarak düşüktür ve uçucu kül takviye oranının değişmesiyle fazla bir değişiklik göstermemektedir.
12. Uygulanan karakterizasyon testleri sonucunda kriyoöğütülmüş, öğütücü bilya/karışım ağırlık oranı 100/1, ortalama talaş boyutu 190 μm ve bileşimi ağ. %75 saf Al tozu ve ağ. %25 AA6061 talaşı olan numune ile ağ. %5 kül -

ağ. %47,5 saf Al toz - ağ. %47,5 AA6061 talaş olan kompozitin mikroyapısal açıdan daha homojen karıştığı ve en düşük boşluk hacim oranınlarına sahip oldukları; mekanik özellikler açısından daha yüksek sertlik ve daha yüksek mukavemet değerlerine sahip oldukları ve korozyon direncinin genel olarak yüksek olduğu görülmüştür. Tasarım kriterlerinin sınırları içinde kalmak kaydıyla, ağ. %75 saf Al tozu içeren numune ile benzer mekanik ve korozyon direnci özelliklerine sahip ağ. %5 uçucu kül takviyeli kompozitin daha düşük maliyet ile üretilmesi mümkündür.

KAYNAKLAR

[1] **Brungs, D.**, 1997. Light weight design with light metal castings, *Materials and Design*, **18**, 285-291.

[2] **Rooy, E. L.**, 1983. Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys, American Society for Metals, Metals Park,Ohio, USA.

[3**] Gronostajski, J., Chmura, W., Gronostajski, Z.**, 2003. Bearing materials obtained by recycling of aluminium and aluminium bronze chips, *Journal of Materials Processing Technology*, **125–126**, 483-490.

[4] **Samuel, M.**, 2003. A new technique for recycling aluminum scrap, *Journal of Materials Processing Technology*, **135**, 117-124.

[5] **Gronostajski, J., Marciniak, H., Matuszak, A.**, 2000. New methods of aluminium and aluminium-alloy chips recycling, *Journal of Materials Processing Technology*, **106**, 34-39.

[6] **Fogagnolo, J. B., Ruiz-Navas, E. M., Simón, M. A., Martinez M. A.**, 2003. Recycling of aluminium alloy and aluminium matrix composite chips by pressing and hot extrusion, *Journal of Materials Processing Technology*, **143–144**, 792-795.

[7] **Thein, M. A., Lu, L., Lai, M.O.**, 2006. Mechanical properties of nanostructured Mg–5 wt %Al–x wt %AlN composite synthesized from Mg chips, *Composite Structures*, **75**, 206-212.

[8] **Samoshina, M., Aksenov, A., Kaevitser, E.**, 2008. Structure and properties of mechanically alloyed composite materials from hard-recycling scrap of Al alloys, *Reviews on Advanced Materials Science*, **18**, 305-311.

[9] **Tekkaya, A. E., Schikorra, M., Becker, D., Biermann, D., Hammer, N., Pantke, K.**, 2009. Hot profile extrusion of AA-6060 aluminum chips, *Journal of Materials Processing Technology*, **209**, 3343-3350.

[10] **Gronostajski, J. Z., Kaczmar, J.W, Marciniak, H., Matuszak, A.**, 1997. Direct recycling of aluminum chips into extruded product, *Journal of Materials Processing Technology*, **64**, 149-156.

[11] **Sherafat, Z., Paydar, M. H., Ebrahimi, R.**, 2009. Fabrication of Al7075/Al, two phase material, by recycling Al7075 alloy chips using powder metallurgy route, *Journal of Alloys and Compounds*, **487**, 395-399.

[12] **Mindivan, H., Cimenoglu, H., Kayali, E. S.**, 2009. Production of the composite from 6082 Al alloy chips and fly ash particles by hot pressing, *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), Supplemental Proceedings*, **3**, 71-75.

[13] **Mindivan, H., Cimenoglu, H., Kayali, E. S.**, 2010. Direct Conversion of 2024 and 6082 Al Alloy Chips, *13th International Materials Symposium*, Pamukkale University, Denizli, Turkey.

[14] **Matsunaga, T., Kim, J.K., Hardcastle, S., Rohatgi, P. K.**, 2002. Crystallinity and selected properties of fly ash particles, *Materials Science and Engineering A*, **325**, 333-343.

[15] **ASM Handbook**, 1990. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special – Purpose Materials, **2**, ASM International, Materials Park, USA.

[16] **Davis, J. R.**, 1999. Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, Materials Park, Ohio, USA.

[17] **Askeland, R. D.**, 1990. The Science and Engineering of Materials, Chapman and Hall Publishing Company, UK.

[18] **Url-1** < http://aluminium.matter.org.uk/aluselect/default.asp>, alındığı tarih 24.04.2011.

[19] **Davis, J. R.**, 1993. Aluminum and Aluminum Alloys, ASM Specialty Handbook, ASM International, Materials Park, Ohio, USA.

[20] **Gronostajski, J., Matuszak A.**, 1999. The recycling of metals by plastic deformation: an example of recycling of aluminium and its alloys chips, *Journal of Materials Processing Technology*, **92-93**, 35-41.

[21] **Gronostajski, J., Kaczmar, J., Marciniak, H., Matuszak, A.**, 1998. Production of composites from Al and AlMg2 alloys chips, *Journal of Materials Processing Technology*, **1-3**, 37-41.

[22] **Gronostajski, J., Marciniak, H., Matuszak, A, Samuel, M.**, 2001. Aluminium-ferro-chromium composites produced by recycling of chips, *Journal of Materials Processing Technology*, **119**, 251-256.

[23] **Meydanoglu, O., Mindivan, H., Çimenoğlu, H., Kayalı, E. S.**, 2007. B4C Particle-Reinforced Al Matrix Composites Production from 7075 Al Alloy Chips by Hot Pressing, *Light Metals*, 1167-1170.

[24] **Suryanarayana, C.**, 2001. Mechanical alloying and milling, *Progress in Materials Science*, **46**, 1-184.

[25] **El-Eskandarany, M. S.**, 2001. Mechanical alloying for fabrication of advanced engineering materials, Noyes Publications / William Andrew Publishing, Norwich, New York, USA.

[26] **Weeber, A. W., Bakker, H., De Boer F. R.**, 1986. The Preparation of Amorphous Ni-Zr Powder by Grinding the Crystalline Alloy, *Europhysics Letters*, **2**, 445-448.

[27] **Gerasimov, K. B., Gusev, A. A., Ivanov, E. Y., Boldyrev, V. V.**, 1991. Tribochemical equilibrium in mechanical alloying of metals, *Journal of Materials Science*, **26**, 2495-2500.

[28] **Miki, M., Yamasaki, T., Ogino, Y.**, 1992. Preparation of Nanocrystalline NbN and (Nb, Al)N Powder by Mechanical alloying under Nitrogen Atmosphere, *Materials Transactions JIM*, **33**, 839-844.

[29] **Chen, Y., Williams, J**., 1996. Hydriding Reactions Induced by Ball Milling, *Materials Science Forum*, **225-227**, 881-888.

[30] **Ogino, Y., Yamasaki, T., Murayama, S., Sakai, R.**, 1990. Non-equilibrium phases formed by mechanical alloying of Cr---Cu alloys, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **117-118**, 737-740.

[31] **Lee, P. Y., Koch, C. C.**, 1987. The formation and thermal stability of amorphous Ni-Nb alloy powder synthesized by mechanical alloying, *Journal of Non- Crystalline Solids*, **94**, 88-100.

[32] **Hong, L.B., Bansal, C., Fultz, B.**, 1994. Steady state grain size and thermal stability of nanophase Ni_3Fe and Fe_3X (X = Si, Zn, Sn) synthesized by ball milling at elevated temperatures, *Nanostructured Materials*, **4**, 949-956.

[33] **Qin, Y., Chen, L., Shen, H.**, 1997. In-situ X-ray diffraction examination of nanocrystalline $Ag_{37}Cu_{63}$ powders synthesized by mechanical alloying, *Journal of Alloys and Compounds*, **256**, 230-233.

[34] **Gilman, P. S., Benjamin, J. S.**, 1983. Mechanical Alloying, *Annual Review of Materials Science*, **13**, 279-300.

[35] **Benjamin, J. S., Volin, T. E.**, 1974. The Mechanism of Mechanical Alloying, *Metallurgical Transactions*, **5**, 1929-1934.

[36] **Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğinobalı, A.**, 2004. Türkiye' deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Yayınları, Ankara, 1-102.

[37] **Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., Mordoğan, H.**, 2005. Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları, Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı IMCET2005, İzmir, Türkiye.

[38] **Öksüz, K.**, 2006. Afşin – Elbistan Termik Santralı Uçucu külünün Zemin Stabilizasyonunda kullanımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

[39] **Aytekin, S.**, 2009. Uçucu Küllerinin Killi Zeminlerin Islahında Kullanımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

[40] **Gikunoo, E., Omotoso, O., Oguocha, N.A.**, 2005. Effects of fly ash particles on the mechanical properties of aluminium casting alloy A535, *Materials Science and Technology*, **21**, 143-152.

[41] **Kutchko, B. G., Kim, A. G.**, 2006. Fly ash characterization by SEM–EDS, *Fuel*, **85**, 2537-2544.

[42] **Toros, H.**, 1987. Afşin Elbistan Termik Santrali Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi olarak Kullanılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 117.

[43] **TS 639**, 1998. Uçucu Küller, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[44] **ASTM C 618**, 1998. Standard specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcite Natural Pozzalan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, 4-16.

[45] **Sudarshan, Surappa, M. K.**, 2008. Dry sliding wear of fly ash particle reinforced A356 Al composites, *Wear*, **265**, 349-360.

[46] **Sudarshan, Surappa M. K.**, 2008. Synthesis of fly ash particle reinforced A356 Al composites and their characterization, *Materials Science and Engineering A*, **480**, 117-124.

[47] **Dou, Z., Wu, G., Huang, X., Sun, D., Jiang, L.**, 2007. Electromagnetic shielding effectiveness of aluminum alloy–fly ash composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **38**, 186-191.

[48] **Mahendra, K.V., Radhakrishna, K.**, 2007. Fabrication of Al–4.5% Cu alloy with fly ash metal matrix composites and its characterization, *Materials Science-Poland*, **25**, 57-68.

[49] **Hrairi, M., Ahmed, M., Nimir, Y.**, 2009. Compaction of fly ash–aluminum alloy composites and evaluation of their mechanical and acoustic properties, *Advanced Powder Technology*, **20**, 548-555.

[50] **Ramachandra, M.**, Radhakrishna, K., 2005. Microstructure, mechanical properties, wear and corrosion behaviour of Al-Si/Flyashp composite, *Materials Science and Technology*, **21**, 1337-1343.

[51] **Guo, R. Q., Venugopalan, D., Rohatgi, P. K.**, 1998. Differential thermal analysis to establish the stability of aluminum - fly ash composites during synthesis and reheating, *Materials Science and Engineering: A*, **241**, 184-190.

[52] **Guo, R. Q., Rohatgi, P. K.**, 1998. Chemical Reactions between Aluminum and Fly Ash during Synthesis and Reheating of Al–Fly Ash Composite, *Metallurgical And Materials Transactions B*, **29**, 519-525.

[53] **Sobczak, N., Sobczak, J., Morgiel, J., Stobierski, L.**, 2003. TEM characterization of the reaction products in aluminium–fly ash couples, *Materials Chemistry and Physics*, **81**, 296-300.

[54] **Pech-Canul, M. I., Escalera-Lozano, R., Pech-Canul, M. A., Rendon-Angeles, J. C., Lopez-Cuevas J.**, 2007. Degradation processes in Al/SiCp/MgAl2O4 composites prepared from recycled aluminum with fly ash and rice hull ash, *Materials and Corrosion*, **58**, 833-840.

[55] **Witkin, D. B., Lavernia, E. J.**, 2006. Synthesis and mechanical behavior of nanostructured materials via cryomilling, *Progress in Materials Science*, **51**, 1-60.

[56] **Sherafat, Z., Paydar, M. H., Ebrahimi, R., Sohrabi, S.**, 2010. Mechanical properties and deformation behavior of Al/Al7075, two-phase material, *Journal of Alloys and Compounds*, **502**, 123-126.

[57] **Bienias, J., Walczak, M., Surowska, B., Sobczak, J.**, 2003. Microstructure and Corrosion Behaviour of Aluminum Fly Ash Composites, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, **5**, 493-502.

[58] **Escalera-Lozano, R., Gutiérrez, C. A., Pech-Canul, M. A., Pech-Canul, M. I.**, 2007. Corrosion characteristics of hybrid $Al/SiC_p/MgAl_2O_4$ composites fabricated with fly ash and recycled aluminum, *Materials Characterization*, **58**, 953-960.

[59] **Zahi, S., Daud, A. R.**, 2011. Fly ash characterization and application in Al–based Mg alloys, *Materials & Design*, **32**, 1337-1346.

[60] **Mishra S. R., Kumar, S., Wagh, A., Rho, J. Y., Gheyi T.**, 2003. Temperature-dependent surface topography analysis of Illinois class F fly ash using ESEM and AFM, *Materials Letters*, **57**, 2417-2424.

[61] **Park,Y. S., Chung, K. H., Kim, N. J., Lavernia, E. J.**, 2004. Microstructural investigation of nanocrystalline bulk Al–Mg alloy fabricated by cryomilling and extrusion, *Materials Science and Engineering A*, **374**, 211-216.

[62] **Wu, G.H., Dou, Z.Y., Jiang, L.T., Cao, J.H.**, 2006. Damping properties of aluminum matrix–fly ash composites, *Materials Letters*, **60**, 2945-2948.

[63] **Guo, R. Q., Rohatgi, P. K., Nath, D.**,1997. Preparation of aluminium–fly ash particulate composite by powder metallurgy technique, *Journal of Materials Science*, **32**, 3971-3974.

[64] **Rohatgi, P. K., Kim, J. K., Gupta, N., Alaraj, S., Daoud, A.**, 2006. Compressive characteristics of A356/fly ash cenosphere composites synthesized by pressure infiltration technique, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **37**, 430-437.

[65] **Kayalı, E. S., Çimenoğlu, H.**, 1986. Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları, İstanbul Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

[66] **Parkins, R. N.**, 1968. Mechanical Treatment of Metals, George Allen & Unwin Ltd., London, Great Britain, 20-21.

[67] **Paul, K. T., Satpathy, S. K., Mana, I., Chakraborty, K. K., Nando, G. B.**, 2007. Preparation and Characterization of Nano structured Materials from Fly Ash: A Waste from Thermal Power Stations, by High Energy Ball Milling, *Nanoscale Research Letters*, **2**, 397-404.

[68] **Viala, J. C., Bouix, J., Gonzalez, G., Esnouf, C.**, 1997. Chemical Reactivity of Aluminium with Boron Carbide, *Journal of Materials Science*, **32**, 4559-4573.

[69] **Mindivan, H.**, 2010. Reciprocal sliding wear behaviour of B_4C particulate reinforced aluminum alloy composites, *Materials Letters*, **64**, 405-407.

[70] **Rajan, T. P. D., Pillai, R. M., Pai, B. C., Satyanarayana, K. G., Rohatgi, P. K.**, 2007. Fabrication and characterisation of Al–7Si–0.35Mg/fly ash metal matrix composites processed by different stir casting routes, *Composites Science and Technology*, **67**, 3369-3377.

[71] **Murugendrappa, M. V., Khasim S., Ambika Prasad, M. V. N.**, 2005. Synthesis, characterization and conductivity studies of polypyrrole–fly ash composites, *Bulletin of Materials Science*, **28**, 565-569.

[72] **Yu, S., Hing, P., Hu, X.**, 2000. Dielectric properties of polystyrene–aluminum-nitride composites, *Journal of Applied Physics*, **88**, 398-404.

[73] **Zhou, F., Witkin, D., Nutt, S. R., Lavernia, E. J.**, 2004. Formation of nanostructure in Al produced by a low-energy ball milling at cryogenic temperature, *Materials Science and Engineering A*, **375-377**, 917-921.

[74] **Huang, B., Perez, R. J., Lavernia, E. J.**, 1998. Grain growth of nanocrystalline Fe-Al alloys produced by cryomilling in liquid argon and nitrogen, *Materials Science and Engineering A*, **255**, 124-132.

[75] **Pierson, H. O.**, 1996. Handbook of Refractory Carbides and Nitrides, sayfa 239, Noyes Publications, Westwood, New Jersey, USA.

[76] **Perez, R. J., Jiang, H. G., Dogan, C. P., Lavernia, E. J.**, 1998. Grain growth of nanocrystalline cryomilled Fe-Al powders, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **29A**, 2469-2475.

[77] **ASM International**, 2002. Atlas of Stress-Strain Curves, 2. Baskı, sayfa 420, The Materials Information Society, Materials Park, OH, USA.

EKLER

EK A: Alüminyum alaşımları için temel ısıl işlem simgeleri.

EK B: Optik mikroskopla çekilen mikroyapı görüntüleri.

EK C: Al – N denge diyagramı.

