

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**UÇUCU KÜL İÇEREN ALÜMİNYUM MATRİSLİ
KOMPOZİT ÜRETİMİ, ÖZELLİKLERİ VE
MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU**

85054

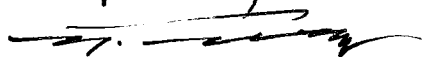
Mak. Yük. Müh. Sedat KOLUKISA

**F.B.E Metalürji Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programında
Hazırlanan**

**DOKTORA TEZİ
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

**Tez Savunma Tarihi
Tez Danışmanı
Jüri Üyeleri**

**: 28/04/1999
: Prof. Dr. Ahmet TOPUZ (Y.T.Ü)
: Prof. Dr. Kutsal TULBENTÇİ (İ.T.Ü)
: Prof. Dr. Mehmet KOZ (M.Ü)**

İSTANBUL, 1999

85054

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER	2
2.1 MMK Malzemelerin Uygulama Alanları	3
2.1.1 Rijitlik	3
2.1.2 Dayanım.....	4
2.1.3 Sürünme direnci	4
2.1.4 Aşınma direnci	4
2.1.5 Yoğunluk	5
2.1.6 Isıl genleşme	5
2.1.7 Diğer faktörler	6
2.2 MMK Malzemelerin Üretim Yöntemleri	8
2.2.1 Sıvı faz üretim yöntemleri	9
2.2.1.1 Basınçlı döküm ve infiltrasyon yöntemi.....	9
2.2.1.2 Sprey /yığma yöntemi	10
2.2.1.3 Harç döküm (compocasting)	10
2.2.1.4 Reaktif yöntem (‘in situ kompozitleri’).....	12
2.2.1.4.1 Ötektiklerin yönlü (kontrollü) katılaştırılması	12
2.2.1.4.2 Sıvı-gaz reaksiyon yöntemi	13
2.2.1.4.3 Sıvı-katı reaksiyon yöntemi	13
2.2.2 Katı faz üretim yöntemleri	14
2.2.2.1 Toz metalurjisi	14
2.2.2.2 Difüzyon bağı yöntemi ile MMK (folye) üretimi	14
2.2.2.3 Fiziksel buhar yığma (PVD)	15
2.2.3 MMK malzemelerin şekillendirilmesi (üretimde ikinci aşama)	16
2.2.3.1 Ekstrüzyon işlemi	16
2.2.3.2 Haddeleme, dövme ve izostatik presleme.....	17

3.	ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLER	19
3.1	Alüminyum Matrisli Kompozit Elemanları	19
3.1.1	Takviye elemanları	19
3.1.1.1	Yapılarına göre sınıflandırma	20
3.1.1.1.1	Oksit seramikler	20
3.1.1.1.2	Oksit olmayan seramikler	22
3.1.1.2	Şekillerine göre sınıflandırma	23
3.1.1.2.1	Partiküller	23
3.1.1.2.2	Süreksiz fiberler	24
3.1.1.2.3	Viskerler	24
3.1.2	Alüminyum matris	24
3.1.2.1	Alüminyum alaşımları	25
3.1.2.1.1	Alüminyum-silisyum alaşımları	26
3.1.2.1.2	Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemler	26
3.2	Üretim Yöntemleri	28
3.2.1	Karıştırma yöntemi	28
3.2.2	Harç döküm (compocasting)	29
3.2.3	Basınçlı döküm (infiltrasyon)	31
3.2.4	Toz metalürjisi	32
3.3	AMK Özellikleri	32
3.3.1	Mekanik özellikler	33
3.3.1.1	Elastiklik modülü "E"	33
3.3.1.2	Çekme dayanım	35
3.3.1.3	Sertlik ve aşınma direnci	38
3.3.1.4	Tokluk ve darbe direnci	39
3.3.1.5	Yorulma direnci	39
3.3.2	Fiziksel özellikler	39
3.3.2.1	Yoğunluk	40
3.3.2.2	Isıl genleşme ve ısı iletkenlik	40
4.	UÇUCU KÜL İÇEREN, DÜŞÜK MALİYETLİ AMK MALZEMELER .	42
4.1	Uçucu Küller (Fly Ash)	42
4.1.1	Uçucu küllerin tanımı	43
4.1.2	Uçucu küllerin sınıflandırılması	44
4.1.2.1	Kimyasal yapılarına göre	44
4.1.2.2	Elde edildiği kömür cinsine bağlı sınıflandırma	45
4.1.3	Uçucu küllerin mineralojik ve kimyasal yapısı	45
4.1.4	Uçucu küllerin fiziksel ve mekanik özellikleri	47
4.1.4.1	Görünüş	47
4.1.4.2	Tane boyutu	48
4.1.4.3	Yoğunluk	48
4.1.4.4	Ergime sıcaklığı	50
4.1.4.5	Manyetik özellik	50
4.1.4.6	Mekanik dayanım.....	50
4.1.4.7	Absorbsiyon özelliği	51

4.1.4.8	Suda çözünürlük	51
4.1.4.9	Puzolanik özellik	51
4.2	Uçucu Küllerin AMK Malzeme Üretiminde Kullanımları	52
4.2.1	Partikül dağılımı	52
4.2.2	Yoğunluk	53
4.2.3	Sertlik ve elastiklik modülü	53
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	55
5.1	Kompoziti Oluşturan Malzemeler	55
5.1.1	Alüminyum matris alaşımı	55
5.1.2	Takviye ve dolgu malzemeleri	56
5.2	Deney Seti	61
5.3	Deneyin Yapılışı	63
5.3.1	Karıştırma hızı, süresi ve sıcaklığı	64
5.3.2	Döküm sıcaklığı ve akışkanlık	64
5.4	Mekanik ve Fiziksel Özelliklerin Saptanması	64
5.4.1	Yoğunluk	65
5.4.2	Sertlik ve aşınma dayanımı	66
5.4.3	Çekme dayanımı ve % uzama oranları	71
5.4.4	Elastiklik modülü ve eğilme dayanımı	75
5.4.5	Darbe dayanımı	84
5.5	Mikroyapı Karakterizasyonu	85
5.5.1	Işık mikroskop görüntüleri	86
5.5.2	Görüntü analiz cihazında yapılan çalışmalar	89
5.5.3	Tarama elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri	95
6.	SONUÇLAR	99
KAYNAKLAR	101	
EKLER		
Ek 1	Yıldız Üniversitesi Kimya Metalürji Fakültesi Laboratuvarlarında Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihaz Fotoğrafları	104
Ek 2	Yıldız Üniversitesi Kimya Metalürji Fakültesi Laboratuvarlarında Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihaz Fotoğrafları	105
Ek 3	Yıldız Üniversitesi Kimya Metalürji Fakültesi Laboratuvarlarında Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihaz Fotoğrafları	106
ÖZGEÇMİŞ	107	

SİMGE LİSTESİ

σ	Çekme dayanımı
α	Isıl genleşme katsayısı
ρ	Yoğunluk
D	Dairesel kesitli numune çapı
d	Fiber çapı
E	Elastiklik Modülü
f	Sürekli fiberler
F	Tatbik kuvveti
I_x	Atalet (eylemsizlik) momenti
K	Isıl iletkenlik katsayısı
l	Fiber uzunluğu
l_c	Kritik Fiber uzunluğu
p	Partiküller
V_f	Karışım oranı (% hacimsel takviye oranı)
w	Süreksiz fiberler / viskerler
W_x	Mukavement momenti

KISALTMA LİSTESİ

AMK	Alüminyum Matrisli Kompozitler
ASTM	American Standards for Testing & Materials
ETİAL	Etibank Alüminyum
MMK	Metal Matrisli Kompozitler
PVD	Physical Vapour Deposition
SEM	Scanning Electron Microscope
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
XD	Exothermic Dispersion



ŞEKİLLER

Sayfa

1. BÖLÜM

2. BÖLÜM

Şekil 2.1	MMK malzemelerin fiber tiplerine bağlı olarak sınıflandırılması	2
Şekil 2.2	Alüminyum matris içindeki hacimsel % SiC oranına bağlı olarak ısı genleşme katsayısının değişimi ve buna eşdeğer bazı metal örnekleri	6
Şekil 2.3	Seramik partiküllerin SEM görüntüleri	8
Şekil 2.4	Al-%7 (ağırlık) Si / %20 (hacim) SiC _p kompozit mikroyapıları	11
Şekil 2.5	Ti matrisli, sürekli fiber takviyeli MMK'ler	16
Şekil 2.6	Ekstrüzyon sırasında ötelenen fiberlerin parçalanması	18
Şekil 2.7	Ekstrüzyon işleminde seramik yoğunluklu bant oluşumu	18

3. BÖLÜM

Şekil 3.1	Grafitin kristal yapısı	22
Şekil 3.2	Al-Si faz diyagramı	26
Şekil 3.3	Harç döküm yönteminin şematik görünümü	29
Şekil 3.4	Harç döküm yöntemi ile üretilen AMK şekillendirme teknikleri	30
Şekil 3.5	Al-7Si-0.6Mg alaşım matrisli ,hacimsel %10 SiC fiber takviyeli kompozit malzemenin içyapısı	30
Şekil 3.6	AMK malzeme üretiminde kullanılan basınçlı döküm teknikleri	31
Şekil 3.7	Basınçlı döküm (infiltrasyon) yöntemi ile üretilen AMK malzemenin içyapı görüntüsü	31
Şekil 3.8	Toz metalurjisi üretim yöntemi şematik gösterimi	32
Şekil 3.9	AMK malzemelerin teorik ve deneysel Elastiklik Modülü değerlerinin mukayesesi	34
Şekil 3.10	AMK malzemelerde, süreksiz fiber hacim oranlarının Elastik Modül üzerindeki etkileri	34
Şekil 3.11	Süreksiz fiber takviyeli AMK malzemelerin teorik ve deneysel çekme dayanım sonuçlarının mukayesesi	37

4. BÖLÜM

Şekil 4.1	Çöktürücü uçucu kül elek analizi	48
Şekil 4.2	Senosifir uçucu kül elek analizi	48
Şekil 4.3	Çöktürücü uçucu kül yoğunluklarının partikül boyutuna bağlı değişimi	49
Şekil 4.4	Senosifir uçucu kül yoğunluklarının partikül boyutuna bağlı değişimi	49
Şekil 4.5	A 356 Alüminyum matrisli, hacimsel %10 uçucu kül takviyeli AMK malzemelerin ışık mikroskop fotoğrafları	52
Şekil 4.6	AMK (A 356) malzemenin uçucu kül oranına bağlı yoğunluğunun değişimi.	53
Şekil 4.7	AMK (A 356) malzemenin uçucu kül oranına bağlı sertliğinin (HB)	54
Şekil 4.4	AMK (A 356) malzemenin uçucu kül oranına bağlı Elastiklik Modülünün değişimi	54

5. BÖLÜM

Şekil 5.1	Muhtelif uçucu küllerin yapı bileşenlerinin mukayesesi	57
Şekil 5.2	Uçucu küllerin yoğunluk tayininde kullanılan Le Chaltier şişesinin görünümü	57

Şekil 5.3	Uçucu kül (Yatağan) partikül boyutlarının % ağırlık oranları	60
Şekil 5.4	Uçucu kül (Kemerköy) partikül boyutlarının % ağırlık oranları	60
Şekil 5.5	Uçucu kül (Tunçbilek) partikül boyutlarının % ağırlık oranları	60
Şekil 5.6	Deneylerde kullanılan döküm seti (2kg kapasiteli) şematik görünümü.....	61
Şekil 5.7	Numunelerin döküldüğü kokil kalıpların şematik görünümü	62
Şekil 5.8	Seramik malzeme kaplı mikserin şematik görünümü	62
Şekil 5.9	Uçucu kül % hacimsel oranlarına bağlı kompozit yoğunluğunun değişimi ve teorik yoğunluklarla mukayesesi	66
Şekil 5.10	Üretilen AMK deney malzemelerinin % hacimsel takviye oranlarına bağlı olarak Brinell Sertlik değerleri (HB)	67
Şekil 5.11	Aşınma dirençlerinin tespitinde kullanılan tribometrenin şematik görünümü	68
Şekil 5.12	Üretilen kompozit malzemelerin, uçucu kül % hacimsel takviye oranlarına bağlı olarak aşınma miktarlarının mukayesesi (Aşındırıcı P 800)	69
Şekil 5.12	Üretilen kompozit malzemelerin, uçucu kül % hacimsel takviye oranlarına bağlı olarak aşınma miktarlarının mukayesesi (Aşındırıcı P 240)	70
Şekil 5.14	Çekme dayanımlarının % uçucu kül takviye oranlarına bağlı değişimi	74
Şekil 5.15	Uzama oranlarının, % uçucu kül takviye oranlarına bağlı değişimi	74
Şekil 5.16	Elastiklik modülünün tespitinde kullanılan deney düzeneği.(şematik)	75
Şekil 5.17	Uçucu kül takviyeli AMK malzemede Elastiklik modülünün, hacimsel % takviye oranlarına bağlı olarak değişimi	81
Şekil 5.18	Uçucu kül takviyeli AMK malzemede eğilme dayanımının (kırılma modülü) hacimsel % takviye oranlarına bağlı olarak değişimi	83
Şekil 5.19	Uçucu kül takviyeli AMK malzemede darbe dayanımının hacimsel % takviye oranlarına bağlı olarak değişimi	85
Şekil 5.20	Optik mikroskop incelemeleri için alınan numune kesitlerinin şematik görünümü	86
Şekil 5.21	Takviyesiz alüminyum alaşımlarının ışık mikroskop fotoğrafları	86
Şekil 5.22	ETİAL 171 (A360) Alüminyum matrisli Tunçbilek uçucu kül takviyeli kompozitlerin ışık mikroskop fotoğrafları	87
Şekil 5.23	ETİAL 171 (A360) Alüminyum matrisli Tunçbilek uçucu kül takviyeli kompozit numunelerinin dağlanmış yüzeylerinin ışık mikroskop fotoğrafları	88
Şekil 5.24	ETİAL 171 –Tunçbilek AMK numunelerin görüntü analiz cihaz mikroskobundan alınan fotoğraflar	94
Şekil 5.25	AMK numunenin SEM fotoğrafı	95
Şekil 5.26	AMK numunenin SEM fotoğrafı	95
Şekil 5.27	AMK numunenin SEM fotoğrafı	97
Şekil 5.28	ETİAL 171(A360) Alüminyum alaşımının kırılma yüzeyinin SEM fotoğrafı	96
Şekil 5.29	ETİAL 171- Tunçbilek AMK (%5) numunenin kırılma yüzeyinin SEM fotoğrafı	97
Şekil 5.30	ETİAL 171- Tunçbilek AMK (%5) numunenin kırılma yüzeyinin SEM fotoğrafı	97
Şekil 5.31	ETİAL 171- Tunçbilek AMK (%10) numunenin kırılma yüzeyinin SEM fotoğrafı	98
Şekil 5.32	ETİAL 171- Tunçbilek AMK (%10) numunenin kırılma yüzeyinin SEM fotoğrafı	98

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

1.	BÖLÜM	
2.	BÖLÜM	
Çizelge 2.1	MMK malzemelerin potansiyel uygulama alanları	7
Çizelge 2.2	Takviye şekline bağlı olarak, üretim yöntemlerinin karşılaştırılması	9
3.	BÖLÜM	
Çizelge 3.1	Seramik partikül(a), Seramik fiber (b), Visker (c) karakteristikleri	23
Çizelge 3.2	Çeşitli alüminyum alaşımların ısıtılma işlem karakteristikleri	27
Çizelge 3.3	Sürekli fiber takviyeli AMK dayanımına etki eden çeşitli faktörlerin karşılaştırılması	38
4.	BÖLÜM	
Çizelge 4.1	Çeşitli ülkelere ait uçucu kül karakteristikleri	44
Çizelge 4.2	C ve F tipi uçucu küllerin kimyasal kompozisyonu (% ağırlık)	46
Çizelge 4.3	T.S.E ve ASTM Standartlarına göre uçucu küllerin kimyasal bileşim oranları (% ağırlık)	46
Çizelge 4.4	Uçucu küller ve bazı malzemelerin, fiziksel ve mekanik özellikleri	47
Çizelge 4.5	Spesifik yüzeylerin yoğunlukla değişimi	50
5.	BÖLÜM	
Çizelge 5.1	Alüminyum alaşımlarının kimyasal analiz sonuçları	55
Çizelge 5.2	Alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri	56
Çizelge 5.3	Uçucu küllerin kimyasal analiz sonuçları	56
Çizelge 5.4	Çeşitli termik santrallerden sağlanan uçucu kül yoğunlukları	58
Çizelge 5.5	Yatağan termik santrali, elektro filtre altı uçucu kül elek analizleri	59
Çizelge 5.6	Kemerköy termik santrali, elektro filtre altı uçucu kül elek analizleri	59
Çizelge 5.7	Tunçbilek termik santrali uçucu kül elek analizleri	59
Çizelge 5.8	Bir (1) gr alüminyuma , % takviye oranlarına bağlı, kül miktarları	63
Çizelge 5.9	AMK malzemelerin teorik ve deneysel yoğunluklarının mukayesesi	65
Çizelge 5.10	Üretilen AMK malzemelerin ortalama Brinell Sertlik değerleri	67
Çizelge 5.11	Üretilen AMK malzemelerin aşınma dayanımlarının mukayesesi (P800)	69
Çizelge 5.12	Üretilen AMK malzemelerin aşınma dayanımlarının mukayesesi (P240)	70
Çizelge 5.13	Üretilen AMK malzemelerin çekme dayanımlarının deneysel sonuçları	72
Çizelge 5.14	Üretilen AMK malzemelerin % uzama oranları	73
Çizelge 5.15	Elastiklik modülü ve eğilme dayanım değerlerinin tespiti (takviyesiz)	76
Çizelge 5.16	Elastiklik modülü ve eğilme dayanım değerlerinin tespiti (tak.oranı %5).....	77
Çizelge 5.17	Elastiklik modülü ve eğilme dayanım değerlerinin tespiti (tak.oranı %10)	78
Çizelge 5.18	Elastiklik modülü ve eğilme dayanım değerlerinin tespiti (tak.oranı %15)	79
Çizelge 5.19	Elastiklik modülü ve eğilme dayanım değerlerinin tespiti (tak.oranı %20)	80
Çizelge 5.20	Üretilen AMK malzemelerin elastiklik modülü değerleri	81
Çizelge 5.21	Üretilen AMK malzemelerin eğilme dayanımları	83
Çizelge 5.22	Üretilen AMK malzemelerin darbe dayanımlarının mukayesesi	84
Çizelge 5.23	Üretilen AMK malzemelerin ($V_f = \%5$) görüntü analiz cihazı verileri.	90
Çizelge 5.24	Üretilen AMK malzemelerin ($V_f = \%10$) görüntü analiz cihazı verileri.	91
Çizelge 5.25	Üretilen AMK malzemelerin ($V_f = \%15$) görüntü analiz cihazı verileri.	92
Çizelge 5.26	Üretilen AMK malzemelerin ($V_f = \%20$) görüntü analiz cihazı verileri.	93

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarımın tüm safhalarında, derin bilgi ve deneyimini benimle paylaşan ve destek olan değerli danışman hocam, Sayın Dekanımız Prof. Dr. Ahmet TOPUZ başta olmak üzere, bölüm başkanımız Prof. Dr. Müzeyyen MARŞOĞLU'na, tüm hocalarıma, Uz. Menekşe AKIN'a , teknisyenlerimiz Şevki ŞAHİN'e, İbrahim KESKİN'e Ahmet ERBAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Sedat KOLUKISA

ÖZET

Son yıllarda, partikül takviyeli metal matrisli kompozitlere (MMK) , özellikle alüminyum alaşım matrisli olanlara ilgi gösterilmiştir. Bu ilginin sebebi, kaçınılmaz olarak oluşan darbe dayanımı ve kırılma tokluğunun azalmasına rağmen, seramik partiküllerin alüminyum alaşımlara katılmasıyla, elastisite modülünde (rijitlik), akma dayanımında, çekme dayanımında, aşınma dayanımında ve sertliğinde, hacimsel takviye oranlarına (V_f) bağlı olarak belirgin artışların sağlanmasıdır. Ayrıca ısı iletkenlik ve ısı genleşme değerleri de uygun olabilmektedir. Ancak çok iyi mekanik ve fiziksel özelliklere sahip kompozit malzeme üretimi, uygulanan üretim yöntemine ve kullanılan takviye (pekiştirici) malzemesine bağlı olarak yüksek maliyet ve üretim teknolojisi gerektirir. Kompozit üretimindeki sınırlayıcı bu faktörlerin elimine edilmesi amacı ile daha ucuz takviye elemanlarının ve üretim yöntemlerinin uygulanması ihtiyacı doğmuştur.

Bu çalışmamızda, kompozit malzeme üretim maliyetlerinin düşürülebilmesi ve termik santrallerin atık malzemesi olan düşük maliyetli uçucu küllerin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda ETİAL 171 (A360) ve ETİAL 120 (443) matris malzemesi olarak seçilen alüminyum alaşımlarına %5, %10, %15 ve %20 hacim oranlarda Tunçbilek ve Yatağan termik santrallerinden sağlanan uçucu kül ilavesiyle AMK malzemelerin üretimi gerçekleştirilmiştir.

AMK malzemelerin üretiminde karıştırma (stir-mix) yöntemi uygulanmıştır. Deneyler 750, 850, 950 °C ergime sıcaklıklarında ve 400, 560, 750 d/dak. karıştırma devir sayılarında, özel olarak tasarımı yapılan seramik kaplı karıştırıcı (mikser) kullanılarak yapılmıştır. Karıştırma ve döküm sıcaklığı , karıştırma hızı, mikser geometrisi gibi parametrelerin çok sınırlı bir aralıkta değişebilmesi, karıştırma safhasındaki oksidasyon meyli ve homojen partikül dağılımındaki güçlükler, üretimin sınırlayıcı etkenleri olarak sayılabilir. Ancak bu kısıtlayıcı engellerin giderilmesi ile ilgili öneriler, tezin bilgi akışı içinde sunulmuştur. Uygulanan üretim yöntemi ile alüminyum alaşım matrise, uçucu kül takviyesinin maksimum %20 (hacimsel) ile sınırlı olduğu gözlenmiştir. Bu oranın üzerindeki uçucu kül takviyelerinde, ıslatma kabiliyetinin hızla düştüğü ve akıcılığın kaybolduğu görülmüştür. Üretimi tamamlanan kompozit numunelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin tespiti amacı ile çekme, eğme, elastik modül, darbe, yoğunluk, sertlik, aşınma, testleri ile optik ve elektron mikroskopik mikro yapı ve kırılma yüzey incelemeleri yapılmıştır.

Deney sonuçlarında optimum değerler, 850 °C karıştırma sıcaklığında, 560 d/dak karıştırma devir sayısı koşullarında elde edilmiştir. Yapılan testler sonucunda hacimsel %15 takviye oranlarına kadar aşınma, çekme, eğme dayanımı, elastiklik modülü değerlerinde artış, kopma uzaması ve darbe dayanımında, hacimsel takviye oranlarının artması ile azalma görülmüştür. Böyle bir uygulama ile, özellikle büyük miktarlardaki ticari amaçlı kompozit üretiminde, uçucu kül takviyesi (dolgusu) ile alüminyum alaşım sarfiyatında, hacimsel takviye oranlarına bağlı olarak tasarruf sağlanabilecek ve atık bir malzeme olan uçucu küller, ucuz bir takviye elemanı olarak değerlendirilebilecektir.

ABSTRACT

In recent years there has been a great deal of interest in particulate-reinforced metal-matrix composites (MMCs), and in particular those based on existing aluminium alloys. This is because the addition of ceramic particles to aluminium alloys, as a function of volume fraction (V_f) can lead to improvements in elastic modulus, yield stress, tensile strength, wear resistance and hardness, although invariably accompanied by reductions in ductility and fracture toughness. Also controlled, low thermal expansivity and thermal conductivity meet engineering requirements. Despite these attractive properties, fabrication of composites having high mechanical and physical properties, requires advanced technology, regarding to the fabrication process and reinforcing chosen. To eliminate these restrictions on composite fabrication, application of low cost reinforcements and uncomplicated production process should be encouraged.

Cost saving in composite fabrication process, reinforcement, and utilisation of coal combustion by-products (fly ash) aimed in this research work. AMC's fabricated from ETİAL 171 (A360) and ETİAL 120 (443) aluminium alloys and Tunçbilek, Yatağan fly ashes were used as reinforcement with volume fractions %5, %10, %15, %20.

Stir mixing and casting process were used for the fabrication of fly ash containing aluminium-matrix composites (AMC's). Specially designed and ceramic covered mixer were used for string of melted aluminium alloy at 750, 850, 950 °C elevated temperatures and 400, 560, 750 rpm rotation rates. Variation of limited parameters such as, string and casting temperatures, string rate, mixer geometry, oxidation tendency, difficulties in homogeneity of particle distribution can be classified as a limitation of a fly ash containing AMC fabrication. Proposals for the elimination of these restrictions were presented in relevant sections. It has been observed that, with the applied fabrication process, maximum %20 (volume) fly ash can be added to aluminium alloy matrix. Addition of fly ash, over volume fractions ($V_{f\max}$) %20 tend to effect wetting ability and fluidity of aluminium alloy melt were also observed. Tensile, hardness, wear, elastic modulus, density, bend, impact tests applied to investigate mechanical and physical properties of fabricated AMK specimens and optical, scanning electron microscope micro graph were taken for microstructure characterisation.

Referring to the experimental data, optimum properties were achieved at 850 °C string temperature and 560 rpm mixer rotation rates. From the test results, up to % 15 reinforcement volume fractions, increase in wear resistance, hardness, tensile strength, elastic modulus and decrease in elongation and impact strength were observed as a function of reinforcement volume fraction (V_f). With this application, utilising low cost fly ash as a filler material, significant amount of aluminium alloy can be saved, in commercial fabrication of reinforced aluminium alloy tools.

BÖLÜM 1

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, şekil ve kimyasal bileşimleri farklı birbiri içerisinde pratik olarak çözünemeyen iki veya daha fazla sayıda makrobileşenin kombinasyonundan oluşan ve bileşenlerinden daha iyi özelliklere sahip ileri mühendislik malzemeleri olarak tarif edilebilir. Kompozit malzeme üretiminin, şekillendirilmesinin güçlükleri ve geri dönüşüm olanaklarının kısıtlı olması, özellikle metal matrisli kompozitlerde takviye malzemelerinin pahalı olması, bu malzemelerin ticari üretimine önemli bir engel olarak düşünülebilir. Bu amaçla son yıllarda kompozit malzeme üretiminde düşük maliyetli takviye elemanlarının kullanımı giderek önem kazanmıştır. [1, 2]

Bu düşünceden hareketle, termik santrallerin atık ürünü olan çok düşük maliyetli uçucu küller, çimento başta olmak üzere bir çok malzemenin üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Böylece daha düşük maliyetli malzemelerin üretimi gerçekleştirildiği gibi, çevreyi önemli ölçüde kirleten bu atık ürünün değerlendirilmesiyle bir anlamda çevrede korunmaya çalışılmıştır. Son zamanlarda yapılan bir çalışma neticesinde bazı termik santrallerin uçucu küllerinde kabul edilebilir sınırların üzerinde radyasyona rastlanması bu yan ürünlerin kullanımına bir kısıtlama getirmiştir.

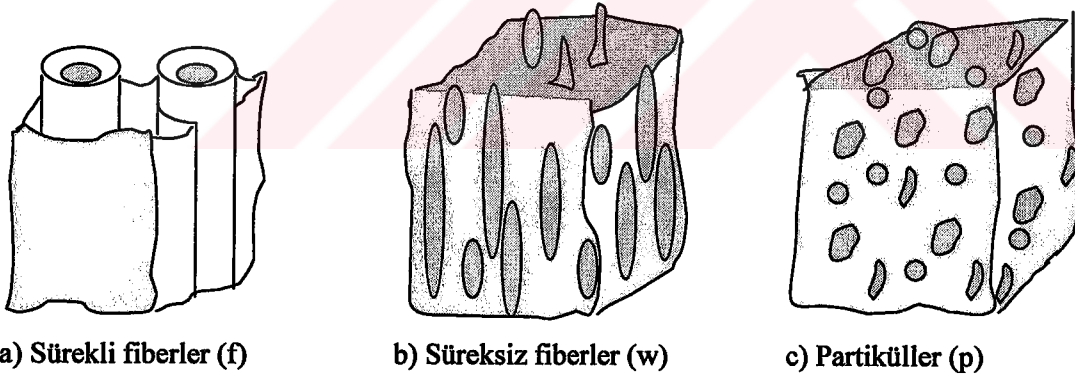
Bu çalışmamızda düşük maliyetli, alüminyum matrisli, uçucu kül takviyeli kompozit malzeme üretim olanakları, mekanik özellikleri, mikroyapı karakterizasyonu, değişkenlerin bu özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma sürecinde ve tezin yazımında akıcılık sağlamak amacı ile kompozit malzemeler hakkında genel bilgiler vermekten kaçınılmış, sadece çalışma konusu ile ilgili ve gerekli literatür ve deneysel çalışmalarından örneklerle konuya yaklaşım sağlanmıştır.

BÖLÜM 2

2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Son çeyrek asırda Metal Matrisli Kompozit malzemeler ile ilgili yapılan etkin çalışmalar, bu malzemelerin endüstri alanında kullanımlarına ve mühendislik uygulamalarına belirgin bir katkı sağlamıştır. Bu çalışmalar özellikle üretim yöntemlerinin geliştirilmesi, maliyetlerin düşürülmesi, yapı-özellik ilişkileri, bileşenlerin tasarımı konularında ağırlık kazanmıştır. [1]

Metal matrisli kompozitlerde genel olarak seramik takviye malzemelerinin yanı sıra refrakter metalsel malzemelerde kullanılır. Metal matrisli kompozitler takviye elemanının şekline bağlı olarak, sürekli fiberler (f), süreksiz fiberler/viskerler (w), partiküller (p) olarak sınıflandırabilirler. [1]



Şekil 2.1 MMK malzemelerin fiber tiplerine bağlı olarak sınıflandırılması. [1]

Metalsel malzemelerin yüksek ergime sıcaklıkları, polimer sistemlerine göre çok daha yüksek sıcaklıklarda üretim ve şekil verme yöntemlerinin kullanılmasını zorunlu hale getireceğinden, MMK malzemelerin mekanik özelliklerinin düşmesine neden olan fiber matris reaksiyonları görülebilir. MMK malzemelerin üretiminde kullanılan grafit, bor, silisyum karbür, alümina gibi refrakter karakterli, yüksek mekanik özellik kazandırabilen takviye elemanlarının üretimi ileri teknoloji gerektiren pahalı yöntemlerdir. Ayrıca sıvı halde üretim yönteminde, ergimiş metalin takviye elemanlarını ısıtmaması, matris

metalinin oksidasyonu, homojen bir yapının elde edilememesi ve dökümde akıcılığın sağlanamaması gibi zorluklar bu malzemelerin üretiminde görülebilecek engeller olarak bilinmeli ve bu yönde gerekli önlemler alınmalıdır. [1, 2]

MMK malzemelerin yüksek dayanım, elastik modül, tokluk ve darbe dayanımı , sertlik ve aşınma direnci, ısı dayanımı gibi, mekanik ve fiziksel özelliklerinin istenilen düzeyde olması metal matrislerin özellikleri ile ilgili olduğu kadar takviye malzemelerinin yapısına, dağılımına, şekline, boyutlarına ve karışım oranlarına da bağlıdır. Uygun üretim yöntemleri, matris ve takviye malzemeleri ile ilgili parametrelerin kontrollü kombinasyonu, yapıya bağlı olarak seçilen ısı işlem koşullarının değerlendirilmesi, MMK malzemelerin değişik özelliklerde üretilmesine olanak sağlar. Ekonomik koşulların, yeterli bilgi iletişiminin sağlanması ve bitmiş malzemeler için uygulama alanlarının doğru seçilmesi bu malzemelerin yaygın olarak üretilmesini ve kullanılmasını artırabilir. [1, 2]

2.1 MMK Malzemelerin Uygulama Alanları

MMK malzemelerin üretimindeki zorluklara rağmen, bu malzemelerin klasik malzemelere olan üstünlükleri, endüstride geniş bir uygulama alanı bulmasına sebep olmuştur. Bu özellikler ve buna bağlı uygulama alanları aşağıda özet olarak verilmiştir.

2.1.1 Rijitlik

MMK malzemelerin, özgül rijitlik ve rijitliğin artırılması ile ilgili potansiyel oluşturması, bu malzemelerin kullanılmasını cazip hale getirir. Rijitlik bir çok mühendislik bileşeni için kritik tasarım parametresidir. Çünkü aşırı elastik sapmanın önlenmesi veya buna karşı direncin artırılması oldukça zor bir olaydır. Dönen parçalar, destek parçaları gibi birçok makina elemanlarının tasarımı için metalsel malzemeler, tokluk, yüksek dayanım, şekillendirilebilme, çeşitli imalat yöntemleri gibi özellikleri sağlarlar. Ancak bazı istisnalar dışında (örneğin Al-Li) küçük katkılarla ve mikro yapının kontrol edilmesiyle rijitliğin artırılması hedeflenemez. Uzay araçlarının bazı parçalarının yapımında, kırılma ve tokosit problemlerine rağmen berilyum gibi pahalı ve zor malzemelerin kullanılması gerekli olabilir.