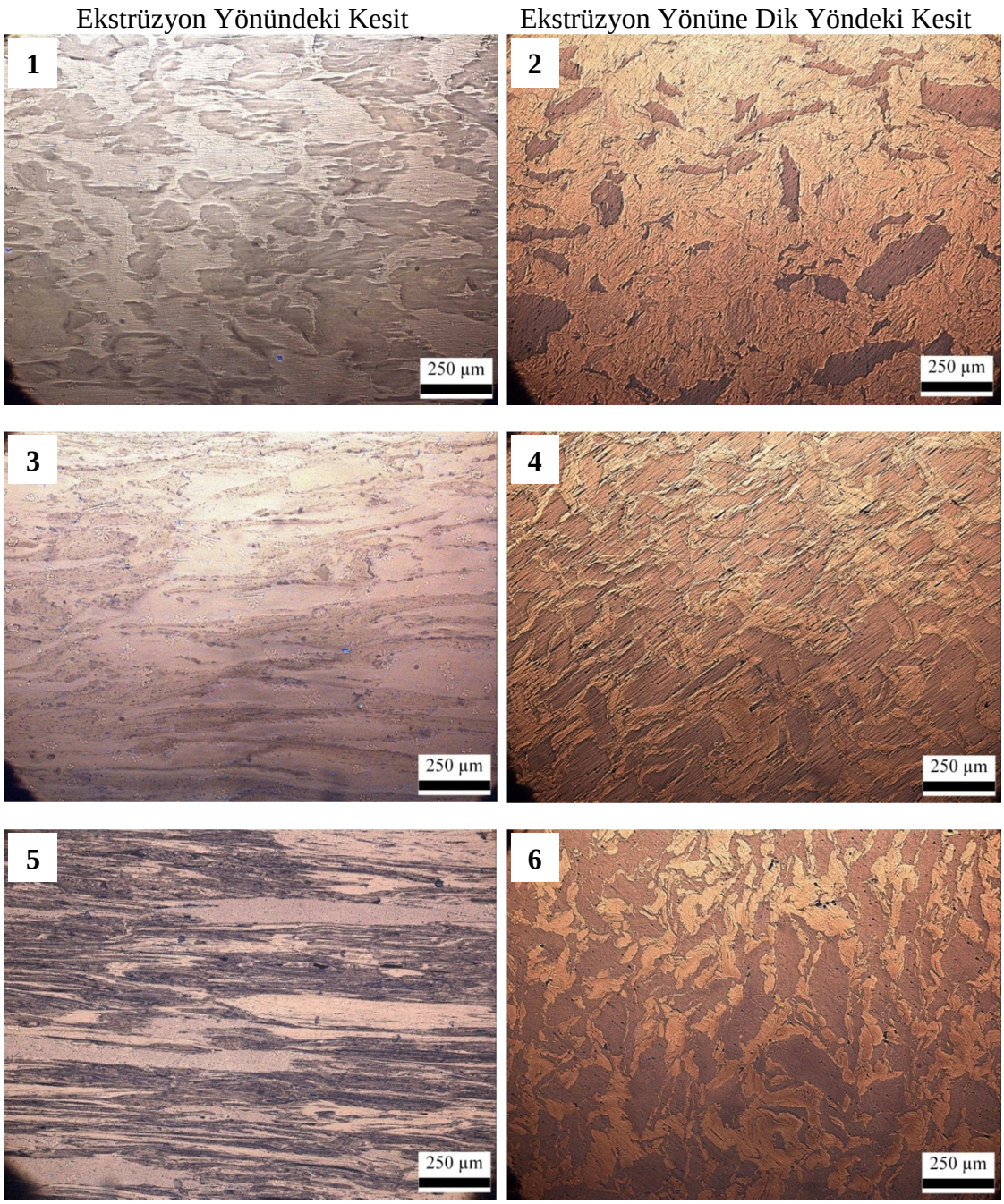
EK D: Korozyon yüzeyi SEM görüntüleri.

EK A

Çizelge A.1: BS EN 515: 1993 standardına göre alüminyum alaşımları için temel ısıl işlem simgeleri.

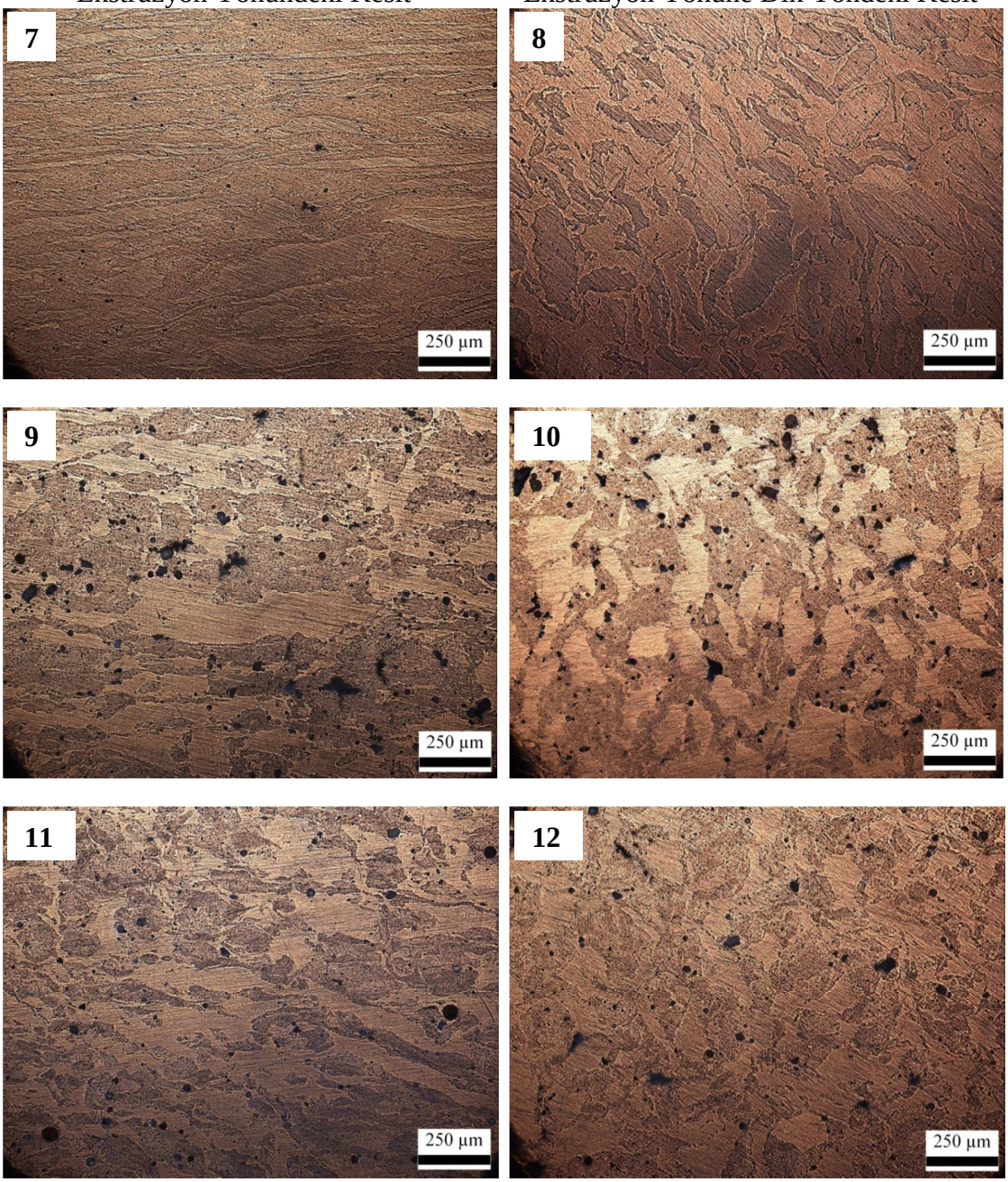
F	Üretildiği haliyle (sıcak işlenmiş, dövülmüş, döküm vb.)
O	Tavlanmış (mümkün olduğunca yumuşak koşulda)
H	Soğuk işlenmiş
H1x	Sadece soğuk işlenmiş (x simgesi soğuk işlem miktarını ve sertleşmeyi işaret etmektedir)
H12	Çekme dayanımını O ile H14 arasında veren soğuk işlem
H14	Çekme dayanımını O ile H18 arasında veren soğuk işlem
H16	Çekme dayanımını H14 ile H14 arasında veren soğuk işlem
H18	Yaklaşık % 75 küçültmenin (ezmenin) yapıldığı soğuk işlem
H19	H18 ısıl işlemi ile sağlanan 13.8 MPa (2000 psi) değerinden daha büyük çekme mukavemeti veren soğuk işlem
H2x	Soğuk işlenmiş ve kısmi tavlanmış
H3x	Soğuk işlenmiş ve yaşlanma sertleşmesini önlemek için düşük sıcaklıkta dengelileştirilmiş
W	Çözeltiye alma ısıl işlemi tabi tutulmuş
T	Yaşlandırma ısıl işlemine tabi tutulmuş
T1	Üretim sıcaklığından soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış
T2	Üretim sıcaklığından soğutulmuş, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırılmış
T3	Çözeltiye alınmış, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırılmış
T4	Çözeltiye alınmış ve doğal yaşlandırılmış
T5	Üretim sıcaklığından soğutuluş ve yapay yaşlandırılmış
T6	Çözeltiye alınmış ve yapay yaşlandırılmış
T7	Çözeltiye alınmış ve aşırı yaşlanma ile dengelileştirilmiş
T8	Çözeltiye alınmış, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmış
T9	Çözeltiye alınmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş
T10	Üretim sıcaklığından soğutulmuş, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmış

EK B



Şekil B.1: Optik mikroskopla çekilen mikroyapı görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (1) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 100/1; %25 saf Al toz - %75 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (2) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 100/1; %25 saf Al toz - %75 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (3) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (4) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (5) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %75 saf Al toz - %25 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (6) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %75 saf Al toz - %25 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme

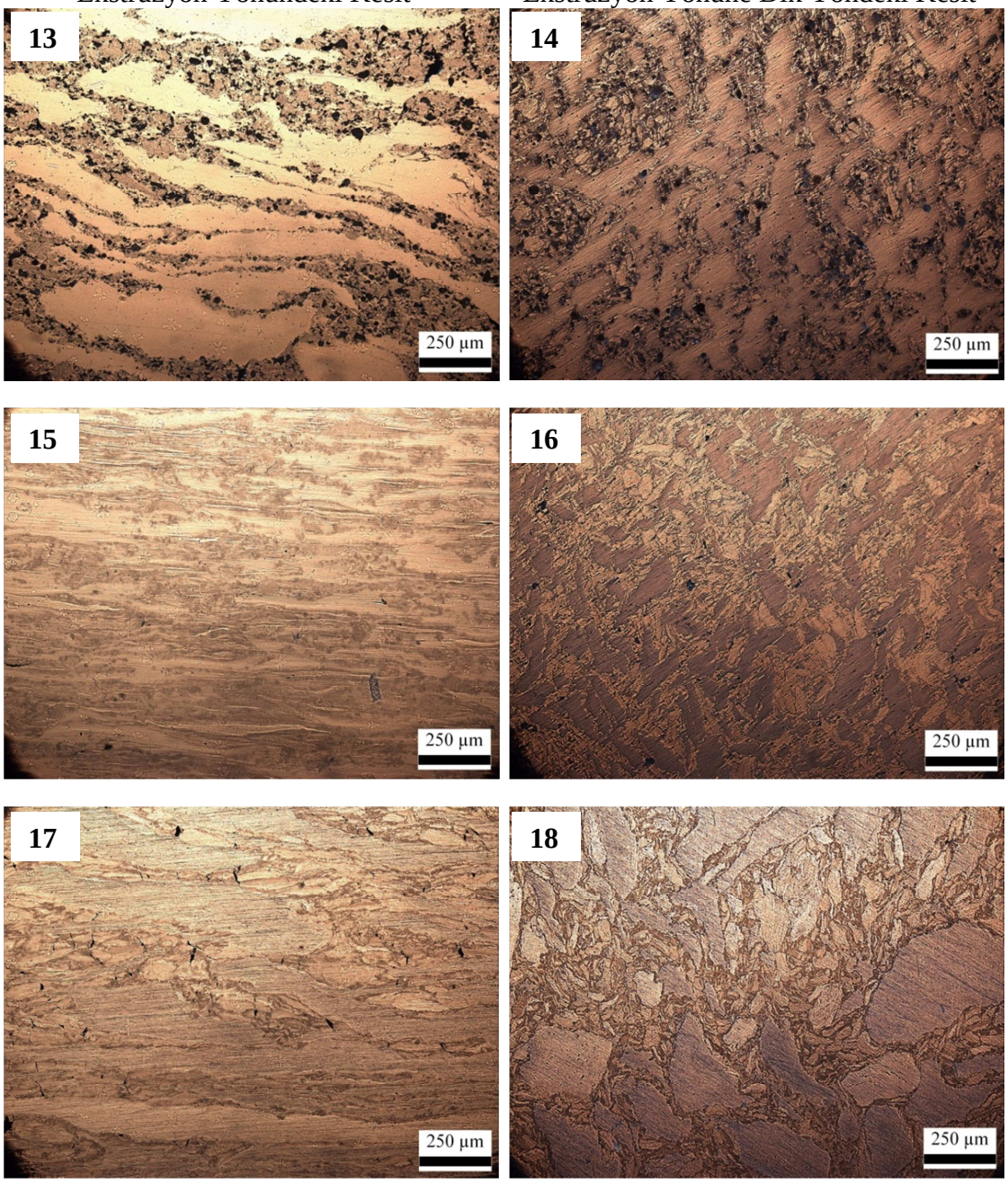
Ekstrüzyon Yönündeki Kesit Ekstrüzyon Yönüne Dik Yöndeki Kesit



Şekil B.1 (devamı): Optik mikroskopla çekilen mikroyapı görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (7) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %5 kül - %47,5 saf Al toz - Ağ. %47,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (8) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %5 kül - %47,5 saf Al toz - %47,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (9) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %10 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (10) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %10 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (11) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %15 kül - %42,5 saf Al toz - %42,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (12) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %15 kül - %42,5 saf Al toz - %42,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme.

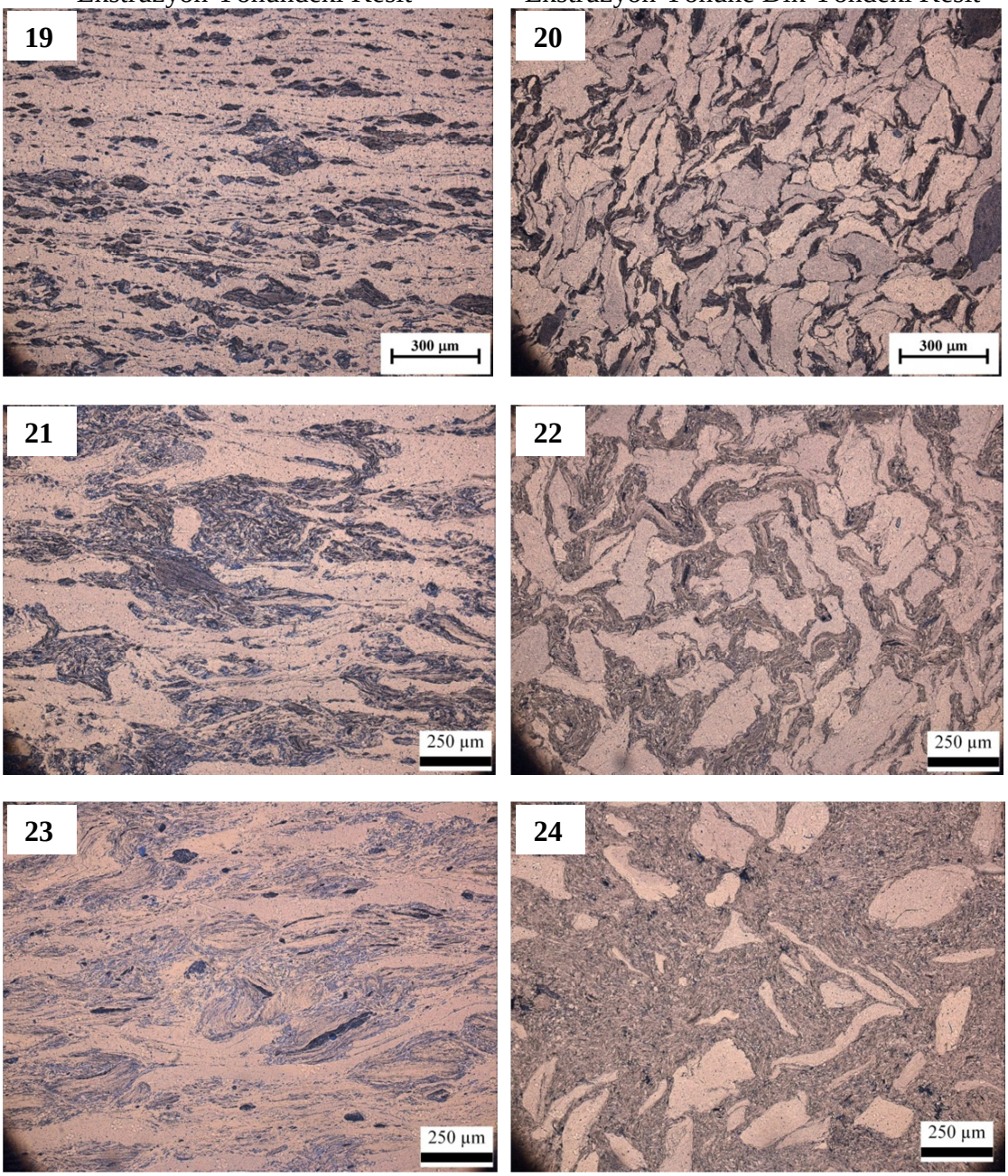
Ekstrüzyon Yönündeki Kesit

Ekstrüzyon Yönüne Dik Yöndeki Kesit



Şekil B.1 (devamı): Optik mikroskopla çekilen mikroyapı görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (13) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %20 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (14) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %20 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (15) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 90 - 200 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (16) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 90 - 200 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (17) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz=100/1; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (18) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz=100/1; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme.

Ekstrüzyon Yönündeki Kesit Ekstrüzyon Yönüne Dik Yöndeki Kesit

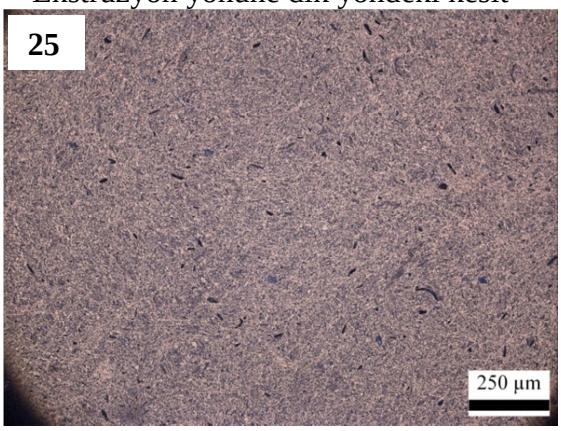


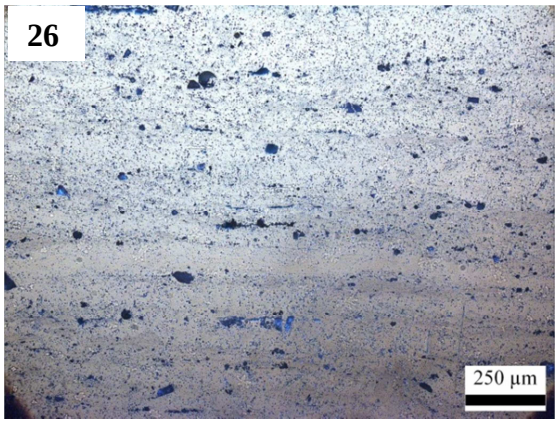
Şekil B.1 (devamı): Optik mikroskopla çekilen mikroyapı görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (19) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %25 saf Al toz - %75 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (20) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %25 saf Al toz - %75 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (21) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (22) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (23) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %75 saf Al toz - %25 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (24) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %75 saf Al toz - %25 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme.

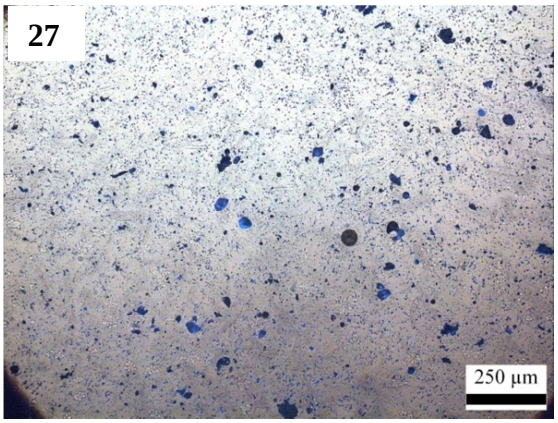
Ekstrüzyon Yönündeki Kesit

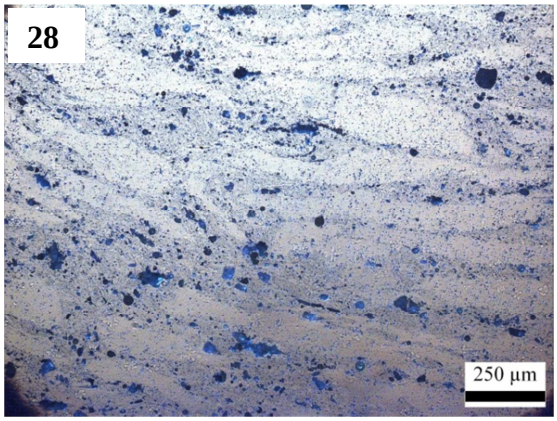
Ekstrüzyon yönüne dik yöndeki kesit

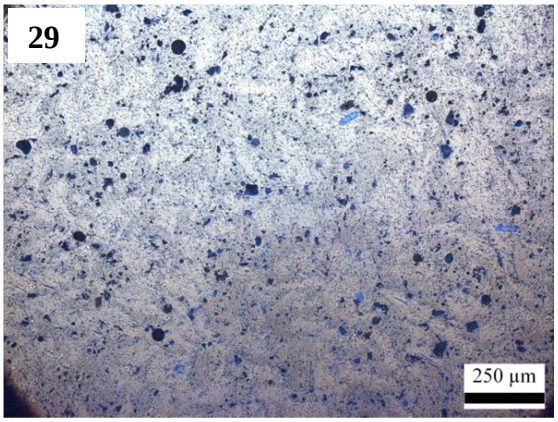
Bu numune toz olduğu için ekstrüzyon yönündeki kesit ile ekstrüzyona dik yöndeki kesit aynıdır.





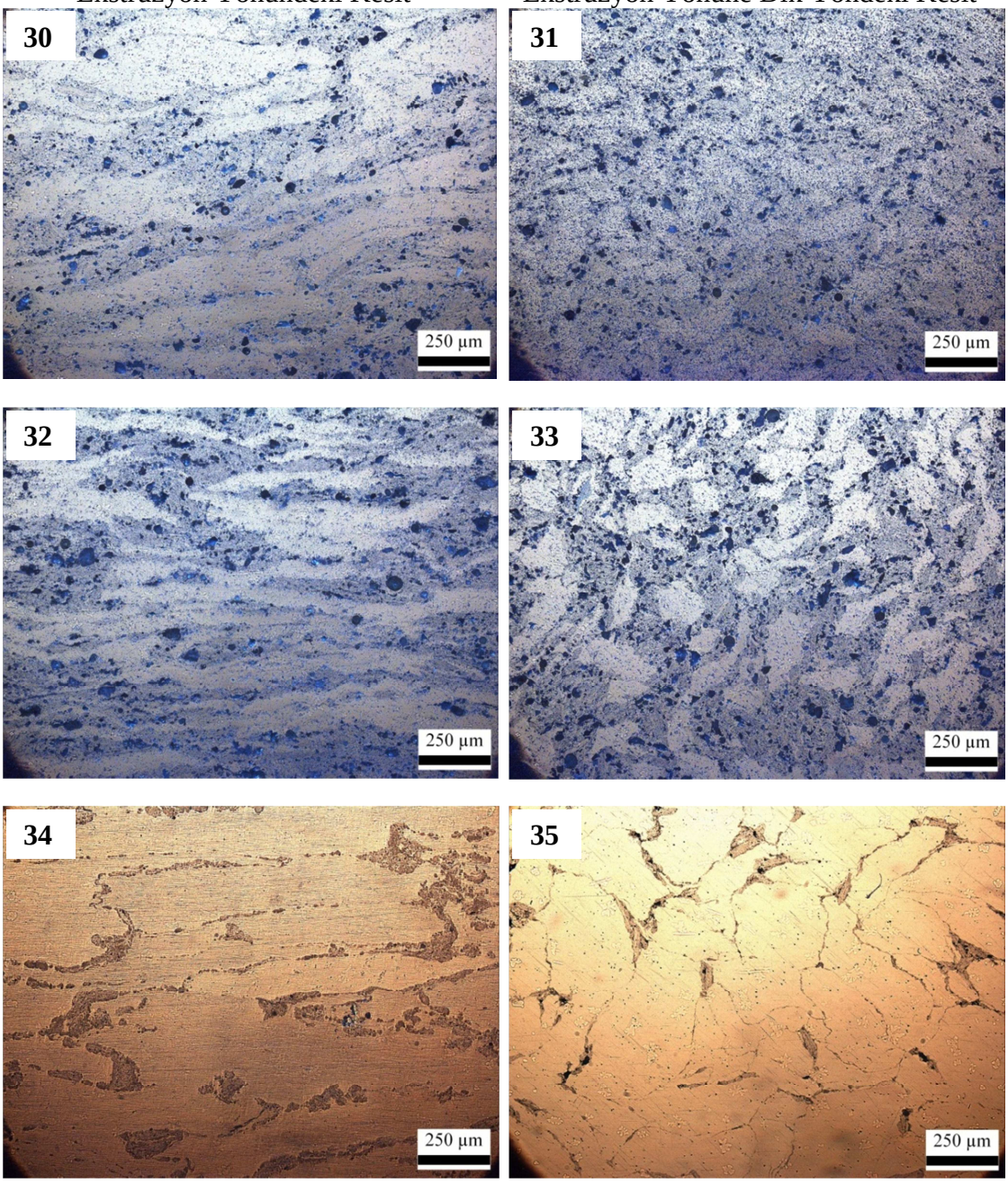






Şekil B.1 (devamı): Optik mikroskopla çekilen mikroyapı görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (25) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %100 saf Al toz, ortalama toz boyutu 27 µm; yuvarlak kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (26) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %5 kül - %47,5 saf Al toz - %47,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (27) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %5 kül - %47,5 saf Al toz - %47,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (28) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %10 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (29) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %10 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme.

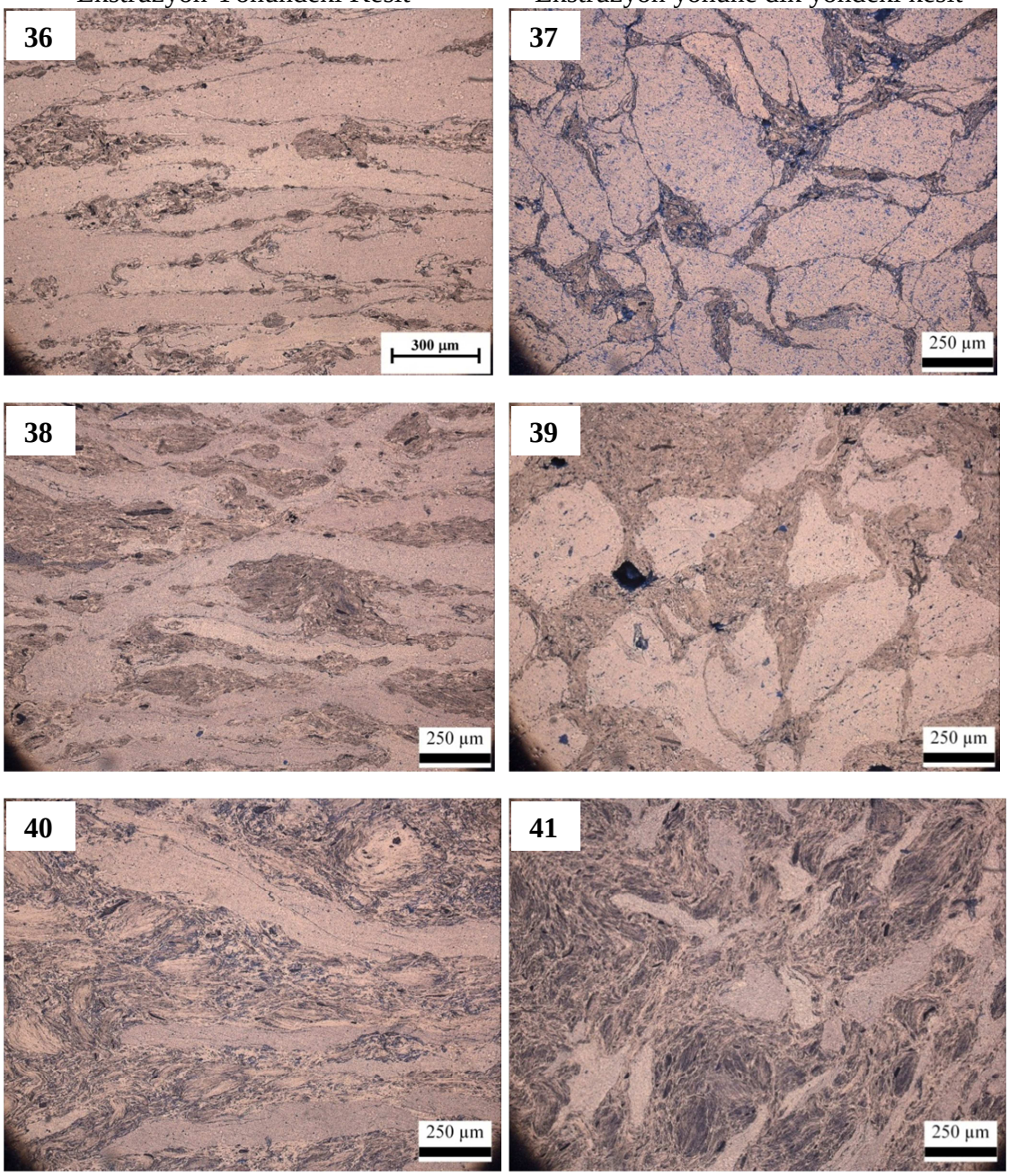
Ekstrüzyon Yönündeki Kesit Ekstrüzyon Yönüne Dik Yöndeki Kesit



Şekil B.1 (devamı): Optik mikroskopla çekilen mikroyapı görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (30) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %15 kül - %42,5 saf Al toz - %42,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (31) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %15 kül - %42,5 saf Al toz - %42,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (32) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %20 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (33) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %20 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (34) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %100 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100xbüyütme. (35) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %100 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100xbüyütme.

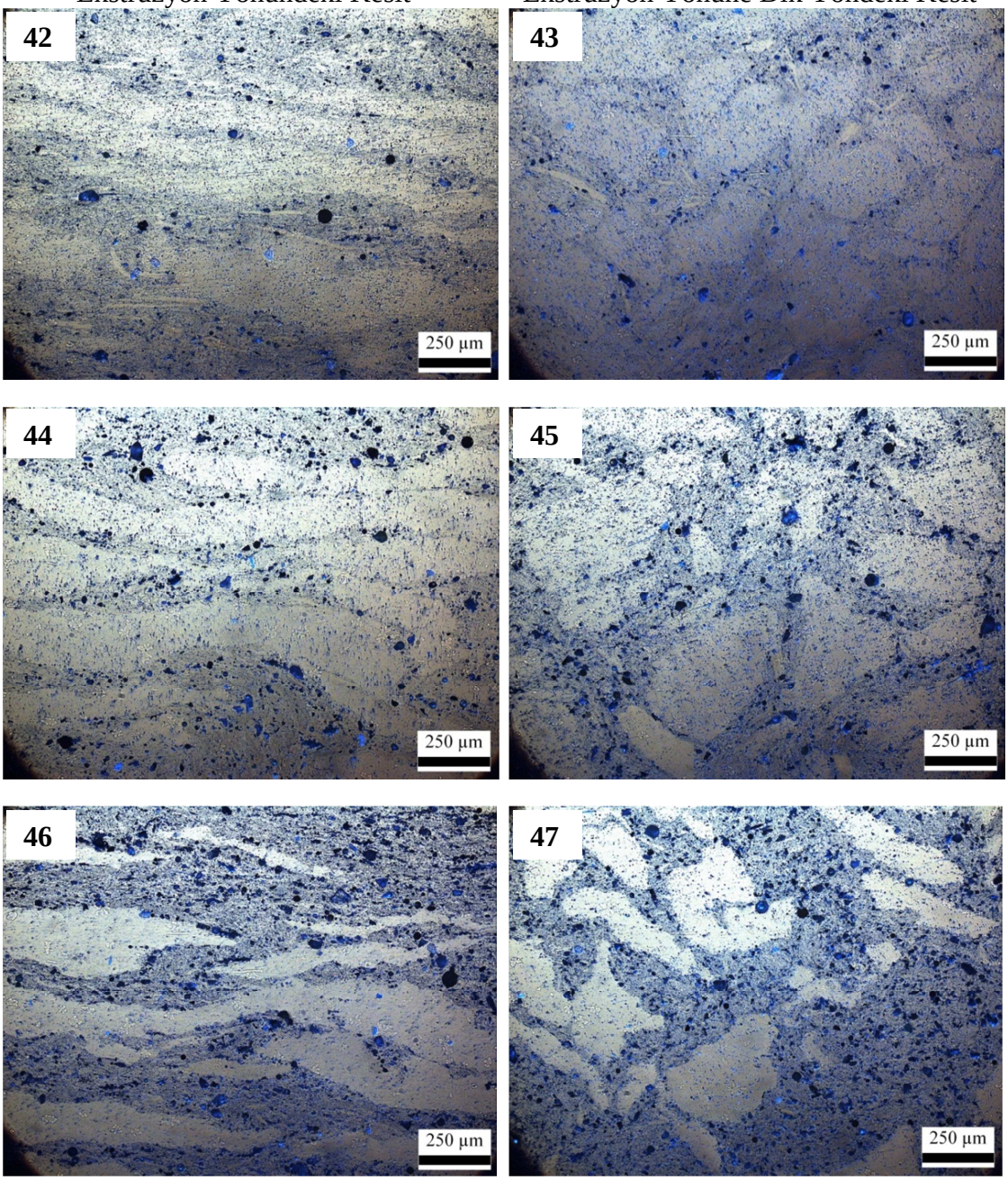
Ekstrüzyon Yönündeki Kesit

Ekstrüzyon yönüne dik yöndeki kesit



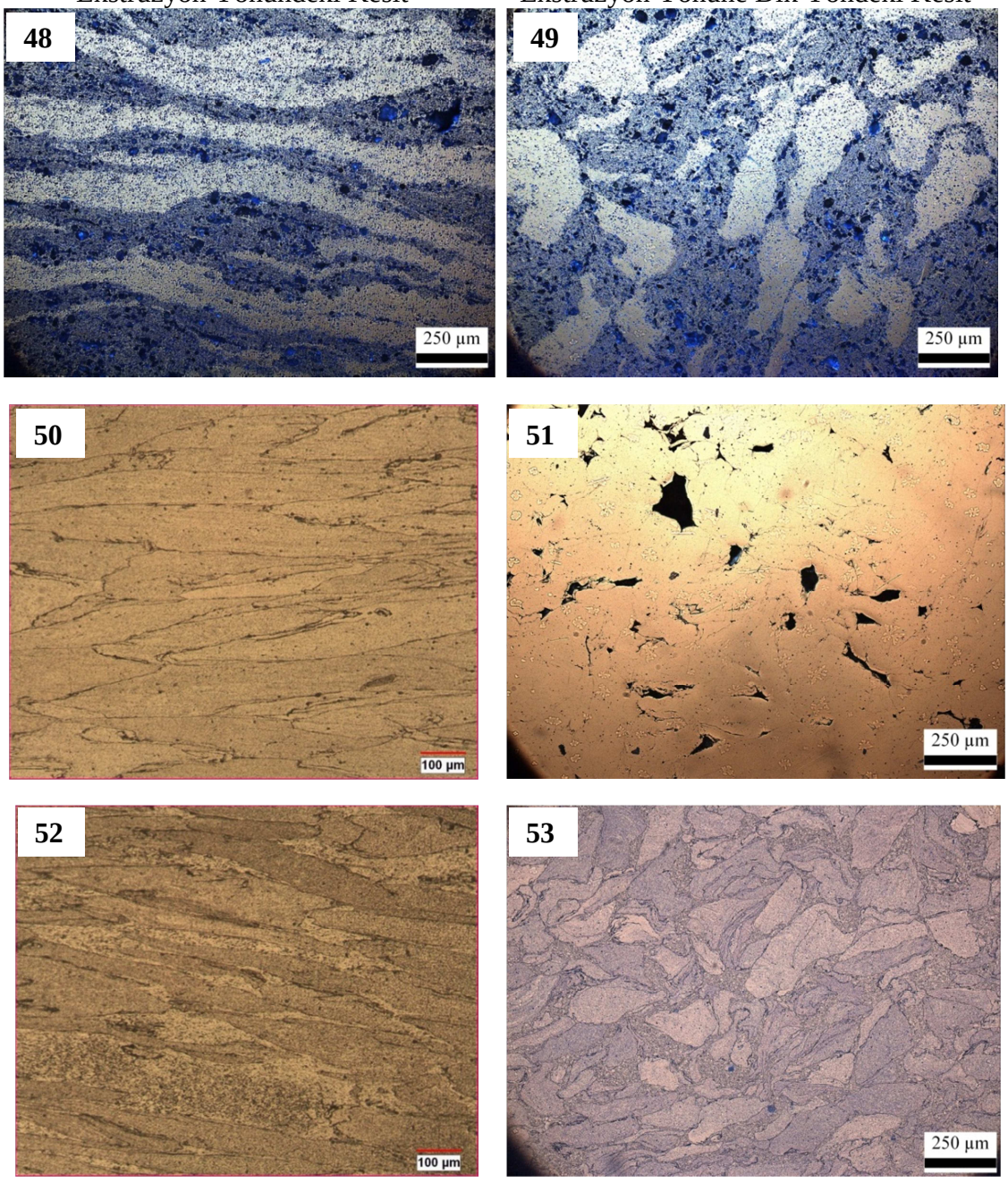
Şekil B.1 (devamı): Optik mikroskopla çekilen mikroyapı görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (36) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %25 saf Al toz - %75 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; ekstrüzyon kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (37) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %25 saf Al toz - %75 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; yuvarlak kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (38) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; ekstrüzyon kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (39) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; yuvarlak kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (40) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %75 saf Al toz - %25 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; ekstrüzyon kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (41) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %75 saf Al toz - %25 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; yuvarlak kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme.