Rijitliğin ön planda arandığı, transmisyon elemanları, hassas ölçü aletleri, bisiklet türü binek araçların gövdeleri, yat direkleri, sondaj tijleri MMK malzemelerin uygulama alanları için birer örnektir. Ekstrüzyon yöntemi ile Al-SiC_p üretilen 10 m uzunluğunda ve 45 cm çapında yelken direği, tek parçada imal edilebilmiştir. Uzay mekiklerinin Al-%60 bor fiber kompozit malzemeden imal edilen kargo bölümlerinin iskeleti, MMK malzemeler için kritik bir özgül rijitlik uygulaması olarak söylenebilir. [1, 3]

2.1.2 Dayanım

Takviye elemanları ile malzeme dayanımının, buna bağlı olarak akma sınırının, yorulma dayanımının yükseltilmesi bir çok tasarımda gerekli bir faktördür. Ancak bu mekanik özelliklerin iyileştirilmesi çoğu zaman kırılma tokluğunun azalmasına neden olur. Genelde, MMK malzemeler yüksek dayanım (en azından oda sıcaklığında) özelliklerinden dolayı çok az uygulama alanı bulurlar. Bununla birlikte, uçakların iniş takımlarında yüksek dayanımlı, düşük tekrarlı yorulma direncine sahip alaşımlara (Ti-6Al-4V) alternatif olarak MMK malzemelerin kullanılması daha uygun olabilir.[1, 3, 4, 5]

2.1.3 Sürünme direnci

Özellikle sürekli fiberlerden imal edilen MMK malzemeler sürünme direncinin etkin olarak artırılması konusunda potansiyel oluşturmaktadır. Bu potansiyele bir örnek gaz türbinlerinin jet motorlarıdır. Burada amaç nikel bazlı rotor bıçaklarının ve arka disklerin (sıcak alanlardaki) daha hafif malzemelerden imal edilmesidir. Titanyum bu iş için en iyi aday malzemeler arasında bulunmasına rağmen, sürünme direncinin zayıf olması engel teşkil etmektedir. Titanyum matrisin sürekli seramik fiber takviyesi ile, sürünme dirençleri ve rijitlikleri artırılarak MMK malzemelerin kullanımları cazip hale getirilebilecektir. [1,3]

2.1.4 Aşınma direnci

MMK malzemelerin uygulama amaçlarına uygun, aşınma hızının en az on kat azaltılabilmesi için, değişik aşınma şartlarına bağlı olarak çeşitli takviye malzemeleri kullanılır. Ayrıca maliyetlerin düşürülmesi, yeterli ısı iletkenliğinin sağlanması amacı ile

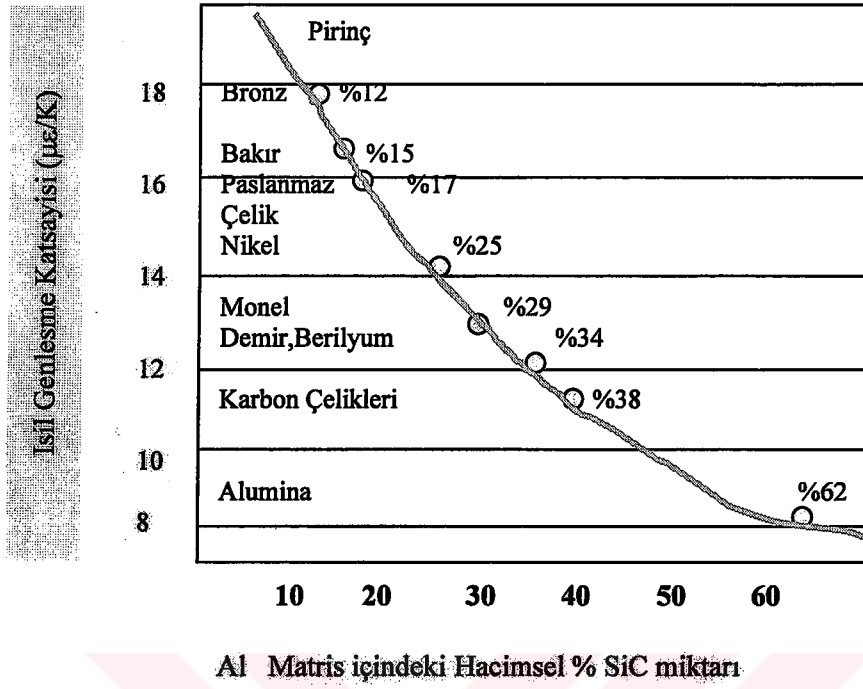
sadece aşınan veya aşınma riski olan yüzeylere takviye uygulanabilir. Genelde aşınma direnci gereksinimi, tokluk, rijitlik, ısıya dayanıklılık ve iyi ısı iletimi gibi diğer özelliklerle birleştirilerek uygulanır. [1, 3]

2.1.5 Yoğunluk

Yoğunluk, MMK malzemelerin uygulama alanları için cazip bir özelliktir. Bazı uygulamalarda takviye malzemesinin yapısına bağlı olarak yoğunluk artabilir ancak bu artış, dayanım ve rijitliğin artması ile dengelenir. Diğer bir çok uygulamada MMK malzemenin yoğunluğunun belirgin olarak düştüğü gözlemlenebilir. Dayanım, rijitlik gibi bir çok mekanik özelliklerden taviz vermeksizin daha hafif kompozit malzemelerin üretimi mümkündür. Örneğin gaz türbinlerinde nikel süper alaşımı yerine seramik takviyeli nikel matrisli kompozit malzemelerin kullanılması ağırlık yönünden avantaj sağlar, ancak yüksek sıcaklıklarda ara yüzey reaksiyonlarını önlemek oldukça problem arzedebilir. [1, 3]

2.1.6 Isıl genleşme

Seramiklerin düşük ısı genleşme özelliklerinden yararlanılarak, değişik ısı genleşme katsayısına ve özelliğine sahip kompozit malzemelerin üretimi mümkün olur. Bu özelliklerden yararlanılarak değişik oranlarda kullanılan seramik takviye malzemeleri ile üretilen MMK malzemeler, mikroelektronik parça imalatında, hassas ölçme cihazlarında, ve düşük ısı genleşme özelliği aranan cihaz parçalarının imalinde kullanılırlar. [6] Uydu anten direkleri, dalga kılavuzu, gibi eksensel rijitliğin önemli olduğu yerlerde çok düşük ısı genleşme katsayılı (sıfıra yakın) MMK malzemeler ($Al-C_f$) başarıyla kullanılmaktadır. $Al-SiC_p$ MMK malzemelerinde, hacimsel % SiC takviyesinin ısı genleşme katsayısı üzerindeki etkisi ve buna eşdeğer çeşitli metalsel malzemelerin ısı genleşme katsayıları Şekil 2.2’de verilmiştir. [1]



Şekil 2.2 Alüminyum matris içindeki hacimsel % SiC oranına bağlı olarak ısıl genleşme katsayısının değişimi ve buna eşdeğer bazı metal örnekleri. [1]

2.1.7 Diğer faktörler

MMK malzemelerin uygulama alanları bu malzemelerin sağladığı mekanik özelliklere bağlıdır. Ancak ticari uygulamalar için seri üretim olanakları ve üretim maliyetleri de çok önemlidir. Uzay araştırmaları, hava taşımacılığı gibi büyük projelerde bu malzemelerin üretim maliyetleri çok önemli olmayabilir ancak günlük kullanım araçlarında, bu malzemelerin üretimi için, fizibilitelerin sağlıklı olarak yapılması önemlidir. MMK malzemelerin potansiyel uygulama alanları Çizelge 2.1’de verilmiştir. [1, 2]

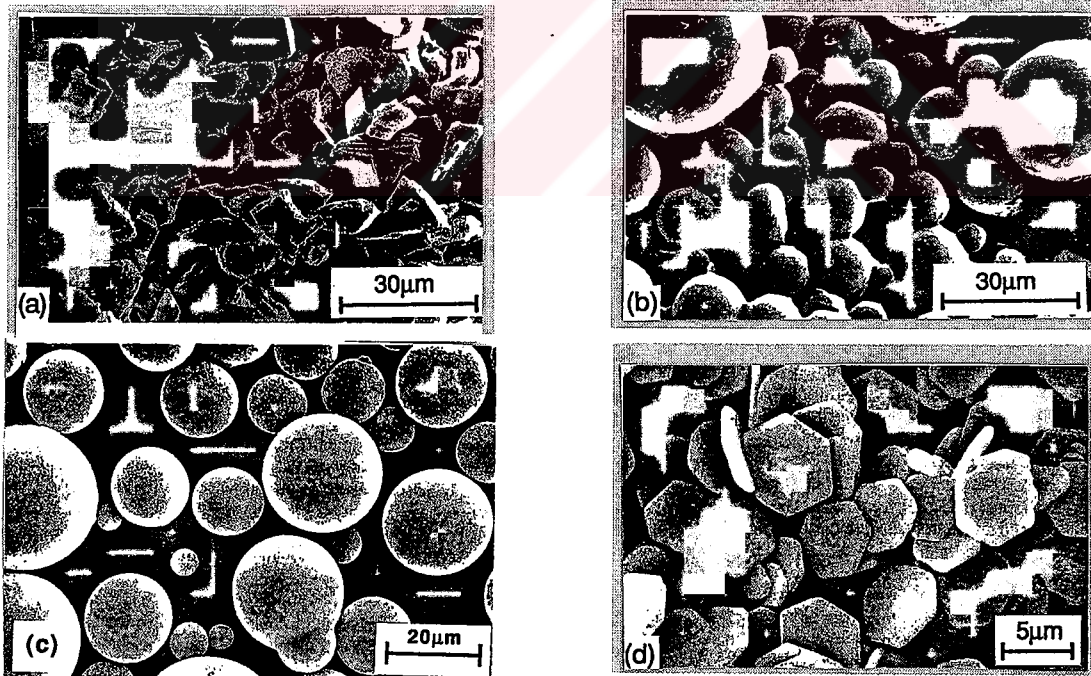
Çizelge 2.1 MMK Malzemelerin Potansiyel uygulama alanları [1, 2, 7, 8]

MATRİS	TAKVİYE ELEMANI	ARANAN ÖZELLİKLER	POTANSİYEL UYGULAMA ALANLARI
Al Alasımları	Grafit %60 C (f)	Rijitlik, dayanım, düşük yoğunluk Eksensel rijitlik, düşük yoğunluk, çok düşük eksensel ısı genleşme	Uydu, güdümlü mermi, helikopter parçaları Uzay teleskopu dalga kılavuzu ve yapısal destek parçaları
	Bor	Rijitlik, yorulma dayanımı, Aşınma direnci	Kompresör kanatları, yapısal destekler
	Alümina %5 Al ₂ O ₃ (w)	Düşük ısı genleşme, rijitlik yüksek ısı iletkenliği Aşınma direnci, sıcak çalışma dayanımı, iyi ısı iletkenliği	Fizyon güç reaktörlerinde süper iletken durdurucular Dizel motor pistonları
	%20 Al ₂ O ₃ (p) %12 Al ₂ O ₃ + %9 C	Yüksek rijitlik, düşük yoğunluk, tokluk Aşınma direnci, düşük yoğunluk, yüksek sıcaklık dayanımı	Kardan mili, şaft Motor silindir blokları
	Silisyum Karbür %20 SiC (p)	Sürünme dayanımı, Aşınma direnci, düşük yoğunluk, iyi ısı iletimi	Yüksek sıcaklık motor parçaları Fren rotor diskleri
	%20 SiC (p)	Yüksek rijitlik, düşük yoğunluk, iyi yorulma dayanımı	Bisiklet kasaları
Mg Alasımları	Bor	Eksensel rijitlik, düşük yoğunluk,	Anten yapıları
	Grafit	Düşük yoğunluk, rijitlik, düşük ısı genleşme	Uydu parçaları
	Alümina	Rijitlik, yorulma dayanımı, düşük yoğunluk	Helikopter transmisyon parçaları
Ti Alasımları	Bor	Yüksek sıcaklık dayanımı, kırılma tokluğu	Jet motoru fan kanatları
	Silisyum kaplı bor %40 SiC (f)	Rijitlik, sürünme dayanımı	Yüksek sıcaklık yapı elemanları
		Dayanım, yüksek sıcaklık performansı, rijitlik, düşük yoğunluk,	Uçak motor parçaları
Super Alasım	Molibden, tungsten	Dayanım, yüksek sıcaklık performansı, rijitlik, düşük yoğunluk, sürünme dayanımı	Yüksek sıcaklık, motor parçaları

2.2 MMK Malzemelerin Üretim Yöntemleri

MMK malzemelerin üretimi için değişik yöntemler geliştirilmiş ve geliştirilmektedir. Bu yöntemler, yapıyı oluşturan malzemelerin üretimi ve şekillendirme işlemleri olarak ayrılabilir. Ayrıca matrisin, üretimin herhangi bir aşamasında sıvı hale gelip gelmediği konusu baz alınarak da bir sınıflandırma yapılabilir. Her üretim tekniğinin, bileşen yapısı, büyüklüğü ve buna bağlı içyapı özellikleri ile ilgili kendine özgü sınırlamaları vardır. [1, 2]

MMK malzemelerin üretim teknikleri ile ilgili detaylara geçmeden önce takviye elemanlarının seçimi ile ilgili bazı bilgilerin verilmesi yararlı olacaktır. Çünkü MMK malzemeleri, klasik metalsel malzemelerden ayıran ve kullanımını cazip kılan, takviye elemanlarının sağladığı mekanik özelliklerdir. Takviyelerin sürekli veya süreksiz olması kullanım amacı, performansı ve üretim maliyeti ile doğrudan ilgili bir seçimdir. Her iki seçenekte de takviye elemanlarının dağılımı, büyüklüğü, oranı gibi değişkenlerin kombinasyonu, kompozit özelliklerini etkiler. [9] Partikül boyutları ile birlikte şekilleri de önemli bir faktördür. Örneğin küresel partiküllerin performansları keskin köşelilere nazaran daha iyidir.



Şekil 2.3 Seramik partiküllerin SEM görüntüleri (a) Standart SiC kırma partikülleri, (b) küresel alümina (plazma sprey), (c) küresel alümina (sol-gel), (d) α -alumina tekkristali [1]

Değişik yöntemlerle üretilmiş partiküllerin SEM görüntüleri Şekil 2.3’de verilmiştir. MMK malzemelerin üretim yöntemleri hakkında bir ön bilgi vermek amacıyla Çizelge.2.2’de takviye elemanları tipine bağlı olarak, uygulanabilir üretim yöntemlerinin karşılaştırılması verilmiştir. [1]

Çizelge 2.2 Takviye tipine bağlı, üretim yöntemlerinin karşılaştırılması [1]

ÜRETİM YÖNTEMİ	TAKVİYE ELEMANI TİPİ				
	SÜREKLİ FİBERLER		SÜREKSİZ FİBERLER		
	TEK LİFLİ	ÇOK LİFLİ	KISA FİBER	WHİSKER	PARTİKÜL
İNFLTRASYON	Y	Z	Z	Z	Y
SPREY- YIGMA	Z	Z	X	X	Z
KARIŞTIRMA-DÖKÜM	X	X	Y	Y	Z
TOZ METALURJİSİ	X	X	Z	Z	Z
SICAK PRESLEME	Y	Z	X	X	X
DİFÜZYON BAĞI	Z	X	X	X	X

X – PRATİK DEĞİL, Y- YAYGIN OLARAK KULLANILMAZ, Z-GEÇERLİ UYGULAMA

Yukarıda verilen çizelgede görülebileceği gibi, takviye elemanları metal matris içine değişik yöntemlerle katılabilir. MMK malzemelerin üretimindeki en kritik aşama üretim yönteminin doğru seçilmesidir. Üretim yöntemleri matris metalinin eriyik veya katı fazlarında yapılmasına bağlı olarak tasnif edilmiştir.

2.2.1 Sıvı faz üretim yöntemleri

Değişik tekniklerin uygulandığı bu yöntemde matris, seramik takviye ile temas sağlandığında, kısmen veya tamamen eriyik durumdadır. Böylece matris ile takviye malzemesi arasında iyi bir temas sağlanacağından, ara yüzey bağları kuvvetli olur, ancak sıcaklık, basınç, temas süresi gibi değişkenlerin iyi kontrol edilememesi durumunda, ara yüzey reaksiyonları oluşabileceği için, kırılgan bir yapı ile karşılaşılabilir. [1, 2, 3]

2.2.1.1 Basınçlı döküm ve infiltrasyon yöntemi

Katılaşma sistemine, genelde hidrolik bir pistonla basınç uygulanması yapılan işlemler, basınçlı döküm yöntemi olarak adlandırılırlar. Yöntemin iyi uygulanması halinde bu tekniğin kendine özgü karakteristik özellikleri vardır. Eriyiğin yeteri derecede hızlı soğutulması sağlandığı takdirde ince taneli içyapı elde etme olasılığı artacağı gibi, sıvı

metal takviyesi sürekliliğinin sağlanması halinde, porozite çok düşük seviyelere indirilebilir.[1, 10]

Bu yöntemin klasik basınçlı dökümden ilk farklı yönü, katılaşma sürecinde basıncın kesintisiz uygulanmasıdır. Buda dendrit büyüme düzenini bozarak tipik %5 kendini çekme boşluğunu kompanse eder. Ayrıca klasik döküm tekniğine nazaran piston ilerleme genelde hızı daha düşük ancak tatbik edilen basınç bazen daha yüksektir. Basınçlı döküm tekniği ısıtılmış toz karışımlarına veya karıştırılmış döküm malzemelerine uygulanabilir ancak bu yöntem genel olarak basınçlı infiltrason sistemine daha uygundur. Bu yöntemle üretilen MMK malzemeler, basit geometrik şekillerde üretilebileceği gibi (kullanma yeri ve amacına uygun olarak tekrar şekillendirilmeye uygun formda), son şekline yakın döküm formunda üretilirler.[1, 2, 3, 11]

2.2.1.2 Sprey – yığılma yöntemi

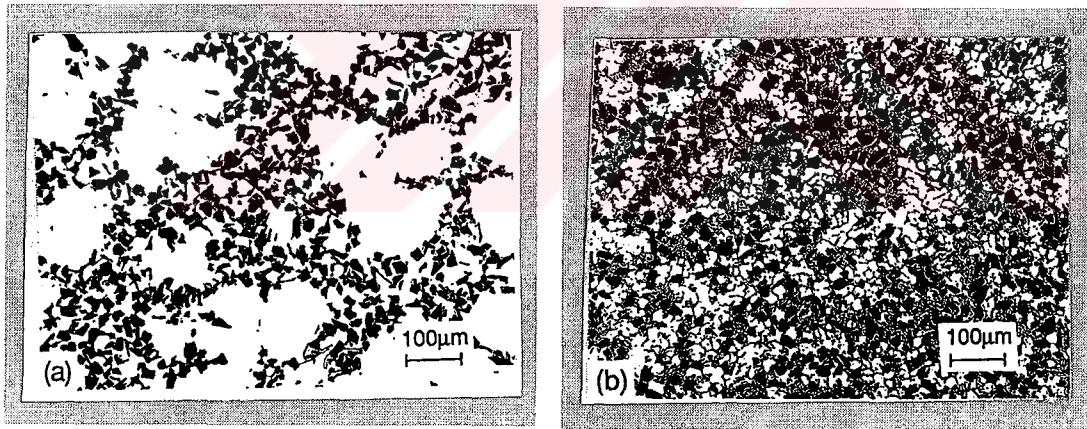
Bu yöntemde, metal parçacıklarının bir yüzey üzerine püskürtülerek yığılması ile kompozit oluşturulur. Partikül şeklindeki takviyeler metal huzmesi içine katılarak beslenirken, fiber takviyeler uygun bir yöntemle, yığılma tabanına monte edilirler. Püskürtülen metal huzmesi, eriyik banyodan üretilebileceği gibi soğuk metalsel malzemelerin hızlı ısı ortamlarına enjeksiyonu ile de üretilirler. Hızlı soğutma, düşük oksit, belirgin porozite, düzgün takviye dağılımının zor olduğu bir yöntem olarak tarif edilebilir.[1, 12]

2.2.1.3 Harç döküm (compocasting)

MMK malzeme üretiminde, kabul edilen en basit, ekonomik ve cazip bir yöntemdir. Bu yöntemde katı seramik parçaları eriyik haldeki metalle karıştırılır ve katılaşmaya terk edilir. Klasik ekipmanlarla, sürekli veya kesintili olarak üretim yapılabilir. Ayrıca bu yöntemle üretilen MMK malzemeler, basınçlı döküm için hammadde olarak da kullanılabilirler. Bu teknik Al-SiC kompozitlerin ticari olarak üretiminde kullanılmaktadır. Yöntemin uygulanmasında karşılaşılabilecek zorluklar, şekillendirilebilme, homojen olmayan mikroyapı, ara yüzey kimyasal reaksiyonları olarak üç başlık altında toplanabilir.

Sıvı matrise katılan, katı seramikler, karışımın viskozitesini artırır ve karışımın akışkanlığını azaltarak döküm imkanlarını kısıtlar. Akıcı özelliğe sahip karışım sürekli karıştırılır, böylece dentritik yapı oluşumu bozularak, küresel partikül oluşumu aktive edilir. Ayrıca karıştırma işlemi, homojen partikül dağılımını, matrisin takviye elemanlarını ıslatmasını sağladığı gibi partikül çökeltilerini önler. [1]

Yetersiz sıvı takviyesi neticesinde oluşan poroziteler, partikül segregasyonu, çökelmeler homojen olmayan mikroyapının oluşmasındaki nedenler olarak sayılabilir. Katılaşma hattının önünde sürüklenen parçacıkların neden olduğu segregasyon olayı bu yöntemde elimine edilebilecek en zor problemlerden biridir. Etkinin azaltılabilmesi için tane büyümesi, ısıtma işlemi uygulanması tavsiye edilebilir. Katılaşma sınırında itilen partiküllerin sebebiyet verdiği segregasyona tipik bir örnek Şekil 2.4 (a), (b)'de verilmiştir. Yavaş soğuma neticesinde, SiC partiküllerinin dentrid aralarına itilerek, belirgin sınırlarla kümelenildiği (a). Daha hızlı soğuma halinde ise yine dentritlerin partikülleri ittiği , ancak dentrid kollarının kısa ve tipik parça boyutlarında olması nedeniyle neticesinde, partikül kümelerin oluşmadığı görülmektedir (b). [1, 3, 13, 14, 15]



Şekil 2.4 Al-%7 (ağırlık) Si/ %20(hacim) SiC_p Mikroyapıları (a) hassas döküm (yavaş soğuma) , (b) basınçlı döküm (hızlı soğuma) [1]

Bu yöntemin uygulanmasında, seramik ve sıvının sürekli temas halinde olması, aşırı ara yüzey reaksiyonlarına neden olabilir. Örneğin Al-SiC kompozit üretiminde Al₄C₃ ve Si oluşumlarıyla yaygın olarak karşılaşılabilir. Buda üretim kalitesini düşüreceği gibi, viskozitenin artmasına bağlı bazı döküm zorluklarına sebebiyet verir. Burada ara yüzey

reaksiyonlarının yok denecek kadar azaltılabilmesi için Al matris alaşımının veya karışımın Si miktarının artırılması gerekir. Yüksek silisyum oranlarının istenmediği uygulamalarda, ticari amaçla üretilen Al matrisli kompozit malzemelerde takviye olarak Al_2O_3 kullanılır.[1]

2.2.1.4 Reaktif yöntem (‘in situ kompozitleri’)

Bu üretim tekniği, ötektiklerin yönlü katılaştırılması, sıvı-gaz reaksiyonları, sıvı-katı reaksiyonları yöntemleri olarak, üç başlık altında incelenebilir.

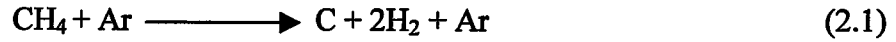
2.2.1.4.1 Ötektiklerin yönlü (kontrollü) katılaştırılması

Yönlü (kontrollü) katılaştırma tekniği ile düzgün bir mikro yapıya sahip mükemmel, anizotropik malzemelerin üretimi uzun zamandan beri yapılmaktadır. Bazı özel durumlarda, yönlü katılaştırma işlemi ile MMK özelliğe haiz malzemelerin üretimi mümkün olmaktadır. Ötektik yapıların normalde eş sıcaklıklarda katılaşarak iki fazlı düzgün bir yapı oluşturduğu bilinmektedir. Bu fazlardan bir tanesinin hacimsel olarak yeteri kadar az (ara yüzey enerjisine bağlı) olması durumunda, katılaşma neticesinde genel olarak görülen lamelli yapının yerini, enerji yönünden daha uygun olan fiber şekiller alır.[1] Ötektik mikroyapı bileşenlerinden birinin sert, dayanımlı veya refrakter karakterli olması durumunda, kontrollü katılaştırma yapılarak, böyle bir fazın visker, çubuk veya lamel şeklinde ve yönlendirilmiş olarak büyütülmesi mümkündür. Bu tür katılaştırma, kontrollü veya yönlü katılaştırma, elde edilen malzeme de yönlü katılaştırılmış ötektik kompoziti olarak adlandırılır. Bu teknikle üretilen kompozitler mükemmel bir kimyasal ve ısı kararlılığına sahiptir. Bu kararlılık fazlar arasındaki ara yüzey enerjisinin minimum olmasından kaynaklanır. Diğer MMK malzemelerde karşılaşılan ve malzeme özelliklerinin düşmesine neden olan matris-fiber reaksiyonları veya üretim aşamasında fiberlerin mekaniksel hasarı gibi problemlerle karşılaşmaz. Ancak katılaşmanın kontrol edilemediği karmaşık şekilli parçaların üretimine uygun değildir [1, 2].

2.2.1.4.2 Sıvı-gaz reaksiyon yöntemi

Bu yöntem, demir esaslı olmayan metalsel malzemeler (Al, Cu, Mg, Ni, Ti) bünyesinde termodinamik kararlılığa sahip refrakter bileşiklerin oluşturulması prensibine dayalı kompozit üretim tekniğidir. Takviye fazı, reaktif ergiyik içerisine gönderilen gazın ergiyikle reaksiyonu sonucunda oluşur. Bu üretim yöntemine örnek olarak termodinamik kararlı karbür oluşumu aşağıda verilmiştir. [16, 17]

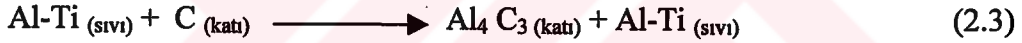
Ergiyik haldeki Al-Ti alaşım içerisine gönderilen metan gazı sıcaklık nedeniyle parçalanır ve (2.1)'de verilen reaksiyon gerçekleşir,



Bu reaksiyon sonucu açığa çıkan karbon (C) sıvı halde bulunan Al-Ti alaşımı ile (2.2)'de verilen reaksiyonu oluşturur.



Burada karbonun titanyum ile reaksiyonu sonucu oluşan titanyum karbürler (TiC), yapı içerisinde çökelerek takviye fazını meydana getirirler. Ayrıca karbonun bir kısmında alüminyum ile (2.3)'de verilen reaksiyonu oluşturur.



2.2.1.4.3 Sıvı-katı reaksiyon yöntemi

Metalsel malzemelerin oksitlendirilmesine benzer bir yaklaşımla Martin Marietta Corporation tarafından geliştirilen XD ('exothermic dispersion') yönteminde, muhtelif karışımların yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılması ile ekzotermik bir reaksiyon oluşturularak, yapıda çok küçük, kararlı seramik bir faz dağılımı yaratılır.

Alüminyum matris bünyesinde oluşturulan TiB_2 partikülleri ile üretilen kompozitler, bu yöntem için iyi bir örnek teşkil edebilir. Toz halindeki titanyum, bor ve alüminyum elementleri veya Al-Ti, Al-B alaşımları karıştırılarak, oldukça yüksek sıcaklıklarda ergiyik oluşturulur. Ortamda bulunan titanyum ve bor'un birleşmesiyle oluşan TiB_2 partikülleri alüminyum matris içinde çökelerek takviye fazını meydana getirir. [1, 16, 17]

2.2.2 Katı faz üretim yöntemleri

Metal matrisi sıvılaştırmadan MMK malzeme üretmek mümkündür. Katı faz üretim yöntemleri aşağıda belirtilen tekniklerle uygulanabilir [1].

2.2.2.1 Toz metalurjisi

Metalik tozlar ve seramik takviye elemanları kuru veya sıvı bir ortamda harmanlanır. Soğuk kalıplama işlemi ile istenilen formda ve boyutlarda hazırlanan malzemeler daha sonra sinterlenerek mekanik özellikleri iyileştirilir. Sıcak preslemede, basma ve ısıtma işlemi beraber yapılır. Ön şekillendirmeden sonra soğuk presleme uygulanması halinde boşluksuz bir yapının üretilmesi için yüksek basınçların uygulanması gerektiğinden takviye elemanlarında hasar meydana gelebilir. [1, 2, 3, 18]

2.2.2.2 Difüzyon bağı yöntemi ile MMK (folye) üretimi

İnce metal plakaların aralarına yerleştirilen sürekli fiberlerle sıcak haddelenmesi neticesinde MMK malzemeler üretilir. Yapılan deneysel ve teorik çalışmalarda üretim basıncının, fiber oranlarından bağımsız olduğu ve daha çok temas yüzeyleri arasındaki sürtünme katsayısına bağlı olarak artış gösterdiği gözlenmiştir [1]. Pratik uygulamalarda matris metalinin sürünme karakteristiği ve temas yüzeylerindeki oksitlenme meyli üretim açısından kontrol edilmesi gereken faktörlerdendir.[1]

Sürünme dayanımının, rijitliğinin iyi olması, ara yüzey kimyasal reaksiyonlarının sıvı faz üretimine nazaran çok daha az olması, yaklaşık 700⁰C sıcaklıkta, kendi oksidinde eriyebilmesinden dolayı difüzyon bağının oluşmasına yatkın olması, bu tekniğin, sürekli fiberlerle takviye edilmiş Ti matrisli, metalik şeritlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmasını cazip hale getiren sebepler olarak sıralanabilir. [1, 2]

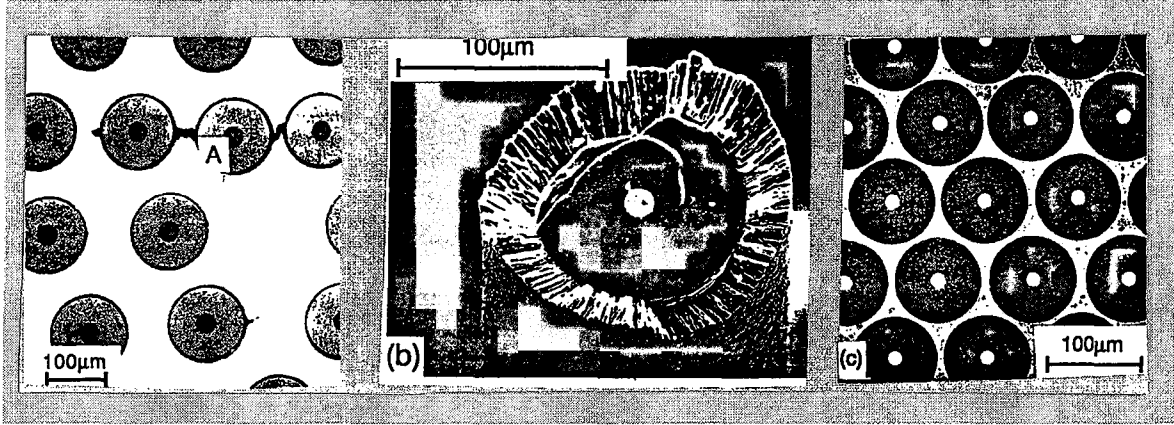
Matris metalinin alaşım kompozisyonunun değişmesi, üretim imkanlarını ve malzeme karakteristiklerini etkiler. Örneğin Al, Mo veya V katılması ara yüzey reaksiyon kinetiğini yavaşlatır, fakat ince folye haddelenmesini daha da güçleştirir. Nikel ilavesi difüzyon

sıcaklığını düşürürken, mekanik özelliklerinin de azalmasına sebebiyet verir. Bu yöntemle MMK Malzeme üretimi oldukça zor, yavaş ve komplikedir. Ayrıca, ısıtım sırasında, çoğunlukla belirgin ara yüzey reaksiyon tabakası (yaklaşık 1 μm) oluşur. Şekil 2.5.(a) Ti-6Al-4V metal matrisli, SiC_f takviyeli MMK malzemenin mikroyapısı verilmiştir. Kalıcı poroziteler 'A' indisi ile gösterilmiştir. [1, 19]

2.2.2.3 Fiziksel buhar yığıma (PVD)

MMK Malzemelerin üretiminde çok az uygulama alanı bulan oldukça yavaş bir yöntemdir. Hedef malzemenin yüksek vakum altında ısıtım buharlaşması daha hızlıdır. Üretilen Ti buharı sürekli fiber üzerinde yoğunlaştırılarak kalın bir tabaka ile kaplanır. Takviye fiberlerinin ara yüzeylerde mekanik zorlamalara uğramaması, ve değişik alaşımlara uygulanabilmesi, üniform kaplama kalınlığı bu yöntemin avantajları olarak sayılabilir.[18] Titanyum ve alüminyum alaşımları, Ti-Al metalsel malzemeler arası alaşımlar bu yöntemle fiberlerin kaplanmasında hammadde olarak kullanılmıştır. Tipik yığıma hızı yaklaşık 5-10 $\mu\text{m}/\text{dak}$ olarak verilmektedir. Kompozit üretimi, genelde, kaplanmış bu fiberlerin bir araya getirilerek sıcak preslenmesiyle tamamlanır. Bu yöntemle, MMK malzemedeki fiber oranı %80'e kadar çıkarılabilir. Uygulamaya tipik bir örnek Şekil 2.5 (b), (c)'de verilmiştir. [1]

Bu yöntemin değişik bir uygulaması da iyon bombardımanıdır. Bu yöntemde metal buharı, takviye malzemesinin etrafını saran gaz (genelde Argon) huzmesinden geçirilir, böylece, ortamdaki gaz ve kaplanacak metal iyonlarının, fiber üzerine bombardımanı sağlanarak kaplama yapılır. Bu uygulama buharlaşma yöntemine nazaran daha yoğun kaplama sağlanmasına rağmen ondan daha yavaştır. Bu yöntem, C fiberlerin Al ile kaplanmasında uygulanmıştır. Genel olarak az miktarda kaplı fiber üretimi için uygun olabilir. [1]



Şekil 2.5 Ti matrisli sürekli fiber takviyeli MMK'ler, (a) Ti-6Al-4V/ SiC_f Difüzyon Bağ yöntemi ile üretilen MMK Mikroyapısı. Kalıcı porozite alanları 'A' ile gösterilmiştir. (b) SiC sürekli fiberlerin, Buhar-yığma yöntemiyle 35 µm Ti-5Al-5V alaşımı kaplanmış mikroyapıları .(c) Sıcak presleme ile üretilen Ti-5Al-5V / hacimsel %80 SiC_f (kaplama kalınlığı 8 µm) kompozit mikroyapısı. [1]

2.2.3 MMK malzemelerin şekillendirilmesi (üretimde ikinci aşama)

MMK malzemelerin şekillendirilmesinde veya ikinci aşama üretiminde, porozitelerin giderilmesi, takviyelerin düzgün dağıtılması ve istenilen son şeklin verilmesi amacıyla birkaç yöntem uygulanabilir. MMK malzeme kompozisyonuna, takviye özelliğine ve diğer değişkenlere bağlı olarak uygulanan şekillendirme veya ikincil üretim işlemleri özet olarak aşağıda belirtilmiştir. [1, 2, 3]

2.2.3.1 Ekstrüzyon işlemi

Ekstrüzyon, basınçlı döküm veya toz metalürjisi yöntemleri ile üretilen süreksiz fiberli MMK malzemelere uygulanabilir. Genelde ekstrüzyon yöntemi takviye edilmemiş malzeme üretimine çok daha uygundur. Ekstrüzyon işleminde ilk ilgi odağı, özellikle fiber takviyeli kompozitlerde meydana gelen mikroyapı değişiklikleridir. Burada amaç fiberlerin ekstrüzyon eksenine paralel olarak dağılımını sağlamaktır, ancak bu işlem aynı zamanda fiberlerin kırılmasına da sebep olmaktadır. İşlem sıcaklığının yükseltilmesi ve toplam gerininin azaltılması kırılan fiber miktarlarının azalmasına neden olduğu gözlenmiştir. Bu

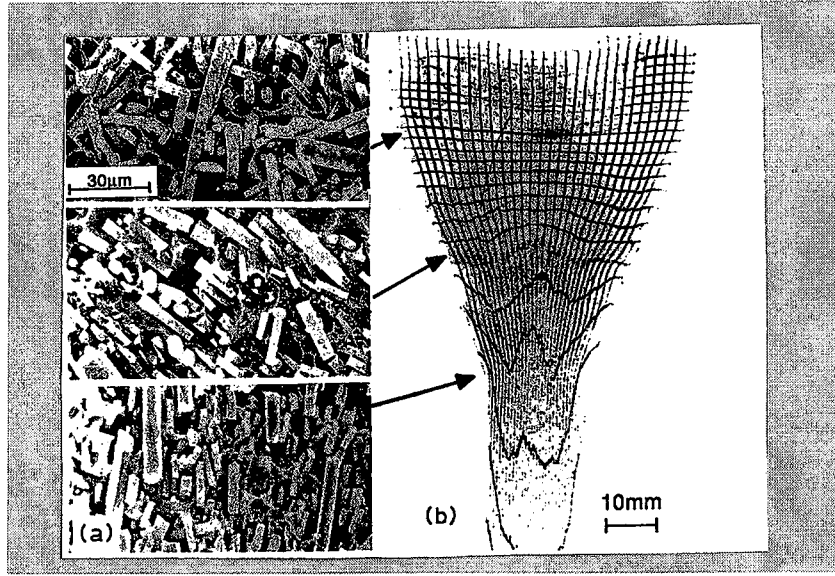
olay gerilim düşme kinetiğinin, fiber takviye üzerinde çekme gerilim birikimi olarak kendini göstermesiyle izah edilebilir. Şekil 2.6'da bölgesel gerinim oranının etkisini onaylayan veriler gösterilmiştir. Burada yüksek gerinim oranını (verilen ekstrüzyon oranlarında) azaltmak için en uygun yol konik veya aerodinamik kılavuz kullanmaktır. Ekstrüzyon oranı takviye elemanlarının dayanımı ile de ilgili bir faktördür. Örneğin aynı şartlar altında viskerler süreksiz fiberlere nazaran daha yüksek oranlarda çekilebilirler.[1,20]

MMK malzemelerin ekstrüzyonla üretiminde bilinmesi gereken bir konuda , ekstrüzyon eksenine paralel, seramikçe zengin bantların oluşmasıdır. Şekil 2.7'de ekstrüzyon işlemi sonunda yapıda oluşan seramik bantların içyapı görünümleri verilmiştir. [1]

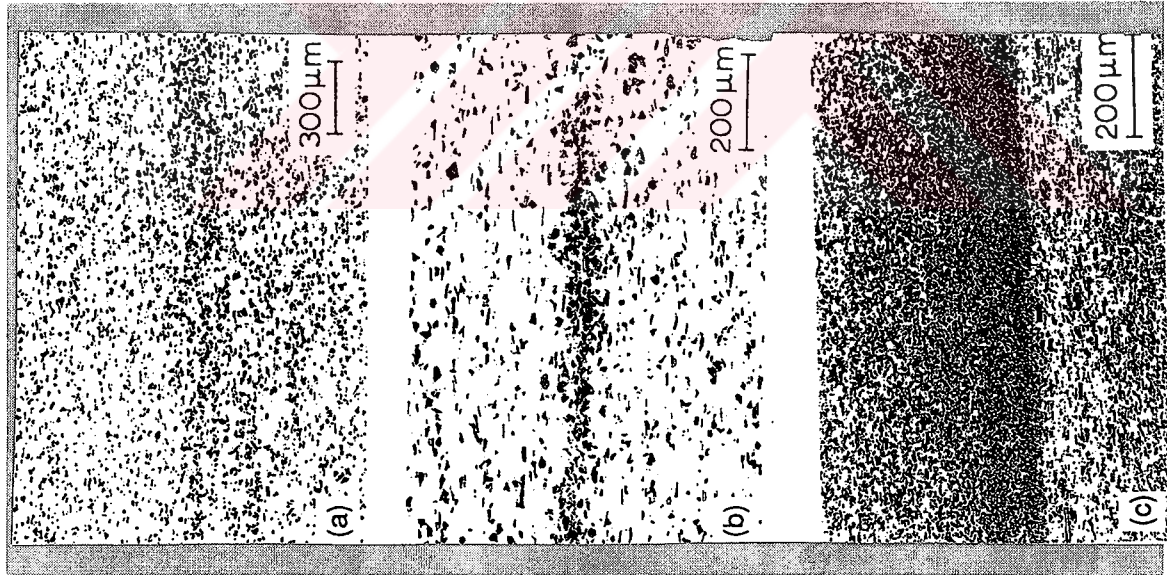
2.2.3.2 Haddelme, dövme ve izostatik presleme

MMK malzemelere uygulanan, klasik şekillendirme ve imalat yöntemlerinin, mikroyapı üzerindeki etkileri, işlem sıcaklıkları, gerilim ve gerinim oranları gibi bilgilerin verilmesiyle açıklanabilir. Dövme ve haddelme gibi yöntemlerde, değişik yönlü gerinimin kısa süreler içerisinde uygulanması, özellikle düşük sıcaklıklarda, boşlukların oluşmasına, fiberlerin kırılmasına ve makroskopik çatlakların oluşmasına sebebiyet verir. Yüksek işlem sıcaklıkları, matrisin sıvılaşmasına sebep olabileceği gibi, sıcak çatlaklara ve yırtılmalara yol açabilir.[1]

İzostatik sıcak presleme, mikroyapıyı bozmadığı gibi yapıda gerilim oluşturmaz. Ayrıca yapı içindeki yüksek seramik yoğunluğunun fazla olduğu alanlardaki kalıcı poroziteler dışındaki, porozitelerin giderilmesinde bu yöntem kullanılabilir.[1]



Şekil 2.6 Ekstrüzyon sırasında ötelenen fiberlerin parçalanması, (a) Ekstrüzyon bölgesinde, fiber yapılarının ve oranlarının SEM görüntüsü, (b) Gerinim alanının X-ışınları radyografisi.[1]



Şekil 2.7 Ekstrüzyon işleminde seramik yoğunluklu bant oluşumu, (a)Genelde partikül takviyeli MMK Malzemelerde görülen hafif veya (b) Orta yoğunluklu seramik bant oluşumu. (c) Süreksiz fiber takviyeli malzemelerde daha belirgin sınırlı seramik bantların iç yapı görüntüsü.[1]

BÖLÜM 3

3. ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLER

MMK malzemelerin tanımı, potansiyel uygulama alanları ve üretim yöntemleri hakkında genel bilgiler 2. Bölümde verilmiştir. Ancak seçtiğimiz çalışma konusuna değişik bir bakış açısı sağlamak ve derinlik kazandırmak amacı ile süreksiz fiber/partikül takviyeli, alüminyum matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri, alüminyum alaşımları, takviye elemanları, bu konuda yapılmış deneysel çalışmalar ve sonuçları, uygulama alanları daha spesifik örneklerle bu bölümde yer almıştır.

Rijitlikteki, dayanımdaki, yorulma ve aşınma direncindeki belirgin artışların izlenmesi, alüminyum matrisli kompozit (AMK) malzemelerin kullanımlarını cazip kılmıştır. Ancak özellikle otomotiv sanayinde geniş bir potansiyel uygulama alanı mevcut olmasına rağmen, bu malzemelerin gelişmesi beklenen hızda olmamıştır. Fiber takviye üretiminin pahalı olması, yüksek sıcaklık üretim yöntemlerine bağlı problemler, AMK malzemelerin gelişmesinde engel olan faktörler olarak nitelenebilir. [3]

3.1 Alüminyum Matrisli Kompozit Elemanları

3.1.1 Takviye elemanları

Üretimi planlanan kompozit malzemelerde kullanılacak takviye elemanlarında aranan özellikler, doğal olarak hedef malzemedeki beklentilere paralel olarak farklılıklar gösterecektir. Bazı malzemelerde mekanik özellikler öncelikle aranırken, başka bir malzemde fiziksel özellikler veya üretim maliyetleri ön plana çıkabilecektir. Dolayısıyla bu değişkenler çok iyi analiz edildiği takdirde, hedef malzemeye ulaşma ve üretimde başarılı olma şansı daha da artabilecektir. Genel olarak takviye elemanlarında aranan ortak özellikler aşağıda belirtilmiştir; [3]

- i) Isıl direnç ve kararlılık; işletme şartlarına bağlı olarak, fonksiyonel parçaların herhangi bir nedenle oluşan ısı hareketlere karşı direnç gösterebilmesi için, yüksek sıcaklıklardaki karakteristiklerinin iyi ve kararlı olması çok önemlidir.
- ii) Kimyasal uygunluk; takviye elemanının matris ile kimyasal bir reaksiyona girmemesi ve ara yüzey bağının iyi teşekkül etmesi gerekir.
- iii) Yoğunluk; ağırlığın önemli olduğu uygulama alanları için (uzay araçları ve hava taşımacılığı), spesifik mukavemet, spesifik modülün yüksek olması istenilen projelerde düşük yoğunluklu ve yüksek mekanik özelliklere sahip takviye elemanları tercih edilir.
- iv) Üretim kolaylığı; yüksek miktarlarda yapılan üretimlerde, parça maliyetini doğrudan ilgilendiren durumlarda bu önemli bir faktördür. Ancak büyük bir projede imal edilecek az miktardaki parçalar için kabul edilebilir sınırlar içerisinde, üretimin yavaş olması, zor olması veya yüksek maliyetli olması bütün proje kapsamı içerisinde bir engel olarak görülmeyebilir.

Takviye elemanları yapılarına göre, oksit seramikler ve oksit olmayan (karbürler, nitrürler) seramikler olarak iki başlık altında,[18] şekillerine göre, partiküller, süreksiz fiberler ve viskerler (whiskers) olarak üç başlık altında verilmiştir.[3]

3.1.1.1 Yapılarına göre sınıflandırma

3.1.1.1.1 Oksit seramikler

Yüksek sıcaklık performansları iyi olan metal veya metaloid elementlerin oksijenle oluşturdukları bileşikler olarak tanımlanabilir. Yüksek elastik modül ve sertlik, buna bağlı olarak gevreklik, düşük ısı genleşme, korozyon direnci ve iyi refrakter özellikleri seramik oksitlerin belirgin karakteristikleridir. Ancak malzemenin çeşitli ortamlarda, yüksek sıcaklık, oksidasyon, hidrasyon, buharlaşma ve redüklenmeye direnç gösterme kararlılığı üretim imkanlarını kısıtlar ve maliyetleri artırır. Bazı mühendislik uygulamalarda, torya ve berilya gibi sınırlı imkanlarla üretilen bazı oksitlerin üstün özellikleri nedeniyle

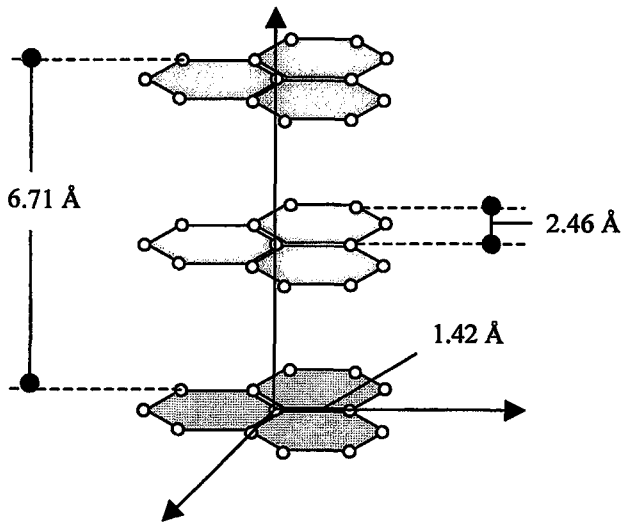
kullanılması kaçınılmaz olabilir. Bu özel durumların dışında silis, alümina, magnezya, kalsiya, mullit gibi kompleks oksitler doğada bol miktarda bulunmaktadır.

Seramik oksitleri, sadece bir metal/metaloid içeren tek oksit seramikler, iki ve daha fazla metal/metaloid içeren karmaşık oksit seramikler olarak sınıflandırmakta mümkündür. Ergime noktası 1728°C 'nin üzerinde, basit oksit oluşturan 24 element ve ergime noktası bu sıcaklığın üzerinde bir çok karmaşık oksit mevcuttur [18].

- i) Alümina (Al_2O_3); ticari üretimi ve sanayide kullanımı son yarım asırda büyük bir gelişme göstermiştir. Özellikle yüksek sıcaklık fırınlarında, kesici takım, yatak malzemesi, elektronik endüstrisinde, hava taşıtları imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Vasat sıcaklıklarda kimyasal maddelere ve mekanik zorlamalara karşı en dayanıklı refrakter malzemelerden biri olan alüminanın ergime sıcaklığı 2000°C ($\pm 30^{\circ}\text{C}$)'dir . Kullanımındaki sınırlama nispeten düşük ergime noktasından kaynaklanmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda flor gazı dışındaki bütün gazlara direnç gösterir, oksitleyici ve redükleyici atmosferde 1900°C 'ye kadar kullanılabilir. Saf alümina düşük sıcaklıklarda birkaç formda bulunur, ancak ortam şartları, zaman gibi değişkenlere bağlı olarak $750\text{-}1200^{\circ}\text{C}$ arasında α -alüminaya dönüşür.[18]
- ii) Magnezya (MgO); refrakter oksitlerin içinde en bol bulunan MgO 'in ergime sıcaklığı 2800°C 'dir. Oksitleyici atmosferde, alüminadan daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir. Ortama bağlı olarak yüksek sıcaklıklarda redüklenir ve 2400°C sıcaklıkta buharlaşır.[18]
- iii) Zirkon (ZrO_2 SiO_2); alüminyum gibi bazı ergimiş metaller tarafından ısıtılması güç olduğundan özellikle karıştırılmalı döküm yöntemi ile kompozit üretimi oldukça problemlidir. 2420°C 'de eriyen zirkon, ısıtma direnci nedeniyle alüminyum, platin, nikel ve paslanmaz çeliğin ergitilmesinde, geniş çapta kullanılmaktadır. Isıl genleşmesi çok düşük olduğu için, termal şok direnci fazladır. [18]

3.1.1.1.2 Oksit olmayan seramikler

- i) Bor karbür (B_4C);yüksek sertlik, ergime sıcaklığı, düşük yoğunluk, kimyasal maddelere karşı yüksek direnç ve üstün mekanik özellikleri ile kompozit malzemeler için önemli bir takviye elemanıdır. Dünyadaki bor karbür rezervlerinin % 70'i ülkemizde yer almaktadır. Özellikle nükleer reaktörlerde, hafif zırh üretiminde ve yüksek işletme şartlarında yaygın olarak kullanılırlar.[18]
- ii) Silisyum Nitrür (Si_3N_4); dayanım, aşınma direnci ve ısıl şok dayanımının iyi olması nedeniyle, gaz türbinlerinde, kesici takımlarda, şalome başlıklarının imalatında yaygın olarak kullanılırlar. Silisyum ile azotun $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta doğrudan reaksiyonu ile üretilir. [18]
- iii) Grafit; karbonun değişik bir formu olan grafit, karbon içeren malzeme olarak da kabul edilmektedir. Grafitin kristal yapısı Şekil 3.1'de verilmiştir. Yüksek sıcaklık dayanımı, düşük yoğunluk, yüksek buharlaşma sıcaklığı ve ısıl şoklara karşı dirençli olması gibi üstün özellikleri nedeniyle ileri teknoloji malzemelerinin (kompozit) üretiminde çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak yapı özelliklerindeki heterojenlik, oksidasyon direncinin düşük ve kırılgan olması uygulama alanları için kısıtlayıcı faktörlerdir.[18]



Şekil 3.1 Grafitin kristal yapısı [18]

3.1.1.2 Şekillerine göre sınıflandırma

3.1.1.2.1 Partiküller

Partiküller, AMK malzemelerin üretiminde çok eskilere dayalı uygulama alanına sahip takviye elemanlarıdır. Mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amacı ile değişik türde ve değişik yöntemlerle elde edilen, oksit, karbür, nitrür partiküllerden yararlanır. Titanyum karbür, krom karbür, bor karbür gibi karbürlerin tipik özellikleri sertlik ve aşınma dayanımlarıdır. Alüminyumoksit, magnezyumoksit, toryumoksit gibi oksitler yüksek ısıl kararlılık özellikleri ile karakterize edilirler. Çeşitli seramik partikül karakteristikleri Çizelge 3.1(a)'da verilmiştir.[3]

Çizelge 3.1 (a)Seramik partikül, (b) Seramik fiber, (c) Visker karakteristikleri [3]

TİPİ	BİLEŞİMİ	BOYUT (μm)	YOĞUNLUK (g/cm^3)	DAYANIM (GPa)	E (GPa)
(a) PARTİKUL	Grafit	40-250	1.6-2.2	20	910
	SiC	15-340	3.2	3	480
	SiO ₂	53	2.3	4.7	70
	MgO	40	2.7-3.6		
	Si ₃ N ₄	46	3.2	3-6	360
	TiC	46	4.9	0	320
	BN	46	2.25	0.8	100-500
	ZrO ₂	75-180	5.65-6.15	0.14	210
	B ₄ C	40-340	2.5	6.5	480
	TiO ₂	20	3.9-4.3		
	Al ₂ O ₃	40-340	3.97	8	460
	Cam	30-120	2.55	3.5	110
(b) FİBER	Karbon T 300	2.5 (l) 7.8 (d)	1.75	3.45	230
	SiC Nicalon	1-6 (l) 10-15 (d)	2.55	3	195
	Al ₂ O ₃ FP	3-6 (l) 15-25 (d)	3.96	1.7	380
	Al ₂ O ₃ Saffil	0.1-1 (l) 1-5 (d)	3.3	2	300
(c) VİSKER	SiC (Tokai)	50-200 (l) 0.1-1 (d)	3.2	3-14	400-700
	SiC (arco)	50 (l) 0.2-1 (d)	3.2	13	700
	Al ₂ O ₃	100 (l) 2 (d)	3.97	15	2275
		l (mm) fiber uzunluğu		d (μm) fiber çapı	

3.1.1.2.2 Süreksiz fiberler

Özellikle küçük çaplı ve düzgün dağılımlı süreksiz fiberler (takviyeler) AMK malzemelerin mekanik özelliklerini artırıcı özellik gösterirler. Ancak değişik yönlerde dağılmış karmaşık yapıya sahip fiber takviyeli AMK malzemeler özelliklerine uygun olarak uygulama alanı bulmuşlardır. Karbon, alümina, silika, silikon karbid süreksiz fiber karakteristikleri Çizelge 3.1 (b)'de verilmiştir.[3]

3.1.1.2.3 Viskerler

Viskerler monokristalin, oldukça yüksek dayanımlı kısa fiberleridir. Bu yüksek dayanım, dislokasyon gibi kristal hatalar olmadığından, teorik dayanıma çok yakındır. Kaliteli kristal yapısının (tane sınırı yok) sağladığı belirgin mekanik özellik artışı, viskerlerin takviye malzemesi olarak kullanımına ilgiyi artırmıştır. Küçük çapları ve uygun boyutları ($l/d \approx 50-100$) yük transferine imkan sağladığı gibi dispersiyonla kuvvetlendirmeye bağlı takviye mekanizmasını oluşturur. Çizelge 3.1 (c)'de çeşitli visker takviyelere ait karakteristikler verilmiştir. [2, 3]

3.1.2 Alüminyum matris

AMK malzemelerin ilk üretimlerinde, özellikle partikül takviyeli kompozitlerde, matris seçimi genelde takviye elemanından bağımsız olarak, alüminyum alaşımın özellikleri (haddeleme, dövme, döküm) dikkate alınarak yapıliyordu. Ancak zaman içerisinde matris fiber reaksiyonlarının tanımlanması, içyapı özelliklerinin mekanik değerler üzerindeki etkilerinin araştırılması, matris fiber kombinasyonları üzerinde etkin rol oynamıştır. Deneysel ve teorik çalışmaların bir bölümü, alüminyum matrise katılan alaşımların kompozit üretimindeki etkileri üzerinde yoğunlaşmıştır. Örneğin alüminyuma katılan, Mg, Cu, Li alaşım elementleri, Al_2O_3 partikül ve fiberlerinin, SiC viskerlerinin, sıvı alüminyum matrise uygunluğunu artırır. Ayrıca Mg ve Si, takviye elementlerinin sıvı matris içindeki dispersiyonunu kolaylaştırır. Aksi halde, alaşım elementlerinin doğru seçilememesi durumunda, takviye elemanları, katılma fazında etkin rol oynayarak (erken

çekirdek oluşumu, dendrit büyümesinin gecikmesi), kompozitin istenilen özelliklerde üretimini zorlaştırabilir. [3]

Mekanik özelliklerin artırılması amacı ile yapılan ısı işlemler, Al matrisin alaşımına ve takviye elemanlarının özelliğine bağlı bir değişkendir. Dolayısıyla ısı işlemlerin kompozitler üzerindeki etkilerini deneysel çalışmalarla belirlemek, iyi bir tahmin yapmaktan daha uygun olacaktır. [3]

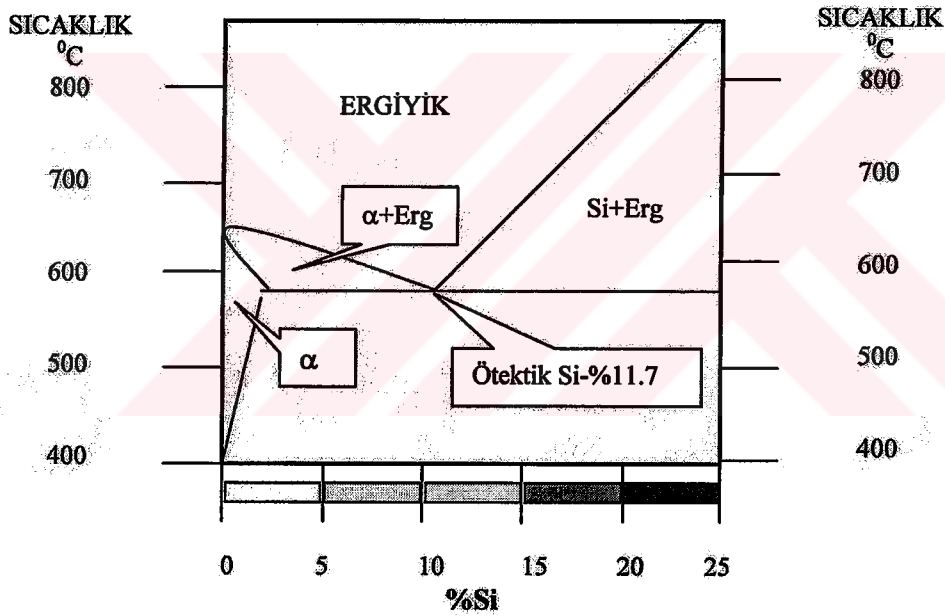
3.1.2.1 Alüminyum alaşımları

Alüminyuma katılan alaşım elementlerinin en önemli amacı, arı alüminyumun, yüksek uzama kabiliyeti ve korozyon dayanımı gibi aranılan özelliklerini fazla değiştirmeden, düşük olan akma sınırını yükseltmektir. Mg, Mn, Si, Zn, Cu alüminyumun başlıca alaşım elementlerindendir. Bu elementlerin, hedef malzeme amacına uygun olarak, düşük miktarlarda bile katılmaları alaşımın özelliklerini etkin olarak değiştirirler. Kübik yüzey merkezli alüminyum kristal kafesi yapısına, ancak çok küçük oranlarda bu elementlerden olabilir ve karışım kristali oluşturabilir. Bu yabancı atomlar, kristal kafesi içinde kaymaya karşı direnci artırdıkları için alaşımın akma sınırını yükseltirler. Bu oluşumdan dolayı şekil değiştirme kabiliyeti fazla etkilenmez. Ancak bu alaşım element oranlarının daha yüksek olması halinde, alüminyum atomlarından ve alaşım elementlerinin çözünmeyen kısımlarından, sert ve kırılğan bir yapı oluşur (intermetalik veya metaller arası bileşikler). Bu durumda, alaşımın mukavemet ve sertliği artar ancak şekil değiştirme kabiliyeti ve kırılğanlığı azalır. Dolayısıyla bazı istisnai durumların dışında, hadde alaşımlarında, katılan elementlerin oranı toplam % 8 'i geçmez. [21]

Alaşım elementlerinin seçimi ve karışım oranları, alüminyum alaşımın imalat ve şekillendirme yöntemi ile yakından ilgilidir. Üretim yöntemleri baz alınarak hadde ve döküm alaşımları olarak iki ana grupta toplamak mümkündür. Her iki yöntemle üretilen malzemelerin, şekillendirme ve işlenebilirlikleri göz önünde tutularak, sertleşebilir veya sertleşemez alaşımlar olarak da tekrar sınıflandırılırlar. Al-Mg ve Al-Mn alaşımları doğal sertlikleri ile kullanılan ve sertleşmeyen alaşımlara örnek olarak verilebilir. Ancak Al-Mg alaşımına Cu, Si veya Zn katılmasıyla, sertleşebilen Al alaşımları üretmek mümkündür.

3.1.2.1.1 Alüminyum-silisyum alaşımları

Alüminyum silisyum alaşımlarının, ıce taneli ve kalıbı iyi doldurma özelliklerinden dolayı, özellikle ötektik alaşımları döküm malzemesi olarak kullanılırlar. Şekil 3.2’de faz diyagramı verilen Al-Si alaşımında, ötektik alaşımın içyapısı yaklaşık %90 α katı çözeltisi ve %10 silisyumdan oluşur. Böylece, sünek alüminyum-silisyum katı çözeltisi, kırılğan silisyuma nazaran daha etkin olarak alaşımın özelliklerini etkiler. [22] Yapılan deneysel çalışmalarda, alüminyum matrisli kompozit malzeme üretiminde alüminyum matrise ilave edilen magnezyumun (Mg, %0,3-%1), alüminyum matrisin takviye partiküllerini ısılatma kabiliyetini etkin olarak artırdığı görülmüştür.[11, 23, 24]



Şekil 3.2 Al-Si faz diyagramı [22]

3.1.2.1.2 Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıt işlemler

Alüminyum alaşımlarında yeniden kristalleşme (rekristalizasyon), çözme, çökelme gibi kritik sıcaklık aralığının dar olması nedeniyle, bu alaşımlara uygulanacak ısıt işlemlerin öngörülen şartlara uygun olarak tatbik edilebileceği tesislere ihtiyaç vardır. Bilgi, beceri, dikkat ve yakın kontrol gerektiren bu ısıt işlemlerin özet olarak tanımları aşağıda, bazı alüminyum alaşımlarına ait ısıt işlem karakteristikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. [22]

443 (%5 Si) ve 360 (%9,5 Si, %0.5 Mg)
ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ [37]

MEKANİK ÖZELLİKLER								
Al ALAŞIMI	DÖKÜM ŞEKLİ	ÇEKME DAYANIMI MPa	AKMA DAYANIMI MPa	ELASTİSİTE MODÜLÜ GPa	% UZAMA numune çapı		SERTLİK HB 500 Kg 10 mm	YORULMA limiti MPa 5.10 ⁸ Tekrar
					a (1/4"	b (1/2)"		
443	BASINÇLI	228	110	71	9.0	..	..	117
	KUM	131	55		..	8.0	40	55
	KOKİL	159	62		..	10.0	45	55
360	BASINÇLI	324	173	71	3.0	..	..	131
	KUM	228	166		3.5	..	..	..
	KOKİL				..	..	..	..

FİZİKSEL ÖZELLİKLER				
Al- Alaşımı	ISIL GENLEŞME μm/°K	ISIL İLETKENLİK Cal/cm ² /cm/°C/sn	ERGİME SICAKLIĞI °C	DÖKÜM SICAKLIĞI °C
443	22	0,34	649-816	635-788
360	21	0,35	649-760	635-704

KİMYASAL KOMPOZİSYON LİMİTLERİ									
Al-Alaşıım	DÖKÜM ŞEKLİ	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Zn	Ti	Diger
443	BASINÇLI	4,5-6,0	2,0	0,60	0,10	0,30	0,50	..	0,20
	KUM	4,5-6,0	0,8	0,15	0,05	0,35	0,30	0,25	0,15
	KOKİL	4,5-6,0	0,8	0,15	0,05	0,35	0,25	0,25	0,15
360	BASINÇLI	9,0-10,0	2,0	0,6	0,40-0,60	0,30	0,50	..	0.20
	KUM	..	..	..	..	..	..	..	..
	KOKİL	..	..	..	..	..	..	..	..

- i) Toparlanma tavlama; rekristalizasyon sıcaklığının altında yapılan tavlama, yeniden kristalleşme olmaksızın, kristallerin toparlanarak münferiden dengelenmesi sağlanır. Sertlik kısmen azalırken diğer özelliklerde, şekillendirme öncesi değerlere yaklaşır. Alaşım türü ve miktarına bağlı olarak, 200 -330 °C arasında değişir.
- ii) Rekristalizasyon tavlama; rekristalizasyon tavlama sıcaklığı, alüminyumun alaşım türüne bağlı olarak, 300-500 °C arasında değişir. Dayanım ve sertliğin azalmasından dolayı bu ısıtma işlemi yumuşak tavlama olarak denir.
- iii) Çökelme sertleşmesi; alaşımı oluşturan elemanların azalan sıcaklıkla yapı içerisindeki çözünürlüklerinin azalmasına bağlı olarak, çeliklerdeki yaşlanma olayına benzer bir şekilde uygulanan ısıtma işlemidir. Çözme tavlama (homojenleştirme) , ani soğutma, çökelme (ayırışma) ısıtma işlemleri adı altında üç aşamada gerçekleşir.
- iv) Sıcak şekillendirme için tavlama; sıcak şekillendirme için tavlama sıcaklığı, yeniden kristalleşme sıcaklığının üstünde bir sıcaklıkta (400-550 °C), katılma hattının 50-80 °C altında yapılan ısıtma işlemidir.

Çizelge 3.2 Çeşitli alüminyum alaşımların ısıtma işlem karakteristikleri [22]

	ALAŞIM	YUMUŞAK TAVLAMA SICAKLIĞI	ÇÖZME TAVLAMASI		ÇÖKELME-AYRISMA	
			SICAKLIĞI (°C)	SÜRESİ (dakika)	SICAKLIĞI (°C)	SÜRESİ (saat)
HADDE	Al Mg 1	340...380				
	Al Mg 3	340...380				
	Al Mg 5	320...360				
	Al Mn	360...420				
	Al Mg Si 1	340...400	510...540	10...30	120...140	5...15
	Al Cu Mg 0,5	350...380	495...510	10...30	~20	
	Al Cu Mg 2	370...400	492...500	5...30	~20	
	Al Zn Mg 1	380...430	450...480	10...40	120...140	20...50
	Al Zn Mg 3	400...450	460...485	10...30	120...140	10...50
	Al Zn Mg Cu 0,5	420...450	460...475	10...30	120...140	10...50
	Al Zn Mg Cu 1,5	420...450	460...475	10...30	120...140	10...50
DOKUM	Al Si 10 Mg		520...530	3...6 saat	160...165	8...10
	Al Si 5 Mg		520...530	3...6 saat	150...160	8...10
	Al Si 5 Cu 1		520...530	3...6 saat	160...165	8...10

3.2 Üretim Yöntemleri

Ticari amaçlı kompozit üretiminde süreksiz fiber takviyelere ilginin büyük olmasının başlıca nedeni, klasik yöntemlerle, ekonomik üretim imkanlarının olmasıdır. Ancak bu hiçbir zaman bu kompozitlerin üretiminin problemsiz ve kolay olduğu anlamına gelmemelidir. Matrisin takviye elemanlarını ıslatmaması, homojen dağılımın sağlanması, porozitelerin önlenmesi, dökümde akıcılığın sağlanması, ara yüzey reaksiyonlarının engellenmesi gibi bir çok problemlerle karşılaşılabilir. İşte bu anlamda yapılan deneysel ve teorik çalışmalar, bulguların hızlı ve yaygın iletişimi, bu problemlerin giderilmesinde veya aşılmasında etkin rol oynamıştır. Ancak maliyetlerin düşürülmesi, seri ve kaliteli kompozit üretiminin cesaretlendirilmesine yönelik, yapılması gerekli daha bir çok çalışma ve araştırma potansiyeli mevcuttur. [1, 2, 3, 25, 26, 27]

3.2.1 Karıştırma yöntemi

Seramik takviye elemanlarının pıhtılaşma ve çökme eğilimleri, takviyelerin iyi olmayan ıslanma kabiliyetleri, sıvı alüminyum matris içine takviyelerin önlemsiz olarak katılmasında belirsizlik oluşturabilir. Bu olumsuzluklarla, özellikle takviye elemanı partiküllerinin çok küçük olması veya matrisle yoğunluk farkının büyük olması durumunda daha sık karşılaşılır. Problemlerin çözümünde aşağıdaki tekniklerin uygulanması tavsiye edilebilir.[1, 2, 3, 24]

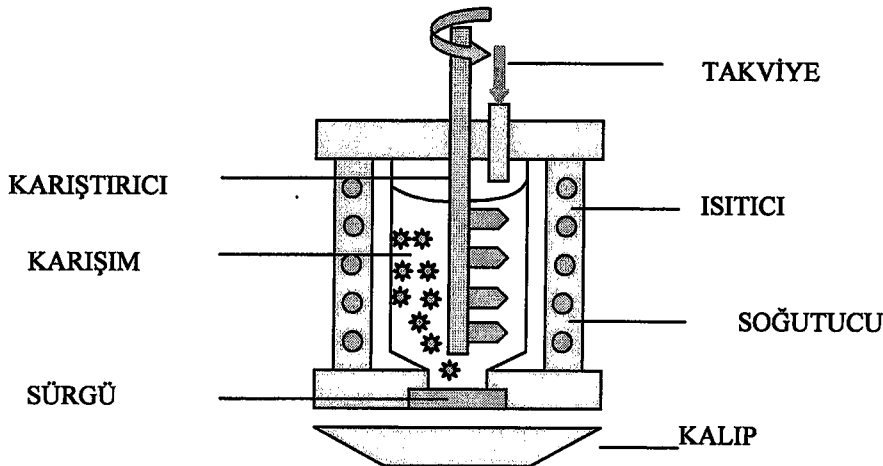
- i) Takviye elemanlarının Al alaşımları tarafından ıslatılabilme özelliklerinin artırılması amacıyla, takviye elemanlarına yüzey işlemleri uygulanabilir. Örneğin grafit ve alümina partikül yüzeylerinin Ni veya Cu ile kaplanması.
- ii) Daha öncede bahsedildiği gibi, Al matrise karıştırma öncesinde veya karıştırma sırasında Li, Cu veya Mg alaşımlarının katılması, takviye elemanlarının matris tarafından ıslatılabilme özelliğini artırabilir.
- iii) Seramik elementlerin ön ısıtma işlemi tabi tutulmaları düzgün dağılımlarına imkan sağlar ve toparlanmaları önleyebilir.
- iv) Seramiklerin Al tozları ile karışımından oluşan peletlerin kullanılmasında takviyelerin dağılımını iyi yönde etkiler.

Bu yöntemle kaliteli kompozit üretimi, sıvı metal ve takviye elemanlarının sıcaklığına, karıştırma hızına ve şekline, gaz giderme yöntemine, katılaştırma hızına ve daha bir çok değişkenin kontrol edilmesine bağlıdır. Her durumda düşük oranlarda ($\approx$ hacimsel %10) takviye imkanlarının sağlanabilmesi bu yöntemin yaygın olarak uygulanmasında bir engel olarak düşünülebilir.[1, 2, 3, 18]

3.2.2 Harç döküm (compocasting)

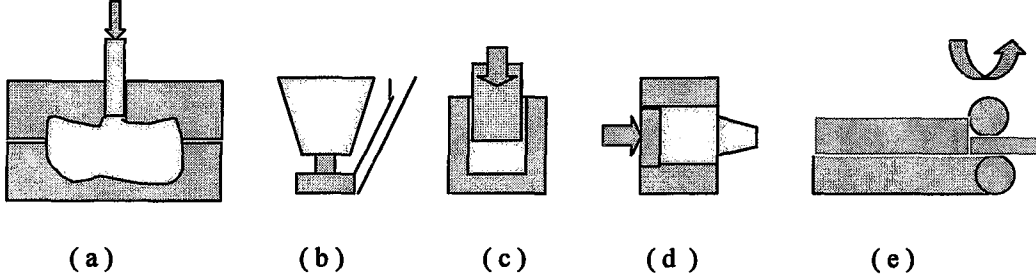
Takviyelerin kümeleşmeden, matris içinde yüksek oranlarda katılımı harç döküm tekniğinin geliştirilmesiyle mümkün olmuştur. Bu yöntemde yarı-katı fazda, akıcı özelliğe sahip, dendrit ihtiva etmeyen karışım ikinci kademe üretim yöntemleriyle şekillendirilir. Şekil 3.3'de şematik gösterimi sunulan bu yöntem, aşağıda belirtilen işlem akışına uygun olarak tatbik edilir.[1, 2, 3, 18]

- i) Gerekli iyileştirmelerin, katkıların yapılabilmesi amacıyla Al alaşımı $\approx 750^{\circ}$ C kadar ısıtılır.
- ii) Alaşım sıcaklığı yarı-katı faz teşekkül sıcaklığına kadar düşürülür. Bu esnada akıcılığın sağlanması ve dendrit teşekkülünün önlenmesi amacıyla karışım sürekli olarak karıştırılır.
- iii) İşte bu aşamada takviye elemanları oluşan vorteks'e aktarılarak dağılımı sağlanır. Karışım viskozitesinin yeterli olması toparlanmaları önleyeceği gibi dağılımın düzgün olmasına yardımcı olur.



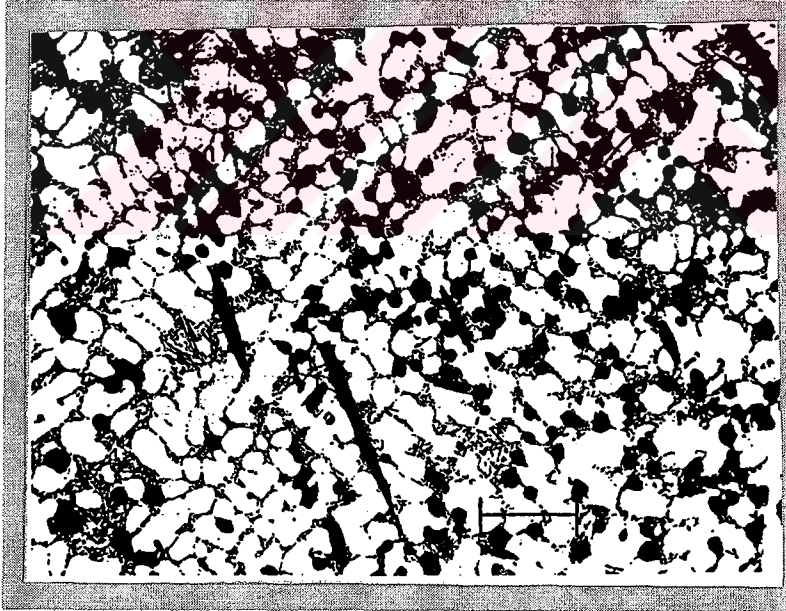
Şekil 3.3 Harç döküm yönteminin şematik görünümü [3]

Üretimin ikinci ve son aşamasında Şekil 3.4’de şematik olarak verilen tekniklerle kompozit üretimi tamamlanmış olur. Ancak kullanım yeri ve amacına bağlı olarak AMK malzemeler tekrar işlenebilir, hatta ısıtılabilir, hatta ısıtılabilir.



Şekil 3.4 Harç (compocasting) yöntemi ile üretilen AMK malzemelerin ikinci aşama şekillendirme teknikleri, (a) enjeksiyon, (b) gravite, (c) basınçlı, (d) ekstrüzyon, (e) haddeleme [3]

Bu yöntemle üretilen kompozitlerin içyapıları küresel ve homojen dağılım karakteristiği gösterirler. Şekil 3.5’te Bu yöntemle üretilen AMK malzemenin içyapı görünümü verilmiştir.



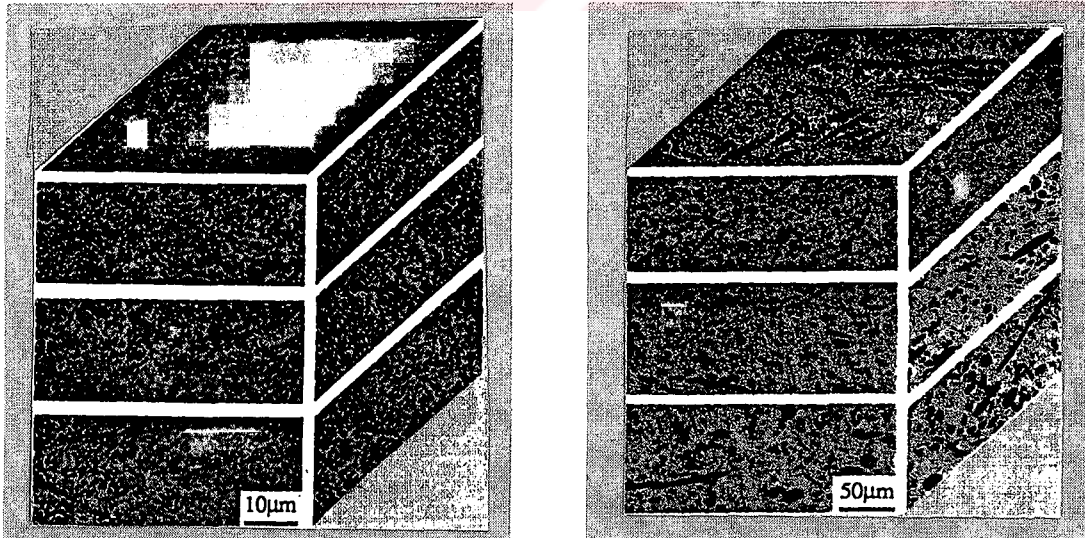
Şekil 3.5 Al-7Si-0.6 Mg alaşım matrisli, hacimsel %10 SiC fiber takviyeli kompozit malzemenin içyapısı (sınırlı çizgi 100µm) [3]

3.2.3 Basınçlı döküm (infiltrasyon)

Basınçlı döküm tekniği, AMK malzemelerin uygulama boyutlarına çok yakın olarak imal edildiği kompozit üretim yöntemidir. Bu yöntemde takviye elemanı olarak genellikle süreksiz seramik fiberler veya viskerler, nadir olarak partiküller kullanılır. Islanma kabiliyeti az olan takviyelerin, bu yöntemle daha başarılı olarak matrise karıştırılabilmesi, Al matrisin basınç altında katılaşması neticesinde, metalurjik özelliklerinin iyi olması ve porozitelerin az olması bu yöntemin avantajları olarak sıralanabilir. [1,2,3,18,28] AMK malzeme üretiminde kullanılan basınçlı döküm teknikleri, şematik olarak Şekil 3.6 (a), (b)'de bu yöntemle üretilen kompozitin içyapı görüntüleri Şekil 3.7 (a), (b)'de verilmiştir.