Ekstrüzyon Yönündeki Kesit Ekstrüzyon Yönüne Dik Yöndeki Kesit



Şekil B.1 (devamı): Optik mikroskopla çekilen mikroyapı görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (42) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %5 kül - %47,5 saf Al toz - %47,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (43) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %5 kül - %47,5 saf Al toz - %47,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (44) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %10 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (45) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %10 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (46) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %15 kül - %42,5 saf Al toz - %42,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (47) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %15 kül - %42,5 saf Al toz - %42,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme.

Ekstrüzyon Yönündeki Kesit | Ekstrüzyon Yönüne Dik Yöndeki Kesit

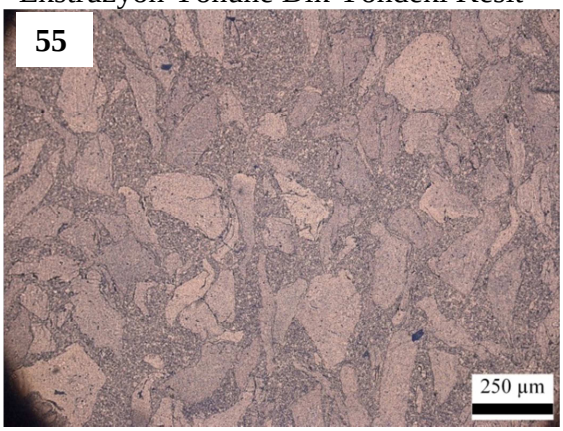


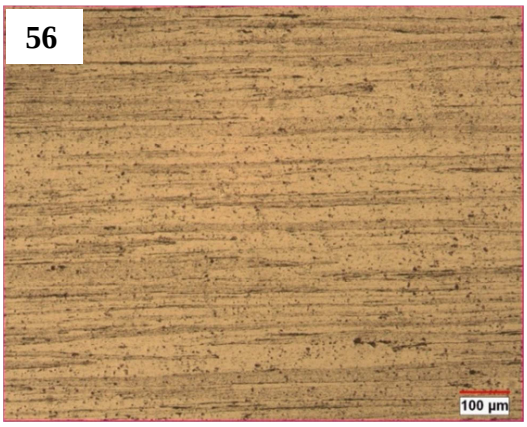
Şekil B.1 (devamı): Optik mikroskopla çekilen mikroyapı görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (48) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %20 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (49) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %20 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (50) Elle karıştırılmış; %100 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (51) Elle karıştırılmış; %100 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (52) Elle karıştırılmış; %25 saf Al toz - %75 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (53) Elle karıştırılmış; %25 saf Al toz - %75 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme.

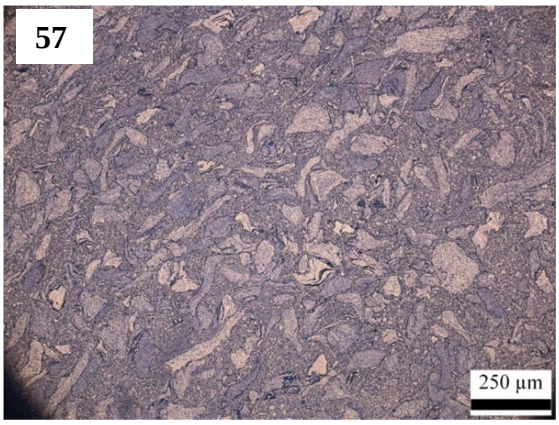
Ekstrüzyon Yönündeki Kesit

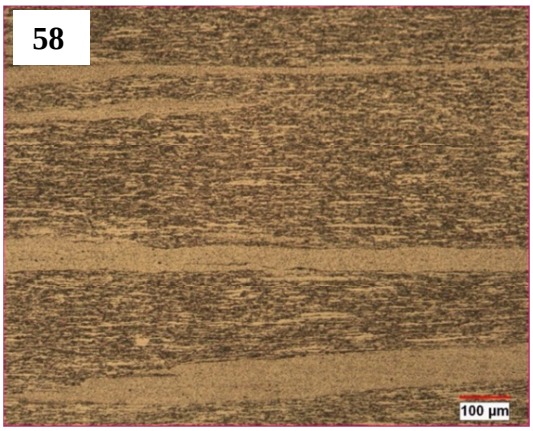


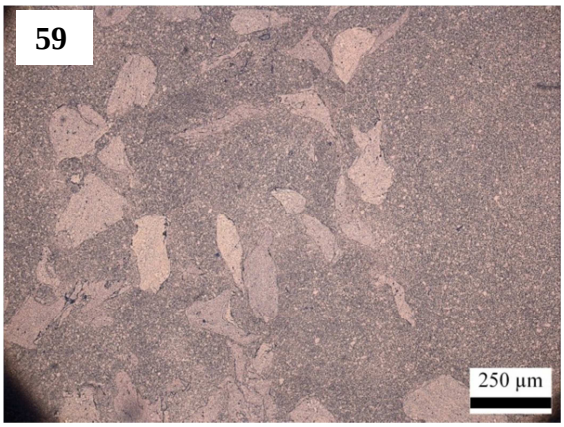
Ekstrüzyon Yönüne Dik Yöndeki Kesit





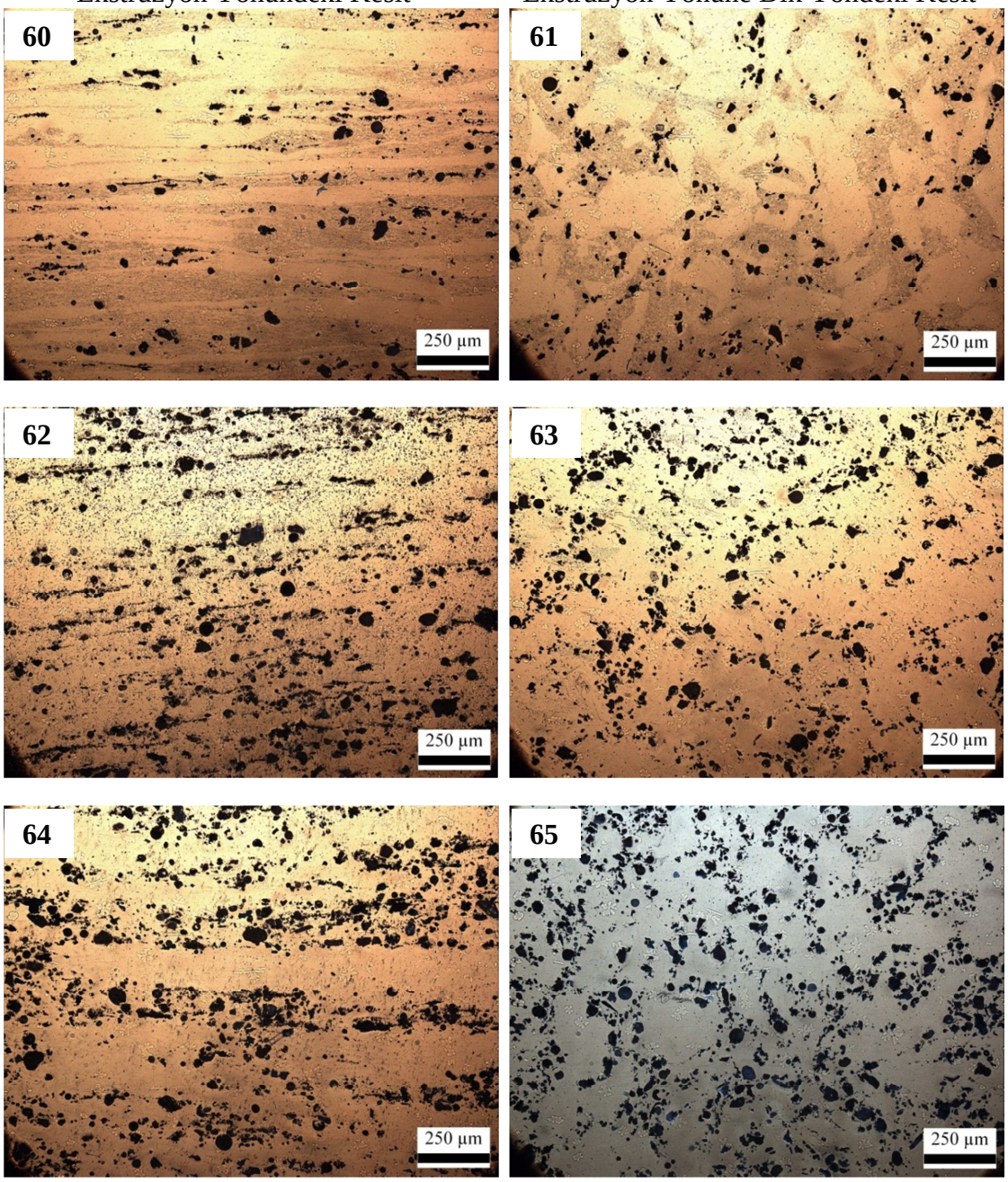






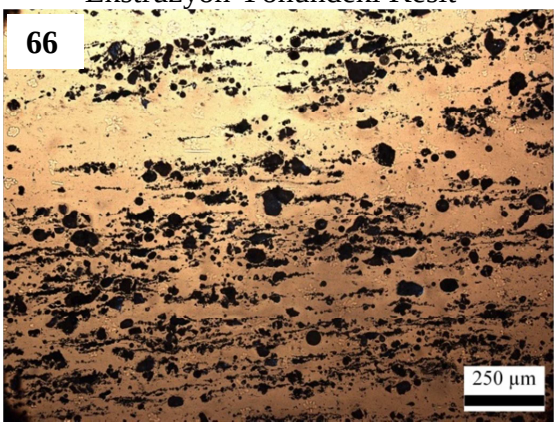
Şekil B.1 (devamı): Optik mikroskopla çekilen mikroyapı görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (54) Elle karıştırılmış; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (55) Elle karıştırılmış; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (56) Elle karıştırılmış; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 90-200 µm; ekstrüzyon kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (57) Elle karıştırılmış; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 90-200 µm; yuvarlak kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (58) Elle karıştırılmış; %75 saf Al toz - %25 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (59) Elle karıştırılmış; %75 saf Al toz - %25 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme.

Ekstrüzyon Yönündeki Kesit | Ekstrüzyon Yönüne Dik Yöndeki Kesit

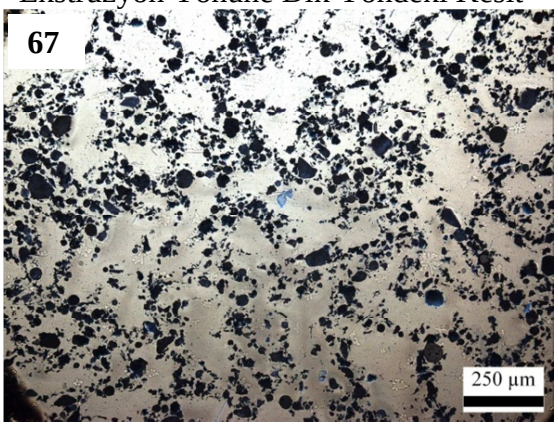


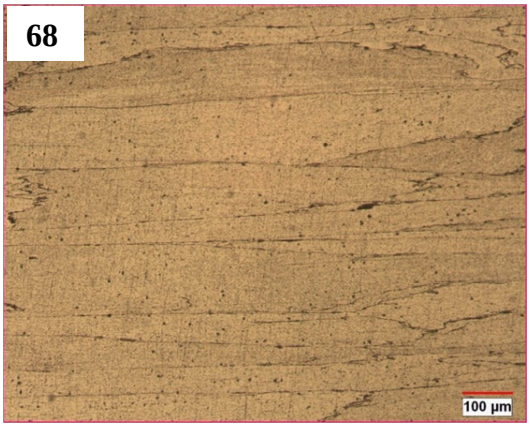
Şekil B.1 (devamı): Optik mikroskopla çekilen mikroyapı görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (60) Elle karıştırılmış; %5 kül - %47,5 saf Al toz - %47,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (61) Elle karıştırılmış; %5 kül - %47,5 saf Al toz - %47,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (62) Elle karıştırılmış; %10 kül - %45 saf Al toz - %45 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (63) Elle karıştırılmış; %10 kül - %45 saf Al toz - %45 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (64) Elle karıştırılmış; %15 kül - %42,5 saf Al toz - %42,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (65) Elle karıştırılmış; %15 kül - %42,5 saf Al toz - %42,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme.