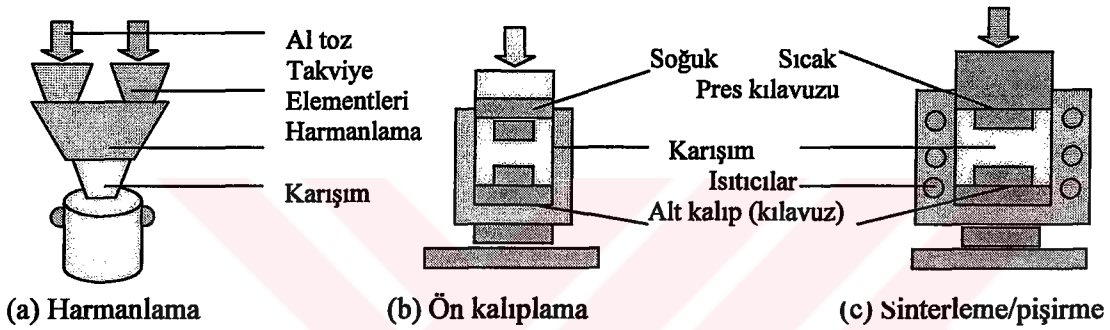
Şekil 3.6 AMK malzeme üretiminde kullanılan basınçlı döküm teknikleri (a) infiltrasyon yöntemi, (b) basınçlı katılaştırma yöntemi [28]



Şekil 3.7 Basınçlı döküm (infiltrasyon) yöntemi ile üretilen AMK malzemelerin içyapı görüntüleri, (a) Al/ hacimsel %15 SiC (w) kompoziti, (b) Al/ hacimsel %15 Al₂O₃ (f) kompoziti [28]

3.2.4 Toz metalürjisi

Katı haldeki Al tozlarının, takviye partikülleri, süreksiz fiberleri veya viskerleri ile harmanlanan karışımın, sıcak preslenmesi toz metalürjisi üretim tekniğinin prensibini oluşturur. Bu yöntemle üretilen AMK malzemelerde, takviye elementlerinin genelde üniform dağıldığı görülmüştür. Ayrıca takviye oranlarında artış sağlama imkanları vermektedir.[1,2,3,18] Toz metalürjisi üretim yöntemi şematik olarak Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Toz metalürjisi üretim yöntemi şematik gösterimi (a) Harmanlama , (b) Ön kalıplama veya şekillendirme, (c) Sinterleme veya pişirme [1,2,3]

Üretim aşamasında, ön şekillendirme amacı ile sinterleme öncesi oda sıcaklığında uygulanan presleme işlemi, takviyelerin bozulmasına ve özelliklerini kaybetmesine neden olabilir. Dolayısıyla ön kalıplama ve şekillendirmede takviye elemanlarının hasar görmemesi için oda sıcaklığında yapılan ön kalıplama sıcaklığı yükseltilebilir, buna bağlı olarak sinterleme aşamasında basınçların düşürülmesi imkanı da olabilir. Bu yöntem ile AMK malzeme üretiminde takviye malzemesi olarak genelde partiküller, viskerler veya bunların karışımı kullanılır. Uzun takviye şekilleri için bu yöntemin uygun olduğu söylenemez. [1, 2, 3, 18]

3.3 AMK Özellikleri

Süreksiz fiber takviyeli AMK malzemeler, seramik elemanların kısa boylarına, rasgele dağılımlarına rağmen spesifik (yoğunluğa bağlı) özellikler ve ısıl performans (düşük

maliyet) gösterirler. AMK malzemelerin üretim aşamalarında, bitmiş malzemenin tüm özelliklerini dolaylı veya dolaysız etkileyen bir çok parametre ve değişken vardır. Bu parametrelerin iyi analiz edilerek üretimin kontrol altında tutulması, üretim kalitesi ve maliyeti açısından önemli bir faktördür.

3.3.1 Mekanik özellikler

3.3.1.1 Elastiklik modülü “E”

Eşyönsüz fiber takviyeli kompozit malzemelerde, elastiklik modülü, fiber dağılımı, görünüm oranı (l/d), fiber ve matrisin mekanik özellikleri, uyumu, bağlantı şartları gibi değişkenlere bağlı bir mekanik özelliktir. Fiber takviyeli kompozitlerin, elastiklik modüllerinin daha önceden saptanması amacıyla, Tsai ve Pagano tarafından önerilen (iki boyutlu fiber dağılımı-lamelli), çok kullanılan ve güvenilir bir bağıntı (3.1)’de, Lim ve Han tarafından önerilen (üç boyutlu fiber dağılımı) bağıntı (3.2)’de verilmiştir. Burada ‘ E_L ’ eşyönsüz fiber kompozitin boyuna, ‘ E_r ’ enine rijitliğidir. [28]

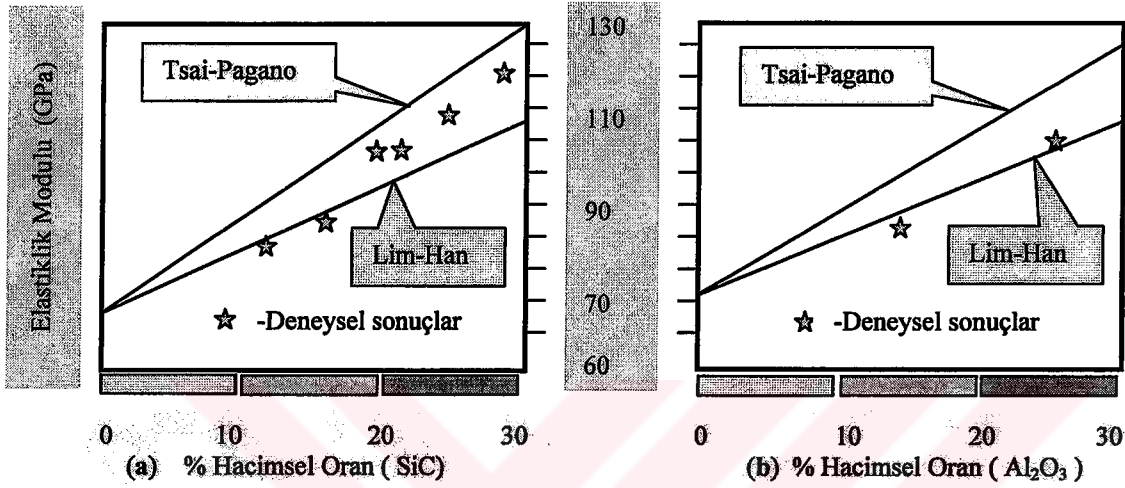
$$E = 1/8 (3E_L + 5E_r) \quad (3.1)$$

$$E = 1/8 [(3E_L + 5E_r) - ((E_L + E_r)^2 / (2E_L + 3E_r))] \quad (3.2)$$

Bu bağıntılarla hesaplanmış elastiklik modülleri , deneysel çalışmalar sonucu elde edilen değerlerin mukayesesi, Şekil 3.9 (a) ve (b)’de verilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı gibi, deneysel sonuçlarla elde edilen elastik modül değerleri, verilen bağıntılarla hesaplanan değerlere (iki-üç boyutlu), yakın ve iki tahmin arasındadır, çünkü takviye dağılımı ve yönleri bu iki sisteme de uygunluk gösterir. Ancak Al/Al_2O_3 (η) sisteminde, fiberlerin kırılması neticesinde deneysel sonuçlarda bir azalma görülmektedir. Al matrise katılan $SiC_{(w)}$ takviyesi, elastik modülün %70, Al_2O_3 (η) takviyesi, elastik modülün % 40 artmasını sağlamıştır [28].

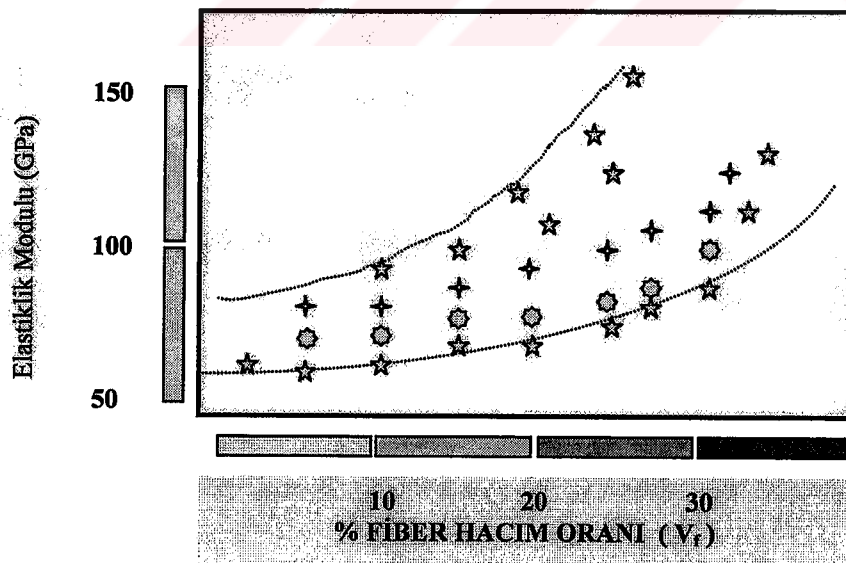
Elastiklik modülünün takviye oranlarına (V_f) bağlı olarak değişimi ile ilgili değişik deneysel çalışmaların sonuçları Şekil 3.10’da verilmiştir. Sonuçlardan anlaşılacağı gibi,

sürekli fiber hacimsel oranlarının (V_f) artması elastiklik modülün belirgin olarak yükselmesinde etkin rol oynamıştır. Fiber yapısının, şeklinin, dağılımının, elastik modül üzerindeki etkisi daha azdır. Genel olarak sürekli fiber, hacimsel oranlarındaki (V_f) %20-40'lık bir artış, Elastik modülün %50-100 oranında artmasını sağlayabilir. [28]



Şekil 3.9 AMK malzemelerin teorik ve deneysel Elastiklik Modülü değerlerinin mukayesesi.

(a) Al/SiC sistemi, (b) Al_2O_3 sistemi [28]



Şekil 3.10 AMK malzemelerde sürekli fiber hacim oranlarının (V_f), Elastiklik modülü üzerindeki etkileri. [28]

Partikül takviyeli kompozitlerin elastiklik modüllerinin teorik hesaplamalarında (3.3) eşitliği kullanılarak, doğrusal olan üst sınır değerlerinde karışımlar kuralı prensibi ile tahminler yapmak mümkün olabilir. Ancak doğrusal olmayan alt sınır değerleri, daha kompleks bağıntılarla ifade edilmişlerdir. Küresel partikül takviyeli kompozitlerde poisson oranının $\gamma=0.2$ olduğu varsayımından, elastiklik modülünün (3.4) bağıntısı ile hesaplanması önerilebilir. [29]

$$E_c = \frac{E_m V_m + E_r V_r}{V_m + V_r} \quad (3.3)$$

$$E_c = \frac{E_m V_m + E_r (V_r + 1)}{E_r V_m + E_m (V_r + 1)} \quad (3.4)$$

Burada E_c , E_m , E_r sırasıyla kompozitin, matrisin ve takviye elemanının elastiklik modülleri, V_m , V_r sırasıyla matrisin ve takviyenin hacimsel oranlarıdır.

3.3.1.2 Çekme dayanımı

Eşyönsüz süreksiz fiber takviyeli kompozit malzemelerde çekme dayanımı; fiber dağılımı, fiberlerin şekil oranı (l/d), matris ve fiber dayanımı, ara yüzey kayma gerilmesi, kalıcı gerilimi, fiber-matris bağı gibi, karmaşık bir çok değişkenin fonksiyonudur. Dolayısıyla bu kompozitlerde çekme dayanımının daha önceden çok yaklaşık olarak hesaplanması ve tahmin edilmesi oldukça zordur. Ancak plastik yük transfer modeli baz alınarak, eş yönsüz süreksiz fiber takviyeli kompozitlerin çekme mukavemeti için aşağıdaki (3.5) ve (3.6) bağıntıları kullanılabilir. [28]

$$\sigma_c = \sigma_f (1 - lc/2l) V_f + \sigma_m^* V_m \quad lc \leq l \quad (3.5)$$

$$\sigma_c = (\tau l/d) V_f + \sigma_m^* V_m \quad lc > l \quad (3.6)$$

Burada, σ_c , σ_m , σ_f sırasıyla kompozit, matris ve fiberin çekme dayanımı, l ve d fiberin boyu ve çapı, σ_m^* fiberin kırılma gerinimine tekabül eden matris gerilimi, τ matrisin kayma gerilmesi, lc kritik fiber uzunluğudur ($lc = \sigma_f d / 2 \tau$).

Son zamanlarda, iki ve üç boyutlu düzensiz fiber dağılımı için Lim ve Han tarafından geliştirilen (3.7), (3.8), (3.9) ve (3.10) bağıntılar aşağıda verilmiştir [28]

İki boyutlu dağılım için;

$$\sigma_c = 1/2 \sigma_f (1 - lc/2l) V_f + \sigma_m^* V_m \quad lc \leq l \quad (3.7)$$

$$\sigma_c = (\pi l/d) V_f + \sigma_m^* V_m \quad lc > l \quad (3.8)$$

Üç boyutlu dağılım için;

$$\sigma_c = 1/4 \sigma_f (1 - lc/2l) V_f + \sigma_m^* V_m \quad lc \leq l \quad (3.9)$$

$$\sigma_c = (\pi l/4d) V_f + \sigma_m^* V_m \quad lc > l \quad (3.10)$$

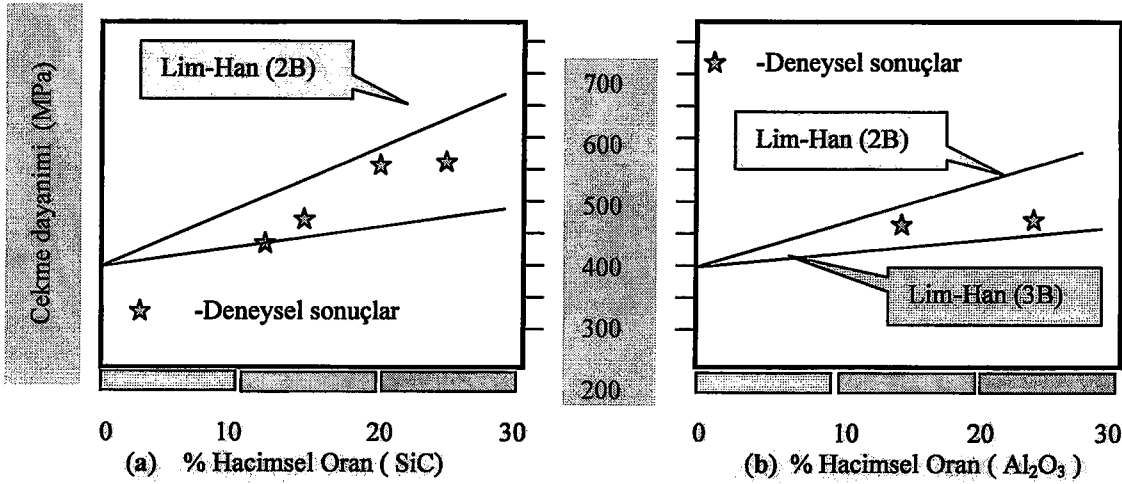
Basıncılı döküm yöntemi ile üretilen süreksiz fiber takviyeli MMK malzemelerde, takviye dağılımı, iki ve üç boyutlu sistem karakteristiği arasında özellik gösterirler. Bu yöntemle üretilen MMK malzemeler için Çekme mukavemeti (3.11) ve (3.12) bağıntılarıyla hesaplanabilir. [28]

$$\sigma_c = C \sigma_f (1 - lc/2l) V_f + \sigma_m^* V_m \quad lc \leq l \quad (3.11)$$

$$\sigma_c = C(\pi l/d) V_f + \sigma_m^* V_m \quad lc > l \quad (3.12)$$

Burada C takviye elemanlarının dizilişini karakterize eden bir katsayı. Lim ve Han'a göre iki boyutlu ve üç boyutlu dağılım için C katsayısı sırasıyla 0.5 ve 0.25 olmalıdır.[28]

Al/SiC ve Al/Al₂O₃ AMK malzemelere ait deneysel ve teorik çekme dayanım değerleri Şekil 3.11 (a) ve (b)'de verilmiştir. Elastik modülde olduğu gibi, çekme mukavemet verileri iki ve üç boyutlu tahmin değerlerinin arasında yer almıştır. Bu örnekte sunulan deneysel çalışmalarda C katsayısının Al/SiC ve Al/Al₂O₃ sistemleri için 0.35 olduğu görülmüştür.[28]



Şekil 3.11 AMK malzemelerin teorik ve deneysel çekme dayanım sonuçlarının mukayesesi.

(a) Al/SiC sistemi, (b) Al₂O₃ sistemi [28]

Genel olarak, akma ve kopma dayanımları takviye elemanlarının hacimsel oranına bağlı olarak artış gösterir. Ancak takviye tipi, şekli, dağılımı, imalat yöntemi, matris malzemesi alaşımı, yapısı ve uygulanan ısıt işlemler kullanıma hazır AMK malzemenin dayanım özelliğine etki eden faktörlerdir. Seramik partikül takviyeli AMK malzemelerde, özellikle dayanımın ikinci planda kaldığı uygulamalarda, dayanım artışı, alüminyum matrise katılan alaşım elementleri ile kontrol edilebilir. Süreksiz fiber takviyelerin çekme dayanımları üzerindeki artış etkisi, akma dayanımlarına oranla daha fazladır. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bazı sonuçlardan, süreksiz fiber takviyeli AMK malzeme dayanımlarına etki eden değişik faktörlerin karşılaştırılması Çizelge 3.3’de verilmiştir. [3]

Özellikle seramik fiber takviyeli AMK malzemelerin, takviyelerin hacimsel oranına bağlı olarak, yüksek sıcaklık karakteristikleri çok iyi ve kararlıdır. Örneğin SiC ve Al₂O₃ takviyeli AMK malzemelerin muhtelif sıcaklıklardaki dayanımları, takviyesiz Al alaşımından daha iyidir. Al 9Si 3Cu/ SiC_w (V_f = %20) AMK malzemenin 300⁰ C sıcaklıkta çekme dayanımı yaklaşık 250 MPa olduğu halde aynı alaşımın takviyesiz çekme dayanımı 100 MPa olarak ölçülmüştür.[3] Özellikle ısıt değişim aralığının yüksek olduğu çevrimlerde, fiber matris ara yüzeylerinde kopma oluşmaması için, dikkat edilecek önemli bir konuda matris ve takviye elemanlarının ısıt genleşme katsayıları arasındaki farkın büyük olmamasıdır (mismatch).

Çizelge 3.3 Süreksiz fiber takviyeli AMK malzeme dayanımına etki eden çeşitli faktörlerin karşılaştırılması [3]

KOMPOZİT YAPISI	ÜRETTİM YÖNTEMİ	FİBER ORANI V_f	E (GPa)	DAYANIM (MPa)		
				AKMA	ÇEKME 20°C	ÇEKME 350°C
Al 1Mg 0.6Si Al ₂ O ₃ safil	TOZ METALURJİ	29	94	390	485	120
Al 1Mg 0.6Si Al ₂ O ₃ safil	BASINÇLI DÖKÜM	20	92	260	360	120
Al 12Si Cu Ni SiC visker	BASINÇLI DÖKÜM	12	95	266	359	124
Al 12Si Cu Ni Al ₂ O ₃ safil	BASINÇLI DÖKÜM	20	11	298	384	181
Al 12Si Cu Ni Al ₂ O ₃ safil	BASINÇLI DÖKÜM	12	83	251	273	74
Al 12Si Cu Ni Al ₂ O ₃ safil	BASINÇLI DÖKÜM	20	95	281	313	113
Al 1Mg 0.6Si SiC visker	TOZ METALURJİ	15	91		306	
Al 4Cu 1Mg SiC visker	TOZ METALURJİ	15	90		406	
Al 1Mg 0.6Si SiC partikül	TOZ METALURJİ	30	126	380	450	
Al 1Mg 0.6Si SiC visker	TOZ METALURJİ	18	98	420	450	
Al 4.5Cu Al ₂ O ₃ safil	Sıvı Faz KARIŞTIRMA	10	74	221	305	144
Al 4.5Cu SiC Nicalon	Sıvı Faz KARIŞTIRMA	10	46	201	217	145

3.3.1.3 Sertlik ve aşınma direnci

Aşınma, sürtünme sonucu meydana gelen, katı cismin yüzeyini teşkil eden malzeme sahasında ve teknolojik olarak bilinen form değiştirme yada madde değişimi dışında kalan, kalıcı form değişimi veya madde değişimidir. Zaten tribolojik olaylar, yalnızca iştirak eden malzeme ve onların özelliklerine değil, ayrıca olaya iştirak eden tüm faktörlerin karşılıklı etkileşimleri ve yakın çevre şartlarına bağlıdır. Dolayısıyla, genel anlamda, aşınma direncini malzemenin sertliği ile özdeşlemenin doğru bir yaklaşım olmayabilir. Ancak aşınma mekanizmasının belirlenmesi (adhesif ve abrasif aşınma) halinde, sertlik aşınma ilişkileri daha iyi bir yaklaşımla açıklanmış olur. [30]

AMK malzemeler içinde durum aynıdır. Kompozit içindeki hacimsel seramik takviye oranının artması, sertliğinin artmasına, sertliğin artması da aşınma direncinin artmasına neden olur. Bu anlamda daha büyük partiküllerin, küçük partiküllere nazaran daha etkin

olduğu gözlenmiştir. Ayrıca fiber takviyeler, partiküllere nazaran, dayanım ve aşınma direnci kombinasyonunda daha başarılıdır. [3]

3.3.1.4 Tokluk ve darbe direnci

Süreksiz fiberli AMK malzemelerde, seramik takviye elementlerinin, hacimsel oranlarının artması, bu malzemelerin aynı zamanda tokluk ve darbe dirençlerinin düşmesine neden olmaktadır. Ancak, çatlak ilerleme hızını yakından ilgilendirilen, tokluk ve darbe dirençlerindeki bu değişim, sadece bu oranla sınırlı olmayıp, parça boyutuna, şekline ve dağılımına da bağlıdır. Partiküller arasındaki mesafelerin azalması çatlak oluşumu ve ilerlemesi için uygun ortamların oluşmasına neden olabilir. [3]

3.3.1.5 Yorulma direnci

Özellikle seramik viskerler AMK malzemelerin yorulma ömrünü belirgin olarak artırır. Aslında kompozit üretim aşamasında oluşan birçok içyapı hataları, çatlak oluşumu ve ilerlemesi için uygun ortamlar oluştururlar. Ancak takviye elemanlarının, görüntü oranının (l/d) yeterli olması durumunda, çatlak oluşumu ve büyümesi önemli ölçüde engellenerek, yorulma dayanımında artış sağlanır. Örneğin Al_2O_3 (fiber), SiC (visker) takviyelerle, yorulma limitlerinde %25-35 artış sağlandığı görülmüştür. Özetle, fiber matris ara yüzey bağlantılarının iyileştirilmesi ve boşluksuz olması kompozitin yorulma direncini ve dayanımını olumlu yönde etkiler. [3]

3.3.2 Fiziksel özellikler

Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin fiziksel özellikleri, birbirinden farklı özelliklere sahip matris ve takviye fazlarının özelliklerine, dağılımlarına ve oranlarına bağlı değişiklikler gösterir.[3, 29]

3.3.2.1 Yoğunluk

Özellikle özgül mekanik özelliklerin önem kazandığı mühendislik uygulamalarında, üretimi planlanan alüminyum matrisli kompozit malzemelerin yoğunluğunun azaltılması düşünülebilir. Ancak takviye elemanlarının yoğunluğu artırıcı yöndeki etkileri, bu malzemelerin üretimi için önemli bir engel teşkil etmez. Ayrıca kompozit malzemelerin yoğunlukları, partikül dağılımı ve poroziteler ile ilgili tahminlerin yapılabilmesi açısından önemli bir parametredir. [1, 29, 31, 32]

Partikül takviyeli kompozitlerde teorik yoğunluk karışımlar kuralına göre hesaplanabilir,

$$\rho_c = \rho_r V_f + [\rho_m (1 - V_f)] \quad (3.13)$$

Burada, ρ_c , ρ_r , ρ_m , sırasıyla kompozitin, takviye elemanının, matrisin yoğunlukları, V_f , hacimsel takviye oranıdır. [29, 32]

3.3.2.2 Isıl genleşme ve ısı iletkenlik

Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin, iyi olan mekanik özelliklerinin yanı sıra, ısı genleşme ve ısı iletkenlik gibi fiziksel özellikleri, özellikle hassas ölçü cihazlarında ve elektronik parça imalatı gibi birçok mühendislik uygulamalarında aranan ve hedeflenen önemli bir parametre olarak görülebilir. Takviye elemanlarının, yapısına, şekillerine, dağılımına ve karışım oranlarına bağlı olarak bu fiziksel özellikleri nasıl etkilediği, kompozit üretimi için önemli bir faktördür. Bu fiziksel özelliklerin teorik olarak hesaplanmasında bazı modeller geliştirilmiştir. [1, 29]

Partikül takviyeli (düşük takviye oranlarında, küresel partiküller için) kompozit malzemelerin ısı iletkenliklerinin teorik olarak hesaplanmasında Rayleigh-Maxwell tarafından (3.14) bağıntısı önerilmiştir. [29]

$$K_c = K_m * \left[\frac{1 + 2.V_f \left[\frac{(1 - K_m / K_r)}{(2K_m / K_r + 1)} \right]}{1 - V_f * \left[\frac{(1 - K_m / K_r)}{(2K_m / K_r + 1)} \right]} \right] \quad (3.14)$$

Burada K_c , K_m , K_r sırasıyla, kompozitin, matrisin ve takviye elemanının ısı iletkenlik katsayıları, V_f hacimsel takviye oranınıdır.

Partikül takviyeli (küresel) kompozit malzemelerin ısı ıl genleşme katsayısının teorik olarak hesaplanmasında Rayleigh-Maxwell tarafından (3.15) bağıntısı önerilmiştir. [29]

$$\alpha_c = \frac{(\alpha_m.V_m.K_m + \alpha_r.V_r.K_r)}{(V_m.K_m + V_r.K_r)} \quad (3.15)$$

Burada α_c , α_m , α_r , sırasıyla, kompozitin, matris ve takviye elemanlarının ısı ıl genleşme katsayıları, K_c , K_m , K_r sırasıyla, kompozitin, matrisin ve takviye elemanının ısı iletkenlik katsayıları, V_m , V_r sırasıyla, matrisin ve takviye elemanın hacimsel oranlarıdır. [29]

BÖLÜM 4

4. UÇUCU KÜL İÇEREN, DÜŞÜK MALİYETLİ AMK MALZEMELER

Metal ve alüminyum matrisli kompozit malzemeler ile ilgili genel bilgiler daha önceki bölümlerde sunulmuştu. Bu bilgiler doğrultusunda kompozit malzeme üretimi, matris ve takviyelerin hazırlanması ve nihai şekillendirme işlemleri, ileri teknoloji gerektiren, işletme maliyetleri yüksek ve pahalı yatırımlardır. Ayrıca birim maliyeti değiştiren bir çok faktörün kontrol altında tutulması da oldukça zordur. Geri kazanma ve dönüşüm imkanları olmayan ve çok yüksek miktarlarda seri olarak üretilen kompozit malzeme hurdalarının, çevrenin kirlenmesi ile ilgili olumsuz etkilerini de unutmamak gerekir. [1, 2, 3, 18]

Son zamanlarda yapılan bazı çalışmalar düşük maliyetli kompozit malzeme üretimi doğrultusunda yoğunlaşmış ve kayda değer ilerlemeler kaydedilmiştir. Özellikle düşük maliyetli takviyelerin kullanılması ve kompleks olmayan üretim yöntemlerinin uygulanmasına çalışılmıştır. Düşük maliyetli, takviye ve dolgu malzemeleri arasında en popüler olanlarından biride uçucu küllerdir.[31]

Tez konusu bu çalışmamızın amacı, yok denecek kadar düşük maliyetli uçucu küllerin, alüminyum matris içerisinde takviye ve dolgu maddesi olarak kullanılma olanaklarının araştırılmasıdır. Ulaşabildiğimiz kaynaklarda uçucu kül takviyeli AMK malzemelerle ilgili doküman sayısı çok fazla olmamakla birlikte, elde edilen dokümanlardan konumuzla ilgili yapılan bazı çalışmaların sonuçları bölüm içerisinde verilmiştir.

4.1 Uçucu Küller (Fly Ash)

AMK malzemenin üretiminde, dolgu ve takviye amacı ile kullanılacak olan uçucu küller, termik santrallerin bir atık ürünüdür. Termik santrallerde yakılan 100 ton kömürden yaklaşık olarak 12 ton uçucu kül oluşmaktadır.[33] Uçucu küller ve diğer atık ürünler, uygunluklarına bağlı olarak, yüzey dolgu işlemlerinde ve çimento üretiminde değerlendirilmektedir. Sonuç olarak bu atık ürünlerin kullanılmayan büyük bir oranı su ile

karıştırılarak yapay göletlerde depolanmaktadır. Çevrenin kirlenmesine de yol açan bu atık ürünler ile ilgili özet bir bilgi aşağıda verilmiştir.

4.1.1 Uçucu küllerin tanımı

Düşük kalorili olmaları nedeniyle endüstride yakıt olarak kullanılmayan kömürler termik santraller de pülverize halde yakılarak elektrik enerjisi elde etmekte kullanılırlar. Şlam adı verilen bu kömürlerin tane çapları 0.2-5 mm dolayındadır ve kül oranları oldukça yüksektir. Öğütülmüş kömür tanecikleri su ile fırına püskürtülerek yakılır. Termik santralin tipine göre 1100-1700 °C sıcaklıkta yakılan bu kömürlerin %10-20'si kazan altına düşerek su ile uzaklaştırılır. Buna kazan altı cürufu denir ve tane çapları 20µm -3mm arasındadır. Geri kalan daha küçük partiküller baca çekişi ile taşınarak siklon veya elektro filtrelerde toplanırlar. Baca gazları ile sürüklenen ve hava gazları ile temas ederek ani soğuma ile puzolanik özellik kazanan bu atık ürünlere *Uçucu Kül* denir. Bu küllerin tane boyutları 1-150 µm arasındadır. [34]

Siklon tipi yakma ocaklarında yakma sıcaklığı 1700°C dolayındadır ve külün % 85-90'ı bu sıcaklıkta ergiyerek ocak altında toplanır ve geri kalan %10-15'i baca gazları ile sürüklenerek filtrelere ulaşır.

Termik santraller de oluşan artık maddeleri üç grupta toplamak mümkündür.

- a) Baca gazları ile taşınamayan, yanarak tabana biriken ve burada aglomere olan küle , “taban külü” denir.
- b) Siklon tipi ocaklarda yanan kömür külünün ergimesi neticesinde oluşan küle “ergimiş kül” veya “cüruf” denir.
- c) Baca gazları ile taşınan, mekanik veya elektrostatik filtrelerde biriken küllere “uçucu kül” denir. Uçucu küllerin kimyasal ve fiziksel özellikleri (spesifik yüzey, granülometri) uygulama alanlarının belirlenmesinde en önemli faktörleri oluştururlar. Çizelge 4.1’de çeşitli ülkelerdeki linyit uçucu küllerinin kimyasal ve fiziksel özellikleri verilmiştir. [34]

Çizelge 4.1 Çeşitli ülkelere ait uçucu kül karakteristikleri [34]

ÖZELLİKLER	LİNYİT KÖMÜRÜ UÇUCU KÜL MENŞEİ				
	Almanya (Buna)	Fransa (Gardanne)	Yunanistan (Prolemais)	Polonya (Tureszow)	İtalya (Mercure)
Yoğunluk (gr/cm ³)		1.50	2.26	2.40	
Spesifik Yüzey (cm ² /gr)		3400	3000		
Yumuşama noktası (°C)		1150-1250	1130	1170	
Ergime noktası (°C)		1300-1400	1180	1310	
Kimyasal bileşim	%	%	%	%	%
Karbon (C)		0.10	3.50	0.5-5	
SiO ₂	34.50	24.00	42.20	48-52	35.90
Al ₂ O ₃	2.25	12.00	19.60	30-32	21.10
Fe ₂ O ₃	0.49	5-6	7.50	18.00	7.65
CaO	34.95	32-36	20.20	4-5	19.05
CaO (serbest)	26.20	16-18	1.30	0.01	
MgO	4.54	2-3	7.40	0.15	
SO ₃	19.40	20.00		0.50	11.75
Na ₂ K ₂ O (alkaliler)		2.00	1.80	1-3.5	
Diğerleri					4,5

4.1.2 Uçucu küllerin sınıflandırılması

4.1.2.1 Kimyasal yapılarına göre sınıflandırma

- i) *Siliko alüminöz uçucu küller*; bunlar taşkömürü uçucu külleridir ve esas yapısını siliko alüminatlar oluşturmaktadır. Bu gruptaki uçucu küller oda sıcaklığında kireci bağlama özelliğine sahiptirler, bir başka deyişle hidrolik bir bağlayıcı gibi sulu ortamda priz yaparlar. Tane yapılarının çok ince ve camsı oluşu, çok miktarda silis ve alüminyum içermeleri dolayısıyla diğer hidrolik bağlayıcılar gibi özellik gösterirler.
- ii) *Sulfokalsit uçucu küller*; bu gruptaki uçucu küller genellikle linyit kömürlerinden elde edilirler bazı hallerde bağlayıcı olmaksızın priz alırlar.

- iii) *Diğer uçucu küller* ;yakıtı ve yanma sisteminin homojen olmadığı durumlarda elde edilen küllerdir. [34]

4.1.2.2 Elde edildiği kömür cinsine bağlı sınıflandırma

- i) *Linyit uçucu külü*;linyit kömürünün uçucu maddesi fazladır. Kullanılma alanları fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Linyit uçucu külünde toprak alkali metalleri taş kömürüne oranla daha fazladır. Bu özelliğinden dolayı daha çok uygulama alanı vardır.
- ii) *Taşkömürü uçucu külü*; taş kömürünün uçucu külü genel olarak 3-100 μm incelikte ve 200 nolu elek üzerinde %16-20 kalacak incelikte tamamen kuru olarak elde edilir. Taneciklerin büyük bir kısmı camsı minerallerden meydana gelmektedir. Spesifik yüzeyleri linyit uçucu küllerine göre daha büyüktür. [34]

4.1.3 Uçucu küllerin mineralojik ve kimyasal yapısı

Uçucu küller camsı, içi boşluklu veya dolu küresel tanecikler ile süngerimsi mineral parçacıklar ve yanmamış taneciklerden meydana gelir. Kimyasal yapısı yaklaşık olarak %50 SiO_2 , % 30 Al_2O_3 , % 7 Fe_2O_3 (Fe_2O_3 , FeO veya Fe_3O_4 şeklinde), % 4 K_2O , %2 CaO , %2 MgO , % 1 TiO_2 , %0,5 SO_3 ,% 1 Na_2O , eser miktarda berilyum, germanyum, fosfor, molibden ve bordan meydana gelmiştir. 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 , MgO ateşten uzak olduğu oranda azalmakta, dolu küresel taneler artmakta ve birim hacim fazlalaşmaktadır.

Mineralojik analizlerde genel olarak uçucu kül içindeki silisin bir kısmının kuvarz kristalleri halinde, diğer bir kısmının ise alüminyumla birleşerek mullite ($2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$) geri kalanının ise camsal yapıda olduğu saptanmıştır. Demirin kısmen manyetit (Fe_2O_4) ve hematit (Fe_2O_3) , geri kalanının da camsı fazda olduğu görülür. 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. [34]

C ve F tipi uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları (%ağırlık) Çizelge 4.2'de, T.S.E ve ASTM standartlarına göre uçucu küllerin kimyasal bileşim oranları (%ağırlık) Çizelge 4.3'de verilmiştir. [31, 35]

Çizelge 4.2 C ve F tipi Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonu (% ağırlık) [31]

Uçucu Kül	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO	SO ₃	FeO/LOI*
C-Tipi	33-61	8-26	4-10	14-37	1-7	0.3-2.0	0.4-6.4	0.9-2.8	0.5-7.3	0.2-1.4
F-Tipi	33-65	11-33	3-31	0.6-13	0-5	0.7-5.6	0-3.1	0.7-5.6	0-4	1-12

*Yanma kaybı

Çizelge 4.3 T.S.E ve ASTM Standartlarına göre uçucu küllerin kimyasal bileşim oranları [35]

KİMYASAL BİLEŞİM	T.S.E.K ' na göre Miktar % Ağırlık	ASTM Standardına göre Miktar % Ağırlık	
		F tipi	C tipi
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O 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

4.1.4 Uçucu küllerin fiziksel ve mekanik özellikleri

Uçucu kül ve bazı kimyasal bileşimlerin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 4.4'de görünüm, tane boyutu ve yoğunluk ile ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.4 Uçucu küller ve bazı malzemelerin, fiziksel ve mekanik özellikleri [1, 31]

Malzeme	Gerçek Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime Noktası (°C)	Poison Oranı	Elastiklik Modülü (GPa)	Isıl İletkenlik [W/ (m.K)]	Elektriksel Direnç (Ω.cm)
Uçucu Kül						
Çöktürücü	1.6-2.7	1300	--	143-310	0.06-0.16	10 ⁹⁻¹²
Boşluklu	0.4-0.6	--	--	--	0.07-0.35	--
Al ₂ O ₃	3.9	2250	0.25	380	100 ₍₂₎ ;5-30 ₍₃₎	--
SiC	3.2	--	0.3	420	100 ₍₂₎ ;4-20 ₍₃₎	1000
SiO ₂	2.6	1580 ₍₁₎	--	94	--	--
Mullit	3.2	1850	0.25	140	<5.9	--
Küresel Cam						
Boş	0.15-0.4	589 ₍₁₎	--	--	--	6x10 ¹²
Dolu	2.45-2.5	--	--	68	1.5	--
Soda Camı	2.5	4600 ₍₄₎	0.23	60-70	--	2.5x10 ⁶
Alüminyum	2.7	660	0.33	69-79	237	3.15x10 ⁻⁶

(1)-Yumuşama noktası (2)- Tek kristal (3)- Çok kristalli (4)-Maksimum servis sıcaklığı

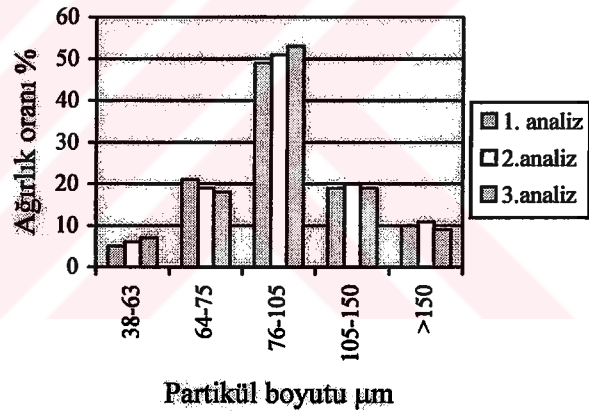
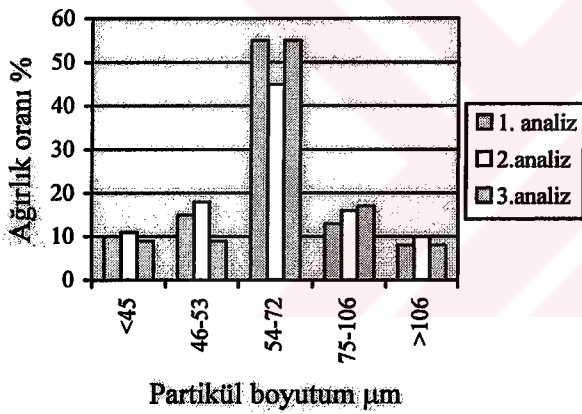
4.1.4.1 Görünüş

Uçucu kül çimentodan daha koyu gri renkte, ince taneli ve yumuşak bir yapıya sahiptir. Mikroskopla incelendiğinde çeşitli şekil ve büyüklükte, genellikle küresel, şeffaf, bazen açık renkli, bir kısmı siyah ve çok az koyu kırmızı taneciklerden oluşan bir yapı gösterir. Linyit kömüründen elde edilen uçucu küller daha esmerdir. Yanmanın iyi olması halinde içinde yanmamış karbon miktarı az olacağından rengi daha açıktır. [34]

4.1.4.2 Tane boyutu

Uçucu küllerin tane boyutları öncelikle kullanılan kömürün öğütülme derecesine bağlıdır. Bacada kullanılan filtre ve kullanılan yakıtın cinsi tane boyutunu etkileyen diğer faktörlerdir. Genellikle taş kömürü uçucu külü linyit uçucu külünden, elektro filtrelerde toplananlar siklonlarda toplananlardan daha ince bir yapıya sahiptirler.[34]

Uçucu külün tane boyutu 0,5-200 μ m arasında değişmekle beraber ortalama boyutları 20 μ m- 50 μ m dir. %16-25'i 80 μ m' lik elekte, %26-240'ı 50 μ m' lik elekte kalmaktadır. 40 μ m' den küçük taneciklerin elekte ayrılması olanaksızdır. Spesifik yüzeyleri ise 2800~3800 cm²/gr arasındadır. Çöktürücü uçucu kül elek analiz sonuçları Şekil 4.1'de, Senosifir uçucu kül elek analiz sonuçları Şekil 4.2'de verilmiştir. [31, 34]



Şekil 4.1 Çöktürücü uçucu kül elek analizi [31]

Şekil 4.2 Senosifir uçucu kül elek analizi [31]

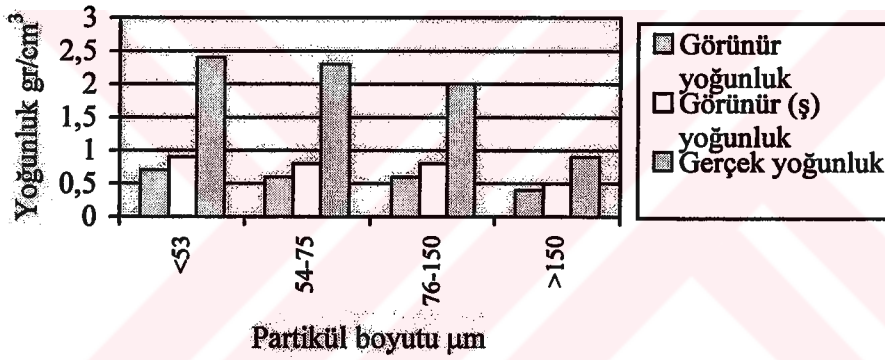
4.1.4.3 Yoğunluk

Uçucu küllerin yoğunluğu, tane büyüklüğüne ve mineralojik yapısına bağlıdır. İçi dolu küresel tanelerden meydana gelen uçucu küllerin yoğunlukları, süngerimsi yapıya sahip taneciklerden oluşan uçucu küllerden daha fazladır. Yoğunluk ile ilgili büyüklüklerden bahsetmeden önce kullanılan yoğunluk deyimlerinin tanımlanması, bu konudaki çelişkilere açıklık getirmesi açısından çok önemlidir.

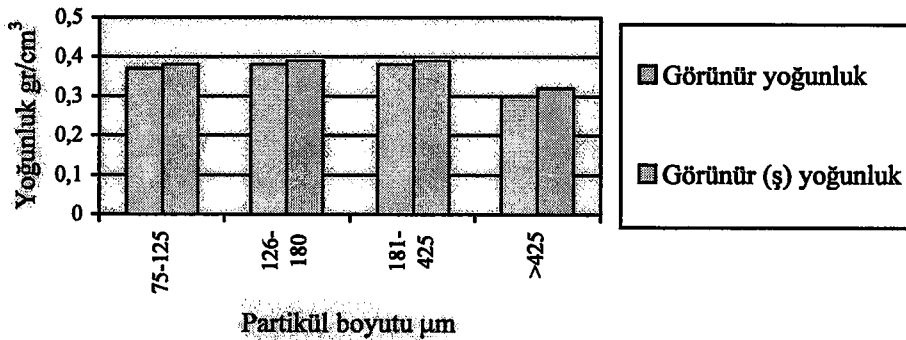
Yoğunlukla ilgili terimlerin toz teknolojisindeki sözlük anlamları, [36]

- i) Görünür yoğunluk (doğal); “Bulk density” serbest olarak dökülen tozun, bu haldeki ölçülen görünür yoğunluğu.
- ii) Görünür yoğunluk (sıkıştırılmış); “Tap density” tozun, belirtilen ölçülerdeki kaplarda, belirli şartlar altında vibrasyonla veya sıkıştırılmasıyla oluşan tabakanın görünür yoğunluğudur.
- iii) Gerçek yoğunluk; “True density” partikülün açık ve kapalı gözenekleri ihmal edilerek kütlesinin hacmine oranı olarak tarif edilir.

Çöktürücü ve senosifir uçucu kül yoğunluklarının partikül boyutuna bağlı olarak değişimi Şekil 4.3’de, senosifir uçucu kül yoğunluklarının partikül boyutuna bağlı olarak değişimi Şekil 4.4’de, spesifik yüzeylerin yoğunlukla değişimi, Çizelge 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.3 Çöktürücü uçucu kül yoğunluklarının partikül boyutuna bağlı olarak değişimi [31]



Şekil 4.4 Senosifir uçucu kül yoğunluklarının partikül boyutuna bağlı olarak değişimi [31]

Çizelge 4.5 Spesifik yüzeylerin yoğunlukla değişimi [34]

SPESİFİK YÜZEY cm^2/gr	690	740	1080	1180	2690	3720	3990	4740	5280
YOĞUNLUK gr/cm^3	1,64	1,77	1,82	1,83	2,08	2,19	2,28	2,33	2,42

4.1.4.4 Ergime sıcaklığı

Uçucu külün ergime sıcaklığı, elde edildiği şartlara ,uygulanan prosesin maksimum ve minimum sıcaklıklarına bağlı olarak değişir. Yapılan bir deneyde yarı yükseltgen yarı indirgen ortamda uçucu külün 900-1100 $^{\circ}\text{C}$ arasında hafif bir çökme göze çarpmakta , belirgin şişme 1100-1200 $^{\circ}\text{C}$ 'de olmakta , tam ergime ve sıvılaşma 1250-1400 $^{\circ}\text{C}$ 'de meydana gelmektedir. Şişme olayı gaz çıkışından meydana gelir, bu durumda malzeme dövülebilir haldedir.

Yükseltgen bir ortamda, 600 $^{\circ}\text{C}$ 'de yanabilen maddeler uzaklaşmakta ve 1400 $^{\circ}\text{C}$ dolayında ergime başlamaktadır. Uçucu kül tuğla rengine dönüşür, ısıtma ergime sıcaklığından önce kesildiğinde uçucu kül taneleri birbirini yapışarak aglomere olur. [34]

4.1.4.5 Manyetik özellik

Uçucu kül içerisine bir mıknatıs daldırıldığında bir miktar uçucu külün mıknatısa yapıştığı görülür. Manyetik özelliği olmadığı halde yapışan tanecikler hafif bir hava akımı ile uzaklaştırılır. Yapılan deneyler sonucu uçucu küllerin yaklaşık %25'i mıknatısta kaldığı görülmüştür. Kimyasal analizlerde mıknatıs tarafından tutulan numunenin %63'nün Fe_2O_3 olduğu tespit edilmiştir. [34]

4.1.4.6 Mekanik dayanım

Uçucu külün mekanik dayanımları bünyesindeki boşluklu malzeme yüzdesine bağlı olarak değişmektedir. Bilyeli değirmede ezilen uçucu külün yoğunluğunda ve spesifik yüzeyinde artış görülmüştür. Örneğin ilk 15 dakika öğütme sonunda $1.90 \text{ g}/\text{cm}^3$ olan yoğunluk 4 saatlik öğütme sonunda $2.67 \text{ g}/\text{cm}^3$ 'e ve $2400 \text{ cm}^2/\text{g}$ olan spesifik yüzey $12000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'a yükselmiştir. [34]

4.1.4.7 Absorbsiyon özelliği

Boşluklu tanelerden oluşan uçucu külle, absorpsiyon özelliklerinden faydalanılarak endüstri atıkları ve suların temizlenmesinde kullanılırlar. [34]

4.1.4.8 Suda çözünürlük

Uçucu külün bünyesinde bulunan SO_3 ve Toprak alkali metal bileşiklerin büyük bir çoğunluğu saf suda çözünürler. Bunun dışındaki bileşikler çok az çözünür. Uçucu kül içerisindeki amorf ve camsı silis oda sıcaklığında ve saf suda çok az çözünür ancak sıcaklığın artması ile çözünürlükte belirgin bir artış izlenir, bu durum puzolanik özellik istenen karışımlar için iyi olmayan bir özelliktir. [34]

4.1.4.9 Puzolanik özellik

Silike Alüminöz bir uçucu kül kireç ile sulu ortamda reaksiyona girmesine puzolanik özellik denir. Belirli oranlarda birleşen kireç, uçucu kül ve su sertleşerek priz alırlar. Termik santraller de bu olaydan faydalanarak uçucu küller barajlarda etkisiz hale getirildiği gibi, çimento üretiminde kullanılmasına olanak sağlar. Son zamanlarda uçucu küllerdeki radyasyon miktarının kabul edilebilir sınırların üstünde olduğunun tespit edilmesi bu atık ürünün çimento sanayinde kullanılmasına bazı kısıtlamalar getirmiştir.[34]

4.2 Uçucu Küllerin AMK Malzeme Üretiminde Kullanımı

Uçucu kül takviyeli AMK malzemelerle ilgili deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçların değerlendirilmesi aşağıda verilmiştir. Bu deneysel çalışmada matris malzemesi olarak A356 alüminyum, takviye ve dolgu malzemesi olarak çöktürücü ve senosifir tip uçucu kül kullanılmıştır. Bu uçucu küllere ait, tane büyüklüğü, elek analizleri, yoğunluk gibi genel bilgiler, uçucu kül özellikleri başlığı altında verilmiştir. [31]

4.2.1 Partikül dağılımı

Bütün kompozitlerde olduğu gibi, uçucu kül takviyeli AMK malzemenin üretiminde partikül dağılımı çok önemlidir. Alüminyum matris ile uçucu kül arasındaki yoğunluk farkından dolayı hafif olan uçucu küller yukarıda toplanma eğilimi içinde olurlar. Bu olumsuzluk, iyi karıştırma neticesinde kalıba dökülen karışımın soğuma hızının kontrol edilmesi ve kalıp geometrisi ile önlenmiştir. Şekil 4.5’de verilen ışık mikroskop görüntülerinde, partiküllerin üniform denecek düzeyde iyi dağıldığı gözlenmiştir.



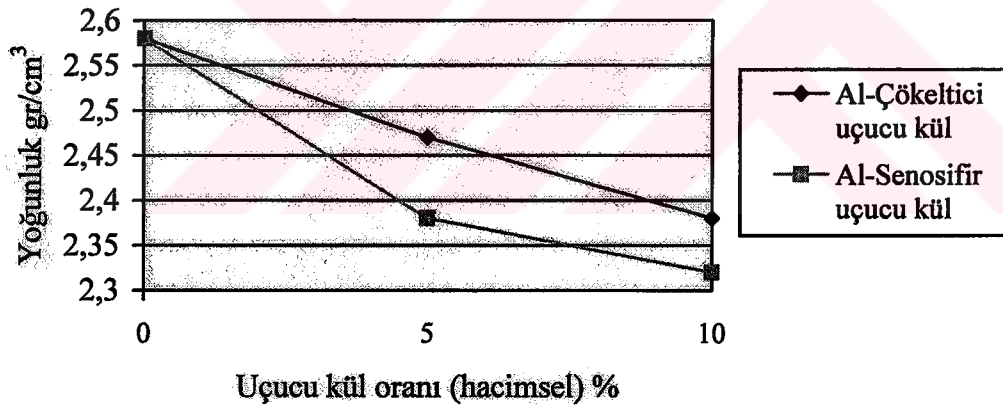
Şekil 4.5 A356 alüminyum matrisli, hacimsel %10 a) çöktürücü uçucu kül takviyeli, b) senosifir uçucu kül takviyeli, kompozit malzemelerin ışık mikroskop fotoğrafları [31]

4.2.2 Yoğunluk

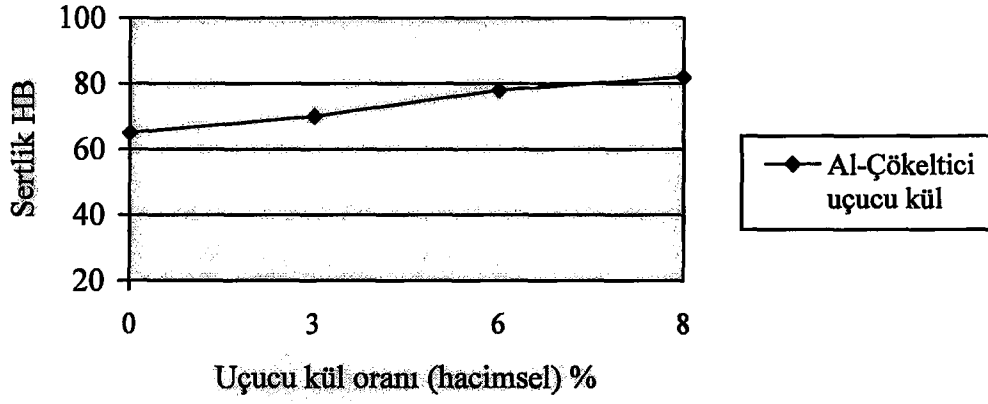
Çöktürücü ve senosifir uçucu külleri ile oluşturulan kompozit malzemenin yoğunlukları, yapıdaki muhtemel porozitelerden dolayı, karışımlar kuralı ile hesaplanan teorik değerin biraz altında seyretmiştir. Şekil 4.6'de uçucu kül oranına bağlı olarak yoğunluğun değişimi verilmiştir.

4.2.3 Sertlik ve elastik modül

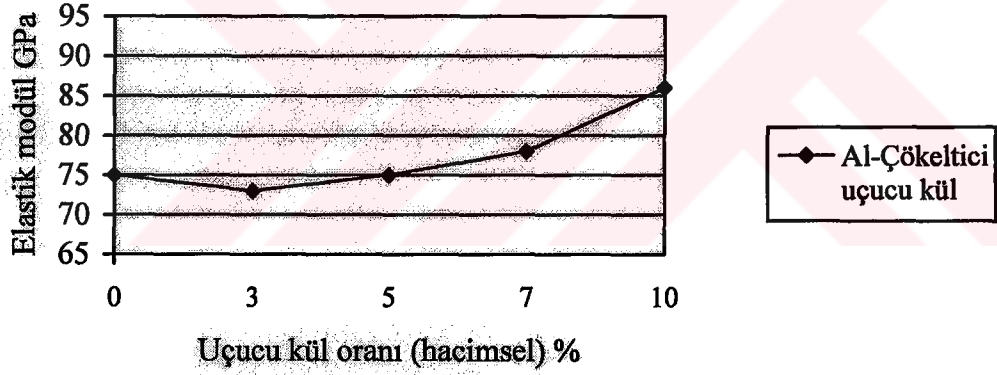
Çöktürücü tip uçucu kül ile belirli hacimsel oranlarda üretilen A356 alüminyum alaşım matrisli kompozitin sertlik ve elastik modül değerlerindeki değişim sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de verilmiştir. Alümin alaşımın takviyesiz sertliği yaklaşık 65 HB'den, hacimsel %8 oranında çöktürücü kül ilavesiyle 82 HB'e yükseltilmiştir. Elastik modülün uçucu kül oranına bağlı olarak, (hacimsel) % 5'den sonra belirgin artış gösterdiği saptanmıştır. [31]



Şekil 4.6 A 356 alüminyum alaşım matrisli kompozit malzemenin uçucu kül oranına bağlı olarak yoğunluğunun değişimi [31]



Şekil 4.7 A 356 alüminyum alaşım matrisli kompozit malzemenin uçucu kül oranına bağlı olarak sertliğinin değişimi [31]



Şekil 4.8 A 356 alüminyum alaşım matrisli kompozit malzemenin uçucu kül oranına bağlı olarak Elastiklik modülünün değişimi [31]

BÖLÜM 5

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarımızda, düşük maliyetli uçucu kül içeren AMK malzeme üretimi, mikroyapının incelenmesi ve üretilen kompozit malzemenin değişkenlere bağlı olarak mekanik özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Deneysel çalışmaların büyük çoğunluğu, Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Metalurji Fakültesi laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiş ve deneylerde kullanılan cihaz fotoğrafları Ek.1, 2, 3’de verilmiştir.

Tez konusu kapsamı içerisinde daha önceki bölümlerde, deneysel çalışmalara altyapı oluşturmak ve belli bir bilgi birikimi sağlamak amacı ile referans kaynaklar incelenmiş ve özet olarak verilmiştir. Tezimizin bu son aşamasında, hedef malzeme üretimi ilgili tüm detaylar belirli bir bilgi akışı içinde vermeye çalışılmıştır.

5.1 Kompoziti Oluşturan Malzemeler

5.1.1 Alüminyum matris alaşımı

Deneysel çalışmalarda, alüminyum matris olarak ETİAL 171 (A360) ve ETİAL 120 (443) alüminyum alaşımları kullanılmıştır. Bu alaşımlarının seçimindeki amaç, döküm kabiliyetlerinin iyi olması ve matrisin uçucu külü ıslatma özelliğini artıran Mg elementi içermeleridir. Bu alaşımların optik emisyon spektrometresinde yapılan kimyasal analiz sonuçları Çizelge 5.1’de mekanik özellikler Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Alüminyum alaşımlarının kimyasal analiz sonuçları

Al alaşımı	Al	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Zn	Pb	Ti	Cr	Sn
ETİAL 171 –A360	89.33	0.02	0.342	9.30	0.35	0.56	0.045	0.04	0.003	0.002	0.001
ETİAL 120 – 443	93.31	0.006	0.277	5.92	0.239	0.002	0.000	0.000	0.130	0.006	0.000

Çizelge 5.2 Alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri

ALÜMİNYUM ALAŞIMI	Çekme Dayanımı MPa	Elastiklik modülü GPa	Sertlik HB
ETİAL 171 (A360)	160	58	60
ETİAL 120 (443)	170	60	63

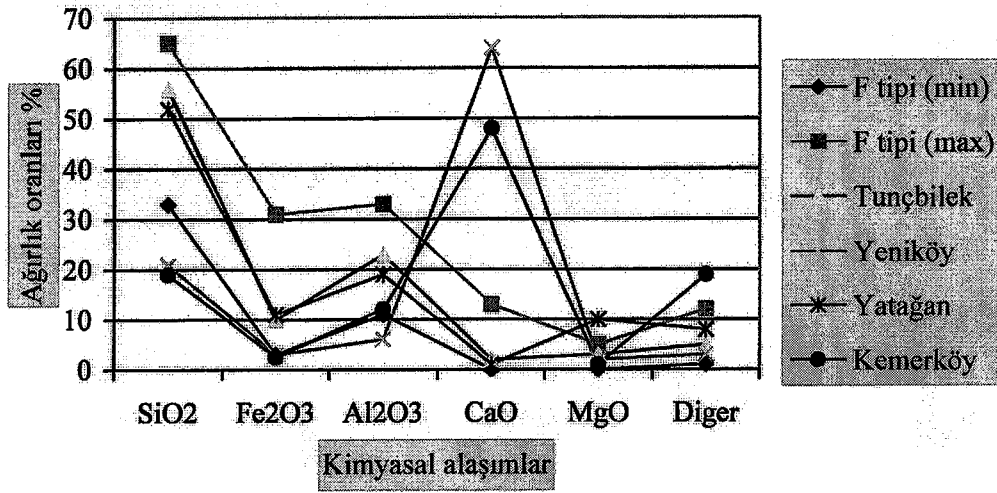
5.1.2 Takviye ve dolgu malzemeleri

Takviye ve dolgu malzemesi olarak kullanılması planlanan uçucu küller Tunçbilek, Yatağan, Yeniköy, Kemerköy Termik santrallerinden alınmıştır. Bu küllere ait elek ve kimyasal analiz sonuçları, yoğunlukları değerlendirilerek kullanılma olasılıkları araştırılmıştır.

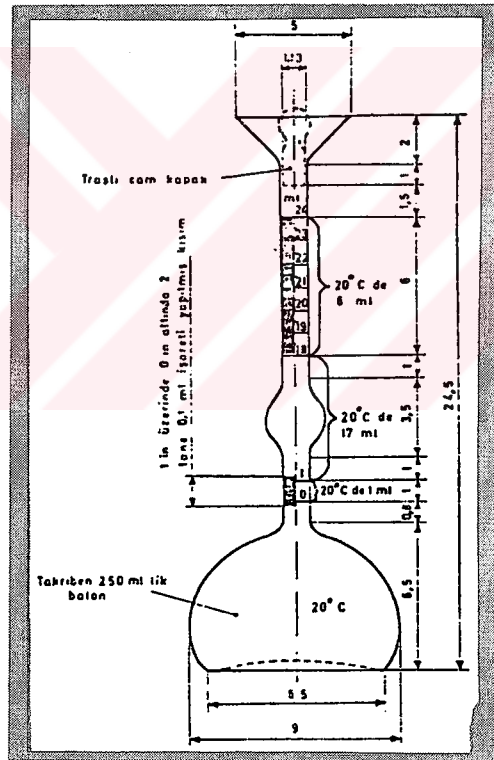
- i) *Kimyasal analizler*; kullanım imkanları araştırılan ve çeşitli kaynaklardan toplanan uçucu küllerin kimyasal analizleri, yaş metod atomik absorosiyon cihazı ile yapılmış ve sonuçları (%ağırlık) Çizelge 5.3’de verilmiştir. Ayrıca uçucu küllerin kimyasal analizlerinin, F tipi uçucu kül kimyasal alaşım sınırları (min-max) ile mukayesesi Şekil 5.1’de verilmiştir. Çizelge değerlerine bağlı olarak oluşturulan grafikte görülebileceği gibi, Yeniköy ve Kemerköy termik santrallerinden sağlanan uçucu küllerin CaO miktarı sırasıyla %64 ve %48 olduğu için, kabul edilebilir sınırların üstünde ve amaca uygun değildir. Dolayısıyla deneysel süreç içerisinde, Tunçbilek ve Yatağan termik santrallerinden alınan uçucu küllerin kimyasal yapılarının kompozit üretimi için elverişli olduğu söylenebilir.

Çizelge 5.3 Uçucu küllerin kimyasal analiz sonuçları (% Ağırlık)

Uçucu Kül	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Diğerleri
F Tipi [16]	33-65	3-31	11-33	0.6-13	0.0-5	1-12
Tunçbilek	56.40	10.10	23.00	2.10	3.30	5.10
Yeniköy	20.57	3.24	6.23	64.48	2.30	3.18
Yatağan	51.96	10.54	18.98	0.30	10.47	7.75
Kemerköy	18.69	2.54	11.45	47.86	1.00	18.45



Şekil 5.1 Muhtelif uçucu küllerin yapı bileşenlerinin mukayesesi



Şekil 5.2 Uçucu küllerin yoğunluk tayininde kullanılan Le Chaltier şişesinin görünümü

- ii) *Yoğunluk*; uçucu küllerin yoğunluk tayinleri TS 639'da belirtilen prosedüre uygun olarak, Şekil 5.2'de verilen Le Chaltier düzeneği ile yapılmış, ölçüm değerleri ve tespit edilen uçucu kül yoğunlukları Çizelge 5.4'de verilmiştir. Bu verilerden,

Kemerköy ve Yeniköy termik santrallerinden sağlanan uçucu küllerin yoğunluğunun diğer uçucu küllere kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca Yeniköy termik santralinden alınan uçucu külün yoğunluğunun alüminyumdan daha yüksek olması, kompozit malzemenin spesifik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilecektir. Yoğunlukları ve kimyasal kompozisyonları, dikkate alındığında, Tunçbilek ve Yatağan termik santrallerine ait uçucu küllerin, takviye ve dolgu malzemesi olarak kullanılması daha uygun görülmüştür.

- iii) *Elek analizleri*; partikül büyüklüklerinin tespit edilmesi amacı ile yapılan elek analiz sonuçları, ortalama tane büyüklükleri ve dağılım grafikleri sırasıyla Çizelge 5.5, 6, 7 ve Şekil 5.3, 4, 5’de verilmiştir. Çizelge değerleri baz alınarak çizilen grafiklerde, Yatağan termik santralinden sağlanan uçucu kül partikül boyutlarının % 72’si 90 μm ’dan küçük olduğu halde, Kemerköy uçucu küllerinin partikül boyutlarının 150-90 μm arasında yoğunlaştığı yani daha kaba taneli olduğu izlenmektedir. Tunçbilek uçucu kül partikül boyutları da yatağan uçucu kül partikül dağılımına benzerlik göstermektedir. Sonuç olarak Yatağan ve Tunçbilek santrallerinden alınan uçucu kül örnekleri, partikül boyutlarının dağılımı açısından uygun görünmektedir.

Çizelge 5.4 Çeşitli termik santrallerden sağlanan uçucu kül yoğunluklarının tespiti

Uçucu kül kaynağı	Ağırlık M g	İlk hacim (V ₁) cm ³	Son hacim (V ₂) cm ³	Hacim (V ₂ -V ₁) cm ³	Yoğunluk ρ g/cm ³	Ort.Yoğunluk ρ g/cm ³
Kemerköy termik santrali	5.0007	18.2	20.3	2.1	2.38	2.43
	5.0195	18.3	20.4	2.1	2.39	
	5.0190	18.1	20.1	2.0	2.51	
Yeniköy termik Santrali	5.0247	18.1	19.9	1.8	2.79	2.77
	5.0796	18.3	20.1	1.8	2.82	
	5.1347	19.1	21.0	1.9	2.70	
Yatağan termik santrali	5.1862	18.7	21.4	2.7	1.92	1.80
	5.0558	18.4	21.2	2.8	1.81	
	5.0020	18.3	21.3	3.0	1.67	
Tunçbilek termik santrali	5.0156	18.5	21.1	2.6	1.93	1.90
	5.0145	18.6	21.3	2.7	1.88	
	5.0136	18.4	21.1	2.7	1.89	

Çizelge 5.5 Yatağan termik santrali, elektro filtre altı uçucu kül elek analiz sonuçları

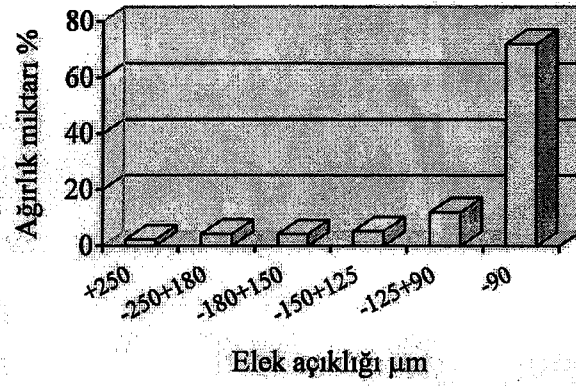
ELEK AÇIKLIĞI (μm)	MİKTAR (g)	MİKTAR (%)	TOPLAM ELEK ÜSTÜ %	TOPLAM ELEK ALTI %
+355	0.34	0.34	0.34	100.00
-355+250	1.95	1.96	2.30	99.66
-250+180	4.28	4.30	6.60	97.70
-180+150	4.23	4.25	10.85	93.40
-150+125	5.27	5.29	16.14	89.15
-125+90	11.98	12.03	28.17	83.86
-90+75	10.65	10.69	38.86	71.83
-75(DARA)	60.88	61.14	100.00	61.14
TOPLAM	99.58	100.00	ORT. TANE BOYUTU: 40 μm	

Çizelge 5.6 Kemerköy termik santrali, elektro filtre altı uçucu kül elek analiz sonuçları

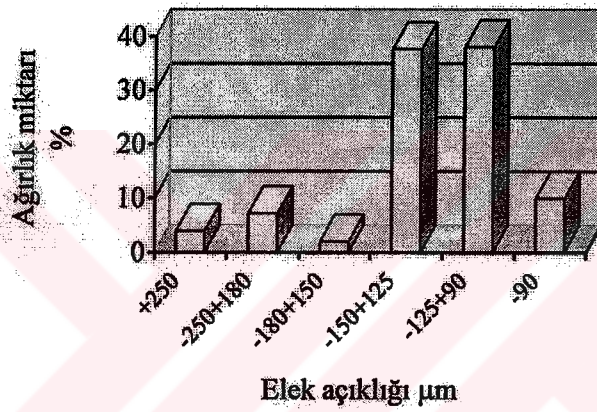
ELEK AÇIKLIĞI (μm)	MİKTAR (gr)	MİKTAR (%)	TOPLAM ELEK ÜSTÜ %	TOPLAM ELEK ALTI %
+355	0.92	0.92	0.92	100.00
-355+250	3.95	3.97	4.89	99.08
-250+180	7.19	7.22	12.11	95.11
-180+150	2.01	2.02	14.13	87.89
-150+125	37.52	37.68	51.81	85.87
-125+90	37.91	38.07	89.88	48.19
-90+75	1.53	1.54	91.41	10.12
-75(DARA)	8.55	8.59	100.00	8.59
TOPLAM	99.58	100.00	ORT. TANE BOYUTU: 105 μm	

Çizelge 5.7 Tunçbilek termik santrali uçucu kül elek analiz sonuçları

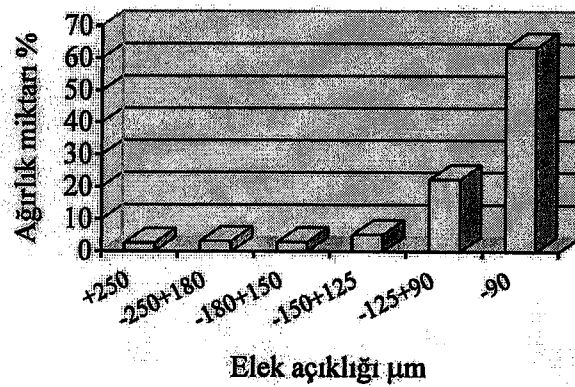
ELEK AÇIKLIĞI (μm)	MİKTAR (gr)	MİKTAR (%)	TOPLAM ELEK ÜSTÜ %	TOPLAM ELEK ALTI %
+250	2.67	2.69	2.69	100.00
-250+180	3.28	3.30	5.97	97.31
-180+150	2.94	2.96	8.94	94.01
-150+125	5.26	5.29	14.24	91.06
-125+90	22.21	22.34	36.58	85.76
-90(DARA)	63.03	63.42	100.00	63.42
TOPLAM	99.39	100.00	ORT. TANE BOYUTU: 66,7 μm	



Şekil 5.3 Uçucu kül (Yatağan) partikül boyutlarının (%) ağırlık oranları



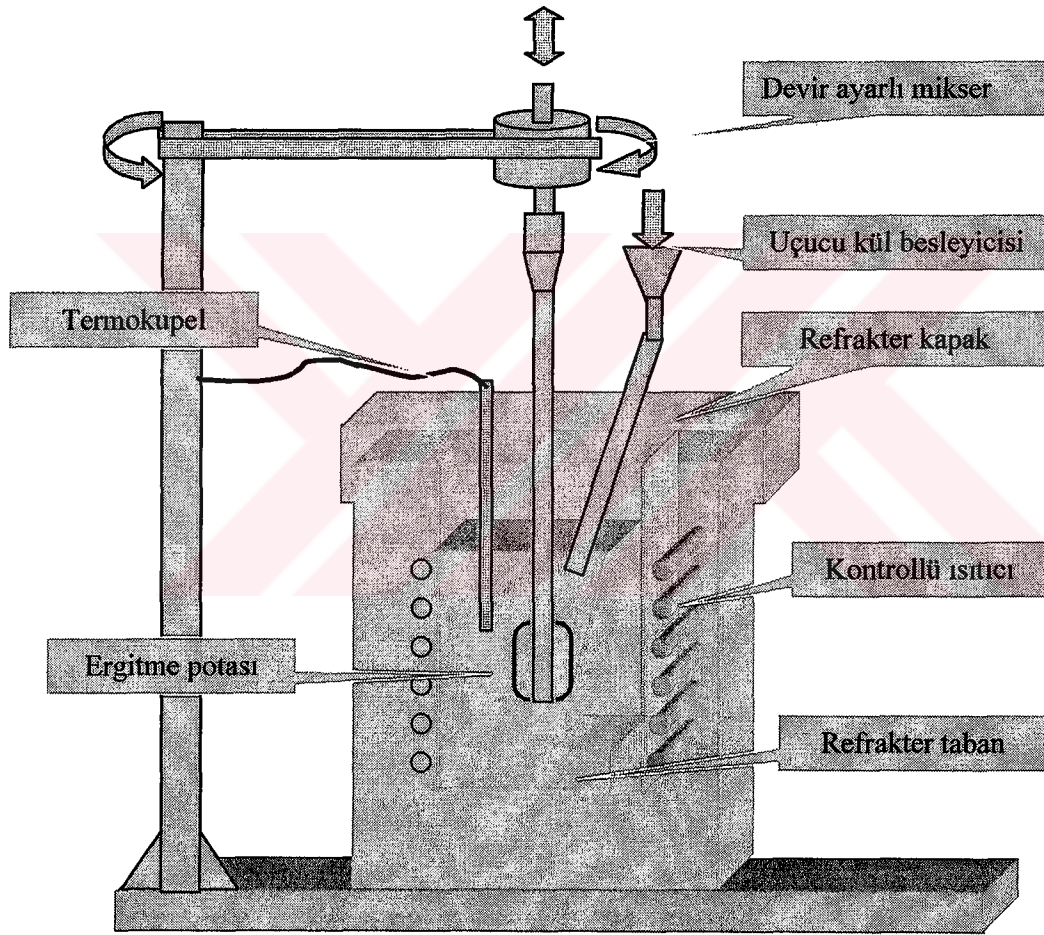
Şekil 5.4 Uçucu kül (Kemerköy) partikül boyutlarının (%) ağırlık oranları



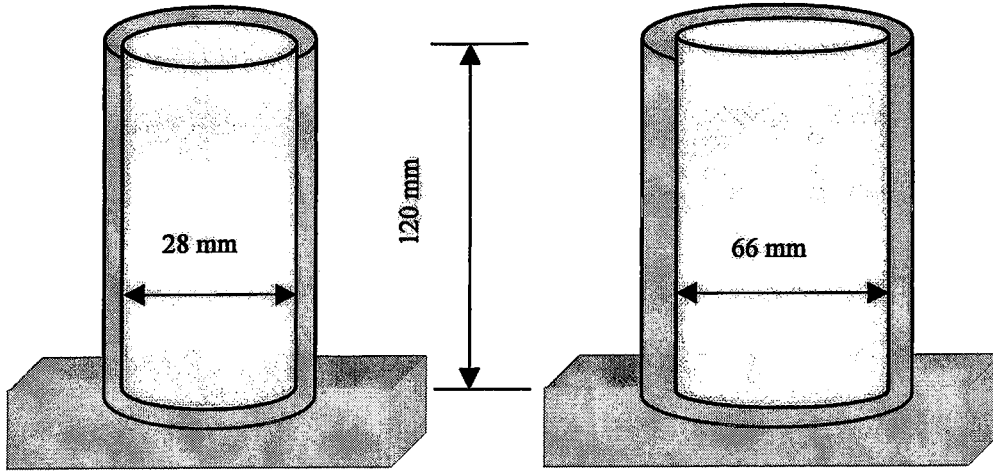
Şekil 5.5 Uçucu kül (Tunçbilek) partikül boyutlarının (%) ağırlık oranları

5.2 Deney Seti

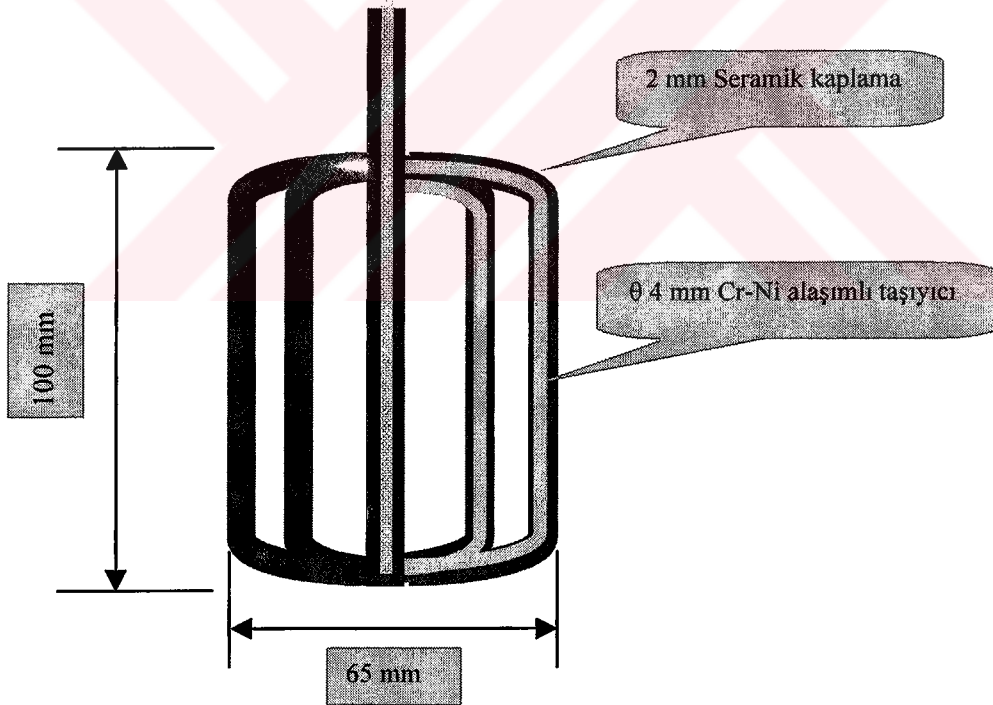
Karıştırırmalı döküm (“stir-mix” veya vortex) tekniğine uygun olarak, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya Metalurji Fakültesi Laboratuvar imkanları kullanılarak hazırlanan iki kilogram kapasiteli, döküm setinin şematik görünümü Şekil 5.6’da, karıştırma işlemi için kullanılan mikserin şematik görünümü Şekil 5.7’de verilmiştir. Şekil 5.8’de şematik görünümü verilen kokil kalıplara dökülen deney parçaları ve döküm şartları ile ilgili değişkenler, konu akışı içinde sunulacaktır.