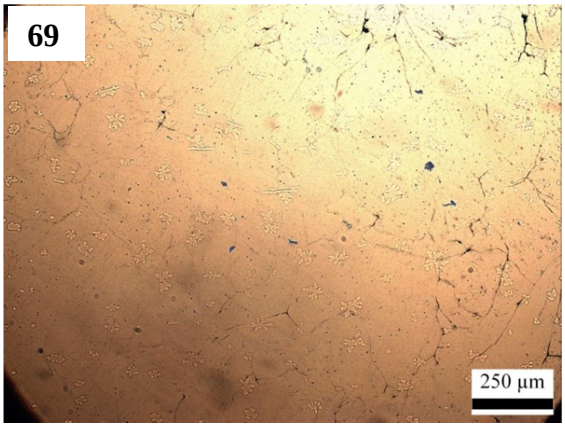
Ekstrüzyon Yönündeki Kesit

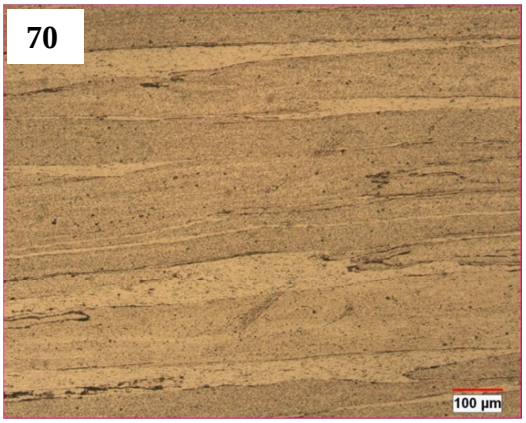


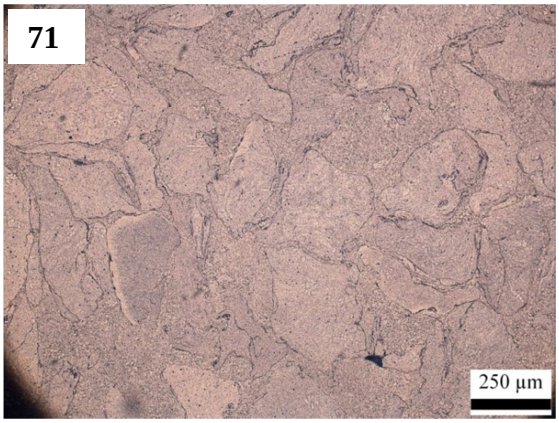
Ekstrüzyon Yönüne Dik Yöndeki Kesit







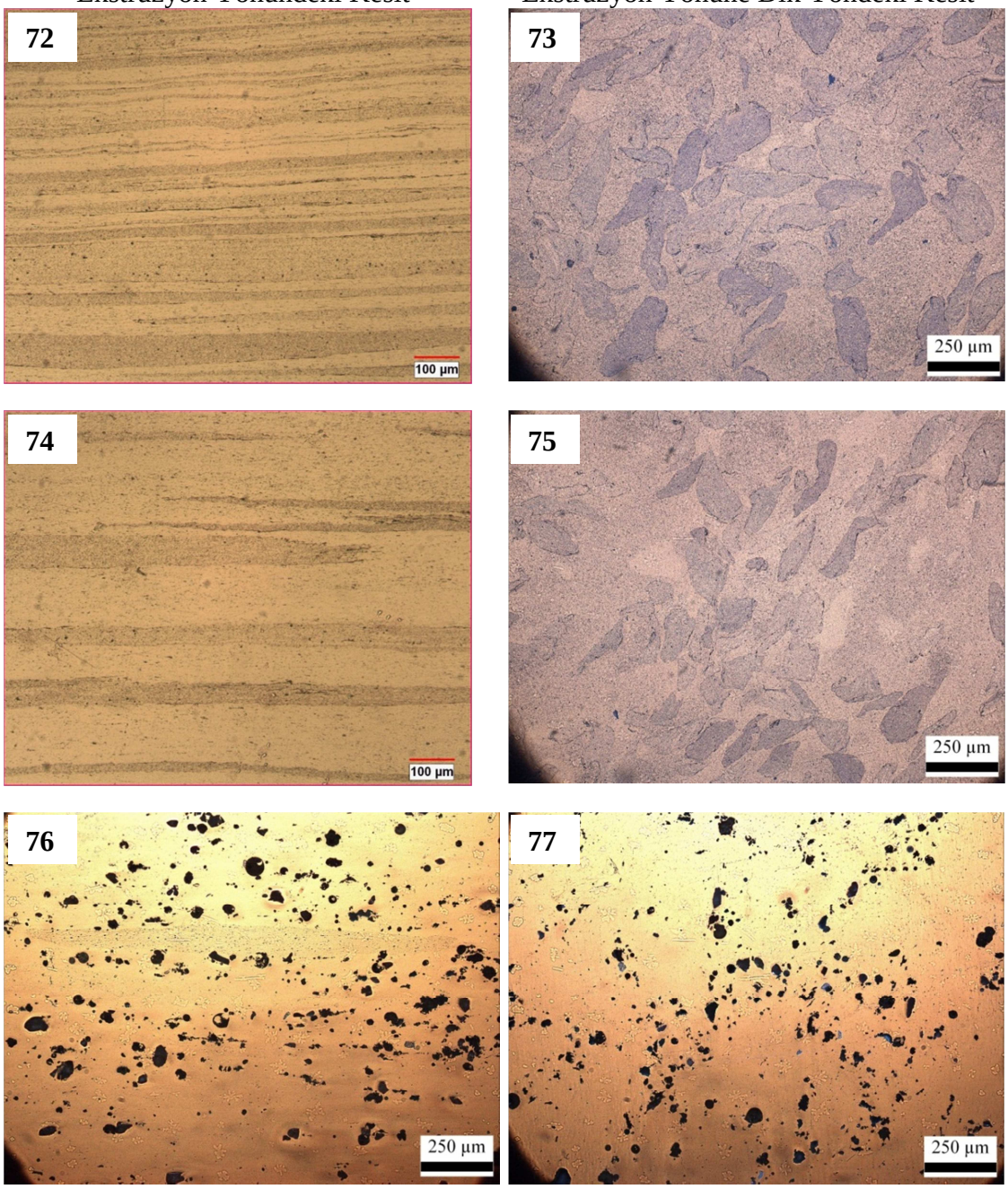




Şekil B.1 (devamı): Optik mikroskopla çekilen mikroyapı görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (66) Elle karıştırılmış; %20 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (67) Elle karıştırılmış; %20 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (68) Elle karıştırılmış; % 100 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; ekstrüzyon kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (69) Elle karıştırılmış; % 100 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (70) Elle karıştırılmış; %25 saf Al toz - %75 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; ekstrüzyon kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (71) Elle karıştırılmış; %25 saf Al toz - %75 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; yuvarlak kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme.

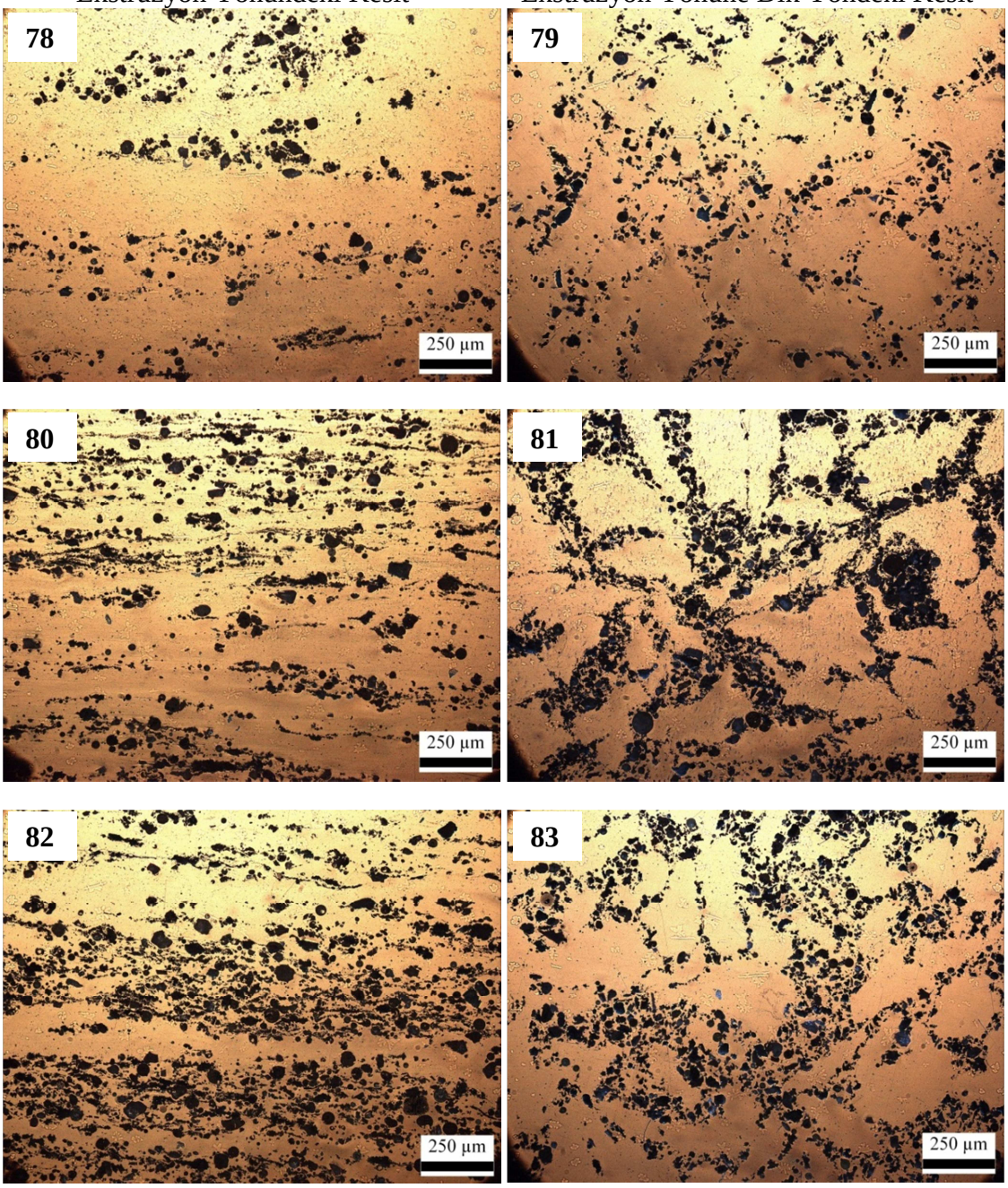
Ekstrüzyon Yönündeki Kesit

Ekstrüzyon Yönüne Dik Yöndeki Kesit



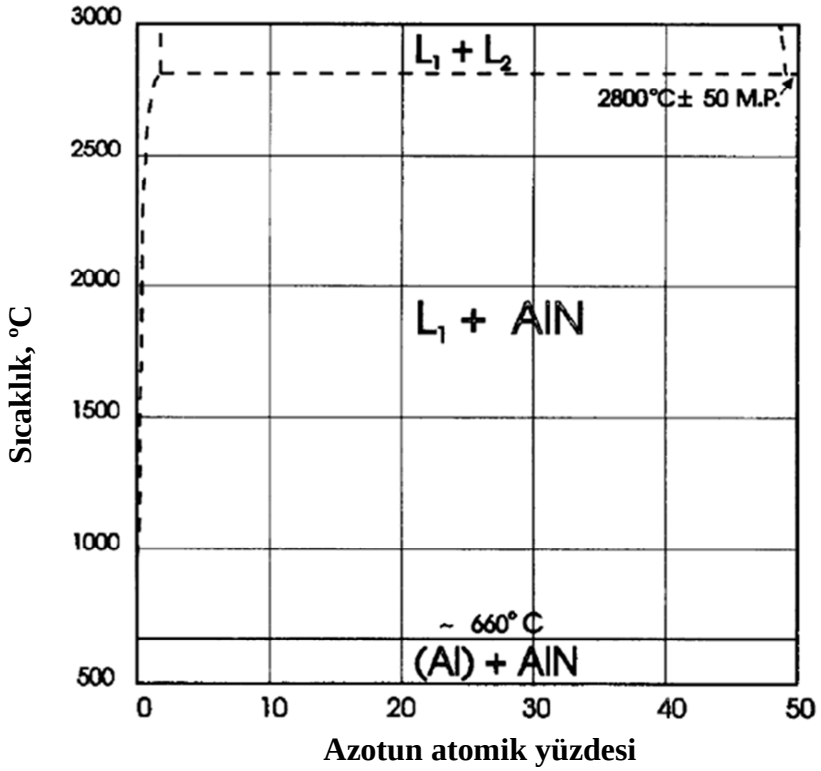
Şekil B.1 (devamı): Optik mikroskopla çekilen mikroyapı görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (72) Elle karıştırılmış; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; ekstrüzyon kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (73) Elle karıştırılmış; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; yuvarlak kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (74) Elle karıştırılmış; %75 saf Al toz - %25 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; ekstrüzyon kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (75) Elle karıştırılmış; %75 saf Al toz - %25 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; yuvarlak kesit; Keller dağlayıcı ile dağlanmış; 100x büyütme. (76) Elle karıştırılmış; %5 uçucu kül - %47,5 saf Al toz - %47,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (77) Elle karıştırılmış; %5 uçucu kül - %47,5 saf Al toz - %47,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme.

Ekstrüzyon Yönündeki Kesit Ekstrüzyon Yönüne Dik Yöndeki Kesit



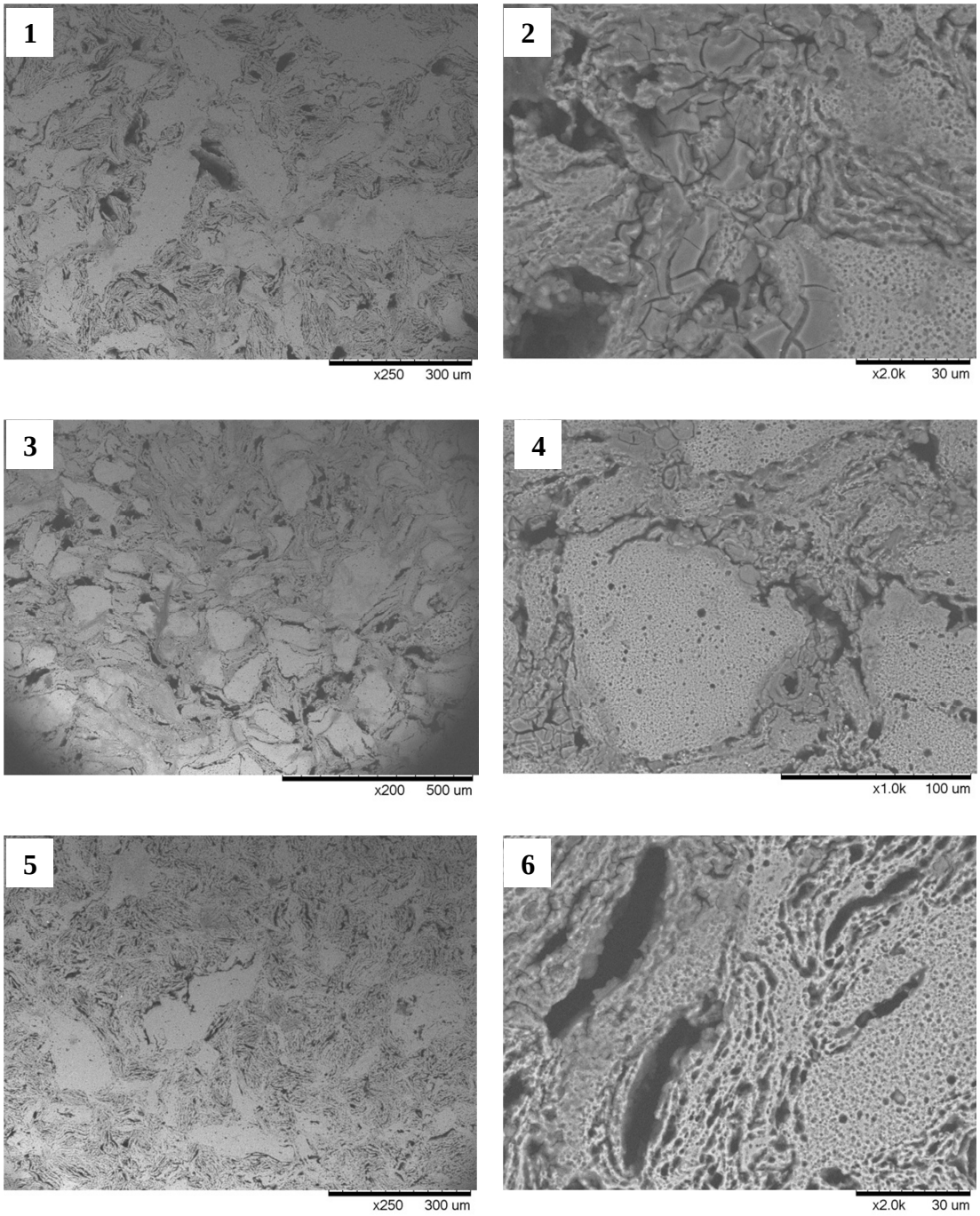
Şekil B.1 (devamı): Optik mikroskopla çekilen mikroyapı görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (78) Elle karıştırılmış; %10 uçucu kül - %45 saf Al toz - %45 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (79) Elle karıştırılmış; %10 uçucu kül - %45 saf Al toz - %45 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (80) Elle karıştırılmış; %15 uçucu kül - %42,5 saf Al toz - %42,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (81) Elle karıştırılmış; %15 uçucu kül - %42,5 saf Al toz - %42,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (82) Elle karıştırılmış; %20 uçucu kül - %40saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; ekstrüzyon kesit; dağlanmamış; 100x büyütme. (83) Elle karıştırılmış; %20 uçucu kül - %40saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm; yuvarlak kesit; dağlanmamış; 100x büyütme.

EK C

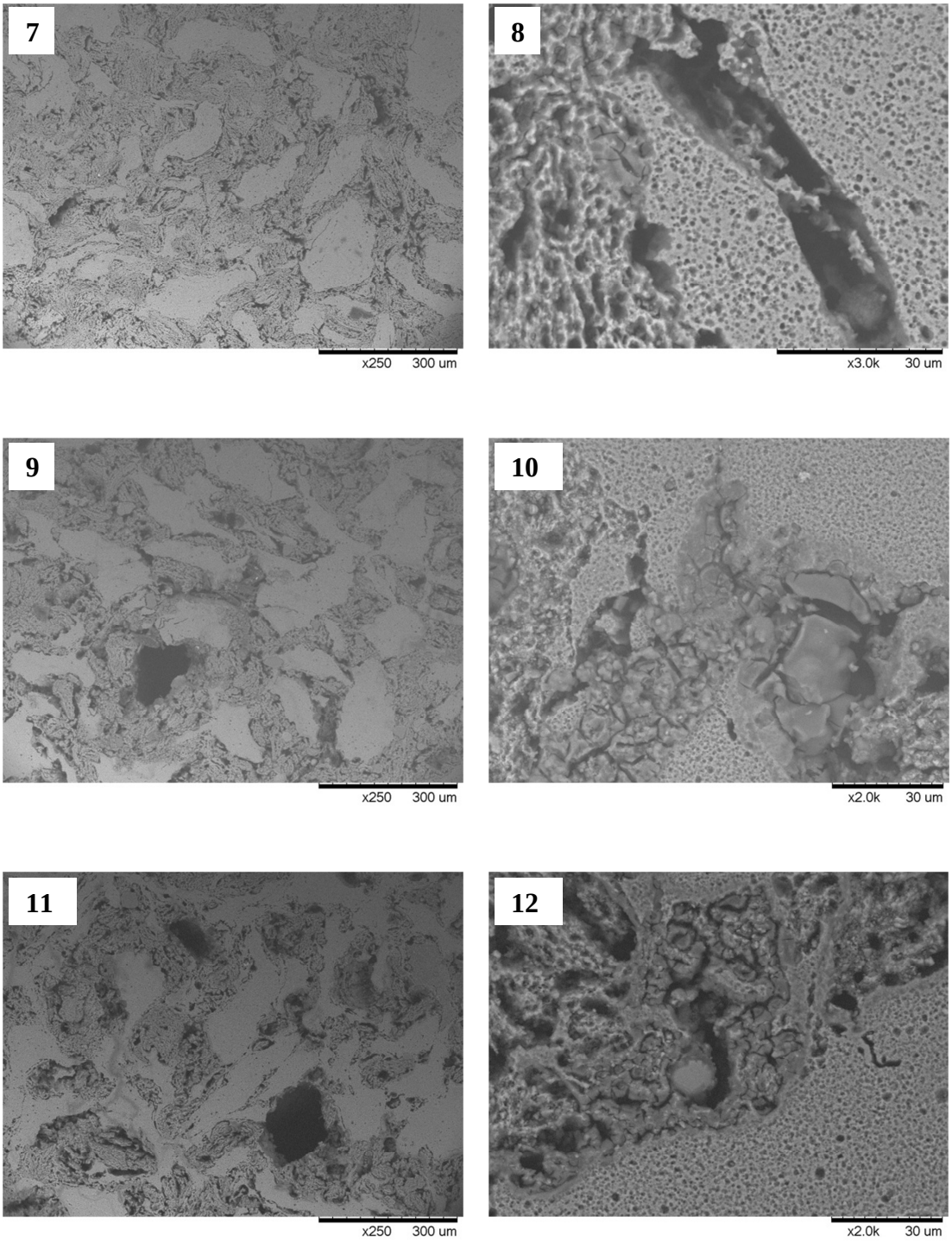


Şekil C.1: Al – N denge diyagramı [75].