Şekil 5.6 Deneylerde kullanılan döküm seti (2 Kg kapasiteli) şematik görünümü



Şekil 5.7 Numunelerin döküldüğü kokil kalıpların şematik görünümü



Şekil 5.8 Seramik malzeme kaplı mikserin şematik görünümü

5.3 Deneyin Yapılışı

Döküm seti ve kokil kalıpların hazırlanmasından sonra dökümde kullanılacak alüminyum alaşımları mekanik testere ile kesilerek 700-1200 gramlık poşetlerde torbalanmış ve kodlanmıştır. Bu ağırlıklara tekabül eden hacimsel % 5, 10, 15, 20 oranlarındaki kompozit üretimi için gerekli uçucu kül miktarları (5.1) bağıntısı kullanılarak oluşturulan Çizelge 5.8'den alınmıştır.

$$M_r = (M_m \times V_f \times \rho_r) / ((1 - V_f) \times \rho_m) \quad (5.1)$$

Burada, M_r ve M_m sırasıyla uçucu kül ve alüminyum alaşımının ağırlıkları, V_f hacimsel takviye oranı, ρ_r ve ρ_m sırasıyla takviye uçucu külünün ve alüminyum matris alaşımının yoğunluklarıdır.

Tartımlar yapılarak poşetlenen uçucu küller aynı kodlanma sistemi ile markalanmıştır. Isıl şokların önlenmesi, yapıdaki nemin giderilmesi, partikül dağılımının iyileştirilmesi ve ıslatılabilirliğin artırılması amacıyla döküm öncesi kullanılacak uçucu küller 400°C'de 15 dakika kurutma işlemine tabi tutulmuşlardır [24]. Hazırlanan deney çiftleri ile ilk aşamada, takviye ve dolgu malzemesinin ıslatılabilme, karışma ve akıcık özellikleri incelenmiştir.

Çizelge 5.8 -1g alüminyum alaşımına, % hacimsel takviye oranlarına bağlı olarak katılacak uçucu kül miktarları

Uçucu kül		1 g Alüminyum alaşımına, % hacimsel takviye oranlarına bağlı olarak katılacak uçucu kül miktarları			
Menşei	Yoğunluğu (g/cm ³)	%5 Miktar (g)	%10 Miktar (g)	%15 Miktar (g)	%20 Miktar (g)
Tuçbilek	1.90	0.03704	0.07819	0.12418	0.17593
Yatağan	1,80	0.03508	0.07407	0.11764	0.16666

Not : alüminyum alaşımlarının yoğunlukları 2.7 g/cm³ olarak alınmıştır.

5.3.1 Karıştırma hızı, süresi ve sıcaklığı

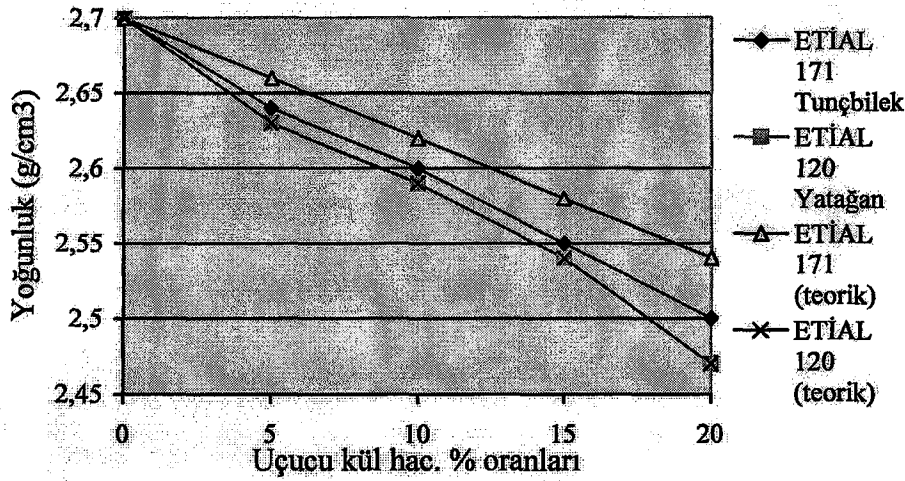
Değişik sıcaklık aralıklarında (750-850-950 °C) yapılan deneylerde 400-560-750 devir/dakikalık karıştırma hızları tatbik edilmiştir. Gözle izlenen deneylerde, özellikle düşük sıcaklıklarda 400 d/dak karıştırma hızlarında uçucu külün karışmadığı ve toparlandığı izlenmiştir. Isının artırılması ile (950 °C) karışmada iyileşme görülmüş ancak oksidasyon hızlanarak cüruf miktarında artma görülmüştür. Ayrıca yüksek karıştırma hızında uçucu küllerin potanın bir bölgesinde birikerek kütle oluşturma eğilimi izlenmiştir. Karıştırma süresi alüminyumun miktarına bağlı olarak 90-120 sn arasında değişmektedir. Sürenin kısılması halinde iyi bir karışım olmadığı, sürenin uzun tutulması halinde, hava ile temas eden girdap (vortex) yüzeyinde oksit oluşumu gözlenmiştir. Ancak burada tespit edilen ve belirtilen tüm veri ve büyüklüklerin, mikser başlığı ve pota geometrisinin fonksiyonu olarak değişiklikler gösterebileceğini unutmamak lazımdır. Özetle, bizim gözlemlerimiz neticesinde, en iyi karışma, partikül dağılımı, ıslatılabilme kabiliyetinin, 100 sn karıştırma süresinde, 560 d/dak karıştırma hızında ve 850 °C sıcaklığında gerçekleştiği kanaatine varılmıştır.

5.3.2. Döküm sıcaklığı ve akışkanlık

850 °C sabit sıcaklıkta ve yukarıda belirtilen şartlarda karıştırılan sıvı haldeki karışımın sıcaklığının kokil kalıba döküm sırasında hava ile temas ederek sıcaklığının kademeli olarak 750°C'ye düştüğü, akışkanlığının yeterli ve kalıbı çok iyi dolduracak seviyede olduğu görülmüştür. Ancak hacimsel %15'in üzerindeki kül takviyelerinde, karışma problemlerine paralel olarak akışkanlığın süratle zayıfladığı izlenmiştir. Çok ince cidarlı, karmaşık yapıdaki malzemelerin dökümü için akışkanlık testlerinin ilgili prosedürlere uygun olarak yapılmasında fayda vardır.

5.4 Mekanik ve Fiziksel Özelliklerin Saptanması

Yukarıda belirtilen şartlar ve deney setinde üretimi gerçekleştirilen AMK malzemelerin mekanik ve fiziksel bazı özelliklerinin saptanması amacıyla aşağıda belirtilen deneyler yapılmış ve sonuçları ilgili paragraflarda değerlendirilmiştir.



Şekil 5.9 Uçucu kül % hacimsel oranlarına bağlı olarak kompozit yoğunluğunun değişimi ve teorik yoğunluklarla mukayesesi

5.4.2 Sertlik ve aşınma dayanımı

Sertlik ölçümleri 62.5 Kp yük altında 2.5 mm çapında bilye kullanılarak yapılmıştır. (5.3) bağıntısıyla bulunan HB sertlik değerleri Çizelge 5.10 ve grafikleri Şekil 5.10'da verilmiştir. (5.4) Bağıntısı ile hesaplanan yükleme derecesi (x)=10 olarak hesaplanmış ve alüminyum alaşımları için öngörülen sınırlar içinde olduğu tespit edilmiştir. [38]

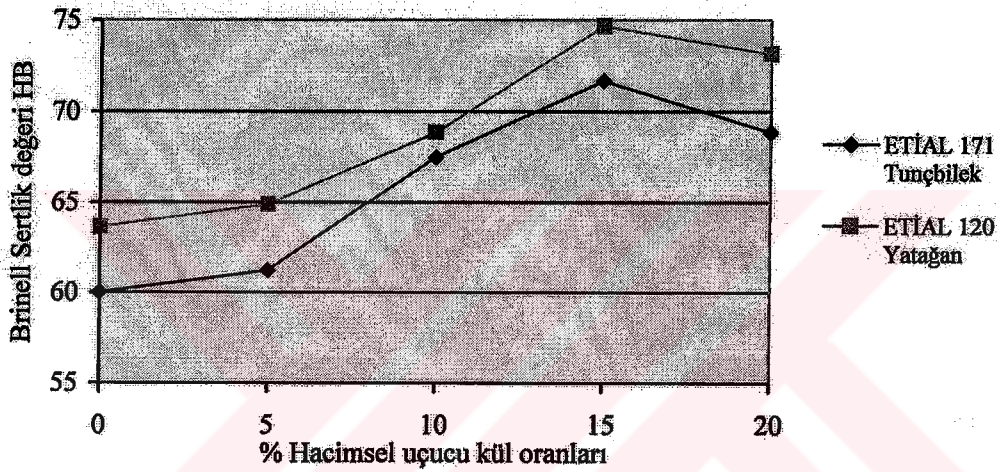
$$\text{Brinell Sertlik Değeri (HB)} = 2F (Kp) / [\pi D (D - (D^2 - d^2)^{1/2})] \quad (5.3)$$

$$\text{Yükleme derecesi (x)} = F (Kp) / D^2 \quad (5.4)$$

Burada $F (Kp)$ tatbik edilen kuvvet, $D (mm)$ ve $d(mm)$ sırasıyla bilye ve iz çaplarını belirtmektedir.

Çizelge 5.10 Üretilen AMK malzemelerin ortalama Brinel sertlik değerleri

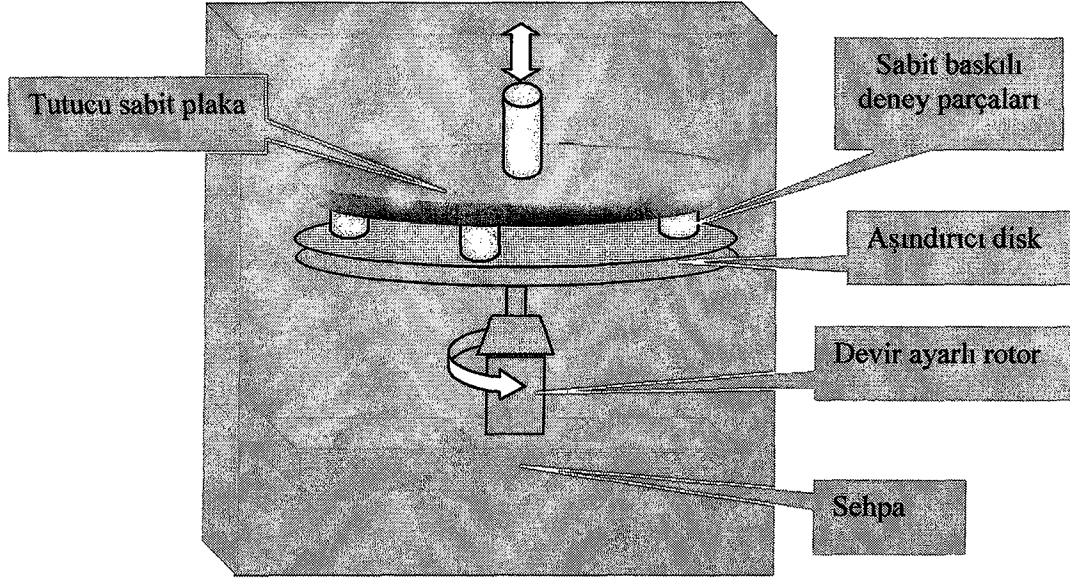
AMK MALZEME	AMK DENEY MALZEMELERİNİN ort. BİRİNEL SERTLİĞİ % HACİMSEL TAKVİYE ORANLARI				
	% 0 HB	% 5 HB	%10 HB	%15 HB	%20 HB
ETİAL 171 (A360) (takviyesiz)	60.017				
ETİAL 171 (A360)(tunçbilek)		61.229	67.483	71.678	68.842
ETİAL120 (443) (takviyesiz)	63.628				
ETİAL 120 (443) (Yatağan)		64.878	68.842	74.685	73.159



Şekil 5.10 Üretilen AMK deney malzemelerinin % hacimsel takviye oranlarına bağlı olarak Brinell sertlik değerleri HB

Çizelge 5.10'da Ortalama Brinell Sertlik değerleri verilen kompozit malzemelerin, yapı içindeki sertlik dağılımlarında belirgin farklılık izlenmemiştir. Ancak çok az parçada rastlanan ve homojen partikül dağılımının gerçekleşmediği ilk deney parçalarında sertlik dağılımında farklılıklar görülmüştür.

Kompozit malzemelerin aşınma dirençlerinin testleri Şekil 5.11'de şematik çizimi verilen Tribometrede yapılmıştır. Tribometre, parlatma cihazında yapılan küçük modifikasyonlarla oluşturulmuştur. [30]



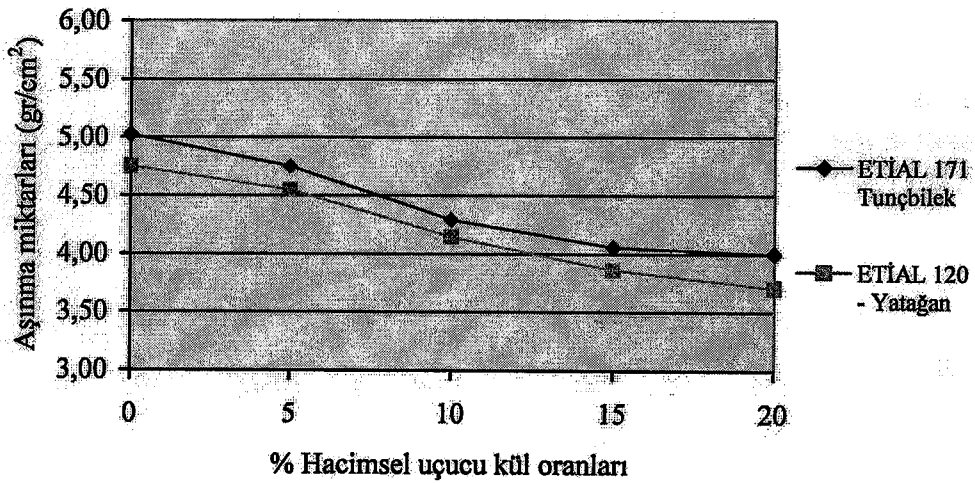
Şekil 5.11 Aşınma dirençlerinin tespitinde kullanılan tribometrenin şematik görünümü [30]

Aşındırıcı, devir sayısı (n) : 600 d/d , temas çapı (D): 16 cm, çevresi : 50 cm, temas hızı (V) :5 m/sn, temas basıncı (p) : 300 gr/cm² , deney süresi (t) :5 dak, aşındırıcı (silisyum karbür zımpara, P240, P800). Aşınma deneyi için, 20 mm boyunda, ≈10 mm çapında hazırlanan numuneler, tribometrede aşınma deneyine tabi tutulmuşlardır. Aynı şartlar altında, iki tip aşındırıcı kullanılarak yapılan deneylerde, numunelerin aşınma sonucu kaybettikleri ağırlık miktarlardan hareket edilerek aşınma dayanımlarının (dirençlerinin) mukayesesi yapılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 5.11 ve 5.12’de, grafikleri Şekil 5.12 ve 5.13’de verilmiştir.

Deney sonuçlarından, üretilen uçucu kül takviyeli, Al matrisli kompozit malzemelerin, hacimsel % takviye oranlarına (V_f) bağlı olarak, aynı şartlar altında, aşınma sonucu kaybettikleri malzeme miktarında % 5-18 oranlarında bir azalma olduğu, bir başka deyişle aşınma dayanımlarında artış olduğu görülmüştür. Aşınma dayanımındaki bu artış, uçucu küllerin bünyesinde aşınmaya dayanıklı oksitlerin varlığı ile izah edilebilir.

Çizelge 5.11 Çeşitli karışım oranlarında üretilen AMK numunelerin aşınma dayanımlarının mukayesesi (Aşındırıcı, silisyum karbür, P 800)

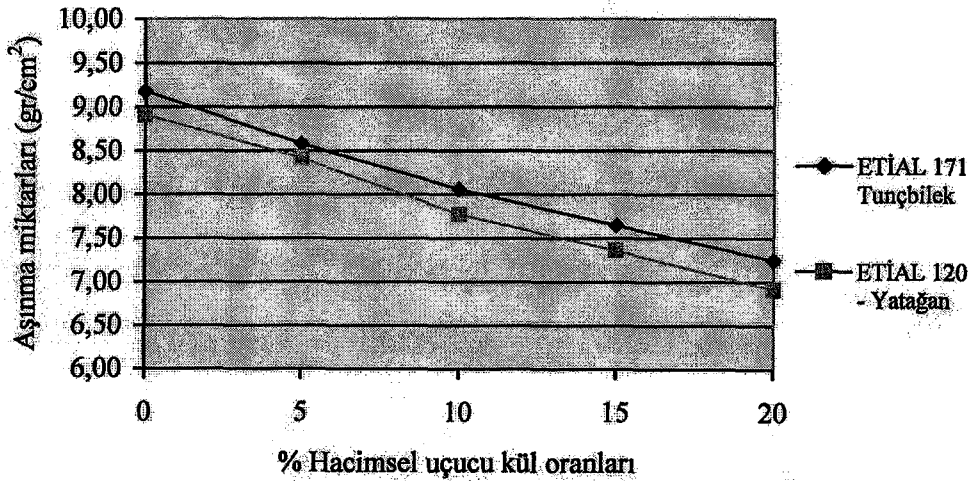
ETİAL 171 (A360) –Tunçbilek					
Hacimsel % takviye oranları (V_f)	% 0	%5	%10	%15	%20
Numune yoğunluğu (gr/cm^3)	2.70	2.64	2.60	2.55	2.50
Numune çapı (mm)	10.20	9.80	9.90	10.10	10.20
Numune kesit alanı (mm^2)	81.70	75.40	77.00	80.10	81.70
Aşınan kısmın yüksekliği $\approx$ mm	1.86	1.80	1.65	1.59	1.60
Aşınan kısmın hacmi $\approx$ mm^3	152.00	135.80	127.00	127.40	130.70
Aşınan malzeme miktarı (gr)	4.10	3.58	3.30	3.25	3.27
Aşınan malzeme miktarı (gr/cm^2)	5.02	4.75	4.29	4.06	4.00
ETİAL 120 (443) – Yatağan					
Hacimsel % takviye oranları (V_f)	% 0	%5	%10	%15	%20
Numune yoğunluğu (gr/cm^3)	2.70	2.63	2.59	2.54	2.47
Numune çapı (mm)	10.10	10.20	10.00	10.30	9.90
Numune kesit alanı (mm^2)	80.10	81.70	78.50	83.30	77.00
Aşınan kısmın yüksekliği $\approx$ mm	1.76	1.73	1.60	1.52	1.50
Aşınan kısmın hacmi $\approx$ mm^3	141.00	141.40	125.70	126.70	1.1550
Aşınan malzeme miktarı (gr)	3.81	3.72	3.26	3.22	2.85
Aşınan malzeme miktarı (gr/cm^2)	4.75	4.55	4.14	3.86	3.70



Şekil 5.12 Kompozit malzemelerin uçucu kül .% hacimsel takviye oranlarına bağlı olarak aşınma miktarlarının mukayesesi (Aşındırıcı, silisyum karbür, P 800)

Çizelge 5.12 Çeşitli karışım oranlarında üretilen AMK numunelerin aşınma dayanımlarının mukayesesi (Aşındırıcı, silisyum karbür, P 240)

ETİAL 171(A360)-Tunçbilek					
Hacimsel % takviye oranları (V_f)	% 0	%5	%10	%15	%20
Numune yoğunluğu (gr/cm^3)	2.70	2.64	2.60	2.55	2.50
Numune çapı (mm)	10.20	9.80	9.90	10.10	10.20
Numune kesit alanı (mm^2)	81.70	75.40	77.00	80.10	81.70
Aşınan kısmın yüksekliği $\approx$ mm	3.40	3.25	3.10	3.00	2.90
Aşınan kısmın hacmi $\approx$ mm^3	277.80	245.10	238.60	240.40	237.00
Aşınan malzeme miktarı (gr)	7.50	6.47	6.20	6.13	5.92
Aşınan malzeme miktarı (gr/cm^2)	9.18	8.58	8.06	7.65	7.25
ETİAL 120 (443) – Yatağan					
Hacimsel % takviye oranları (V_f)	% 0	%5	%10	%15	%20
Numune yoğunluğu (gr/cm^3)	2.70	2.63	2.590	2.54	2.47
Numune çapı (mm)	10.10	10.20	10.00	10.30	9.90
Numune kesit alanı (mm^2)	80.10	81.70	78.50	83.30	77.00
Aşınan kısmın yüksekliği $\approx$ mm	3.30	3.20	3.00	2.90	2.80
Aşınan kısmın hacmi $\approx$ mm^3	264.40	261.50	235.60	241.60	215.50
Aşınan malzeme miktarı (gr)	7.14	6.88	6.10	6.14	5.32
Aşınan malzeme miktarı (gr/cm^2)	8.91	8.42	7.77	7.37	6.92



Şekil 5.13 Kompozit malzemelerin uçucu kül % hacimsel takviye oranların bağlı olarak aşınma miktarlarının mukayesesi (Aşındırıcı, silisyum karbür, P 240)

5.4.3 Çekme dayanımı ve % uzama oranları

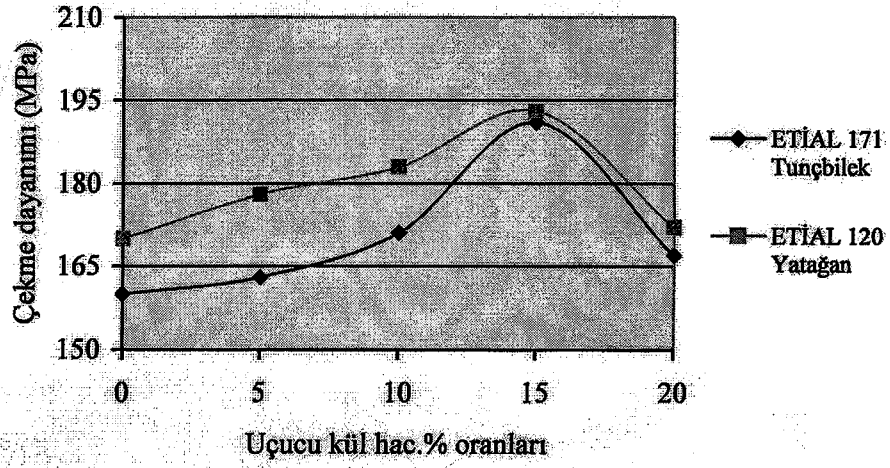
Üretilen kompozit malzemelerin çekme dayanımları ve % uzama oranlarının tespit edilmesi amacıyla $L_0=50\text{mm}$ ve $d_0=10\text{mm}$ çapında çekme çubukları hazırlanmıştır. Oda sıcaklığında ve sabit çekme hızında yapılan deneylerin çekme dayanım sonuçları Çizelge 5.13, uzama oranları Çizelge 5.14’de verilmiştir. Bu değerleri baz alınarak uçucu kül % hacimsel takviye oranlarına bağlı olarak çekme dayanımlarının ve uzama oranlarının değişim grafikleri, sırasıyla Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’de verilmiştir. Bu grafiklerden anlaşılacağı gibi, üretilen kompozit malzemelerin çekme dayanımları artan uçucu kül takviye oranlarına bağlı olarak yükselmiştir. Ancak %20 takviyeli numunelerin çekme dayanımlarında, iyi ıslatmama ve karışma problemlerine bağlı olduğunu düşündüğümüz, bir azalma gözlenmiştir. Literatürde, uyguladığımız üretim yöntemi ile hacimsel % 15 takviye oranlarının üzerine çıkılmasının zor olduğu belirtilmiştir.[1] Uzama oranları, hacimsel % takviye oranlarına bağlı olarak azalmıştır.

Çizelge 7.13 Üretilen uçucu kül takviyeli kompozit malzemelerin çekme dayanımlarının deneysel sonuçları

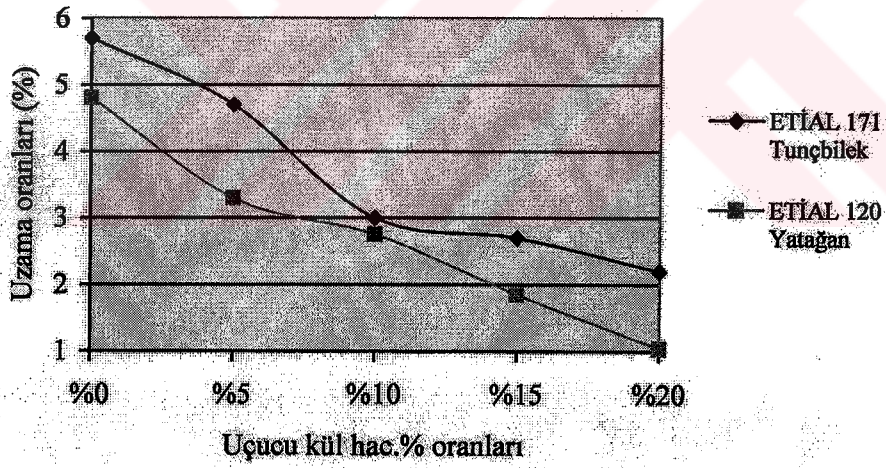
KOMPOZİT		İlk çap	Kesit alanı	Kuvvet F _{max}	Kuvvet F _{max}	Çekme Dayanımı	Ort.çekme Dayanımı	
Alüminyum Alaşımları	Uçucu kül menşei / oranı	d ₀ (mm)	A ₀ (mm ²)	Kg.kuvvet (Kp)	Newton (N)	(N/mm ²) (MPa)	(N/mm ²) (MPa)	
ETİAL 171 (A360)	Uçucu kül (Tuncbilek)	%0	10.37	84.46	1390	13635	161	160
		%0	10.45	85.77	1395	13684	159	
		%5	10.13	80.60	1375	13488	167	163
		%5	10.39	84.79	1380	13537	159	
		%10	10.30	83.32	1435	14077	168	171
		%10	10.21	81.87	1450	14224	173	
		%15	9.80	75.43	1490	14616	193	191
		%15	9.92	77.29	1485	14567	188	
		%20	10.04	79.17	1380	13537	171	167
		%20	10.26	82.68	1375	13488	163	
ETİAL 120 (443)	Uçucu kül (Yatağan)	%0	10.00	78.54	1325	12998	165	170
		%0	9.85	76.20	1360	13341	175	
		%5	9.50	70.88	1290	12654	178	178
		%5	9.43	69.84	1275	15507	179	
		%10	10.40	84.95	1585	15548	183	183
		%10	10.30	83.32	1570	15401	184	
		%15	10.06	79.49	1550	15205	191	193
		%15	9.60	72.38	1450	14224	196	
		%20	10.20	81.71	1420	13930	170	172
		%20	10.10	80.12	1430	14028	175	

Çizelge 5.14 Üretilen Uçucu kül takviyeli kompozit malzemelerin % uzama oranları, çekme deney sonuçları

KOMPOZİT		İlk çap	Kesit alanı	İlk boy	Son boy	Uzama oranı	Ortalama uzama	
Alüminyum Alaşımı	Uçucu kül menşei / oranı	d ₀ (mm)	A ₀ (mm ²)	L ₀ (mm)	L _k (mm)	(L _k - L ₀) / L ₀ (%)	(%)	
ETİAL 171 (A360)	Uçucu kül (Tücbilek)	%0	10.37	84.46	50.00	52.80	5.60	5.70
		%0	10.45	85.77	50.00	52.90	5.80	
		%5	10.13	80.60	50.00	52.10	4.20	4.70
		%5	10.39	84.79	50.00	52.60	5.20	
		%10	10.30	83.32	50.00	51.70	3.40	3.00
		%10	10.21	81.87	50.00	51.30	2.60	
		%15	9.80	75.43	50.00	51.40	2.80	2.70
		%15	9.92	77.29	50.00	51.30	2.60	
		%20	10.04	79.17	50.00	51.00	2.00	2.20
		%20	10.26	82.68	50.00	51.20	2.40	
ETİAL 120 (443)	Uçucu kül (Yatagan)	%0	10.00	78.54	50.00	52.50	5.00	4.80
		%0	9.85	76.20	50.00	52.30	4.60	
		%5	9.50	70.88	50.00	51.60	3.20	3.30
		%5	9.43	69.84	50.00	51.70	3.40	
		%10	10.40	84.95	50.00	51.45	2.90	2.75
		%10	10.30	83.32	50.00	51.30	2.60	
		%15	10.06	79.49	50.00	51.00	2.00	1.85
		%15	9.60	72.38	50.00	50.85	1.70	
		%20	10.20	81.71	50.00	50.50	1.00	1.05
		%20	10.10	80.12	50.00	50.55	1.10	



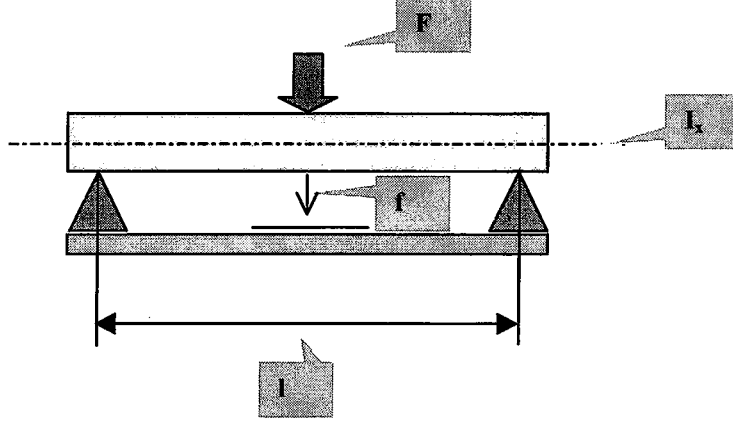
Şekil 5.14 Çekme dayanımlarının % uçucu kül takviye oranlarına bağlı olarak değişimi



Şekil 5.15 Uzama oranlarının, % uçucu kül takviye oranlarına bağlı olarak değişimi

5.4.4 Elastiklik modülü (E_e , E_e) ve eğilme dayanımı (σ_e , max)

Elastiklik modülü (E_e) gerilmelerin deformasyonla orantılı olduğu (elastik) bölgede, numune kesitinin geometrisine bağlı olarak , Şekil 5.16 şematik görünümü verilen deney düzeneğinde, her bir hacim oranı için üç test yapılmış ve ortalamayı veren değerler çizelgelerde verilmiştir. Elastiklik modülü (5.5) bağıntısı ile hesaplanmıştır. [39]



Şekil 5.16 Elastiklik modülünün tespitinde kullanılan deney düzeneğinin şematik görünümü

$$E_e = F.l^3 / 48. f. I_x \quad (5.5)$$

Burada, E_e [Kp/mm^2] numunenin elastiklik modülü, F [Kp] tatbik kuvveti, l [mm] mesnetler arası mesafe, f [mm] çökme (eğilme-sehim) miktarı, I_x [mm^4] numune kesitinin tarafsız eksene göre eylemsizlik momentini ifade etmektedir.

(5.5) Eşitliğinde, dairesel kesitli ve dik dörtgen kesitli geometrik şekillerin tarafsız eksenlerine göre eylemsizlik momentleri (I_x) yerlerine yazıldığında, dairesel kesitli numuneler için (5.6) bağıntısı, dikdörtgen kesitli numuneler için (5.7) bağıntısı elde edilir.

Dairesel kesitlerde, elastiklik modülü, $E_e = 4. F.l^3 / 3. f. \pi D^4$ (5.6)

Dikdörtgen kesitlerde, elastiklik modülü, $E_e = F.l^3 / 4. f. b. h^3$ (5.7)

Burada, E_e [Kp/mm^2] numunenin elastiklik modülü, F [Kp] tatbik kuvveti, l [mm] mesnetler arası mesafe, f [mm] çökme (eğilme-sehim) miktarı, D [mm] dairesel kesitli numune çapı, b , h [mm], sırasıyla dikdörtgen kesitli numune genişliği ve yüksekliğini ifade etmektedir.

Çizelge 5.15, 16,17,18, 19’de verilen eğme deney sonuçlarına bağlı olarak elde edilen elastiklik modülü değerleri Çizelge 5.20’de , grafikleri Şekil 5.17’te verilmiştir.

Çizelge 5.15 Elastiklik modülü (E_e) ve eğilme dayanım ($\sigma_{e, \max}$) değerlerinin tespiti için yapılan eğme deney sonuçları

ETİAL 171 (A360) TAKVİYESİZ (V_f : % 0)							
TATBİK KUVVETİ F Kp	MESNET AÇIKLIĞI l mm	NUMUNE ÇAPI D mm	ÇÖKME MİKTARI f mm	EYLEMSİZLİK MOMENTİ I _x mm ⁴	ELASTİKLİK MODÜLÜ		
					E_e Kp/mm ²	E_e MPa	E_e GPa
05.00	51.00	8.00	0.013	201.06	5286	51860	51.86
10.00	51.00	8.00	0.025	201.06	5498	53935	53.93
15.00	51.00	8.00	0.035	201.06	5891	57787	57.79
20.00	51.00	8.00	0.045	201.06	6109	59927	59.93
25.00	51.00	8.00	0.060	201.06	5727	56182	56.18
30.00	51.00	8.00	0.070	201.06	5891	57787	57.79
35.00	51.00	8.00	0.080	201.06	6013	58991	58.99
40.00	51.00	8.00	0.090	201.06	6109	59927	59.93
45.00	51.00	8.00	0.100	201.06	6185	60677	60.68
50.00	51.00	8.00	0.115	201.06	5976	58625	58.63
55.00	51.00	8.00	0.125	201.06	6048	59328	59.33
60.00	51.00	8.00	0.135	201.06	6109	59927	59.93
65.00	51.00	8.00	0.150	201.06	5956	58429	58.43
70.00	51.00	8.00	0.160	201.06	6013	58991	58.99
75.00	51.00	8.00	0.170	201.06	6064	59487	59.49
115.0	51.00	8.00	KOPMA NOKTASI		ORTALAMA ELASTİKLİK MODÜLÜ		58.12

Çizelge 5.16 Elastiklik modülü (E_e) ve eğilme dayanım ($\sigma_{e, \max}$) değerlerinin tespiti için yapılan eğme deney sonuçları

ETİAL 171 (A360)-TUNCBİLEK HACİMSSEL TAKVİYE ORANI (V_f : % 5)							
TATBİK KUVVETİ F Kp	MESNET AÇIKLIĞI l mm	NUMUNE ÇAPİ D mm	ÇÖKME MİKTARI f mm	EYLEMSİZLİ K MOMENTİ I _x mm ⁴	ELASTİKLİK MODÜLÜ		
					E _e Kp/mm ²	E _e MPa	E _e GPa
05.00	51.00	8.20	0.010	221.93	6226	61078	61.08
10.00	51.00	8.20	0.021	221.93	5930	58169	58.17
15.00	51.00	8.20	0.031	221.93	6025	59108	59.11
20.00	51.00	8.20	0.040	221.93	6226	61078	61.08
25.00	51.00	8.20	0.051	221.93	6104	59880	59.88
30.00	51.00	8.20	0.061	221.93	6124	60076	60.08
35.00	51.00	8.20	0.070	221.93	6226	61078	61.08
40.00	51.00	8.20	0.078	221.93	6386	62644	62.64
45.00	51.00	8.20	0.090	221.93	6226	61078	61.08
50.00	51.00	8.20	0.098	221.93	6353	62324	62.32
55.00	51.00	8.20	0.107	221.93	6401	62790	62.79
60.00	51.00	8.20	0.115	221.93	6497	63733	63.73
125.0	51.00	8.20	KOPMA NOKTASI		ORTALAMA ELASTİKLİK MODÜLÜ		61.08

Çizelge 5.17 Elastiklik modülü (E_e) ve eğilme dayanım ($\sigma_{e, \max}$) değerlerinin tespiti için yapılan eğme deney sonuçları

ETİAL 171 (A360)-TUNÇBİLEK HACİMSSEL TAKVİYE ORANI (V_f : % 10)							
TATBİK KUVVETİ F Kp	MESNET AÇIKLIĞI l mm	NUMUNE ÇAPİ D mm	ÇÖKME MİKTARI f mm	EYLEMSİZLİK MOMENTİ I _x mm ⁴	ELASTİKLİK MODÜLÜ		
					E _e Kp/mm ²	E _e MPa	E _e GPa
05.00	51.00	8.10	0.010	211.31	6539	64150	64.15
10.00	51.00	8.10	0.019	211.30	6883	67527	67.53
15.00	51.00	8.10	0.031	211.31	6328	62081	62.08
20.00	51.00	8.10	0.042	211.31	6229	61095	61.10
25.00	51.00	8.10	0.051	211.30	6411	62892	62.89
30.00	51.00	8.10	0.058	211.31	6765	66362	66.36
35.00	51.00	8.10	0.069	211.30	6634	65080	65.08
40.00	51.00	8.10	0.082	211.31	6380	62586	62.59
45.00	51.00	8.10	0.090	211.30	6539	64150	64.15
50.00	51.00	8.10	0.098	211.31	6673	65459	65.46
55.00	51.00	8.10	0.111	211.31	6480	63572	63.57
60.00	51.00	8.10	0.118	211.30	6650	65238	65.24
130.0	51.00	8.10	KOPMA NOKTASI		ORTALAMA ELASTİKLİK MODÜLÜ		64.15

Çizelge 5.18 Elastiklik modülü (E_e) ve eğilme dayanım ($\sigma_{e, \max}$) değerlerinin tespiti için yapılan eğme deney sonuçları

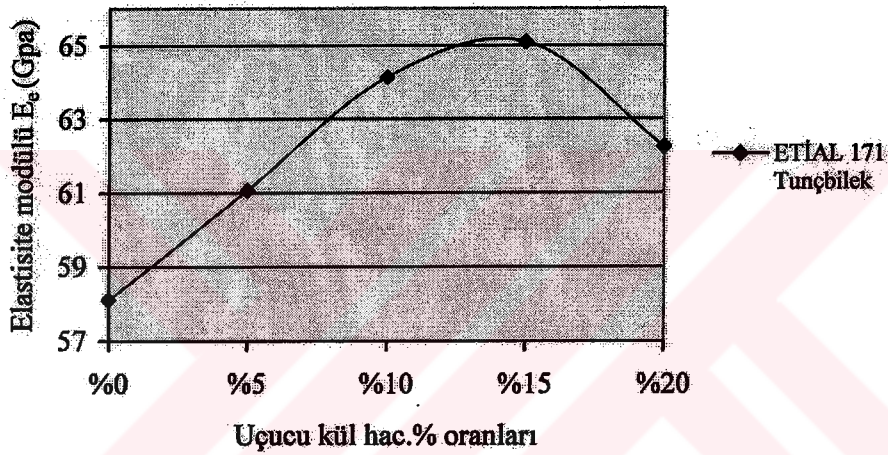
ETİAL 171 (A360)-TUNÇBİLEK HACİMSSEL TAKVİYE ORANI (V_f : % 15)							
TATBİK KUVVETİ F Kp	MESNET AÇIKLIĞI l mm	NUMUNE ÇAPI D mm	ÇÖKME MİKTARI f mm	EYLEMSİZLİK MOMENTİ I _x mm ⁴	ELASTİKLİK MODÜLÜ		
					E _e Kp/mm ²	E _e MPa	E _e GPa
05.00	51.00	8.07	0.010	208.19	6637	65109	65.11
10.00	51.00	8.07	0.021	208.19	6321	62009	62.01
15.00	51.00	8.07	0.031	208.19	6423	63009	63.01
20.00	51.00	8.07	0.039	208.19	6807	66779	66.78
25.00	51.00	8.07	0.050	208.19	6637	65109	65.11
30.00	51.00	8.07	0.062	208.19	6423	63009	63.01
35.00	51.00	8.07	0.068	208.19	6832	67024	67.02
40.00	51.00	8.07	0.080	208.19	6637	65109	65.11
45.00	51.00	8.07	0.088	208.19	6788	66589	66.59
50.00	51.00	8.07	0.101	208.19	6571	64465	64.46
55.00	51.00	8.07	0.106	208.19	6888	67566	67.57
60.00	51.00	8.07	0.121	208.19	6582	64571	64.57
65.00	51.00	8.07	0.132	208.19	6536	64123	64.12
70.00	51.00	8.07	0.136	208.19	6832	67024	67.02
135.0	51.00	8.07	KOPMA NOKTASI		ORTALAMA ELASTİKLİK MODÜLÜ		65.11

Çizelge 5.19 Elastiklik modülü (E_e) ve eğilme dayanım ($\sigma_{e, \max}$) değerlerinin tespiti için yapılan eğme deney sonuçları

ETİAL 171 (A360)-TUNÇBİLEK HACİMSEL TAKVİYE ORANI (V_f : % 20)							
TATBİK KUVVETİ F Kp	MESNET AÇIKLIĞI l mm	NUMUNE ÇAPI D mm	ÇÖKME MİKTARI f mm	EYLEMSİZLİK MOMENTİ I _x mm ⁴	ELASTİKLIK MODÜLÜ		
					E _e Kp/mm ²	E _e MPa	E _e GPa
05.00	51.00	8.15	0.010	216.57	6380	62590	62.59
10.00	51.00	8.15	0.019	216.57	6716	65885	65.88
15.00	51.00	8.15	0.032	216.57	6982	58679	58.68
20.00	51.00	8.15	0.039	216.57	6544	64195	64.20
25.00	51.00	8.15	0.050	216.57	6380	62590	62.59
30.00	51.00	8.15	0.061	216.57	6276	61564	61.56
35.00	51.00	8.15	0.069	216.57	6473	63498	63.50
40.00	51.00	8.15	0.078	216.57	6544	64195	64.20
45.00	51.00	8.15	0.089	216.57	6452	63294	63.29
50.00	51.00	8.15	0.103	216.57	6194	60767	60.77
55.00	51.00	8.15	0.112	216.57	6266	61473	61.47
60.00	51.00	8.15	0.127	216.57	6029	59141	59.14
65.00	51.00	8.15	0.132	216.57	6284	61642	61.64
70.00	51.00	8.15	0.141	216.57	6335	62147	62.15
130.0	51.00	8.15	KOPMA NOKTASI		ORTALAMA ELASTİKLIK MODÜLÜ		62.25

Çizelge 7.20 AMK numunelerin hacimsel % takviye oranlarına bağlı olarak elastiklik modülü değerleri

UÇUCU KÜL TAKVİYELİ (TUNÇBİLEK) AMK HACİMSSEL % TAKVİYE ORANLARI	ELASTİKLİK MODÜLÜ (E_e) GPa
ETİAL 171 (A 360) HACİMSSEL TAKVİYE ORANI % 0	58.12
ETİAL 171 (A 360) HACİMSSEL TAKVİYE ORANI % 5	61.08
ETİAL 171 (A 360) HACİMSSEL TAKVİYE ORANI % 10	64.15
ETİAL 171 (A 360) HACİMSSEL TAKVİYE ORANI % 15	65.11
ETİAL 171 (A 360) HACİMSSEL TAKVİYE ORANI % 20	62.25



Şekil 5.17 Uçucu kül takviyeli AMK malzemede elastiklik modülünün , hacimsel % takviye oranlarına bağlı olarak değişimi.

Deney sonuçlarından anlaşılabileceği gibi ETİAL 171 (A360) Alüminyum matris ve Tunçbilek uçucu külleri ile üretilen AMK numunelerinin, elastiklik modüllerinin, hacimsel %5-15 takviye oranına bağlı olarak artış gösterdiği, %20 takviye oranında ise elastiklik modülünde azalma meydana geldiği görülmektedir. Hacimsel % 15 takviye oranlarının üstünde, matrisin uçucu külü iyi ıslatamaması ve iyi karışmaması mekanik özelliklerin düşmesinin nedeni olarak düşünülebilir.

Eğilme dayanımı (σ_e , max), elastiklik modülünün tespitinde kullanılan deney düzeneği ve deney sonuçları yardımı ile (7.8) ve (7.9) bağıntıları kullanılarak bulunabilir. [39]

$$\sigma_{e, \max} = M / W_x \quad (7.8)$$

$$\sigma_{e, \max} = F.l / 4.W_x \quad (7.9)$$

Burada , σ_e [Kp/mm²] numunenin tarafsız eksenden en uzak noktasındaki eğilme dayanımı (kırılma modülü), M [Kp.mm] eğme momenti, F [Kp] kırılma anındaki tatbik kuvveti, l [mm] mesnetler arası mesafe, W_x [mm³] numune kesitinin tarafsız eksenine göre mukavemet momenti. [39]

(7.9) Eşitliğinde , dairesel kesitli ve dik dörtgen kesitli geometrik şekillerin tarafsız eksenlerine göre mukavemet momentleri (W_x) yerlerine yazıldığında, dairesel kesitli numuneler için (7.10) bağıntısı, dikdörtgen kesitli numuneler için (7.11) bağıntısı elde edilir.

$$\text{Dairesel kesitlerde, Eğilme dayanımı} \quad \sigma_{e \max} = 8.F.l / \pi.D^3 \quad (7.10)$$

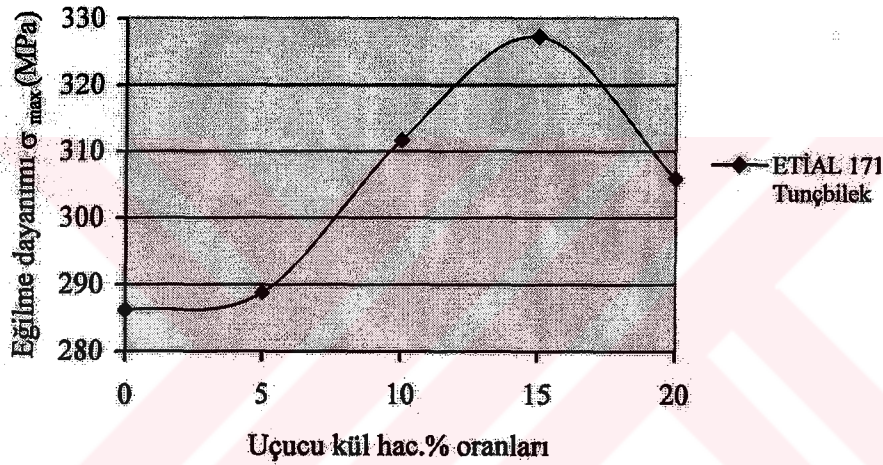
$$\text{Dikdörtgen kesitlerde, Eğilme dayanımı} \quad \sigma_{e \max} = 3.F.l / 2.b.h^2 \quad (7.11)$$

Burada , σ_e [Kp/mm²] numunenin tarafsız eksenden en uzak noktasındaki eğilme dayanımı, F [Kp] kırılma anındaki tatbik kuvveti, l [mm] mesnetler arası mesafe, D [mm] dairesel kesitli numune çapı, b, h [mm], sırasıyla dikdörtgen kesitli numune genişliği ve yüksekliğini ifade etmektedir.

Numunelerin kopma kuvvetleri (7.10) bağıntısında yerlerine koyularak elde edilen eğilme dayanımları Çizelge 5.21'de ve grafikleri Şekil 5.18'de verilmiştir.

Çizelge 5.21 AMK numunelerin, hacimsel % takviye oranlarına bağlı olarak eğilme dayanımları

AMK Uçucu kül takviye oranları	Tatbik Kuvveti F_{max} (Kp)	Mesnet Aralığı l (mm)	Numune Çapı D (mm)	Eğilme Dayanımı	
				$\sigma_{e, max}$ Kp/mm ²	MPa
%0	115	51	8.00	29.17	286.16
%5	125	51	8.20	29.44	288.83
%10	130	51	8.10	31.77	311.65
%15	135	51	8.07	33.36	327.26
%20	130	51	8.15	31.19	305.95



Şekil 5.18 Uçucu kül takviyeli AMK malzemede eğilme dayanımının (kırılma modülü), hacimsel % takviye oranlarına bağlı olarak değişimi.

Deney sonuçlarından anlaşılabileceği gibi ETİAL 171 (A360) Alüminyum matris ve Tunçbilek uçucu külleri ile üretilen AMK numunelerinin, eğilme dayanımlarında (kırılma modülü), hacimsel %5-15 takviye oranına bağlı olarak artış gösterdiği, %20 takviye oranında ise eğilme dayanımında yine aynı nedenlere bağlı olarak azalma meydana geldiği görülmektedir.

5.4.5 Darbe dayanımı

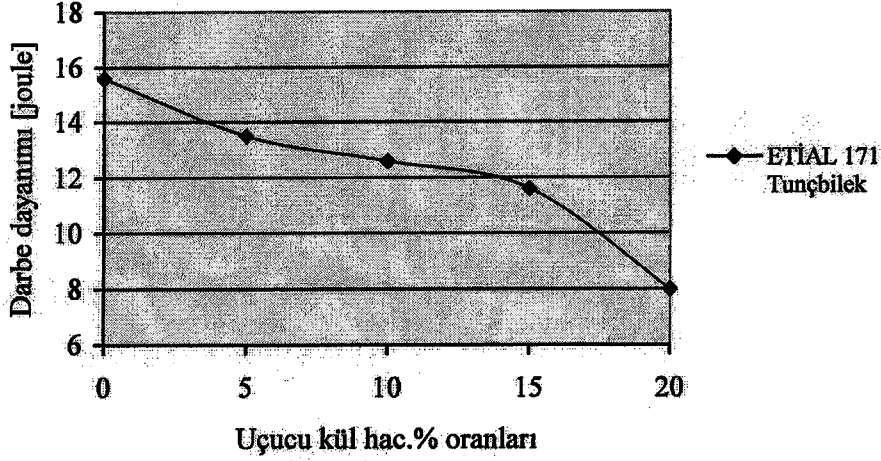
Darbe deneyi, metalik malzemelerin özellikle gevrek kırılmaya müsait şartlardaki mekanik özellikleri hakkında bir fikir elde etme amacıyla uygulanır. Çekme deneyi ile elde edilen gerilim-gerinim diyagramında iyi bir uzama gösteren metalin sünek olacağı, yani statik veya dinamik yüklemelere plastik biçim değiştirme ile karşı koyacağı tahmin edilir. Ancak bu yaklaşım malzemenin yapısına bağlı olarak farklılıklar gösterir. Özellikle düşük sıcaklıklardaki davranışlar oldukça farklıdır. [39]

Üretilen kompozit numunelerinin dinamik bir zorlama altında kırılması için gereken enerji miktarının (darbe dayanımı) tespiti amacıyla, hazırlanan numuneler oda sıcaklığında, teste tabi tutulmuştur. Deney sonuçları Çizelge 5.22’de, grafikleri Şekil 5.19’da verilmiştir.

Referans deney sonuçlarından, üretilen kompozit numunelerin darbe dayanımlarının, % hacimsel takviye oranlarına (V_f) bağlı olarak düşüş gösterdiği görülmüştür. Partikül takviyeli kompozitlerde darbe dayanımındaki azalmalar, takviye ile matris arasındaki yetersiz bağ oluşumu ve porozitelerin varlığı ile izah edilebilir. Özellikle hacimsel %20 takviye oranındaki kompozit numunesinde darbe dayanımının beklentilerin altında bir değerde çıkması, Al matrisin uçucu külü iyi ıslatamaması, dökümde akıcılığın azalması ve porozitelerin fazlalığından kaynaklandığı söylenebilir.

Çizelge 5.22 AMK numunelerin, hacimsel % takviye oranlarına (V_f) bağlı olarak deneysel darbe dayanımlarının değişimi

MEKANİK ÖZELLİK Etial 171 (A360)-Tunçbilek	Hacimsel % takviye oranları (V_f)				
	%0	%5	%10	%15	%20
Darbe dayanımı [joule/ cm²] 25°C , mesnet aralığı : 40 mm Deney cihazı kapasitesi : 50 Joule Hızı : 3.8 m/sn	15.6	13.5	12.6	11.6	8



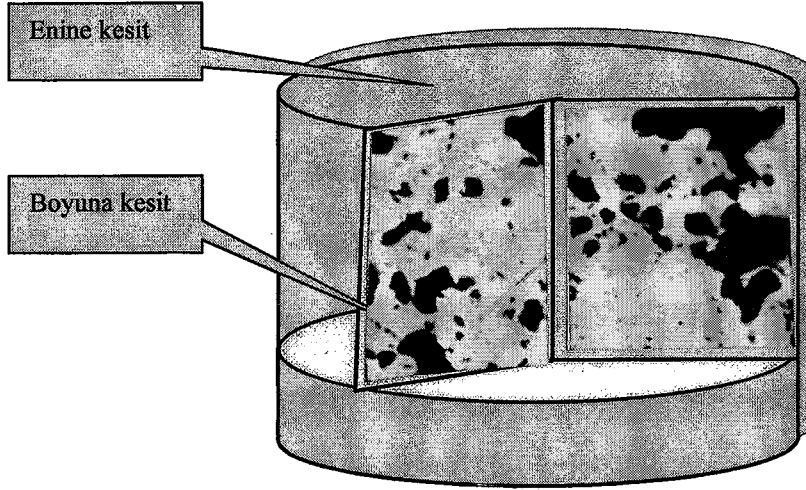
Şekil 5.19 Uçucu kül takviyeli AMK malzemede darbe dayanımının hacimsel % takviye oranlarına bağlı olarak değişimi.

5.5 Mikroyapı karakterizasyonu

Çeşitli hacimsel takviye oranlarında (V_f) üretimi gerçekleştirilen uçucu kül takviyeli AMK malzeme numunelerinin mekanik ve fiziksel özelliklerinin tespiti amacı deneyler yapılmış ve sonuçları ilgili bölümlerde verilmiştir. Bu özelliklerin değişimi, partikül dağılımı, partikül boyutu ve matris ile takviye elemanları arasındaki ara yüzeylerin ve oluşan bağların incelenmesi ile mümkündür. Bu amaçlar doğrultusunda, üretilen numuneler iç yapılarının incelenebilmesine olanak sağlayan temizleme, parlatma ve dağlama işlemlerine tabi tutulmuşlardır.

Mikroyapı karakterizasyonu , yapıda aranan özelliklere bağlı olarak, ışık mikroskobu, tarama elektron mikroskobu (SEM) ve görüntü analiz cihazında yapılan incelemeler doğrultusunda yapılmıştır.

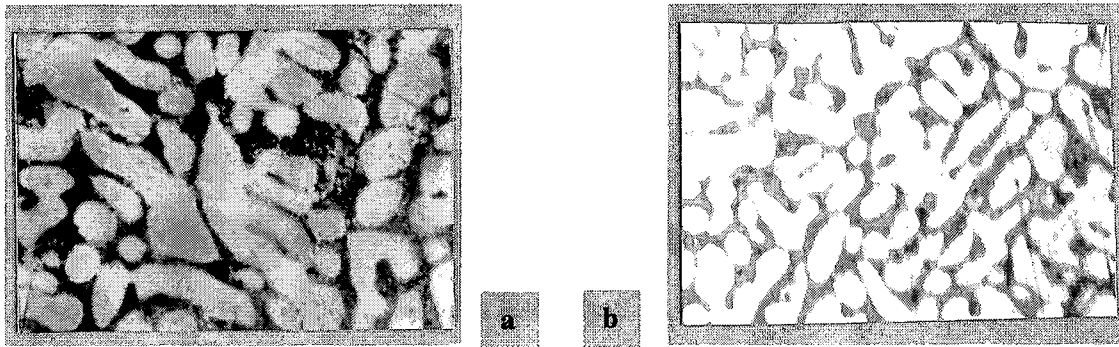
5.5.1 Işık mikroskobu görüntüleri



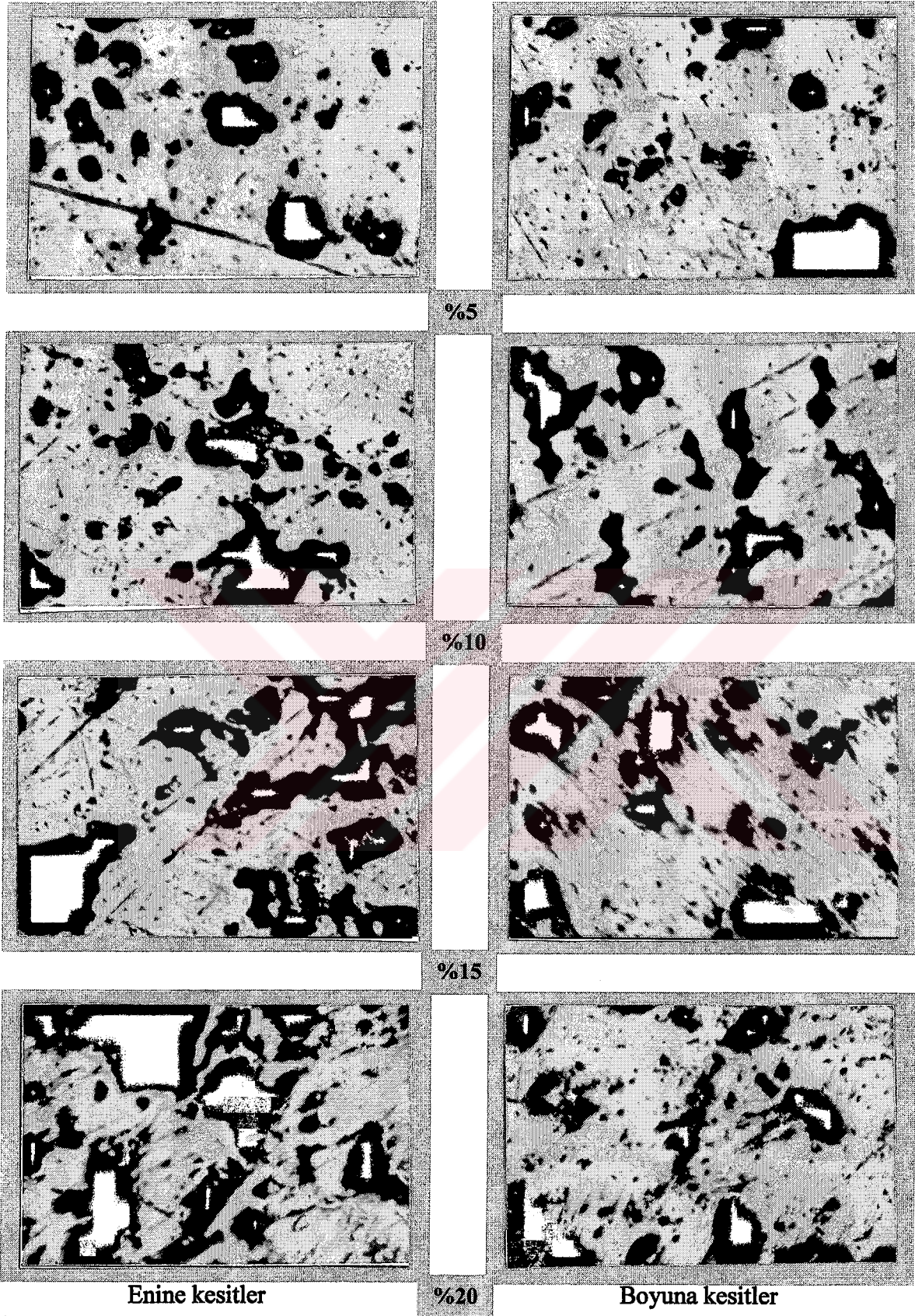
Şekil 5.20 Işık mikroskop incelemeleri için alınan numune kesitlerinin şematik görünümü

İçyapıdaki partikül dağılımı, boyutları, büyüklüğü, oranları ile ilk bilgiler ışık mikroskobu verilerinden yararlanılarak elde edilmiştir. Numunelerin alındığı, enine ve boyuna kesitlerinden şematik görünümü Şekil 5.20’de, takviyesiz alüminyum alaşımlarının ve AMK numunelerinin optik mikroskop içyapı fotoğrafları sırasıyla Şekil 5.21 ve 5.22’de verilmiştir.

Çeşitli % hacim oranlarında (V_f) üretilen kompozitlerin içyapı fotoğraflarından edinilen bilgiler doğrultusunda, genel olarak partikül dağılımının iyi olduğu, taneler arası mesafelerin ve tane büyüklüklerinin beklentiler doğrultusunda olduğu görülmüştür. Tane büyüklüğü, kapladığı alanlar ve oranları ile ilgili detaylı bilgi ve değerler görüntü analiz cihazı verileri ile sunulacaktır.

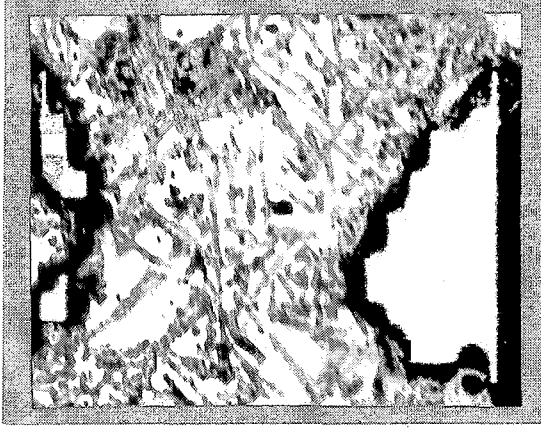


Şekil 5.21 Takviyesiz alüminyum alaşımlarının a) ETİAL 171 (A360), b) ETİAL 120 (443) ışık mikroskop fotoğrafları

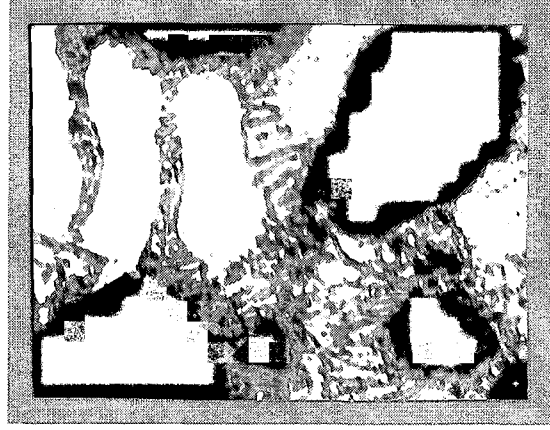


Şekil 5.22 ETİAL 171(360) Alüminyum matrisli, Tunçbilek uçucu kül takviyeli kompozitlerin ışık mikroskop fotoğrafları Uçucu kül partikülleri (siyah)

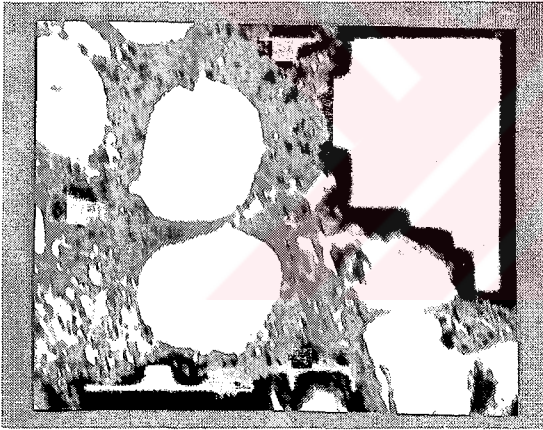
Uçucu kül partiküllerinin yapı oluşumu nasıl etilediği konusunda bilgi sahibi olmak amacı ile ETİAL 171- Tunçbilek kompozit numunelerin dağlanmış yüzeylerinin ışık mikroskop fotoğrafları Şekil 5.23’de verilmiştir.



%5



%10



%15



%20

Şekil 5.23 ETİAL 171-Tunçbilek kompozit numunelerinin dağlanmış yüzeylerinin ışık mikroskop fotoğrafları.Uçucu kül partikülleri (siyah)

5.5.2 Görüntü analiz cihazında yapılan çalışmalar

Üretilen kompozit malzeme numunelerindeki partikül boyutlarının, birim alandaki partikül miktarının, kapladığı toplam alanların ve oranlarının tespiti amacı ile görüntü analiz cihazında yapılan inceleme sonuçları, Çizelge 5.23,24,25,26'da, fotoğrafları Şekil 5.24'de verilmiştir. Bu veriler doğrultusunda,

- i) Görüntülerde tespit edilen maksimum partikül boyutları, uçucu küllerin elek analizlerindeki maksimum boyutlardan daha büyük değildir. Bu sonuçlardan, uçucu kul partiküllerinin karıştırma sırasında , birbiri ile herhangi bir nedenle birleşmediğini ve matris metali tarafından çevrildiğini söylemek mümkündür.
- ii) Taranan yüzeylerde birim alana düşen partikül miktarı, % hacimsel takviye oranından (V_f) bağımsız olarak farklılıklar göstermekte ve 800x800 μ m görüntü alanı içinde 12-32 adet arasında değişmektedir.
- iii) Partikül yüzey alanlarının toplamının ,taranan toplam yüzey alanına oranlarının, genel olarak, % hacimsel takviye oranlarına paralel olarak artması ve benzerlik göstermesi, homojen partikül dağılımının oluştuğunu ifade etmektedir.

Çizelge 5.23 (V_f ;%5) Hacimsel takviye oranı ile üretilen AMK numunelerin görüntü analiz cihazı verileri

800(μm) x 800(μm) GÖRÜNTÜ ALANI İÇERİSİNDEKİ PARTİKÜLLERİN							
A Numunesi : ETİAL 171 (A360) –Tunçbilek uçucu kül takviyeli B Numunesi : ETİAL 120 (443) - Yatağan uçucu kül takviyeli							
Partikül No:		Alanı (μm^2)		Uzunluğu (μm)		Çevre Uzunluğu (μm)	
A	B	A	B	A	B	A	B
1	1	295.62	3929.03	21.31	98.36	67.21	314.75
2	2	163.93	1281.91	14.75	50.82	50.82	165.57
3	3	241.87	300.99	19.67	22.95	62.29	68.85
4	4	5818.30	354.74	116.39	24.59	340.98	73.77
5	5	1238.91	257.99	60.66	21.31	160.66	65.57
6	6	1754.90	163.93	67.21	14.75	219.67	50.82
7	7	747.11	233.81	45.90	19.67	132.79	60.66
8	8	4920.69	13345.81	103.28	152.46	350.82	467.21
9	9	911.04	1273.84	47.54	54.10	150.82	160.66
10	10	8357.92	1152.91	131.15	54.10	409.84	154.10
11	11	212.31	357.43	18.03	22.95	57.38	75.41
12	12	298.31	247.24	22.95	19.67	70.49	62.29
13	13	212.31	292.93	18.03	21.31	57.38	67.21
14	14	236.49	1483.46	19.67	59.02	60.66	177.05
	15		1134.10		52.46		163.93
	16		3695.22		104.92		409.84
	17		1072.29		49.18		142.62
GÖRÜNTÜ ALANI İÇİNDEKİ				A		B	
Partikül miktarı				14		17	
Toplam partikül alanı (μm^2)				25409.70		30577.64	
Toplam partikül uzunluğu (μm)				706.56		842.62	
Toplam partikül çevresi (μm)				2191.80		2680.32	
Ortalama partikül alanı (μm^2)				1814.98		1798.68	
Ortalama partikül uzunluğu (μm)				50.47		49.57	
Ortalama partikül çevresi (μm)				156.56		157.67	
TOP. PARTİKÜL ALANI /TOP. ALAN (%)				7.13		6.08	

Çizelge 5.24 ($V_f\%$ 10) Hacimsel takviye oranı ile üretilen AMK numunelerin görüntü analiz cihazı verileri

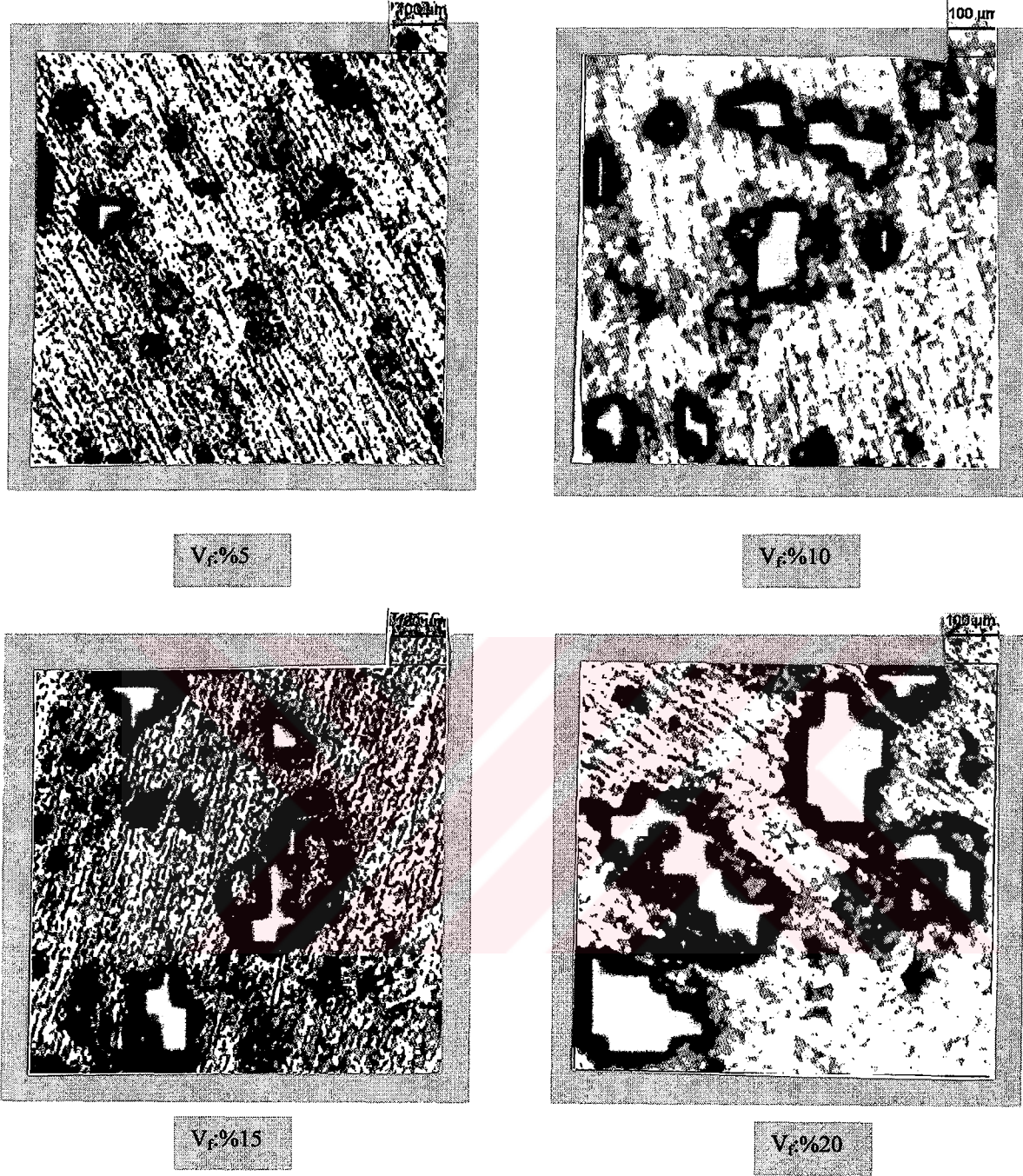
800(μm) x 800(μm) GÖRÜNTÜ ALANI İÇERİSİNDEKİ PARTİKÜLLERİN							
A Numunesi : ETİAL 171 (A360) –Tunçbilek uçucu kül takviyeli							
B Numunesi : ETİAL 120 (443) – Yatağan uçucu kül takviyeli							
Partikül No:		Alanı (μm^2)		Uzunluğu (μm)		Çevre Uzunluğu (μm)	
A	B	A	B	A	B	A	B
1	1	7492.57	1647.40	155.74	68.85	567.21	211.47
2	2	266.06	386.99	19.67	24.59	63.93	77.05
3	3	319.80	163.93	22.95	14.75	70.49	50.82
4	4	8134.37	1633.96	177.05	50.82	580.33	167.21
5	5	14756.71	502.55	175.41	29.51	665.57	90.16
6	6	9862.89	282.18	224.59	22.95	716.39	67.21
7	7	330.55	647.67	24.59	39.34	73.77	113.11
8	8	803.54	306.37	39.34	22.95	116.39	70.49
9	9	13515.11	2413.32	226.23	101.64	724.59	270.49
10	10	163.93	319.80	14.75	22.95	50.82	70.49
11	11	11886.53	244.56	172.13	19.67	506.56	62.29
12	12	2330.01	233.81	81.97	19.67	218.03	60.66
	13		333.24		22.95		72.13
	14		4662.70		108.20		322.95
	15		163.93		14.75		50.82
	16		9868.26		150.82		459.02
	17		163.93		14.75		50.82
	18		1572.15		67.21		183.61
	19		266.06		19.67		63.93
	20		10806.18		147.54		634.42
	21		263.37		19.67		63.93
	22		274.12		22.95		67.21
	23		319.80		22.95		70.49
	24		317.12		26.23		73.77
	25		206.93		18.03		57.38
	26		1152.91		54.10		167.21
	27		266.06		21.31		63.93
	28		1037.35		44.26		137.70
	29		163.93		14.75		50.82
	30		940.60		45.90		129.51
	31		300.99		22.95		67.21
	32		419.24		29.51		83.61
GÖRÜNTÜ ALANI İÇİNDEKİ				A		B	
Partikül miktarı				12		32	
Toplam partikül alanı (μm^2)				69862.58		42281.43	
Toplam partikül uzunluğu (μm)				1334.42		1326.23	
Toplam partikül çevresi (μm)				4354.09		4181.96	
Ortalama partikül alanı (μm^2)				5821.88		1321.29	
Ortalama partikül uzunluğu (μm)				111.20		41.44	
Ortalama partikül çevresi (μm)				362.84		130.69	
TOP. PARTİKÜL ALANI /TOP. ALAN (%)				11.63		8.14	