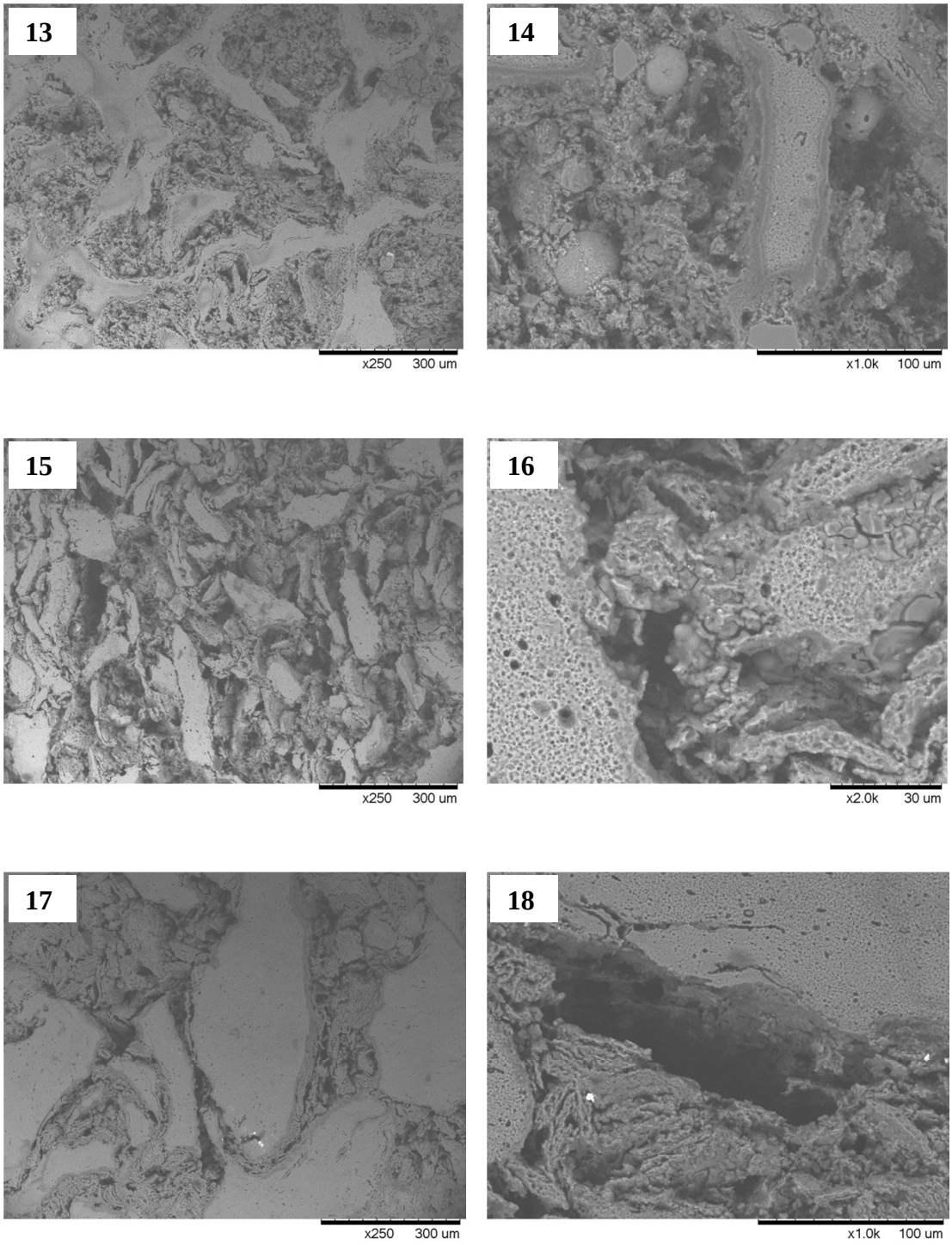
EK D



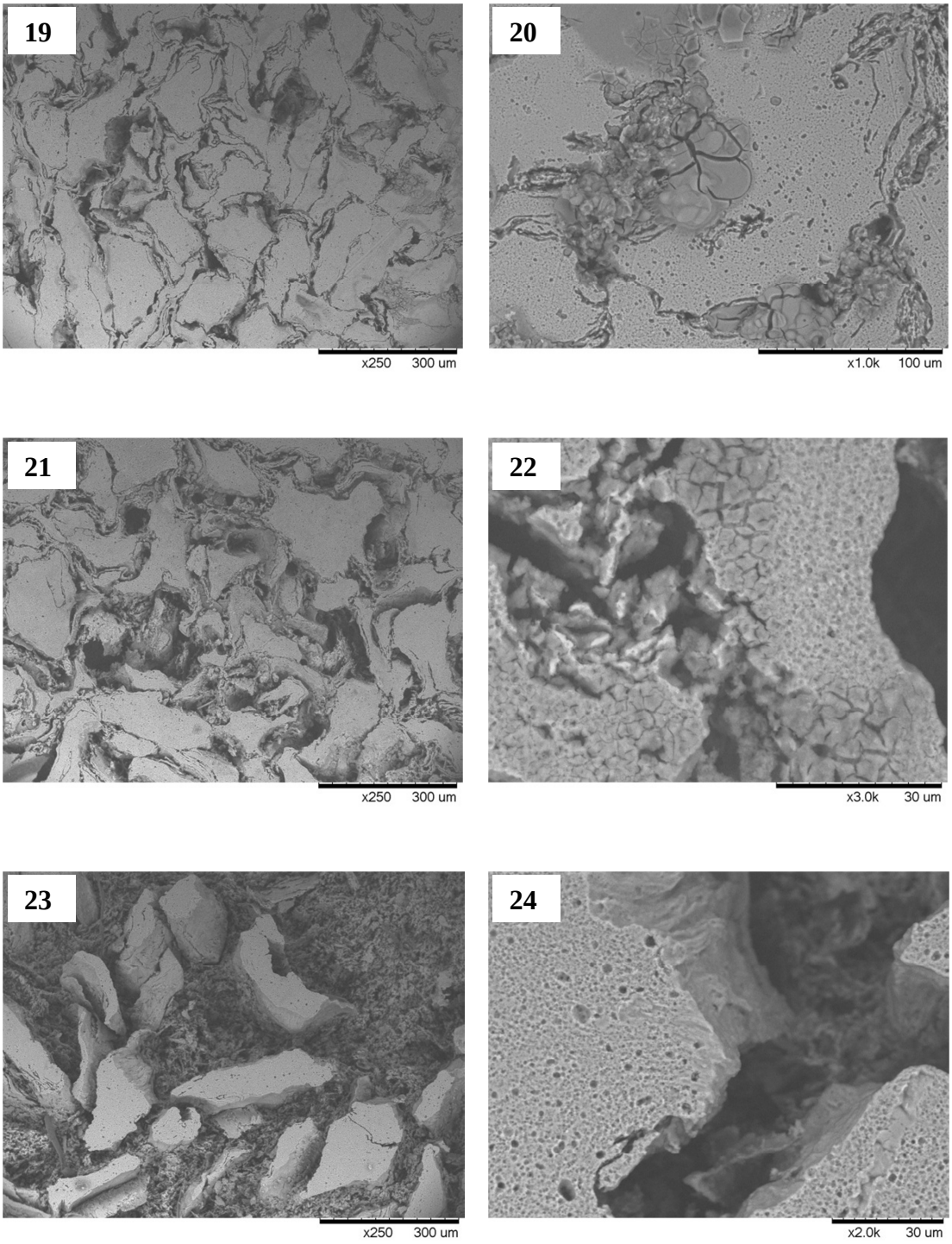
Şekil D.1: Korozyon yüzeyi SEM görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (1) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 100/1; %25 saf Al toz - %75 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm. (2) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı 100/1; %25 saf Al toz - %75 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm. (3) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ort. talaş boyutu 190 µm. (4) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ort. talaş boyutu 190 µm. (5) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %75 saf Al toz - %25 AA6061 talaş; orta. talaş boyutu 190 µm. (6) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %75 saf Al toz - %25 AA6061 talaş; ort. talaş boyutu 190 µm.



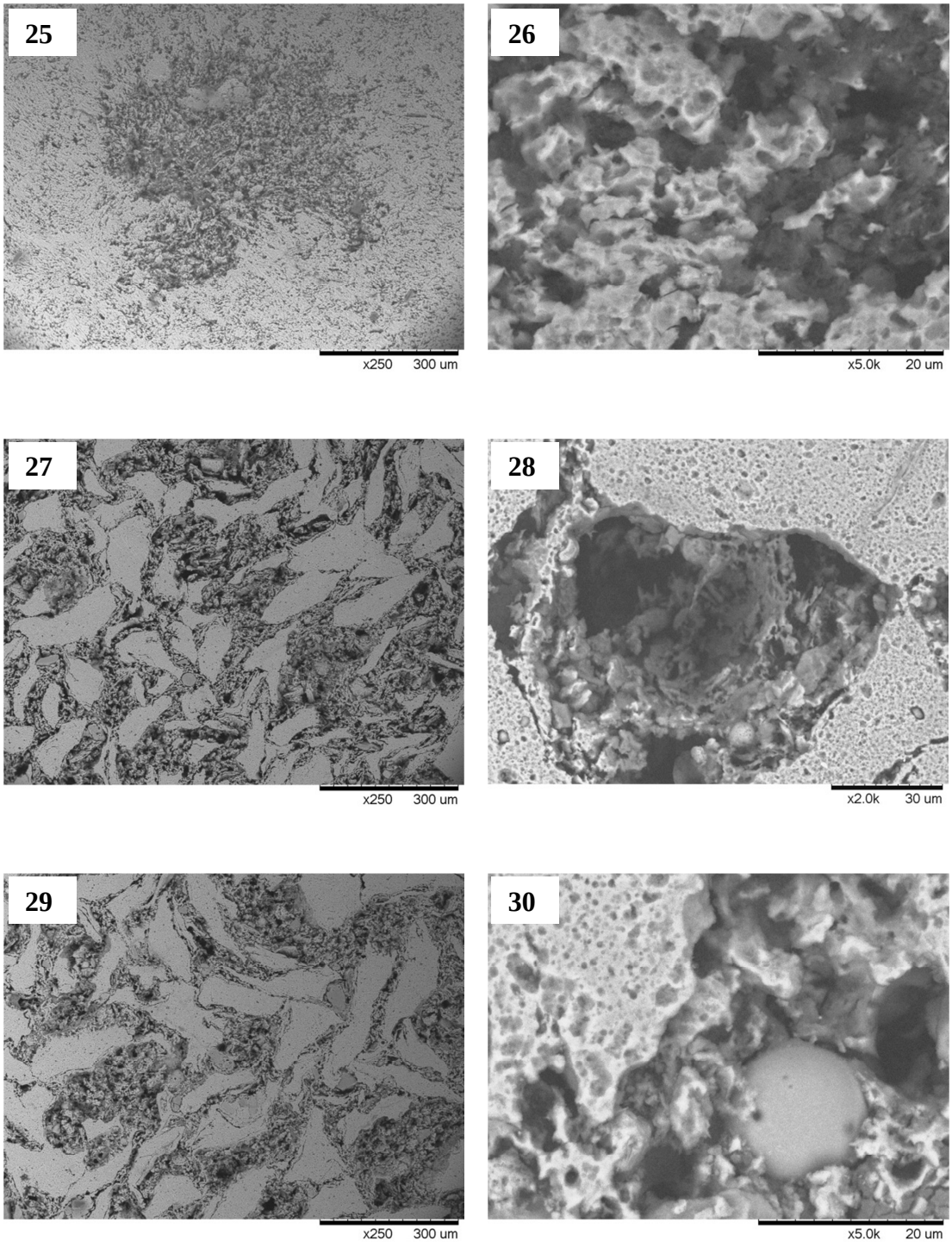
Şekil D.1 (devamı): Korozyon yüzeyi SEM görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (7) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %5 kül - %47,5 saf Al toz - Ağ. %47,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 μm. (8) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %5 kül - %47,5 saf Al toz - %47,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 μm. (9) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağ. or. 100/1; %10 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ort. talaş boyutu 190 μm. (10) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağ. or. 100/1; %10 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ort. talaş boyutu 190 μm. (11) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %15 kül - %42,5 saf Al toz - %42,5 AA6061 talaş; ort. talaş boyutu 190 μm. (12) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %15 kül - %42,5 saf Al toz - %42,5 AA6061 talaş; ort. talaş boyutu 190 μm.



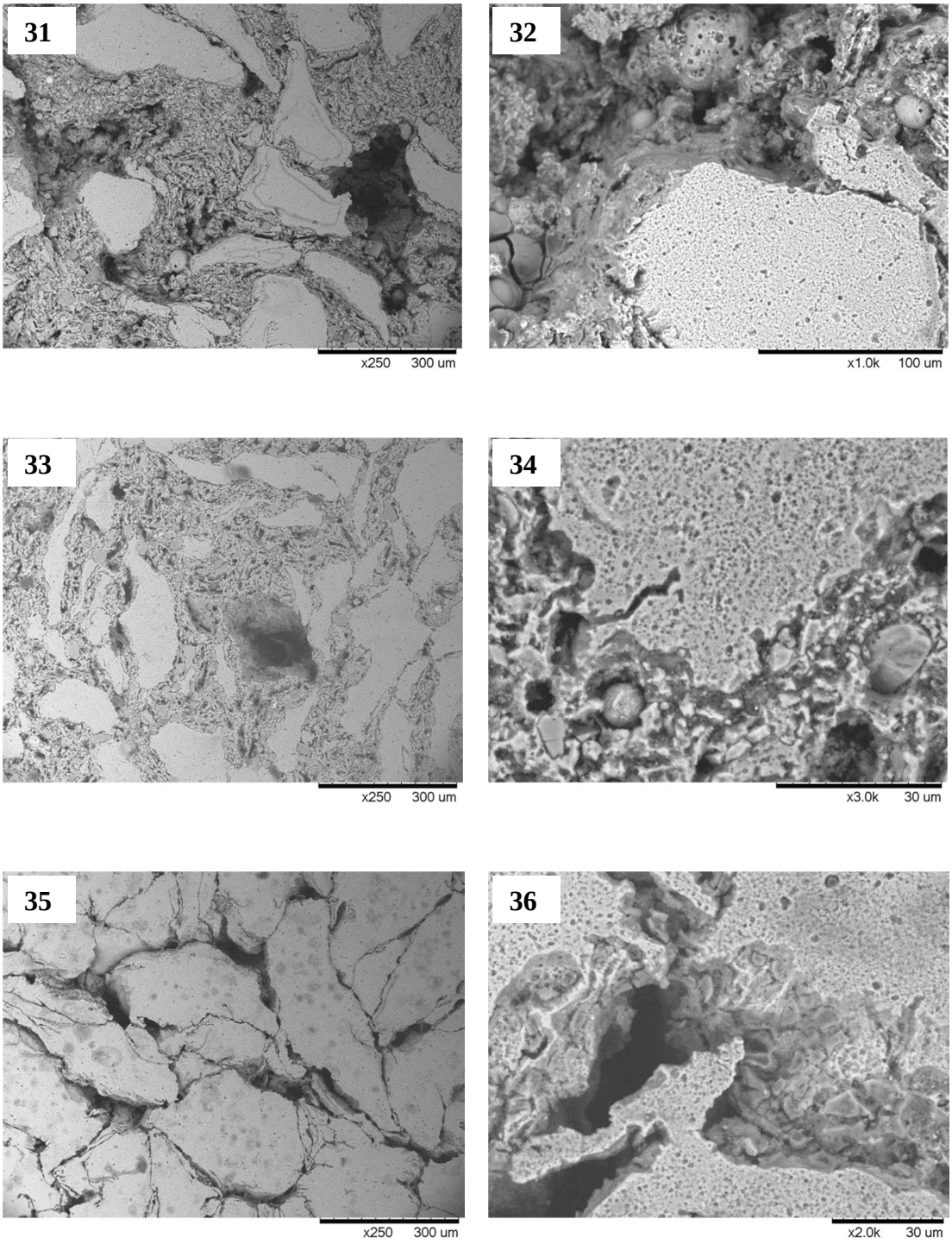
Şekil D.1 (devamı): Korozyon yüzeyi SEM görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (13) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağ. or. 100/1; %20 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ort. talaş boyutu 190 μm. (14) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağ. or. 100/1; %20 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ort. talaş boyutu 190 μm. (15) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 90 - 200 μm. (16) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=100/1; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 90 - 200 μm. (17) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz=100/1; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm. (18) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz=100/1; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm.



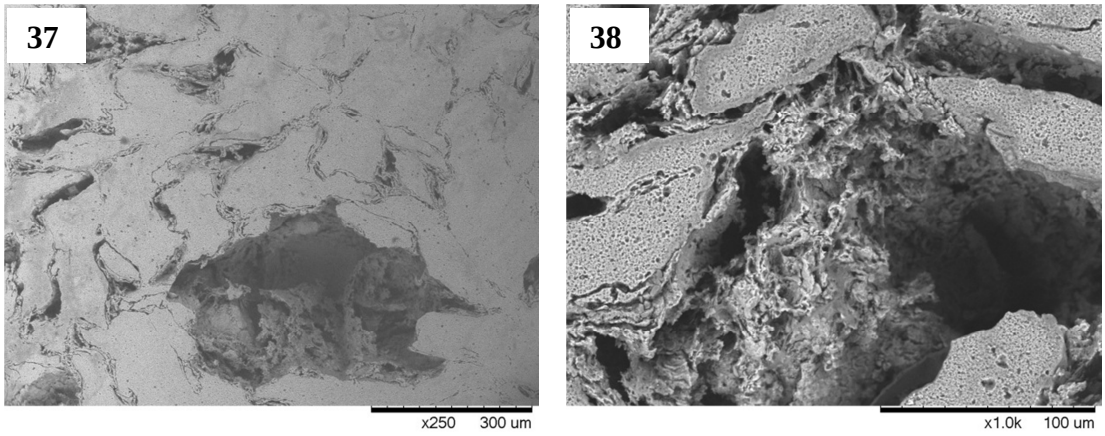
Şekil D.1 (devamı): Korozyon yüzeyi SEM görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (19) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %25 saf Al toz - %75 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 μm. (20) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %25 saf Al toz - %75 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 μm. (21) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 μm. (22) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 μm. (23) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %75 saf Al toz - %25 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 μm. (24) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %75 saf Al toz - %25 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 μm.