Çizelge 5.25 (V_f ;%15) Hacimsel takviye oranı ile üretilen AMK numunelerin görüntü analiz cihazı verileri

800(μm) x 800(μm) GÖRÜNTÜ ALANI İÇERİSİNDEKİ PARTİKÜLLERİN							
A Numunesi : ETİAL 171 (A360) –Tunçbilek uçucu kül takviyeli							
B Numunesi : ETİAL 120 (443) - Yatağan uçucu kül takviyeli							
Partikül No:		Alanı (μm^2)		Uzunluğu (μm)		Çevre Uzunluğu (μm)	
A	B	A	B	A	B	A	B
1	1	1427.03	2515.44	57.38	73.77	167.21	208.20
2	2	701.42	5584.49	39.34	101.64	109.84	408.20
3	3	290.24	1779.08	21.31	68.85	67.21	180.33
4	4	2077.39	2389.13	85.25	83.61	244.26	252.46
5	5	1556.03	360.12	63.93	22.95	186.88	73.77
6	6	322.49	1642.02	24.59	52.46	73.77	163.93
7	7	6777.71	556.30	154.10	31.15	440.98	91.80
8	8	163.93	424.61	14.75	26.23	50.82	80.33
9	9	932.54	1781.77	42.62	60.66	124.59	180.33
10	10	12386.39	685.30	186.88	37.70	581.97	106.56
11	11	2741.18	755.17	65.57	32.79	214.75	106.56
12	12	24971.65	1206.66	375.41	42.62	1054.10	137.70
13	13	12862.07	17234.53	200.00	209.84	552.46	1036.06
14	14	701.42	4775.57	36.07	116.39	106.56	442.62
15	15	2786.87	2426.75	68.85	93.44	218.03	278.69
	16		532.11		27.87		90.16
	17		1427.03		70.49		186.88
	18		1741.46		60.66		190.16
	19		1711.90		70.49		198.36
	20		502.55		26.23		86.89
	21		765.92		36.07		109.84
	22		954.04		52.46		142.62
	23		440.74		26.23		81.97
	24		368.18		22.95		73.77
	25		11147.48		140.98		486.88
	26		851.92		47.54		139.34
	27		10894.86		157.38		521.31
GÖRÜNTÜ ALANI İÇİNDEKİ				A		B	
Partikül miktarı				15		27	
Toplam partikül alanı (μm^2)				70698.37		75455.13	
Toplam partikül uzunluğu (μm)				1436.06		1793.44	
Toplam partikül çevresi (μm)				4193.43		6055.72	
Ortalama partikül alanı (μm^2)				4713.22		2794.63	
Ortalama partikül uzunluğu (μm)				95.74		66.42	
Ortalama partikül çevresi (μm)				279.54		224.29	
TOP. PARTİKÜL ALANI /TOP. ALAN (%)				12.22		13.44	

Çizelge 5.26 (V_f :%20) Hacimsel takviye oranı ile üretilen AMK numunelerin görüntü analiz cihazı verileri

800(μm) x 800(μm) GÖRÜNTÜ ALANI İÇERİSİNDEKİ PARTİKÜLLERİN							
A Numunesi : ETİAL 171 (A360) –Tunçbilek uçucu kül takviyeli B Numunesi : ETİAL 120 (443) - Yatağan uçucu kül takviyeli							
Partikül No:		Alanı (μm^2)		Uzunluğu (μm)		Çevre Uzunluğu (μm)	
A	B	A	B	A	B	A	B
1	1	6038.67	34270.18	127.87	275.41	395.08	1239.34
2	2	545.55	771.29	39.34	39.34	113.11	116.39
3	3	276.81	3531.29	19.67	101.64	67.21	313.11
4	4	4219.27	607.36	88.52	32.79	272.13	100.00
5	5	14952.89	1195.91	172.13	54.10	565.57	168.85
6	6	7610.82	352.05	119.67	26.23	370.49	77.05
7	7	6783.09	55482.11	190.16	354.10	570.49	1770.49
8	8	36253.51	163.93	350.82	14.75	1426.23	50.82
9	9	188.12	792.79	16.39	42.62	54.10	121.31
10	10	5842.79	674.55	224.59	34.43	665.57	101.64
11	11	752.48	2776.12	45.90	80.33	127.87	267.21
12	12	257.99	319.80	19.67	22.95	63.93	70.49
13	13	1015.85	3195.36	47.54	80.33	145.90	236.06
14	14	529.42	1233.53	31.15	52.46	91.80	150.82
15	15	1827.46	1238.91	75.41	59.02	209.84	155.74
16	16	604.67	16178.36	34.43	188.52	100.00	626.23
17	17	626.17	35836.96	32.79	321.31	10164	1824.59
18	18	515.99	6801.90	37.70	122.95	118.03	363.93
19	19	11972.53	17753.20	204.92	204.92	670.49	572.13
20		4146.71		98.36		319.67	
21		163.93		14.75		50.82	
GÖRÜNTÜ ALANI İÇİNDEKİ				A		B	
Partikül miktarı				21		19	
Toplam partikül alanı (μm^2)				107924.73		183175.62	
Toplam partikül uzunluğu (μm)				1991.80		2108.19	
Toplam partikül çevresi (μm)				6499.98		8326.21	
Ortalama partikül alanı (μm^2)				5139.27		9640.82	
Ortalama partikül uzunluğu (μm)				94.85		110.96	
Ortalama partikül çevresi (μm)				309.52		438.22	
TOP. PARTİKÜL ALANI /TOP. ALAN (%)				22.37		24.05	

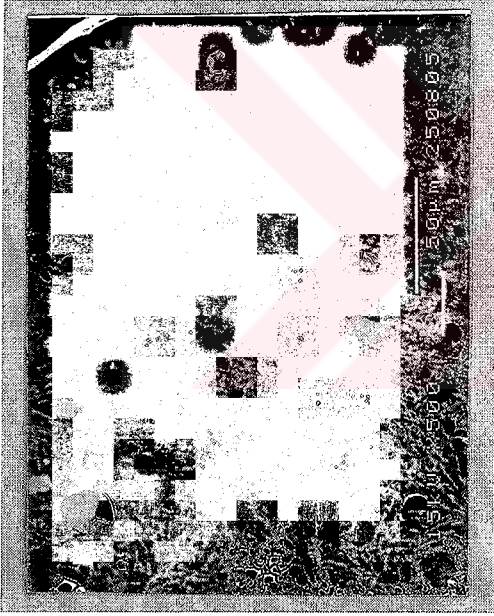


Şekil 5.24 ETİAL 171-Tunçbilek AMK numunelerin görüntü analiz cihaz mikroskopundan alınan fotoğraflar. Uçucu kül partikülleri (siyah)

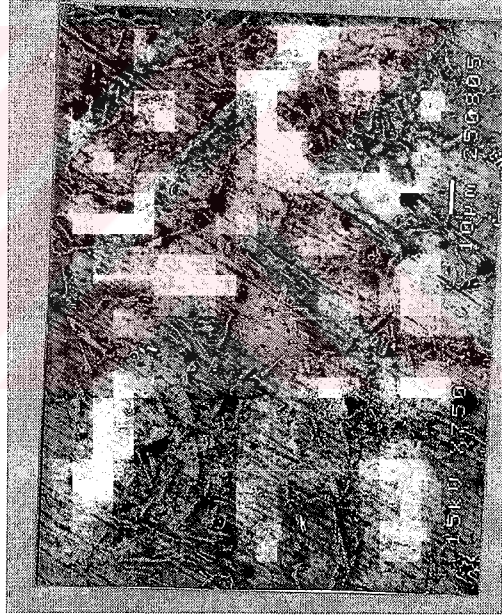
5.5.3 Tarama elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri

Parlatılan ve kırılma yüzeylerindeki mikroyapının incelenmesi amacı ile hazırlanan numunelerin, jeol 5410 LV tarama elektron mikroskobundan (SEM) alınan görüntü fotoğrafları incelenerek, değerlendirilmesi yapılmıştır.

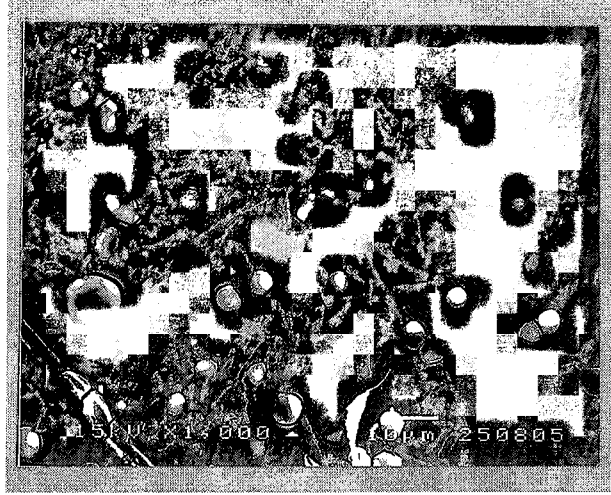
ETİAL 171- Tunçbilek ($V_f\%10$) AMK numunelerin, parlatılan yüzeylerinden, 500x, 750x, 1000x büyültmelerle alınan SEM (sekonder elektron) görüntüleri, sırasıyla Şekil 5.25, 5.26 ve 5.27’de verilmiştir. Alüminyum matraste, katılaşma sürecinde meydana gelen kristallerin takviye partiküllerini iterek homojen dağılımı etkilediği ve segregasyona yol açtığı Şekil 5.26 ve 5.27’de belirgin olarak görülmektedir.



Şekil 5.25 AMK numunenin SEM fotoğrafı

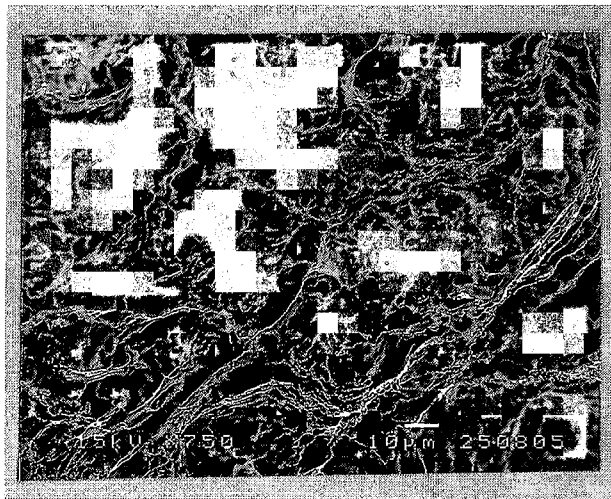


Şekil 5.26 AMK numunenin SEM fotoğrafı

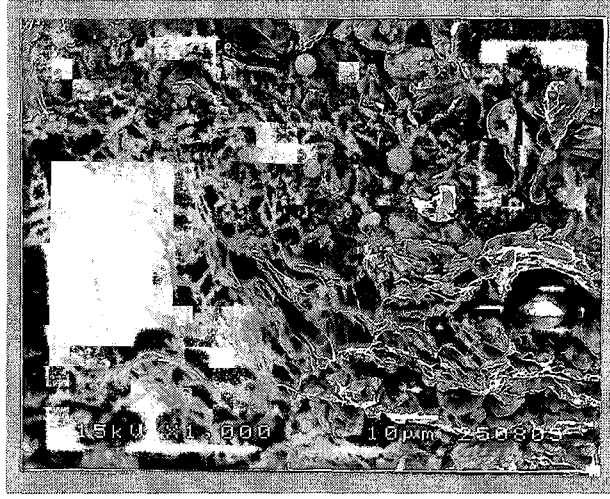


Şekil 5.27 AMK numunenin SEM fotoğrafı

Mukayese etmek amacıyla, çekme deneyinde kullanılan, takviyesiz ETİAL-171 (A360) alüminyum alaşımının, kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri Şekil 5.28’de , hacimsel %5 takviye oranı ile üretilen uçucu kül (Tunçbilek) takviyeli numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 5.29 ve 5.30’da verilmiştir. Kırılma yüzeylerinden , % 5 takviye oranı ile üretilen ETİAL 171- Tunçbilek kompozit numunede sünek kırılma olduğu görülmektedir. 2000x büyütme ile alınan SEM görüntü fotoğrafının yer aldığı Şekil 5.30’da uçucu kül partikülleri ile alüminyum matris arasındaki ara yüzey oluşumları görülmektedir.



Şekil 5.28 ETİAL 171 (A360) Alüminyum alaşımının kırılma yüzeyinin SEM fotoğrafı



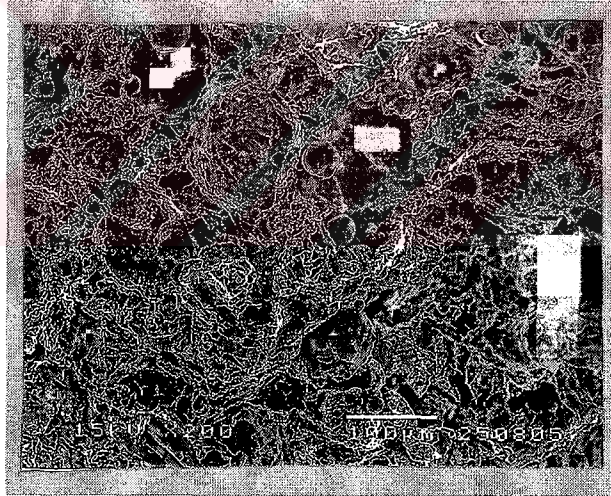
Şekil 5.29 ETİAL 171-Tunçbilek AMK (%5) numunenin kırılma yüzeyinin SEM fotoğrafı



Şekil 5.30 ETİAL 171-Tunçbilek AMK (%5) numunenin kırılma yüzeyinin SEM fotoğrafı



Şekil 5.31 ETİAL 171-Tunçbilek AMK (%10) numunenin kırılma yüzeyinin SEM fotoğrafı



Şekil 5.32 ETİAL 171-Tunçbilek AMK (%10) numunenin kırılma yüzeyinin SEM fotoğrafı

Hacimsel % 10 takviye oranı ile üretilen numunelerin kırılma yüzeylerinden alınan SEM fotoğraflarından, kırılmanın, %5 oranla üretilen numunelere nazaran daha gevrek olduğu görülmektedir.

6.BÖLÜM

6. SONUÇLAR

Bu tezde ETİAL 171 (A360) ve ETİAL 120 (443) alüminyum alaşım matrisli, uçucu kül takviyeli (dolgulu) kompozit malzeme karıştırma (stir-mix) yöntemi ile üretilmiş, mekanik fiziksel özellikleri ile mikroyapı karakterizasyonu yapılmıştır. Çalışmadan çıkan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- i) Takviye elemanı olarak kullanılabilecek uçucu küllerde, SiO_2 ve Al_2O_3 miktarlarının yüksek, CaO miktarının ise düşük olanı dayanım ve aşınma yönünden uygun olmaktadır. Bu nedenle Yatağan ve Tunçbilek termik santral uçucu külleri bu çalışmada kullanılmıştır. Kullanılan uçucu küllerin yoğunlukları $1,8-1,9 \text{ g/cm}^3$, tane büyüklükleri çoğunlukla $40-150 \mu\text{m}$ arasında değişmektedir.
- ii) Matris malzemesi olarak iki farklı, ortalama %9,5 Si içeren ETİAL 171 ve %5 Si içeren ETİAL 120 alüminyum alaşımları kullanılmıştır. Her iki alaşımda ısıtma kabiliyetine olumlu etkisi olan Mg miktarı %0,3 civarındadır. ETİAL 120'de %0,13 Ti mevcuttur. İki farklı alaşım seçilmesi, bunların çok kullanılan Al-Si döküm alaşımları olması ve silisyum içerik farklılığının üretim ve özellik yönünden etkilerinin araştırılması için yapılmıştır. Genelde silisyum farkının üretim ve özellik açısından önemli bir fark oluşturmadığı saptanmıştır.
- iii) Kompozit malzeme üretim yöntemi olarak karıştırmalı (stir-mix) döküm kullanılmış ve numuneler kokil kalıplara dökülmüştür. Uçucu kül hacimsel takviye oranları %5, 10, 15 ve 20 olarak alınmış, 400-560-750 d/d karıştırma devirlerinde, 750-850-950°C sıcaklıklarda, özel olarak tasarımı yapılan ve seramik kaplanan mikser kullanılarak deneyler yapılmıştır. Uçucu külün karıştırmadan önce 400 °C ön ısıtılması, 560 d/d mikser hızında, 850 °C karıştırma sıcaklığında vorteks oluşumu ve homojen karıştırma işleminin en iyi olduğu saptanmıştır. % 20'den fazla hacimsel takviye oranlarında iyi bir karıştırma sağlanamamıştır. Üretim aşamasındaki en büyük problem karıştırma sırasında oluşan oksitlenmedir.
- iv) Üretilen kompozit malzemelerin yapılan, eğme, çekme, elastiklik modülü test sonuçlarında hacimsel takviye oranları arttıkça, çekme ve eğme dayanımları ile

elastiklik modülü değerlerinin arttığı, % 15 hacim oranında maksimuma ulaştığı belirlenmiştir. %15 hacim oranlarında çekme dayanımı ortalama 190 MPa, eğme dayanımı 327 MPa, elastiklik modülü 65 GPa, bulunmuştur. Bu değerler matris malzemesinin değerlerinden yüksektir. Kopma uzaması ve darbe dayanımı değerleri, hacimsel takviye oranlarının artmasıyla azalmıştır. Kopma uzanması değerleri %1-4,7 arasında, darbe dayanımı 8-13,5 J/cm² arasında değişmektedir. Aşınma dayanımı ve sertlik değerleri takviye oranına bağlı olarak artış göstermiştir.

- v) Kompozit malzemelerin yoğunluk değerleri, hacimsel takviye oranlarının artmasıyla azalmıştır. Yoğunluklar 2,47-2,64 g/ cm³ arasında bulunmuştur. Karışımlar kuralına göre $[\rho_c = V_f \cdot \rho_f + (1 - V_f) \cdot \rho_m]$ bulunan teorik yoğunluklarla deneysel değerler karşılaştırıldığında uyum içerisinde oldukları belirlenmiştir.
- vi) Mikroyapı karakterizasyonu , ışık, tarama elektron mikroskopları ve görüntü analiz cihazı kullanılarak yapılmıştır. Bu incelemelere göre uçucu küllerin matris içerisinde genelde homojen dağıldıkları saptanmıştır. Görüntü analiz cihazı kullanılarak uçucu küllerin matris içerisindeki boyutları ve alanları belirlenmiştir. Buna göre uçucu küllerin incelenen alana oranları % 6-24 arasında bulunmuş ve bu değerlerin hacim oranları ile uyum içerisinde olduğu saptanmıştır. Kırılma yüzeylerinin, tarama elektron mikroskopunda yapılan incelemelerinde, kırılmaların genelde matris malzemesinde oluştuğunu göstermiştir.

Yapılan tüm bu çalışmalar sonucunda ülkemiz termik santrallerinin atık bir ürünü olan ve çevreyi kirleten uçucu küllerin, alüminyum matrisli kompozit malzeme üretiminde kullanılarak değerlendirilebileceği belirlenmiştir.

Böylece alüminyum matrisli kompozit malzeme üretiminde pahalı takviye elemanları yerine uçucu külün takviye veya dolgu olarak kullanımı, tüketilen alüminyum alaşımı miktarlarını da azaltarak ülkemiz ekonomisinde fayda sağlayabilecektir.

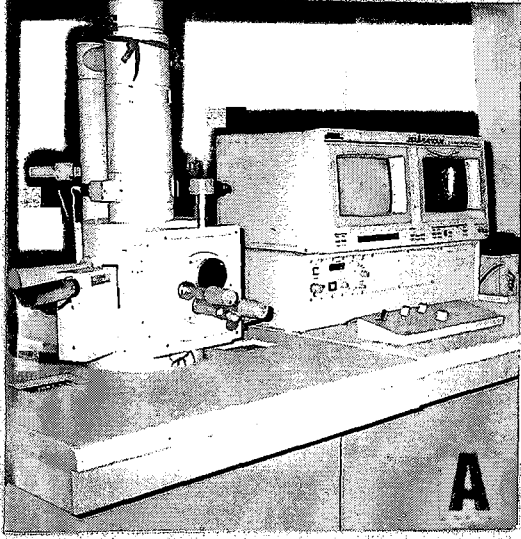
KAYNAKLAR

- [1] Clyne, T.W.- Withers, P.J.(1993) "An Introduction To Metal Matrix Composites", Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge, 1-10, 318-340, 454-467.
- [2] Demirkesen, E.(1991) "Kompozit Malzemeler", İ.T.Ü Kimya-Metalurji Fakültesi , yayın no: 3/1991, 81-128.
- [3] Girot, F.A.G - Quenisset, J.M.- Naslain, R. (1987), "Discontinuously-Reinforced Aluminium Matrix Composites"- "Composites Science and Technology", 155-184.
- [4] Levin, M.- Karlsson,B.(1993) "Fatigue Behaviour of a Saffil-Reinforced Aluminium Alloy (AA6061)" Composites Volume 24, Number 3 (1993) 288-295
- [5] Meletis, E.I - Chouldhury, S.- Gdoutos, E.E (1991) "Stres Strain Behavior of Al Matrix/ Al_2O_3 Fiber Composites" Composite Structures 19 (1991) 89-103
- [6] Vaidya, R.U – Chawla, K.K. "Thermal Expansion of Metal-Matrix Composites" Composites Science and Technology %0 (1994) 13-22
- [7] Rohatgi, P. "Cast Aluminum-Matrix Composites for Automotive Applications" JOM, April (1991), 10-15
- [8] Allison, J.E – Cole, G.S .Rozak,(1993) "MMC in the Automotive industry: Opportunities and Challenges" JOM, January (1993), 19-24
- [9] Downnes, T.J – King, J.E (1993) "The Effect of Microstructure on fracture toughness of a metal-matrix composite " Composites Volume 24, Number 3 (1993) 276-281
- [10] Liu, X.- Bathias, C. (1993) "Defects In Squeeze-Cast $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ Alloy Composites and Their Effects on Mechanical Properties" Composites Science and Technology 46 (1993) 245-252
- [11] Henriksen, B.R. (1990) "The Microstructure of Squeeze-Cast SiC_w -Reinforced Al4cu Base Alloy With Mg And Ni Additions", Composites, Volume 21, Number 4, 1990, 333-338.
- [12] Wu, Y.- Lavernia, E.J. (1991) " Spray Atomised and Codeposited 6061 Al/SiC_p Composites" JOM, Aug. 1991, 16-17
- [13] Hille, D.V - Begtsson, S.- Warren, R (1989) "Quantitative Metallographic Study of Fibre Morphology in a Short Alumina Fibre Reinforced Aluminium Alloy Matrix" Composites Science and Technology 35 (1989) 195-206

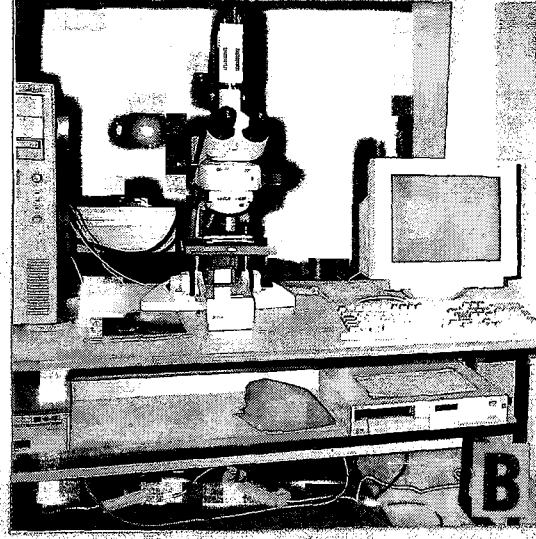
- [14] Lloyd, D.J. (1989) "The Solidification Microstructure of Particulate Reinforced Aluminium/SiC Composites" *Composites Science and Technology* 35 (1989) 159-179
- [15] Rozak, G.A - Lewandowski, J.J - Wallace, J.F.- Altmışoğlu, A.(1992) "Effects of Casting Conditions and Deformation Processing on A356 Aluminum and A356 -20 Vol.% SiC Composites" *Journal of Composite Materials*, Vol.26, No.14 (1992) 2076-2106
- [16] Koczak, M.J. - Peremkumar, M.K,(1993) "Emerging Technologies for the In-situ Production of MMC's" *JOM*, January,1993 44-48
- [17] Shaoo, P. – Koczak, M.J. (1991) "Microstructure-Property Relationship of In situ Reacted TiC/Al-Cu Metal Matrix Composites" *Materials Science and Engineering* (1991),69-76
- [18] Geçkinli, A. E. (1992), "İleri Teknoloji Malzemeleri", İ.T.Ü Kimya-Metalurji Fakültesi , 29-40, 124-150.
- [19] Taya, M.- Arsenault, R.J. (1989) "Metal Matrix Composites" 1989, 209-225
- [20] Stanford, C.A- Beale & Clyne, T.W (1989), "Extrusion and High-Temperature Deformation of Fibre-Reinforced Aluminium" , *Composites Science and Technology* 35 (1989) 121-157
- [21] Anık, S.- Anık, E.S. - Vural. M.(1993) "Malzeme Bilgisi ve Muayenesi", 190-202.
- [22] Topbaş, M.A. (1993) "Isıl İşlemler" , 392-403.
- [23] Asthana, R. - Tewari, S.N.(1993) "Interfacial And Capillary Phenomena In Solidification Processing of Metal-Matrix Composites", *Composite Manufacturing Vol 4*, (1993) 10,11.
- [24] Ramanathan, L.V.- Nuses, P.C.R."Effect of Liquid Metal Processing Parameters on Microstructure and Properties of Alumina Reinforced Al Base MMC's" 611-615
- [25] Arsenault R.J (1994) " Interfaces in Metal-and Intermetallic-matrix Composites " *Composites Volume 25*, Number 7 (1994) 540-548
- [26] Kindl, B.- Teng, Y.H – Liu, Y.L (1994) "Protective Coatings for Commercial Particulate " *Composites Volume 25*, Number 7 (1994) 671-675
- [27] Foo, K.S - Banks, W.M.- Caraven, A.J.- Hendry, A. (1994) "Interface characterization of an SiC Particulate/6061 Aluminium Alloy Composite" *Composites Volume 25*, Number 7 (1994) 677-683
- [28] Lim,T.- Kim, Y.H.- Lee, C.S.-Han K.S. "Fabrication And Mechanical Properties of AMC s", *Journal of Composite Materials Vol.26*, No.7/1992, 1062-1085.

- [29] Geiger, A L.- Walker, A.J.(1991) “The Processing and Properties of Discontinuously Reinforced Aluminum Composites” JOM Aug. 1991, 8-15
- [30] Topbaş, M. A. (1993)“Endüstri Malzemeleri, Cilt II”, 154-160, 220-228.
- [31] Rohatgi, P.K. “Low-Cost, Fly-Ash-Containing Aluminium – Matrix Composites” JOM, Nov. 1994, 55-59
- [32] Ashby, M.F- Jones, R.H. (1982) “Engineering Materials ” (1982), 252
- [33] Young, K. W. – Trust, R. W. (1994) “ Defect of Fly Ash Contempt and Coupling Agent on the Mechanical Properties of Fly Ash filled Polypropylene” Composites Science and Technology 1994, Vol.52, 361-362
- [34] Elektrik Etüd İdaresi Genel Direktörlüğü (1979)“Türkiye Uçucu Küllerinin özellikleri ve Kullanım Olanakları”, 1-40
- [35] TSE (1975) “Uçucu Küller” Türk Standardları Enstitüsü Birinci Baskı-TS 639/Nisan 1975, 1-6
- [36] Walker, P.M.(1992) “Chambers Science And Technology Dictionary”, 119, 885, 926.
- [37] Properties of Aluminum Casting Alloys, (1991), 951, 957, 958.
- [38] Güleç, Ş.- Aran, A.(1988) “Malzeme Bilgisi , Cilt I“ , 153
- [39] Kayalı, E.S.- Ensari, C.-Dikeç, F.(1996) “Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri” 90-94

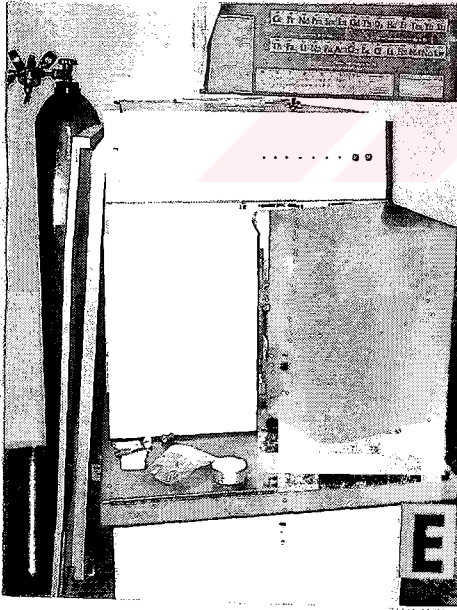
Ek .1 Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya Metalürji Fakültesi Laboratuvarlarında, Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihaz Fotoğrafları



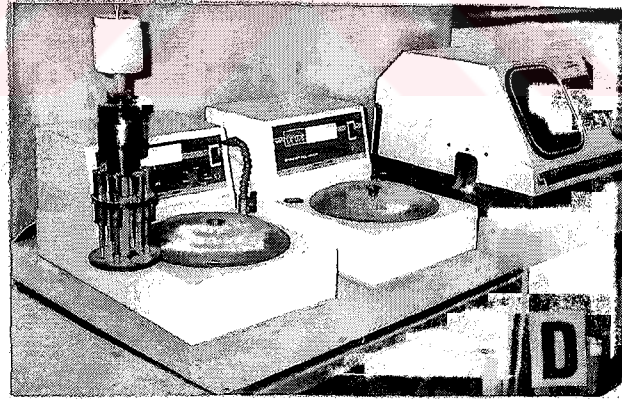
[A] Tarama Elektron Mikroskobu



[B] Görüntü Analiz Cihazı

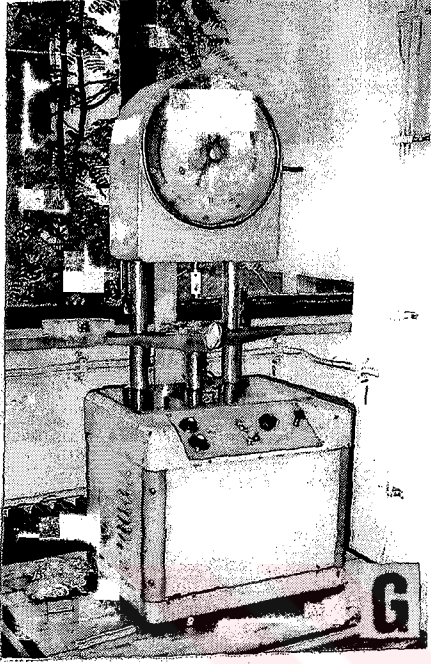


[E] Optik Emisyon Spektrometresi

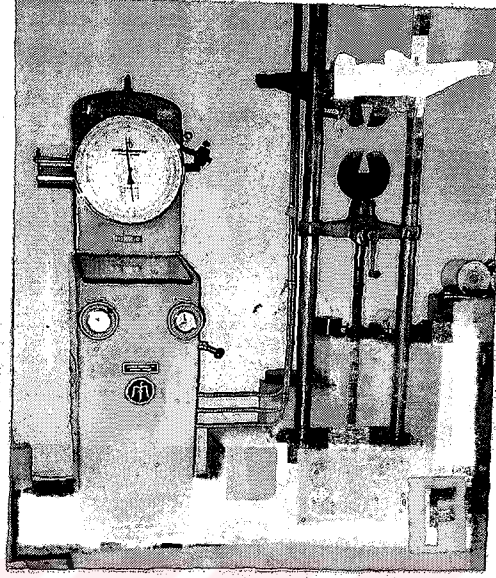


[D] Yüzey Parlatma Cihazı

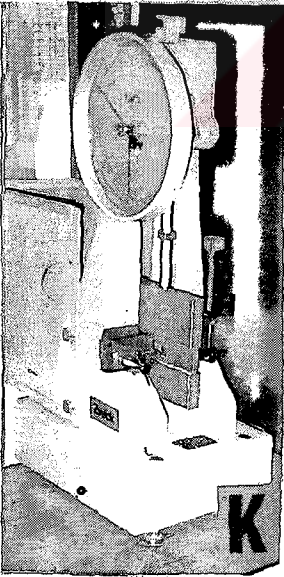
Ek .2 Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya Metalürji Fakültesi Laboratuarlarında, Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihaz Fotoğrafları



[G] Eğme Deney Cihazı



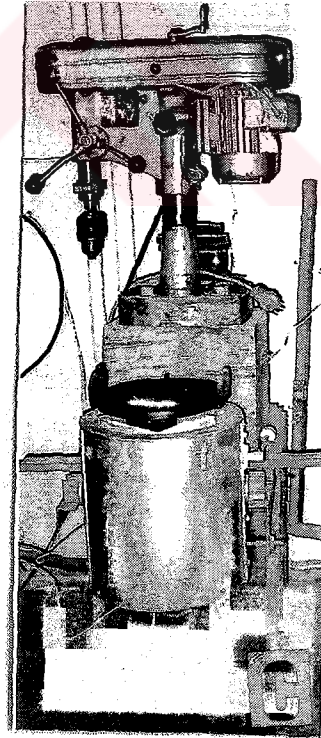
[F] Çekme Deney Cihazı



[K] Darbe Deney Cihazı

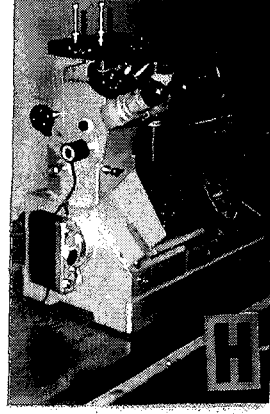
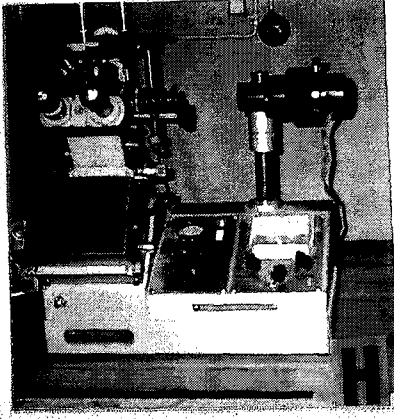


[J] Sertlik Ölçme Cihazı



[C] Karıştırma Döküm Seti

Ek .3 Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya Metalürji Fakültesi Laboratuarlarında, Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihaz Fotoğrafları



[H] Optik (Işık) Mikroskop

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	11.04.1952	
Doğum yeri	Malatya	
Lise	1970-1971	Diyarbakır Maarif Koleji
Lisans	1971-1975	İ.T.Ü Müh. Mim. Fak. Makina Bölümü
Yüksek Lisans	1975-1977	İ.T.Ü Malzeme ve İmalat Anabilim Dalı
Doktora	1994-	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Metalürji Müh. Anabilim dalı, Malzeme Programı
Çalıştığı Kurumlar	1976- 1978	Kaynak Tekniği San. ve Tic. A.Ş. (Eczacıbaşı)
	1980- 1991	N.V. Turkse Shell
	1992-.....	Dicle Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Makina Bölümü
Seminer ve Kurslar	1976	Kaynak Teknolojisi/ESAB/ İsveç
	1976	Tahribatsız Muayeneler Y.T.Ü/İstanbul
	1985	Malzeme ve işletme teknikleri / İskoçya
	1987	IBM Elektronik Malzeme Kayıtları / Hollanda
	1988	İş Emniyeti ve Çevre Semineri / İstanbul
	1989	Yönetim tekniği / Diyarbakır
	1990	İlk Yardım ve Koruyucu Araç Kullanımı /Diyarbakır
	1991	Pazarlık ve Sunma tekniği / Hollanda
	1996	Uluslar arası Kaynak Sempozyumu / İstanbul
	1998	Boru Hatlarının Kaynağı / İstanbul