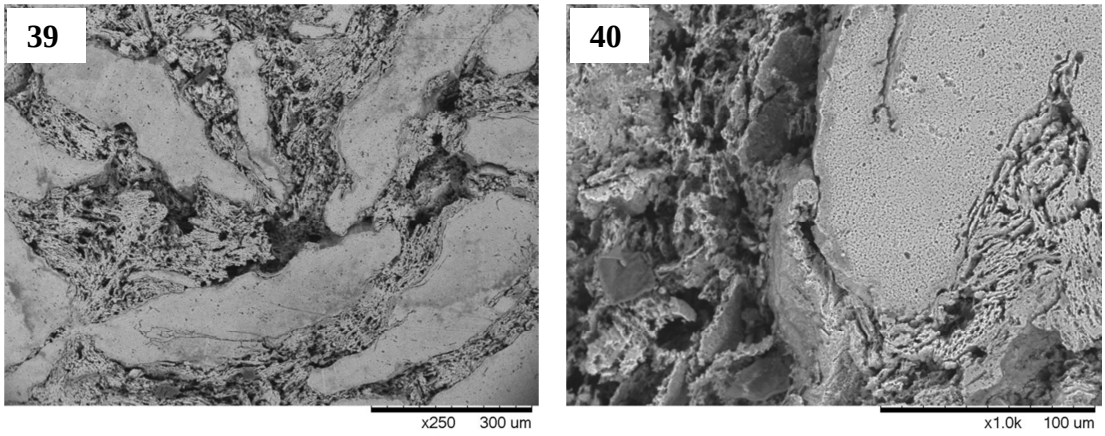


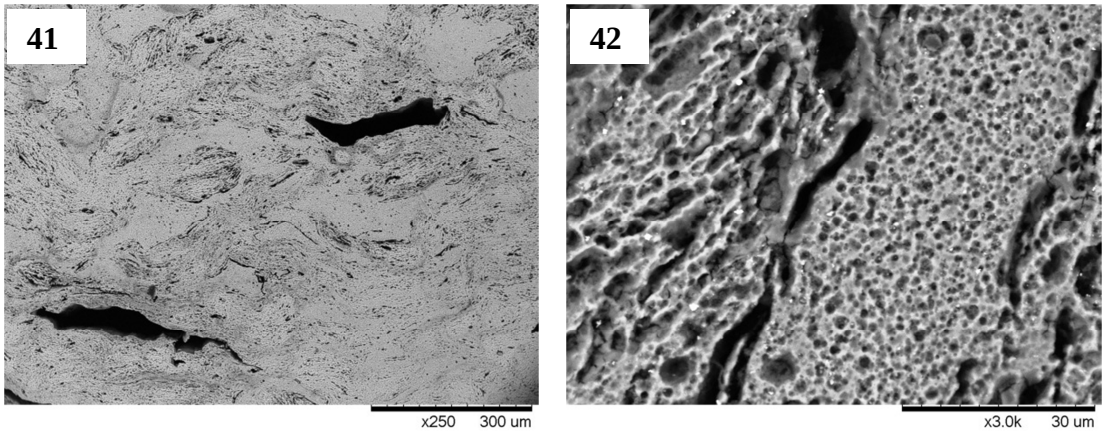
Şekil D.1 (devamı): Korozyon yüzeyi SEM görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (25) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %100 saf Al toz, ortalama toz boyutu 27 μm. (26) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %100 saf Al toz, ortalama toz boyutu 27 μm. (27) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %5 kül - %47,5 saf Al toz - %47,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 μm. (28) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %5 kül - %47,5 saf Al toz - %47,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 μm. (29) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %10 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 μm. (30) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %10 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 μm.



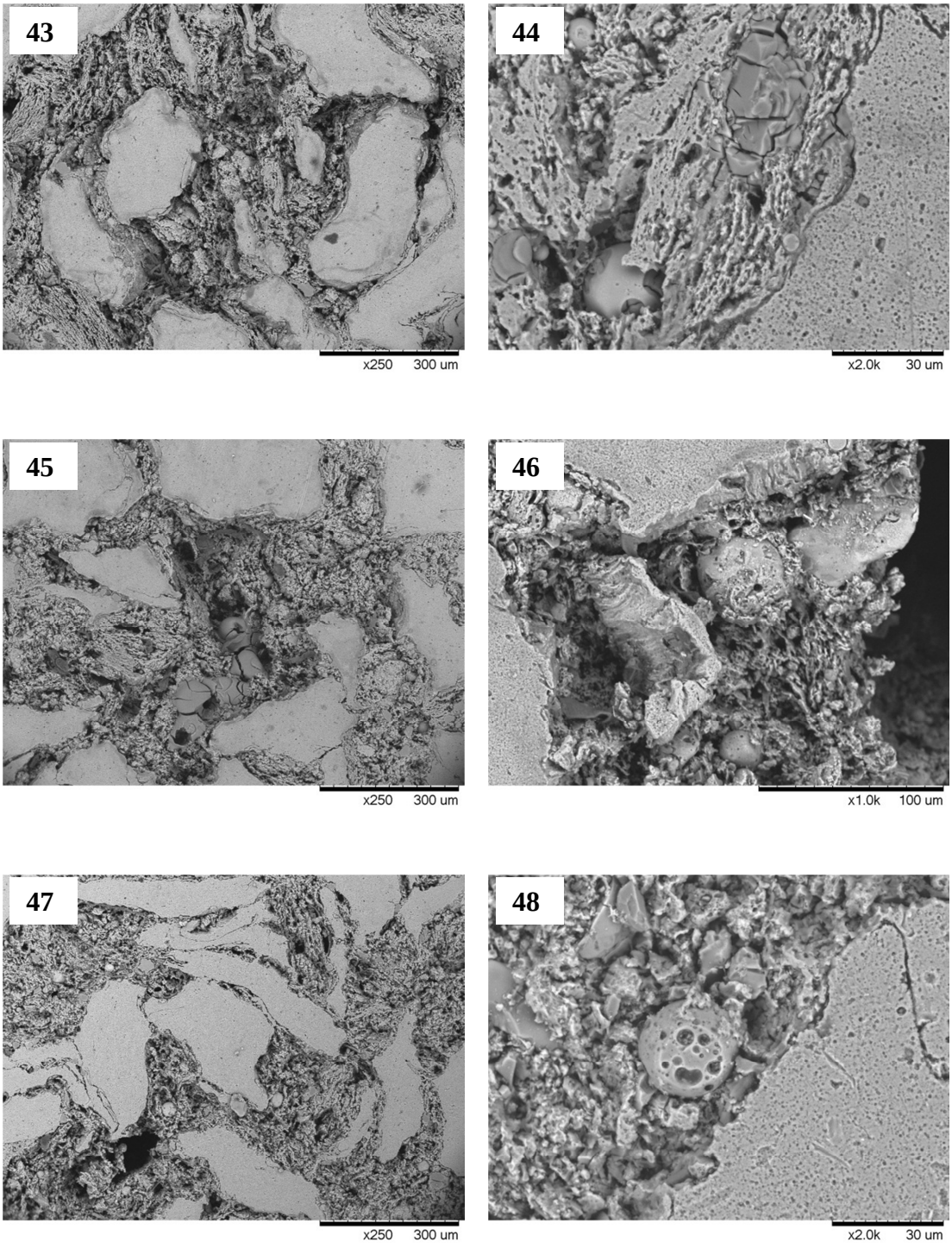
Şekil D.1 (devamı): Korozyon yüzeyi SEM görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (31) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %15 kül - %42,5 saf Al toz - %42,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 μm. (32) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %15 kül - %42,5 saf Al toz - %42,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 μm. (33) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %20 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 μm. (34) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %20 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 μm. (35) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %100 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm. (36) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %100 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm.



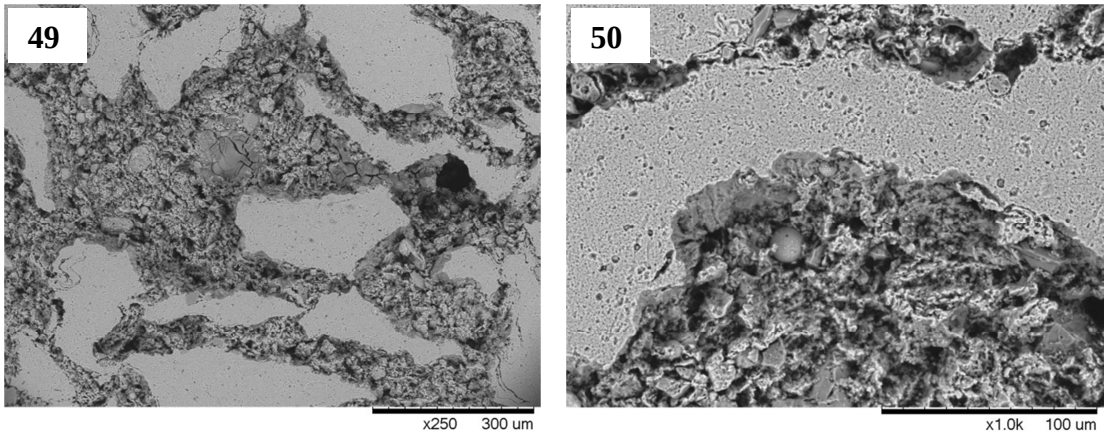


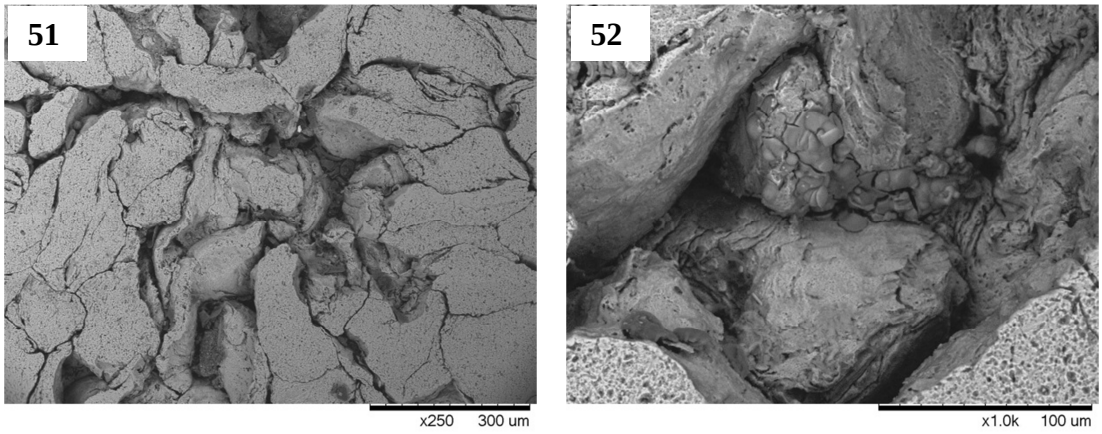


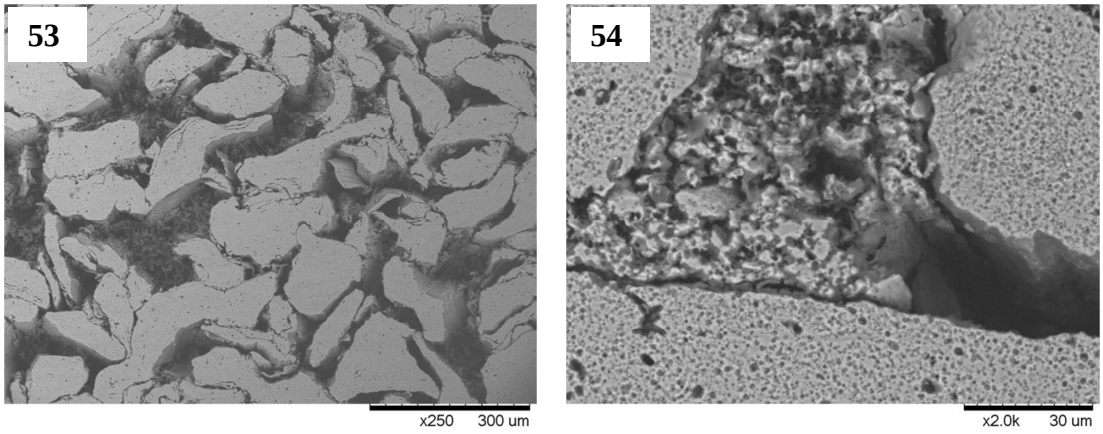
Şekil D.1 (devamı): Korozyon yüzeyi SEM görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (37) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %25 saf Al toz - %75 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm. (38) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %25 saf Al toz - %75 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm. (39) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm. (40) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm. (41) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %75 saf Al toz - %25 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm. (42) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %75 saf Al toz - %25 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm.



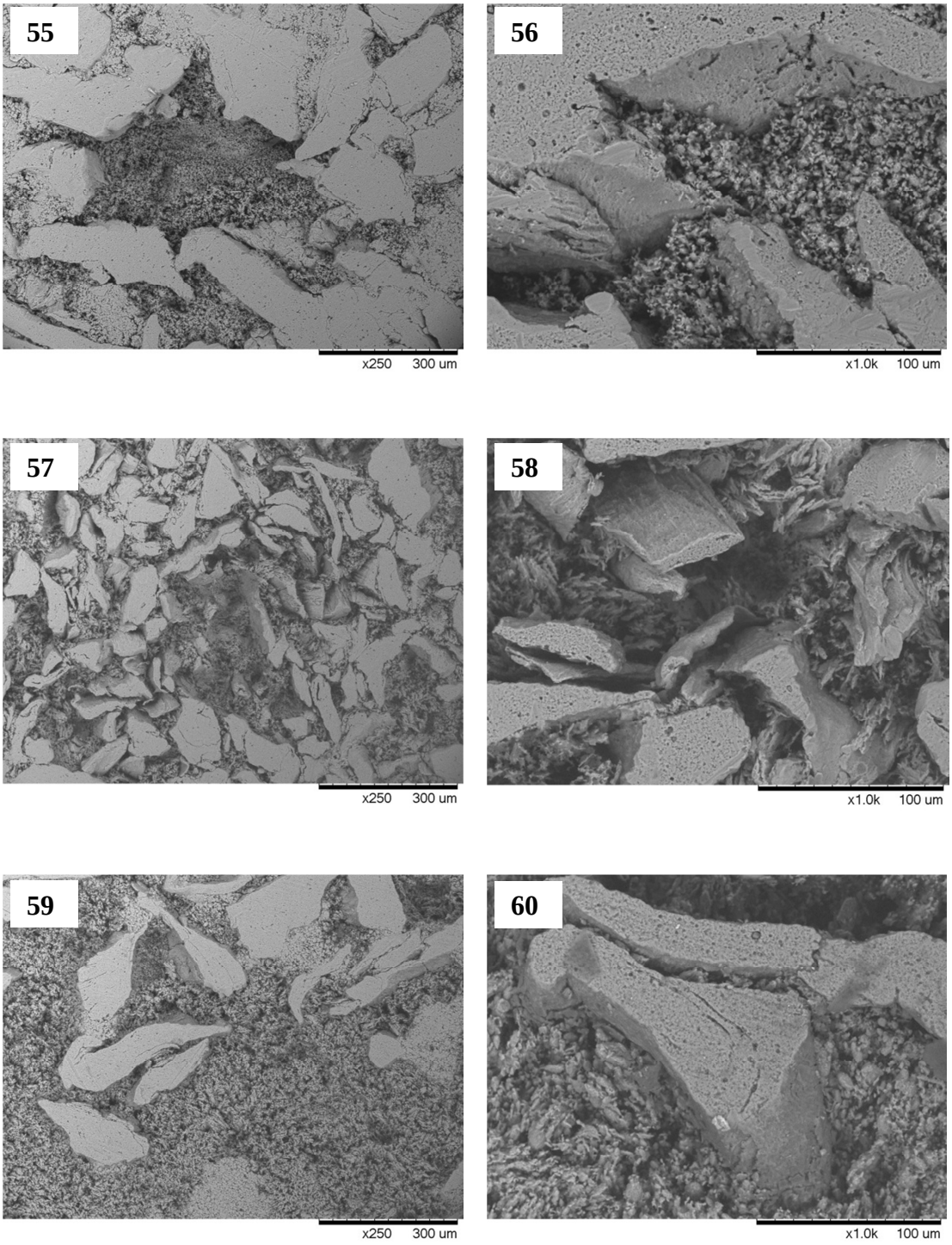
Şekil D.1 (devamı): Korozyon yüzeyi SEM görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (43) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağ. or. 32/1; %5 kül - %47,5 saf Al toz - %47,5 AA6061 talaş; ort. talaş boyutu 660 µm. (44) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağ. or. 32/1; %5 kül - %47,5 saf Al toz - %47,5 AA6061 talaş; ort. talaş boyutu 660 µm. (45) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağ. or. 32/1; %10 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ort. talaş boyutu 660 µm. (46) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağ. or. 32/1; %10 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ort. talaş boyutu 660 µm. (47) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %15 kül - %42,5 saf Al toz - %42,5 AA6061 talaş; ort. talaş boyutu 660 µm. (48) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %15 kül - %42,5 saf Al toz - %42,5 AA6061 talaş; ort. talaş boyutu 660 µm.



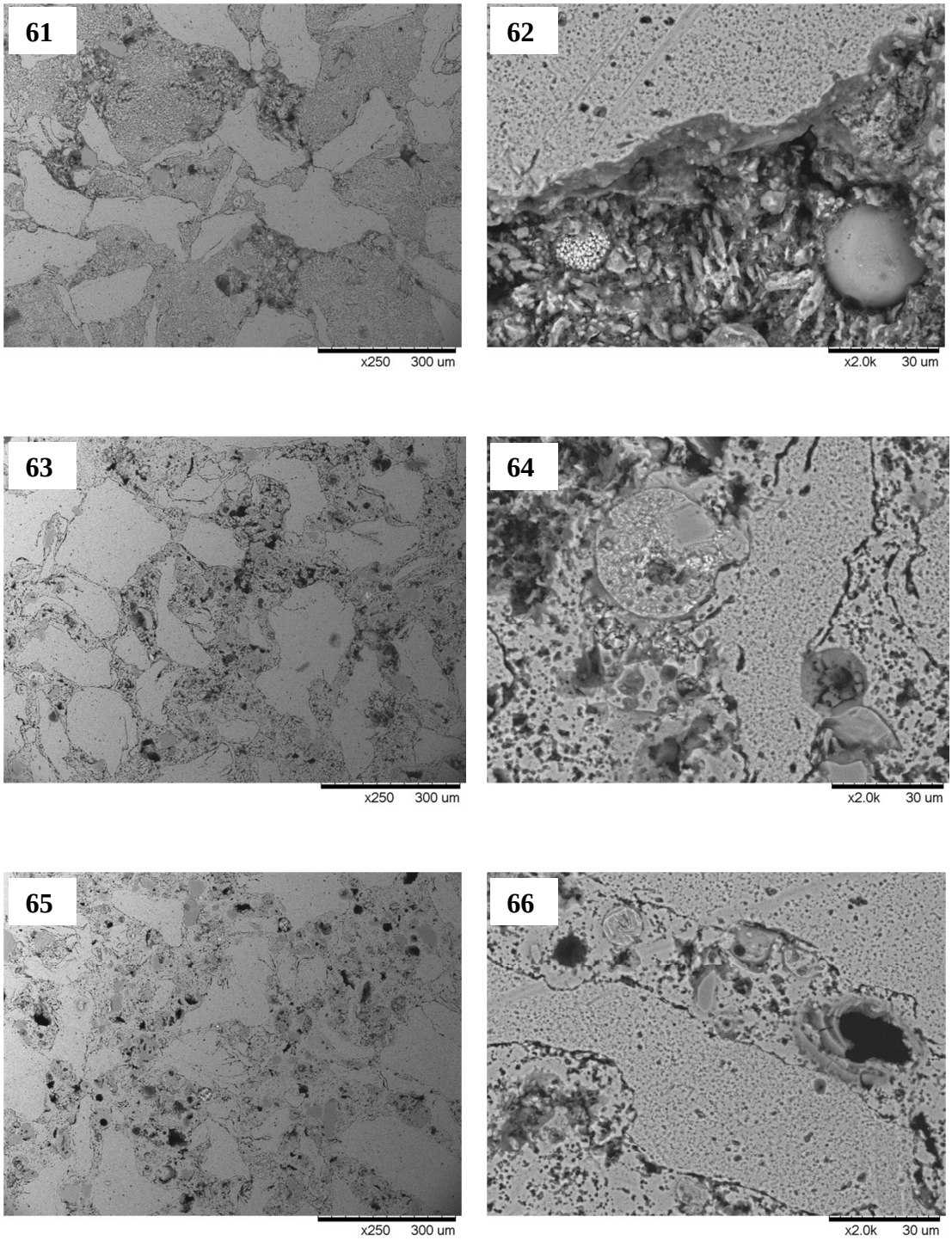




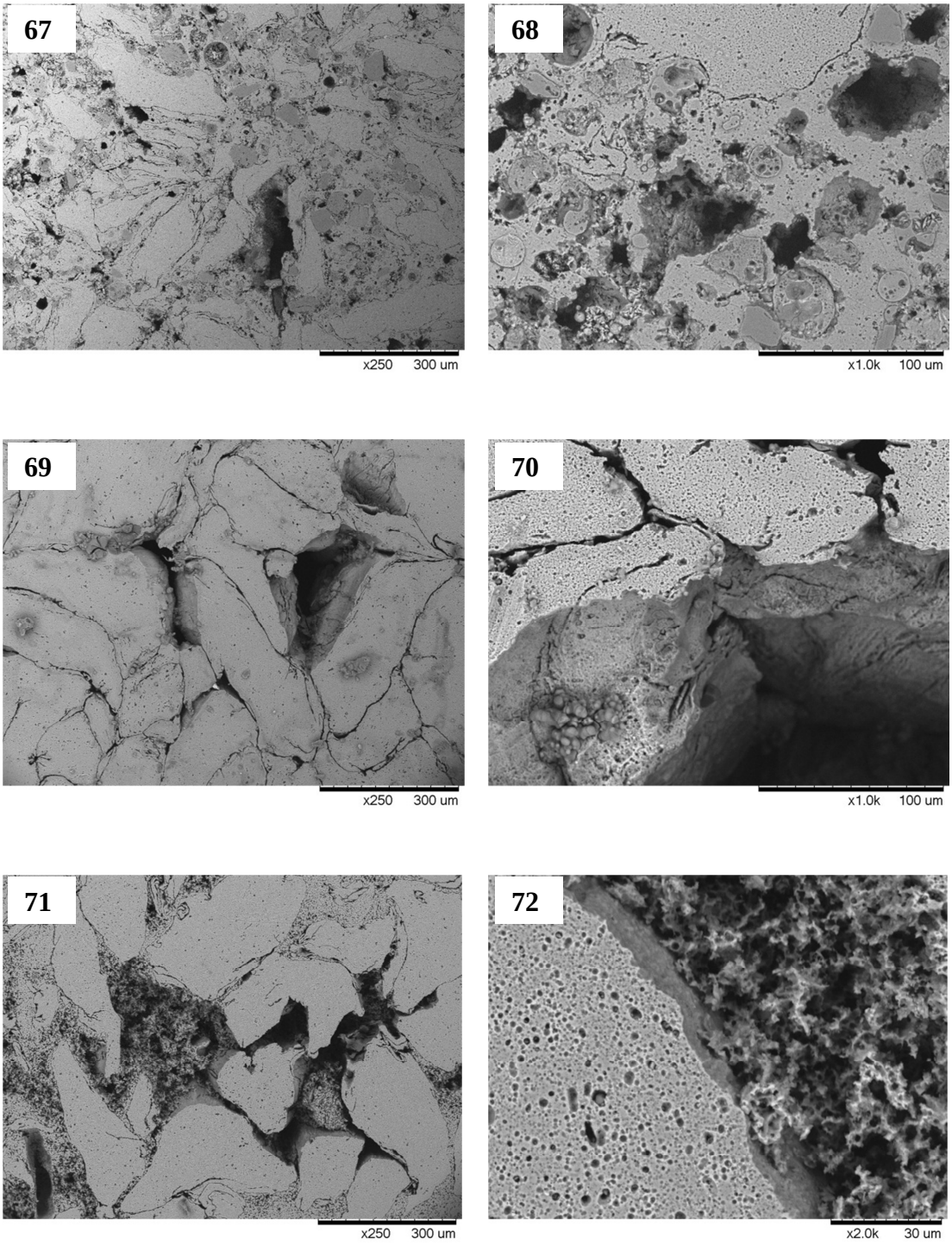
Şekil D.1 (devamı): Korozyon yüzeyi SEM görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (49) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %20 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm. (50) Kriyoöğütülmüş, bilya/toz ağırlık oranı=32/1; %20 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm. (51) Elle karıştırılmış; %100 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 μm. (52) Elle karıştırılmış; %100 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 μm. (53) Elle karıştırılmış; %25 saf Al toz - %75 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 μm. (54) Elle karıştırılmış; %25 saf Al toz - %75 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 μm.



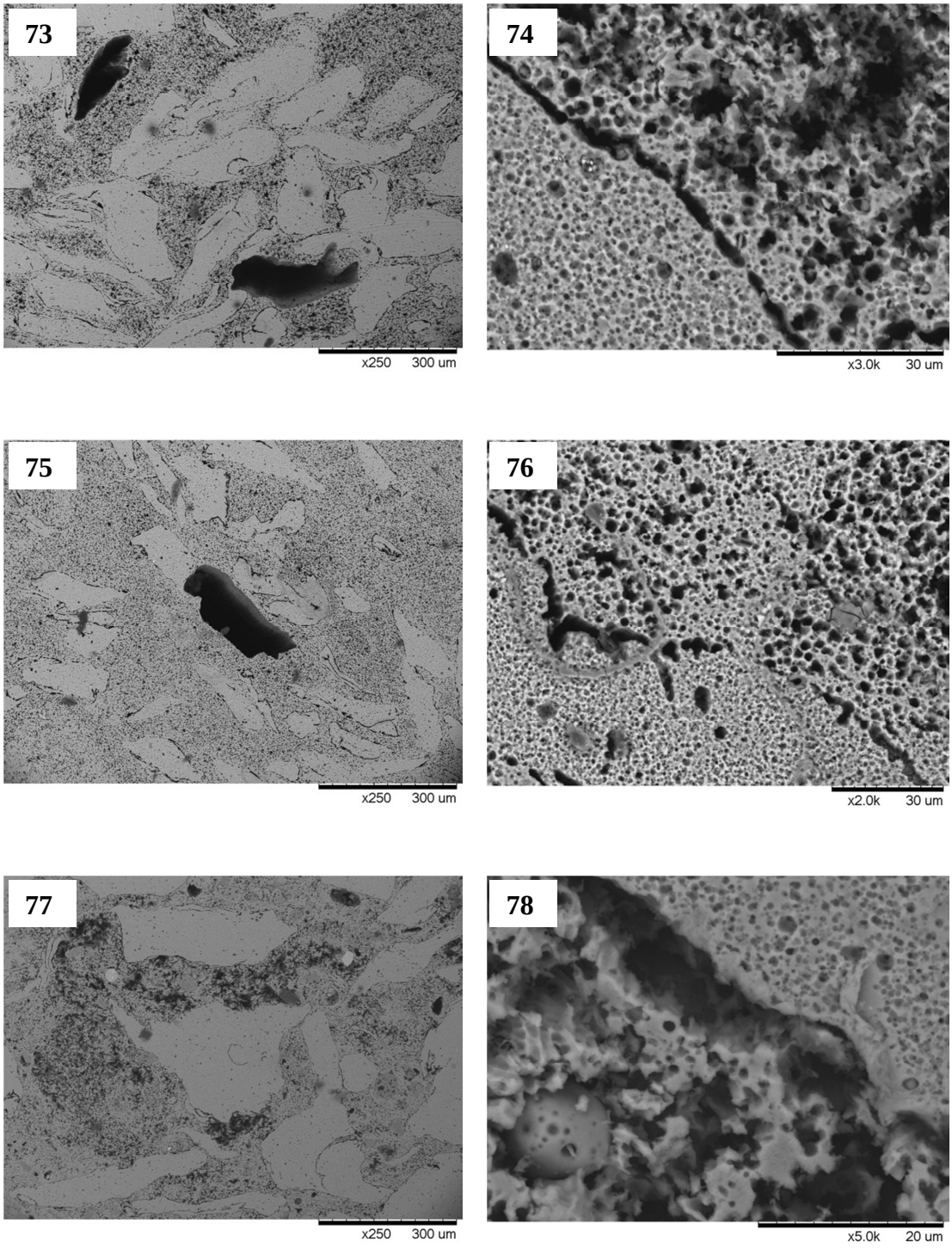
Şekil D.1 (devamı): Korozyon yüzeyi SEM görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (55) Elle karıştırılmış; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ort. talaş boyutu 190 μm. (56) Elle karıştırılmış; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ort.talaş boyutu 190 μm. (57) Elle karıştırılmış; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ort. talaş boyutu 90-200 μm. (58) Elle karıştırılmış; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ort. talaş boyutu 90-200 μm. (59) Elle karıştırılmış; %75 saf Al toz - %25 AA6061 talaş; ort. talaş boyutu 190 μm. (60) Elle karıştırılmış; %75 saf Al toz - %25 AA6061 talaş; ort. talaş boyutu 190 μm.



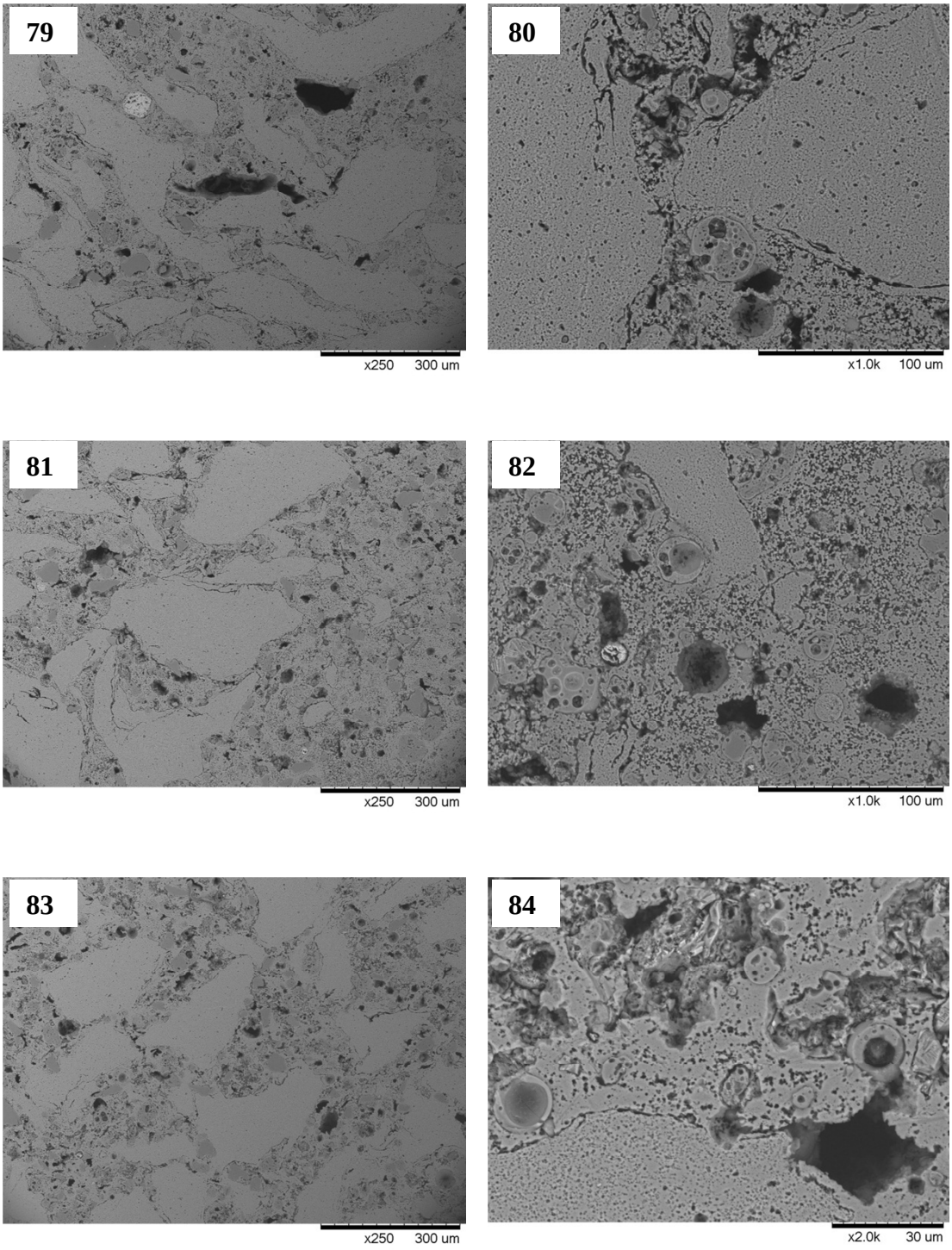
Şekil D.1 (devamı): Korozyon yüzeyi SEM görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (61) Elle karıştırılmış; %5 kül - %47,5 saf Al toz - %47,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm. (62) Elle karıştırılmış; %5 kül - %47,5 saf Al toz - %47,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm. (63) Elle karıştırılmış; %10 kül - %45 saf Al toz - %45 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm. (64) Elle karıştırılmış; %10 kül - %45 saf Al toz - %45 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm. (65) Elle karıştırılmış; %15 kül - %42,5 saf Al toz - %42,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm. (66) Elle karıştırılmış; %15 kül - %42,5 saf Al toz - %42,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm.



Şekil D.1 (devamı): Korozyon yüzeyi SEM görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (67) Elle karıştırılmış; %20 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm. (68) Elle karıştırılmış; %20 kül - %40 saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 190 µm. (69) Elle karıştırılmış; % 100 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm. (70) Elle karıştırılmış; % 100 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm. (71) Elle karıştırılmış; %25 saf Al toz - %75 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm. (72) Elle karıştırılmış; %25 saf Al toz - %75 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 µm.

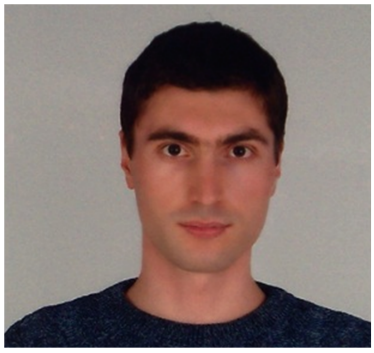


Şekil D.1 (devamı): Korozyon yüzeyi SEM görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (73) Elle karıştırılmış; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm. (74) Elle karıştırılmış; %50 saf Al toz - %50 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm. (75) Elle karıştırılmış; %75 saf Al toz - %25 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm. (76) Elle karıştırılmış; %75 saf Al toz - %25 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm. (77) Elle karıştırılmış; %5 uçucu kül - %47,5 saf Al toz - %47,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm. (78) Elle karıştırılmış; %5 uçucu kül - %47,5 saf Al toz - %47,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm.



Şekil D.1 (devamı): Korozyon yüzeyi SEM görüntüleri. % oran ağırlıkçadır. (79) Elle karıştırılmış; %10 uçucu kül - %45 saf Al toz - %45 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm. (80) Elle karıştırılmış; %10 uçucu kül - %45 saf Al toz - %45 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm. (81) Elle karıştırılmış; %15 uçucu kül - %42,5 saf Al toz - %42,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm. (82) Elle karıştırılmış; %15 uçucu kül - %42,5 saf Al toz - %42,5 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm. (83) Elle karıştırılmış; %20 uçucu kül - %40saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm. (84) Elle karıştırılmış; %20 uçucu kül - %40saf Al toz - %40 AA6061 talaş; ortalama talaş boyutu 660 μm.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Recep Vatansever

Doğum Yeri ve Tarihi: Haskova (Bulgaristan), 14.04.1983

Adres: Şirinkapı Mah. 1040/1 Sok. No: 6 Buca, İzmir

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi