

Sürdürülebilir Makine Mühendisliği

Uygulamalarında

İleri Malzemeler ve Üretim Teknolojileri



Editör
HASAN KOTEN



BİDGE Yayınları

**Sürdürülebilir Makine Mühendisliği Uygulamalarında İleri
Malzemeler ve Üretim Teknolojileri**

Editör: HASAN KOTEN

ISBN: 978-625-8567-42-7

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamalarında İleri Malzemeler ve Üretim Teknolojileri

Önsöz

Günümüzde mühendislik disiplinleri, hızla artan enerji ihtiyacı, doğal kaynakların sınırlılığı, çevresel etkilerin azaltılması ve yüksek performans beklentileri gibi çok boyutlu sorunlarla karşı karşıyadır. Bu bağlamda, sürdürülebilirlik kavramı mühendislik uygulamalarının merkezine yerleşmiş; ileri malzemeler ve modern üretim teknolojileri, bu dönüşümün en temel bileşenleri hâline gelmiştir. Malzeme bilimi, üretim yöntemleri ve sistem entegrasyonundaki yenilikler; daha hafif, daha dayanıklı, daha verimli ve çevreyle uyumlu mühendislik çözümlerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu kitap, Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamalarında İleri Malzemeler ve Üretim Teknolojileri başlığı altında; malzeme ve metalurji mühendisliği, otomotiv mühendisliği ve enerji sistemleri gibi farklı mühendislik alanlarında yürütülen güncel ve özgün çalışmaları bir araya getirmektedir. Kitapta; hassas döküm teknolojileri, yüzey işlem ve kaplama yöntemleri, katkılı imalat, biyobozunur ve biyomalzemeler, yeşil kimya yaklaşımları, enerji depolama sistemleri ve elektrikli araçlara yönelik modelleme çalışmaları gibi geniş bir yelpazede konular ele alınmaktadır. Sunulan bölümler, hem teorik altyapıyı hem de endüstriyel uygulamaya dönük yaklaşımları birlikte içermektedir. Bu eser, akademisyenler, lisansüstü öğrenciler, araştırmacılar ve sanayi profesyonelleri için güncel bir başvuru kaynağı olmayı hedeflemektedir. Kitabın, sürdürülebilir mühendislik alanında çalışan araştırmacılara yeni bakış açıları kazandıracağı, disiplinler arası iş birliklerini teşvik edeceği ve ileri malzemeler ile üretim teknolojilerinin geleceğine ışık tutacağı düşünülmektedir. Bu kapsamda emeği geçen tüm yazarlarımıza değerli katkılarından dolayı teşekkür eder, kitabın bilimsel ve teknolojik gelişmelere anlamlı bir katkı sunmasını temenni ederiz.

Prof. Dr. Hasan Köten
Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı
İstanbul Medeniyet Üniversitesi

İÇİNDEKİLER

BATARYA TEKNOLOJİLERİ VE KOMPOZİT BATARYA KUTULARI	1
<i>EMİR ERIŞCİ, SEVDA NUR TEBERDAR, YALÇIN BOZTOPRAK</i>	
HASSAS DÖKÜM TEKNOLOJİSİ: KAYBOLAN MUM YÖNTEMİ İLE ENDÜSTRİYEL ÜRETİM SÜREÇLERİ	19
<i>MÜCAHİT ABDULLAH SARI, SİNAN ÇOBANER</i>	
Epoksi Esaslı Kaplamalar	36
<i>İLYAS KARTAL, GAMZE BAYGELDİ</i>	
MAGNEZYUM METALİ VE YAPIŞTIRMA İLE BİRLEŞTİRME TEKNOLOJİSİ	68
<i>ÖZLEM YAVAŞ, GAMZE TERBAŞ, GÜVEN YARKADAŞ, HÜSEYİN ŞEVİK</i>	
PACKED-BED (DOLGU YATAK) SİSTEMLERİ İLE TERMAL ENERJİ DEPOLAMA: PRENSİPLER, MALZEMELER VE UYGULAMALAR	77
<i>SAVAŞ OZTÜRK</i>	
MAGNEZYUM METALİ VE KAYNAK TEKNOLOJİSİ	86
<i>GÜLŞAH GERMEN TUTAŞ, GÜVEN YARKADAŞ, HÜSEYİN ŞEVİK</i>	

BÖLÜM 1

BATARYA TEKNOLOJİLERİ ve KOMPOZİT BATARYA KUTULARI

EMİR ERİŞÇİ¹
SEVDA NUR TEBERDAR ERİŞÇİ²
YALÇIN BOZTOPRAK³

Giriş

Piller, taşınabilir elektroniklerden elektrikli araçlara kadar çok geniş bir modern teknoloji yelpazesi için vazgeçilmez hale gelmiştir. Enerji depolama çözümlerine yönelik talebin artmasıyla birlikte, verimli, hafif ve güvenli batarya kutularına (muhafazalarına) duyulan ihtiyaç daha da belirginleşmiştir. Kurşun-asit ve nikel-kadmiyum gibi geleneksel pil türleri, daha yüksek enerji yoğunluğu ve daha uzun çevrim ömrü gibi avantajlar sunan gelişmiş lityum-iyon pillerle büyük ölçüde yer değiştirmiştir. Pil yapısında mekanik dayanım gereksiniminin en yüksek olduğu bileşenlerden biri muhafaza olduğundan, geleneksel malzeme çözümlerinin yerine kullanılmak üzere yakın dönemde geliştirilen kompozit malzemeler gündeme gelmiştir. Birçok kompozit malzeme, polimer bir matris içinde genellikle karbon veya cam lifler içerir, böylece hafif fakat yüksek dayanımlı bir yapı oluşur (Linden vd., 2002).

Kompozit malzemelerin batarya muhafazalarında kullanılmasıyla çeşitli avantajlar beklenmektedir. İlk olarak, geleneksel metal muhafazalara kıyasla belirgin bir ağırlık azalması sağlayabilirler; bu durum özellikle otomotiv ve havacılık uygulamalarında önemlidir, çünkü ağırlık tasarrufu sistem verimliliği ve performansına doğrudan katkı sağlar. İkinci olarak, kompozitler üstün ısı yönetimi özellikleri gösterecek şekilde tasarlanabilir; bu da pillerin performansını ve güvenliğini sürdürmede kritik rol oynar (Pavlov, 2011). Ayrıca kompozitler korozyona karşı iyi direnç sergiler; bu özellik, dayanıklılığı artırarak pil sisteminin hizmet ömrü açısından olumlu sonuçlar doğurur (Ispas vd., 2016). Üretim karmaşıklığı, maliyet ve geri dönüşüm gibi zorluklar kompozitlerin pil tasarımına entegrasyonunda önemli engeller oluştursa da, bu malzemelerin potansiyelinin tam olarak değerlendirilmesi mümkündür.

Gelişmiş pil teknolojileri ile kompozit malzemelerin yakınsaması, daha verimli ve sürdürülebilir enerji depolama yaklaşımlarına doğru önemli bir adımı temsil etmektedir. Süregelen

¹ Marmara University, Institute of Pure and Applied Sciences, Metallurgical and Materials Engineering Department, 0000-0002-0181-3121

² Marmara University, Institute of Pure and Applied Sciences, Metallurgical and Materials Engineering Department, 0000-0002-6724-1912

³ (Assoc. Prof. Dr.), Marmara University, Faculty of Technology, Metallurgical and Materials Engineering Department, 0000-0003-1714-7394

yenilikler, kompozitlerin pillerin performansını ve güvenliğini artırmadaki rolünü güçlendirmekte ve bu alandaki gelişimi birçok yüksek teknoloji uygulamasında daha da hızlandırmaktadır.

Batarya Tipleri ve Uygulama Alanları

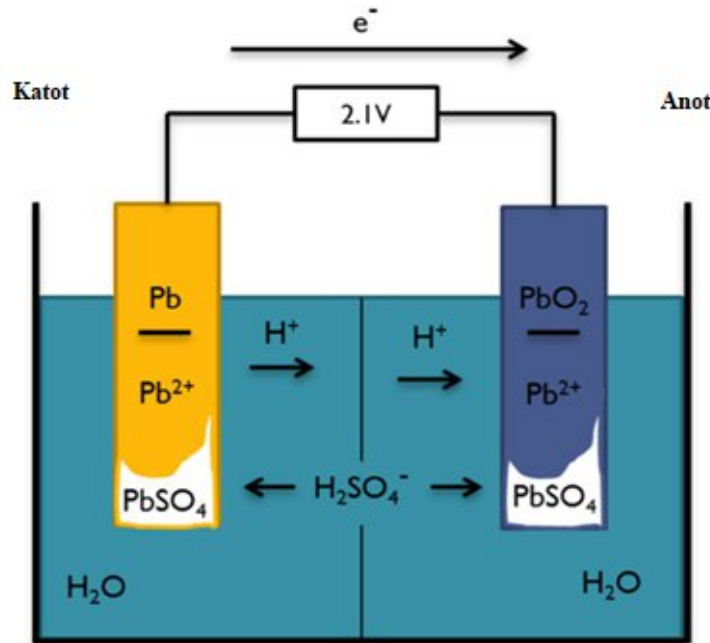
Piller, elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren enerji depolama cihazlarıdır. Özellikle otomotiv endüstrisi başta olmak üzere çok geniş bir uygulama alanında vazgeçilmez bileşenlerdir. Uygulamada farklı çalışma prensipleri ve özellikleri olan çeşitli pil türleri kullanılmakta; bu türler performans, maliyet ve güvenlik gibi kriterler açısından birbirinden ayrılmaktadır.

Kurşun-Asit Bataryalar

Kurşun-asit pillerde katot genellikle kurşun dioksitten (PbO_2), anot ise sünger kurşundan (Pb) oluşur; elektrolit olarak sülfürik asit (H_2SO_4) kullanılır. Deşarj sırasında kurşun dioksit ve sünger kurşun, sülfürik asitle tepkimeye girerek kurşun sülfat (PbSO_4) ve su (H_2O) oluşturur; bu süreçte elektrik enerjisi üretilir. Tepkimenin tersinir olması sayesinde şarj esnasında ürünler yeniden başlangıçtaki aktif malzemelere dönüşür.

Kurşun-asit piller, en eski ve en yaygın kullanılan pil sistemleri arasında yer alır. Otomotiv sektöründe özellikle marş, aydınlatma ve ateşleme (SLI) pilleri olarak geniş kullanım alanına sahiptir. Sağlam yapıları ve yüksek ani akım (surge current) sağlayabilmeleri, bu uygulamalar için onları uygun kılar. Ayrıca, motor çalışmıyorken geleneksel içten yanmalı motorlu (ICE) araçlarda elektriksel ihtiyaçları karşılamak için kullanılmaya devam ederler. Bazı hibrit elektrikli araç tasarımlarında ise yardımcı (ikincil/ancillary) güç kaynağı olarak görev yaparlar.

Şekil 1 Kurşun-asit pili kimyasal reaksiyonunun şematik gösterimi



Kaynak: (Huang vd., 2015)

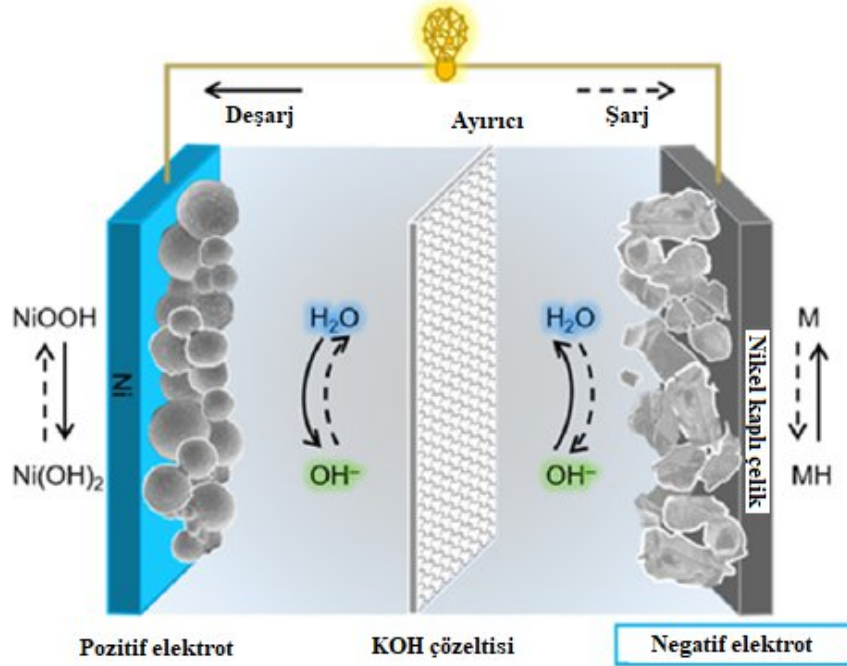
Nikel-Metal Hidrit (NiMH) Bataryalar

Nikel-metal hidrit (NiMH) piller, kurşun-asit pillere kıyasla daha yüksek özgül (gravimetrik) enerji yoğunluğu sundukları için özellikle son yıllarda önemli ölçüde ilgi görmüştür. NiMH pillerde katot genellikle nikel oksihidroksitten oluşurken, anot olarak hidrojen soğurma kapasitesine sahip bir

metal alaşım kullanılır. Elektrolit olarak ise çoğunlukla potasyum hidroksit tercih edilir (Ispas vd., 2016; Ozawa, 2009).

NiMH pillerin başlıca kullanım alanı elektrikli ve hibrit elektrikli araçlardır. Yüksek enerji yoğunlukları sayesinde daha küçük bir hacimde daha fazla enerji depolayabilirler. Ayrıca yüksek çevrim sayılarında enerji depolama kapasitesinin genellikle sınırlı düzeyde azalması nedeniyle HEV uygulamalarında da güvenilir bir seçenek olarak değerlendirilmektedir. NiMH teknolojisi, Toyota Prius ve Honda Insight gibi araçlarda kullanılmıştır.

şekil 2 Bir nikel-metal hidrit pilinin şematik gösterimi

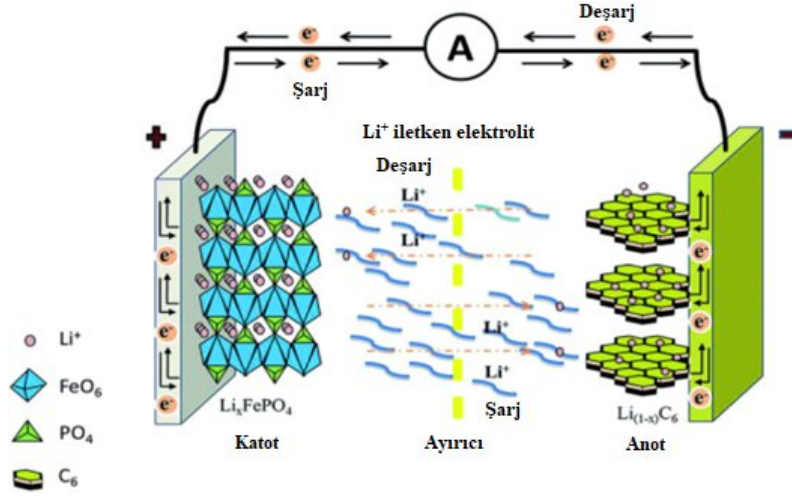


Kaynak: (Xu vd., 2023)

Lityum-İyon Bataryalar

Lityum-iyon piller, yüksek enerji yoğunluğu ve verimlilik sunmaları nedeniyle modern araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Hücre kimyasına bağlı olarak katot malzemesi lityum kobalt oksit (LiCoO_2) veya lityum demir fosfat (LiFePO_4) olabilir. Tipik bir LiFePO_4 tabanlı lityum-iyon hücrede katot LiFePO_4 , anot grafit, elektrolit ise organik bir üzücü içinde znmş bir lityum tuzundan oluşur. Deşarj sırasında lityum iyonları elektrolit üzerinden anottan katoda doğru hareket ederek elektrik enerjisi üretir; şarj sürecinde ise iyonların hareket yönü tersine döner (Nitta, vd., 2015; Goodenough, 2013). Bu stnlkleri sayesinde lityum-iyon piller, daha yüksek enerji yoğunluğu ve daha iyi verimlilik gerektiren şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlar (PHEV) ve tam elektrikli araçlar (BEV) için baskın seçenek haline gelmiştir.

Şekil 3 Lityum iyon pilin en küçük birim yapısı



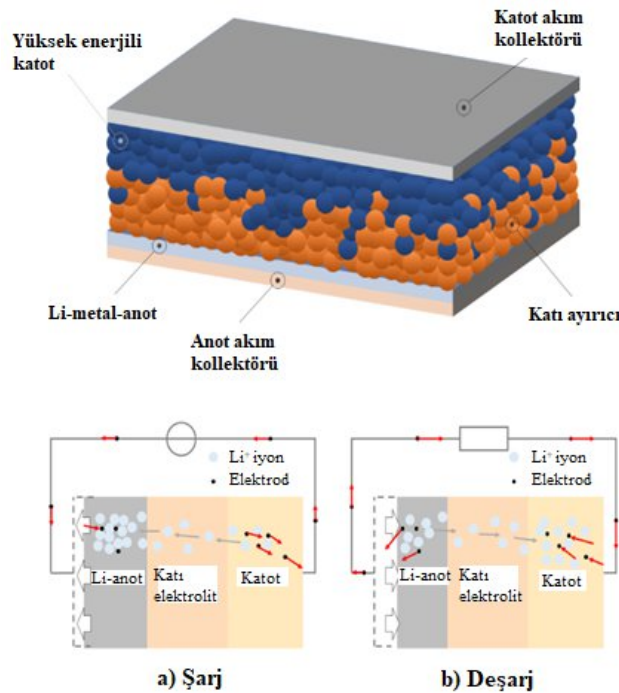
Kaynak: (Xu vd., 2023)

Katı Hal Bataryalar

Gelişmekte olan katı hal (solid-state) piller, sıvı elektrolit yerine polimer, oksit veya sülfür esaslı katı bir elektrolit kullanmaları sayesinde geleneksel lityum-iyon pillerin yerini alma potansiyeline sahiptir. Bu yaklaşım, birim ağırlık başına daha yüksek enerji depolama (daha yüksek enerji yoğunluğu), daha yüksek güvenlik ve geleneksel Li-iyon teknolojisine kıyasla daha uzun hizmet ömrü gibi avantajlar sunabilir (Banerjee vd., 2020; Manthiram vd., 2017).

Otomotiv sektöründe katı hal piller halen geliştirme aşamasındadır; ancak mevcut Li-iyon pillere kıyasla daha gelişmiş güvenlik özellikleri ve daha yüksek enerji yoğunluğu sağlamaları nedeniyle önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Henüz ticarileşme düzeyine ulaşmamış olsalar da, olgunlaştıklarında elektrikli araç pazarını daha uzun menzil ve daha hızlı şarj olanaklarıyla dönüştürmeleri beklenmektedir. Toyota ve BMW gibi büyük üreticiler, gelecekteki araçlarında katı hal pil kullanımına yönelik çalışmaları aktif biçimde sürdürmektedir.

Şekil 4 Katı hal pilinin genel yapısı ve şarj-deşarj süreci (a) Şarj, (b) Deşarj



Kaynak: (<https://futurebatterylib.com>, 2025)

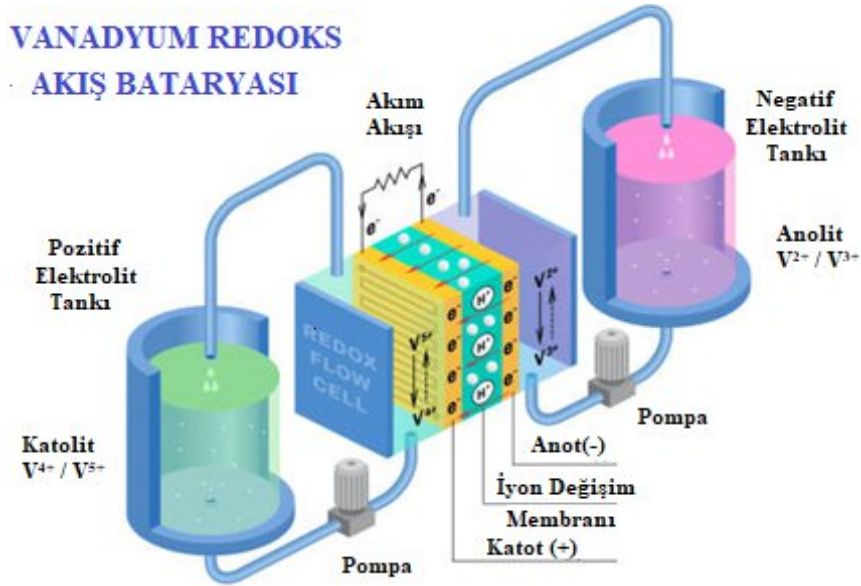
Akış Bataryaları

Akış pillerine verilebilecek en yaygın örneklerden biri vanadyum redoks akış pili (VRFB)'dir. Bu sistemde enerji, sıvı elektrolit içeren haricî tanklarda depolanır. Şarj ve deşarj sırasında sıvı elektrolitler bir hücre yığını (cell stack) içinden pompalanarak dolaştırılır ve elektrokimyasal dönüşüm bu aşamada gerçekleşir. Akış pilleri; uzun süreli enerji depolama sağlayabilmeleri ve büyük ölçekli uygulamalara uygun şekilde kolayca ölçeklenebilmeleri nedeniyle önemli avantajlar sunar.

Genel olarak her pil türü, kendine özgü elektrokimyasal çalışma prensibi ve malzeme bileşimiyle tanımlanır. Bu özellikler; enerji yoğunluğu, verim, dayanım (çevrim ömrü) ve güvenlik gibi performans göstergelerini doğrudan etkiler. Dolayısıyla pil teknolojileri farklı uygulamalarda özellikle otomotiv sektöründe farklı düzeylerde uygunluk ve performans sergiler.

Özellikle VRFB'ler henüz otomotivde (özellikle binek araçlarda) yaygın bir kullanım alanı bulmamış olsa da ağır hizmet ve ticari araçlar için potansiyel taşımaktadır. Uzun süreli deşarj kapasitesi ve büyük ölçekli enerji depolama yeteneği sayesinde sık şarj ihtiyacı olmadan daha uzun operasyon süreleri gerektiren elektrikli otobüs, kamyon ve benzeri ticari araçlarda değerlendirilebilir (Skyllas vd., 2016). Ayrıca akış pilleri ölçeklenebilir oldukları için elektrikli araç filolarında yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu (şarj altyapısı ve şebeke destek uygulamaları dahil) kolaylaştırabilecek fırsatlar sunmaktadır (Alotto vd., 2014).

Şekil 5 Bir akış pilinin şematik gösterimi



Kaynak: (www.globalsources.com, 2025)

Özetle farklı pil kimyaları farklı uygulama alanları için daha uygundur; dolayısıyla pil seçimi enerji yoğunluğu, ağırlık, maliyet, güvenlik ve kullanım ömrü gibi birçok faktöre bağlıdır. Kurşun-asit piller, özellikle marş-aydınlatma-ateşleme (SLI) amaçlarıyla geleneksel araçlarda halen yaygın biçimde kullanılmaktadır. Buna karşılık araçların hızla elektrifikasyona yönelmesiyle birlikte daha yüksek enerji yoğunluğu ve performans potansiyeli sunan lityum-iyon piller ve daha yeni bir seçenek olarak katı hal piller giderek daha fazla öne çıkmakta ve benimsenmektedir.

Bataryaların Karşılaştırması

Tablo 1'de farklı türdeki bataryaların sahip oldukları özelliklere göre karşılaştırması görülmektedir.

Tablo 1 Farklı türdeki bataryaların karşılaştırması

Batarya Türü	Özellikler	Kapasite (Wh/kg)	Malzemeler	Çevrim Ömrü	Enerji Yoğunluğu (Wh/L)	Maliyet (\$/kWh)	Uygulama Alanları
Kurşun-Asit Bataryalar	Yerleşik teknoloji, düşük maliyet, güvenilir	30–50	Kurşun dioksit (katot), sünger kurşun (anot), sülfürik asit (elektrolit)	500–800	60–100	100–150	Otomotiv marş sistemleri, kesintisiz güç kaynakları (UPS)
Nikel-Metal Hidrit (NiMH) Bataryalar	Orta düzey enerji yoğunluğu, iyi çevrim ömrü	60–120	Nikel oksit hidroksit (katot), metal hidrit (anot), potasyum hidroksit (elektrolit)	500–2000	140–300	250–400	Hibrit araçlar, taşınabilir elektronikler
Lityum-İyon Bataryalar	Yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü, hafif	150–250	Lityum kobalt oksit (katot), grafit (anot), lityum tuzları (elektrolit)	1000–3000	250–680	200–600	Elektrikli araçlar, tüketici elektroniği
Katı Hal Bataryaları	Yüksek güvenlik, yüksek enerji yoğunluğu, potansiyel olarak uzun ömür	200–300	Lityum metal (anot), katı elektrolit, lityum kobalt oksit (katot)	1000–5000	300–1000	400–800	Elektrikli araçlar, şebeke ölçekli enerji depolama
Akış Bataryaları	Ölçeklenebilir, büyük ölçekli depolama için uygun	20–40	Vanadyum pentoksit (katot ve anot), sülfürik asit (elektrolit)	5000+ çevrim	15–50	150–1000	Şebeke depolama, yenilenebilir enerji entegrasyonu

Metal Batarya Kutuları

Bataryaları mekanik yükler, sıcaklık değişimleri ve zorlu çevresel koşullara karşı korumak için uygun batarya kutularının (muhafazalarının) kullanılması gereklidir. Metal batarya kutuları, yüksek dayanım ve güçlü koruma sağlamaları nedeniyle halen en yaygın çözümler arasındadır. Ancak bu avantajlara rağmen, yüksek ağırlıkları araç performansını ve enerji verimliliğini olumsuz etkileyebilir.

Metal batarya kutuları, sahip oldukları avantajlı özellikler nedeniyle genellikle çelik ve alüminyumdan üretilir:

Çelik: Yüksek mekanik dayanımının yanı sıra çarpışma anındaki direnci sayesinde araç güvenliğine önemli katkı sağlar. Çoğu çelik malzeme yüksek tokluk/süneklik özellikleri gösterdiğinden bataryaların korunmasına ve çalışır durumda kalmasına yardımcı olur (Jannesar vd., 2024).

Alüminyum: Çelik kadar yüksek dayanım sunmasa da son derece hafiftir. Bu düşük ağırlık, batarya kutusunun kullanılacağı aracın toplam kütlesini belirgin biçimde azaltarak performansı artırır. Bu nedenle özellikle ağırlığın kritik olduğu havacılık ve otomotiv uygulamalarında tercih edilebilir (Işık vd., 2020).

Metal Batarya Kutularının Avantajları

Metal batarya kutuları çeşitli avantajlar sunar:

Mekanik özellikler: Metaller, polimer gibi alternatif malzemelere kıyasla daha yüksek dayanım ve rijitlik sağlar. Bu sayede bataryaların darbe gibi fiziksel etkiler altında zarar görmesi ve/veya yırtılıp delinmesi riski azalır; hücreler daha iyi korunur (Dyer, 1999).

EMI koruması: Metal muhafazalar, bataryayı çevredeki elektronik bileşenlerden ve dış kaynaklı elektromanyetik etkilerden koruyan etkin bir elektromanyetik girişim (EMI) kalkanı görevi görür. Bu durum, araçtaki elektronik sistemlerin güvenli çalışmasına ve dolaylı olarak araç güvenliğine katkı sağlar (Bernardes vd., 2004).

Termal yönetim: Metallerin yüksek ısı iletkenliği sayesinde, bataryanın çalışma sırasında ürettiği ısının iletilmesi ve dağıtılması kolaylaşır; böylece bataryanın termal dengesi/kararlılığı desteklenir (Shearing vd., 2012).

Metal Batarya Kutularında Ağırlık Sorunları

Metal batarya kutularının en büyük dezavantajı, araca ciddi miktarda ek ağırlık bindirmesidir. Örneğin çelik, yüksek yoğunluğu sayesinde güçlü bir koruma sağlasa da aracı belirgin biçimde ağırlaştırır, bu durum enerji tüketimini artırır, verimliliği düşürür ve yakıt tüketimini yükseltir, elektrikli araçlarda ise menzili azaltır (Miller, 2010). Alüminyum, çeliğe göre daha hafif olsa da kompozit malzemelere kıyasla hala daha ağırdır ve genellikle daha düşük dayanım sunar, bu nedenle EV performansını iyileştirmeye dönük tüm gereksinimleri tek başına karşılayamayabilir (Haruna vd., 2005).

Metal batarya kutularının ağırlığı, araç performansını birkaç temel açıdan etkiler.

Yakıt verimliliği: Batarya kutusunun araca eklediği ağırlık, daha fazla enerji ihtiyacı doğurarak yakıt tüketimini artırır (Hu vd., 2023).

Elektrikli araç menzili: EV’lerde araç ağırlığındaki artış, birim mesafe başına enerji tüketimini yükseltir. Dolayısıyla ağır bir batarya kutusu, tek şarjla kat edilen mesafeyi azaltır (Majid vd., 2024).

Ağırlık Sorununu Azaltma Yaklaşımları

Bu bağlamda metal batarya kutularında ağırlığı düşürmeye yönelik çeşitli yöntemler otomotiv sektöründe kullanılmaktadır:

Hafif alaşımlar ve yüksek dayanımlı metaller: Hafif ve yüksek dayanımlı alaşımların kullanımı, dayanımı zayıflatmadan batarya kutusunun ağırlığını azaltabilir. Malzeme bilimi, daha iyi dayanım/ağırlık oranı sunan alüminyum ve yüksek dayanımlı çelik alaşımlarının geliştirilmesini de hızlandırmıştır.

Yeniden tasarım (optimizasyon): Mühendislik tasarım iyileştirmeleri, standartları korurken daha az malzeme kullanmayı hedefler. Sonlu elemanlar analizi (FEA) ile güvenlikten ödün vermeden malzemenin azaltılabileceği bölgeler belirlenerek ağırlık düşürülebilir (Javaid, 2021).

İleri üretim yöntemleri: Hidroform ve eklemeli imalat, hafif ve yüksek derecede optimize edilmiş dayanım/rijitlik sağlayan yapılar üretmeye imkan vererek ağırlık azaltımına katkı sağlar (Both, 2011).

Kompozit Batarya Kutuları

Kompozit batarya kutuları, modern araçlarda batarya kutusu (muhafazası) tasarımı ve mühendisliği açısından önemli bir ilerlemeyi temsil eder. Bu geçiş yalnızca bir malzeme değişimi değil, hafif ve yüksek performanslı yapılar odağında otomotiv tasarımında daha geniş bir dönüşümün parçasıdır. Geleneksel metallere kıyasla kompozit malzemeler, üstün dayanım/ağırlık oranı sayesinde yüksek mekanik bütünlüğü korurken ciddi bir kütle azaltımı sağlayabilir. Ayrıca özelliklerinin tasarımıyla yönlendirilebilir olması, ısıl yönetim ve sürdürülebilirlik gibi alanlarda da ek avantajlar sunar. Otomotiv endüstrisindeki temsili uygulama örnekleri Şekil 6’da gösterilmektedir.

Şekil 6 Kompozit batarya kutusu örnekleri



Kaynak: (<https://www.sgcarbon.com>, 2025)

Kompozit batarya kutuları genellikle takviye elyaflarının (karbon, cam veya aramid gibi) bir polimer matris (epoksi, polyester ya da termoplastik reçineler gibi) içine gömülmesiyle oluşturulur. Bu elyaf-matris tasarımı, belirli yapısal ve işlevsel performans gereksinimlerine göre uyarlanabilen yüksek mekanik özelliklere sahip malzemeler ortaya çıkarır.

Kompozit batarya kutularında olması gereken özellikler şunlardır:

Hafiflik: Metallere kıyasla kompozitler belirgin biçimde daha hafiftir, bu sayede araç kütlesi önemli ölçüde azaltılabilir. Bu durum içten yanmalı araçlarda yakıt ekonomisini iyileştirirken elektrikli araçlarda menzilin artmasına katkı sağlar (Callister vd., 2014).

Yüksek rijitlik: Aynı ağırlık başına değerlendirildiğinde kompozitlerin çekme dayanımı ve rijitliği birçok metale göre daha yüksek olabilir. Bu da batarya hücrelerinin yapısal olarak desteklenmesine ve korunmasına yardımcı olur (Khan vd., 2024).

Kimyasal dayanım: Kompozitler, metaller gibi korozyona uğramaz, dolayısıyla özellikle zorlu çevresel koşullarda batarya kutusunun bütünlüğü ve hizmet ömrü daha iyi korunur (Rubino vd., 2020).

Isıl yönetim: Uygulamaya bağlı olarak kompozitler daha yüksek ısı iletkenliği veya daha iyi yalıtım sağlayacak şekilde tasarlanabilir. Bu da batarya paketinin daha etkin ısıl yönetimine katkı verir (Chen vd., 2024).

Endüstriyel Uygulamalar

Bu avantajlar nedeniyle bazı otomotiv üreticileri kompozit batarya kutularını gerçek uygulamalarda kullanmıştır.

BMW İ3: BMW İ3'te karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) esaslı kompozit bir batarya muhafazası kullanıldığı belirtilmektedir. Bu örnek, kompozitlerin hem ağırlık azaltımı hem de yüksek yapısal bütünlük sağlayabildiğini göstermesi açısından önemlidir (BMW, 2013).

Tesla Model S: Tesla'nın batarya kutularında ağırlık ve performansı optimize etmek amacıyla alüminyum ile kompozit bileşenleri birlikte kullanan karma malzemeli bir yaklaşım benimsediği ifade edilmektedir. Kompozitlerin belirli bölgelerde hedefli kullanımı, daha hafif ve daha verimli bir toplam tasarıma katkı sağlar (Tesla, 2020).

Chevrolet Volt: Chevrolet Volt'ta batarya kutusunda kompozit malzemelerden yararlanılarak ağırlığın azaltılması ve güvenliğin artırılması hedeflenmiştir. Bu yaklaşım, aracın elektrikli sürüş menzilini destekleyen unsurlardan biridir (General Motors, 2016).

Kompozit Batarya Kutularında Kullanılan Malzemeler

Kompozit batarya kutuları temelde **takviye elyafları** ile **polimer bir matrisin** birleştirilmesiyle üretilir. Malzeme seçimi; dayanım, ağırlık, ısıl davranış gibi kritik performans özelliklerini doğrudan etkiler.

Takviye Elyafları

Karbon elyaf: Karbon elyaf, çok yüksek dayanım ve rijitlik değerleriyle bilinir ve üstün mekanik performans gerektiren üst segment uygulamalar için idealdir. Karbon elyaf takviyeli polimerler (CFRP), otomotiv sektöründe özellikle maksimum ağırlık azaltımı ve yüksek yapısal performans hedeflenen alanlarda yaygın olarak kullanılır (Vijayan vd., 2023).

Cam elyaf: Cam elyaf, karbon elyafa göre daha düşük maliyetle iyi bir dayanım-tokluk dengesi ve darbe dayanımı sunar. Bu nedenle cam elyaf takviyeli polimerler (GFRP), maliyet etkinliğinin öncelikli olduğu uygulamalarda geniş kullanım alanına sahiptir (Rajak vd., 2021).

Aramid elyaf: Aramid elyaf, yüksek darbe dayanımı ve mukavemetiyle öne çıkar. Kevlar takviyeli polimerler; artırılmış dayanım ve koruyucu performans gerektiren uygulamalarda tercih edilir (Ursache vd., 2024).

Doğal elyaflar: Keten, kenevir ve jüt gibi yenilenebilir doğal elyaflar, çevresel avantajları ve uygun mekanik özellikleri nedeniyle giderek daha fazla kullanılmaktadır. Biyobazlı kökenleri, kompozit yapılarda sürdürülebilirliği artırmak için onları cazip bir seçenek haline getirir (Elfaleh vd., 2023).

Polimer Matrisler

Termoset reçineler: Epoksi, polyester ve vinil ester gibi termoset sistemler, kompozit üretiminde en yaygın kullanılan reçinelerdir. Yüksek kimyasal dayanım ve ısı kararlılıkla birlikte güçlü mekanik özellikler sunarlar. Kürlendikten sonra sertleşerek rijit bir matris oluşturur ve zorlu koşullarda şekil ve bütünlüğünü korur (Pascault vd., 2018).

Termoplastik reçineler: Polipropilen, polietilen ve poliamid esaslı termoplastikler, geri dönüştürülebilirlik ve daha kolay işlenebilirlik gibi önemli avantajlar sağlar. Yeniden eritilip şekillendirilebildikleri için bazı üretim süreçlerinde kolaylık sunar ve kullanım ömrü sonunda geri dönüşüm seçeneklerini güçlendirebilir (Oladele vd., 2023).

Kompozit Batarya Kutularının Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit batarya kutuları, otomotiv uygulamalarında onları cazip kılan birçok avantaj sunar. Bununla birlikte göz önünde bulundurulması gereken bazı sınırlılıkları da vardır. Bu bölüm, araçlarda batarya muhafazası için kompozit malzeme kullanımının başlıca avantajlarını ve dezavantajlarını özetlemektedir.

Kompozit Batarya Kutularının Avantajları

Ağırlık azaltımı: Kompozit batarya muhafazalarının en önemli avantajlarından biri düşük ağırlıklarıdır. Kompozitler, çelik ve alüminyum gibi geleneksel metallere kıyasla genellikle daha yüksek özgül (dayanım/ağırlık) mekanik özellikler sunar. Bu ağırlık tasarrufu, yakıt ekonomisini ve sürüş dinamiklerini iyileştirebilir; elektrikli araçlarda ise menzili artırabilir (Li vd., 2024).

Yüksek dayanım ve dayanıklılık: Kompozit yapılar, batarya hücrelerini taşıma ve koruma açısından kritik olan yüksek dayanım ve rijitlik sağlayacak şekilde tasarlanabilir. Karbon veya aramid gibi elyaflar, çekme dayanımını ve darbe dayanımını artırarak batarya kutusunun güvenlik seviyesini yükseltir (Mallick, 2007).

Korozyon direnci: Kompozitler, birçok metalin aksine doğası gereği korozyona dayanıklıdır. Bu özellik özellikle nem ve kimyasal maruziyetin olduğu ortamlarda batarya kutusunun hizmet ömrünü uzatabilir ve bakım ihtiyacını azaltabilir (Mazumdar, 2001).

Tasarım esnekliği: Kompozitler, metallere göre daha fazla tasarım serbestliği sağlar. Karmaşık geometriler, entegre fonksiyonlar ve verimli birleştirme çözümleri mümkün olur. Bu esneklik, hafif ve yapısal olarak optimize edilmiş tasarımları desteklerken araç içi yerleşimde (paketleme verimliliğinde) de iyileşme sağlayabilir (Fan vd., 2024).

Isıl yönetim potansiyeli: Formülasyon ve mimariye bağlı olarak kompozitler, ısı yayılımı için daha yüksek ısıl iletkenliğe veya yalıtım için daha düşük ısıl iletkenliğe göre ayarlanabilir. Bu özellik, batarya sıcaklığını güvenli çalışma aralığında tutmaya, aşırı ısınma riskini azaltmaya ve daha dengeli şarj-deşarj davranışını desteklemeye katkı sağlar (Kumar vd., 2024).

Enerji sönümlenme/soğurma: Birçok kompozit, çarpışma anında enerjiyi sönümlenme açısından güçlü performans gösterir. Yüksek darbe dayanımı, enerjinin dağıtılıp sönümlenmesine yardımcı olarak hücre hasarı olasılığını azaltabilir (Jacob vd., 2002).

Kompozit Batarya Kutularının Dezavantajları

Üretim karmaşıklığı: Kompozit batarya kutuları çoğu zaman çok aşamalı, teknik açıdan zorlayıcı süreçler ve özel ekipman/uzmanlık gerektirir. RTM, filament sarım ve otomatik elyaf yerleştirme (AFP) gibi yöntemler çevrim süresini ve üretim maliyetini artırabilir (Maiti, vd., 2022).

Geri dönüşüm zorlukları: Kompozitlerin geri dönüşümü, metallerle karşılaştırıldığında daha zordur, çünkü elyaf-reçine yapısı heterojendir. Etkin, verimli ve ölçeklenebilir geri dönüşüm yöntemlerinin geliştirilmesi, çevresel ve endüstriyel açıdan önemli bir sorun alanıdır (Pickering, 2006).

Onarım ve bakım: Kompozit yapılar, metallere kıyasla daha zor onarılabılır. Bazı hasar türleri özel onarım prosedürleri ve malzemeleri gerektirdiğinden bakım süreçleri karmaşılaşabilir ve maliyet artabilir. Bazı durumlarda onarım yerine parçanın tamamen değiştirilmesi ekonomik olarak daha avantajlı olabilir (Falzon, 2009).

Sınırlı ısıl iletkenlik: Bazı kompozitler ısıl yönetim için özel olarak tasarlanırsa da birçok polimer matrisli kompozitin ısıl iletkenliği metallere göre daha düşüktür. Bu durum, batarya hücrelerinden ısının uzaklaştırılmasında sınırlayıcı olabilir ve ek ısıl kontrol çözümlerini gerekli kılabilir (Singh vd., 2024).

Genel olarak kompozit batarya kutuları; ağırlık azaltımı, yüksek mekanik performans ve korozyon direnci gibi önemli kazanımların yanı sıra ciddi bir tasarım esnekliği sunar. Buna karşılık üretim karmaşıklığı, geri dönüştürülebilirlik ve onarım gibi konulardaki güçlüklerin yönetilmesi gerekir. Otomotiv endüstrisinde kompozit batarya kutularının etkin ve ölçeklenebilir biçimde uygulanabilmesi, bu avantaj-dezavantaj dengelerinin doğru kurulmasına bağlıdır.

Kompozit Batarya Kutularında Isıl Yönetim

Güvenilir ısıl yönetim, elektrikli araçlardaki (EV) batarya paketlerinin verimliliği, güvenliği ve dayanıklılığı açısından kritik öneme sahiptir. Kompozit batarya kutuları, malzeme özellikleri ve tasarım esnekliğinden yararlanarak ısıl zorlukların yönetilmesinde önemli bir rol oynayabilir. Bu bölüm, kompozit batarya kutularında ısıl yönetime ilişkin temel ilkeleri, yaklaşımları ve malzeme değerlendirmelerini ele almaktadır.

Isıl yönetimin temel amacı, batarya hücrelerinin sıcaklığını çalışma boyunca optimum bir aralıkta tutmaktır. Aşırı ısınma veya aşırı düşük sıcaklıklar, batarya performansını olumsuz etkileyebilir, hizmet ömrünü kısaltabilir ve bataryanın kontrolsüz biçimde ısınarak tehlikeli bir duruma sürüklendiği termal kaçak riskini artırabilir. Bu nedenle sıcaklığın güvenli ve kararlı sınırlar içinde korunması; sistemin genel güvenliği, verimliliği ve güvenilirliği için gereklidir.

Isıl Yönetim Teknikleri

Kompozit batarya kutularının ısıl yönetim performansını artırmak için çeşitli teknikler kullanılmaktadır.

Pasif Soğutma

Pasif soğutma, harici bir güç kaynağı kullanmadan ısının doğal yollarla uzaklaştırılmasına dayanır. Yaygın yöntemler şunlardır:

Isı alıcılar ve ısıl iletim yolları: Kompozit yapı içine ısı alıcıların veya özel ısıl iletim yollarının entegre edilmesi, ısının batarya hücrelerinden uzaklaştırılmasına yardımcı olur. Isı yayılımını ve uzaklaştırmayı artırmak için seçilmiş metaller veya seramik dolgular gibi daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip malzemeler kompozit matris içine katılabilir (Baig vd., 2021).

Faz değiştiren malzemeler (PCM'ler): PCM'ler (örneğin katıdan sıvıya geçiş) faz değiştirirken ısıl enerjiyi depolar ve daha sonra geri verir. Batarya kutusu içine veya çevresine PCM yerleştirilmesi, yüksek yük anlarında fazla ısının emilmesini ve sıcaklık düştüğünde ısının kademeli olarak geri salınmasını sağlayarak hücre sıcaklığını daha kararlı hale getirir (Sharma vd., 2009).

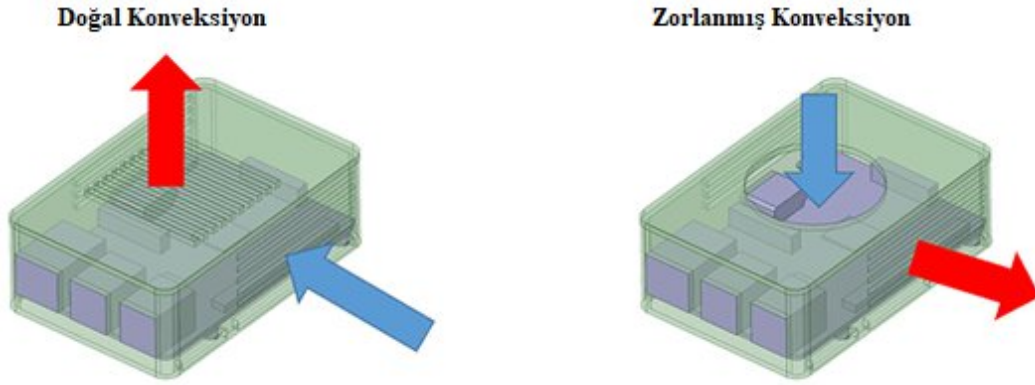
Aktif Soğutma

Aktif soğutma, sıcaklığı daha hassas ve hızlı biçimde kontrol edebilmek için harici sistemlerden yararlanır:

Sıvı soğutma: Kompozit batarya kutusu tasarımına entegre edilen kanallar veya borular aracılığıyla uygulanabilir. Soğutucu akışkan, batarya hücrelerinden ısıyı alır ve bir ısı değiştiriciye taşıyarak ortamdaki ısıyı uzaklaştırır. Böylece sıcaklık optimum aralıkta tutulur. Oldukça etkili olmakla birlikte sistemin karmaşıklığını artırır ve ek kütle getirebilir (Wang vd., 2014).

Hava soğutma: Fan veya üfleyicilerle batarya kutusu yüzeyi üzerinden zorlanmış hava akışı sağlanarak konvektif ısı transferi artırılır. Hava soğutma sistemleri genellikle sıvı soğutmaya göre daha basit ve daha hafiftir. Ancak yüksek yük veya yüksek sıcaklık koşullarında genellikle daha düşük etkinlik gösterir (Roe vd., 2022).

Şekil 7 Batarya soğutma sistemleri [63]



Kaynak: (<https://medium.com>, 2025)

Hibrit Sistemler

Pasif ve aktif soğutma yaklaşımları, güvenilir bir ısı kontrol sağlamak için tamamlayıcı biçimde birlikte kullanılabilir. Örneğin bir batarya kutusunda pasif soğutma için ısı alıcılar ve faz değiştiren malzemeler (PCM) yer alırken, batarya yüksek yük altında çalıştığında ek ısı uzaklaştırma amacıyla sıvı veya hava soğutma sistemleri devreye alınabilir (Behi vd., 2021).

Isıl Yönetim Amaçlı Kullanılabilecek Malzemeleri

Malzeme bilimi alanındaki ilerlemeler, ısı yönetim performansı artırılmış kompozit sistemlerin geliştirilmesine imkan vermiştir.

Isıl iletken dolgular: Polimer matrisin ısı iletkenliğini artırmanın etkili yollarından biri; grafit, grafen ve metalik parçacıklar gibi ısı iletken malzemelerin kompozit yapıya dahil edilmesidir. Bu malzemeler, kompozit içinde ısıyı iletmesini kolaylaştıran “ısı iletim yolları” oluşturarak daha etkin ısı transferi sağlar (Chen vd., 2016).

Hibrit kompozitler: Farklı elyaf ve reçine kombinasyonları kullanılarak malzemenin ısı özellikleri optimize edilirken mekanik performans da korunabilir. Örneğin dayanım için karbon elyafın, ısı yayılımı/uzaklaştırma için ise ısı iletken bileşenlerin birlikte kullanılması, hem yapısal bütünlüğü hem de ısı işlevselliği dengeleyen bir kompozit geliştirilmesine olanak tanır (Rashid vd., 2024).

Isıl Yönetim Çözümleri

Geleceğin kompozit batarya kutularında, mevcut çözümlere kıyasla daha kompakt ve daha yüksek verimli entegre Isıl Yönetim Sistemlerinin (TMS) yer alması beklenmektedir. Bu sistemlerin, ısı değiştiriciler ve faz değişim malzemeleri (PCM) gibi pasif ve aktif soğutma tekniklerini birlikte kullanarak, en zorlu iklim koşullarında dahi batarya sıcaklığını güvenli aralıklarda tutması hedeflenmektedir. Bu tür entegre çözümler, güvenlik, performans ve batarya ömrü açısından kritik rol oynayacaktır (Al-Hallaj vd., 2002).

Isıl Arayüz Malzemeleri: Isıl arayüz malzemelerinde (Thermal Interface Materials, TIM) beklenen yeni gelişmelerin, kompozit batarya kutularında ısı transferini belirgin biçimde iyileştirmesi öngörülmektedir. Yüksek ısıl iletkenliğe ve aynı zamanda esnek/uyumlu (kompliant) yapıya sahip TIM'ler, kritik temas yüzeylerindeki ısıl direnci azaltarak ısı yayılımını artırır. Uygun biçimde kompozit yapıya entegre edildiklerinde, batarya kutusu sistemlerinin ısıl kararlılığı ve soğutma etkinliği önemli ölçüde iyileştirilebilir (Kim vd., 2007).

Tasarım Hususları: Kompozit batarya kutularında ısıl yönetim performansında tasarım, belirleyici bir rol oynar.

Geometri ve yüzey alanı: Isının dış ortama atılabildiği yüzey alanının artırılması, soğutma etkinliğini yükseltir. Kanatçıklar, kaburgalar, çıkıntılar/oluklar veya benzeri yüzey modifikasyonları hava akışını destekleyerek konvektif ısı transferini güçlendirebilir (Chawla, 2012).

Isıl yönetim sistemlerinin entegrasyonu: Kompozit batarya kutusu; soğutma kanalları, gömülü borulama veya ısı eşanjörleri gibi ısıl kontrol bileşenlerini barındıracak şekilde tasarlanmalıdır. Bu entegrasyon, sıcaklığın etkili ve kararlı biçimde düzenlenmesi için kritik önemdedir (Hwang vd., 2024).

Yeni Nesil Araç Teknolojilerindeki Uygulamalar

Elektrikli ve Hibrit Araçlar

Elektrikli ve hibrit araçların üretimi ve pazardaki yaygınlığı arttıkça, verimli, güvenilir ve emniyetli batarya sistemlerine duyulan ihtiyaç da hızla büyümektedir. Bu bağlamda kompozit batarya kutularının, söz konusu araçların hem performansını hem de güvenliğini artırmada kritik bir rol üstlenmesi beklenmektedir. Gelecekteki tasarım eğilimlerinin; tahrik (çekiş) bataryalarında enerji yoğunluğunun daha da artırılmasına, toplam muhafaza kütlesinin azaltılmasına ve ısıl performansın iyileştirilmesine odaklanacağı öngörülmektedir. Bu iyileştirmeler, elektrikli araçlarda menzil artışı ve hizmet ömrünün uzatılmasına doğrudan katkı sağlayabilir (Pesaran, 2002).

Otonom Araçlar

Otonom araçlar; sensörleri, hesaplama birimlerini, haberleşme modüllerini ve yedekli kontrol mimarilerini beslemek için yüksek kapasiteli elektriksel sistemlere ihtiyaç duyar. Kompozit batarya kutuları, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve yapısal dayanım sağlayarak bu gereksinimleri destekleyebilir; aynı zamanda ek elektronik bileşenlerin getirdiği kütle artışını sınırlamaya yardımcı olur. Ayrıca kompozitlerin tasarım esnekliği, gömülü sensörler veya optimize ısıl iletim yolları gibi çok işlevli özelliklerin batarya kutusu yapısına entegre edilmesini kolaylaştırarak uzun ömürlü otonom araç platformlarının geliştirilmesine katkı sunabilir (Grujicic, 2008).

Havacılık ve Denizcilik

Kompozit batarya kutuları otomotiv dışında havacılık ve denizcilik sektörlerinde de giderek daha fazla ilgi görmektedir. Havacılıkta ağırlığın azaltılması kritik öneme sahiptir; çünkü bu durum yakıt tüketimini düşürerek taşıma kapasitesini (payload) artırabilir. Denizcilik uygulamalarında ise kompozit muhafazalar; yüksek mekanik dayanım ve doğal korozyon direnci sayesinde, nem ve tuzluluk gibi zorlu çevresel koşullara uzun süreli maruziyetin söz konusu olduğu ortamlarda avantaj sağlayabilir (Hull, 1996).

Sonuçlar ve Öneriler

Sonuç olarak, kompozit batarya kutuları batarya muhafaza teknolojilerinde önemli bir sıçrama niteliği taşımakta ve geleneksel malzemelere kıyasla belirgin üstünlükler sunmaktadır. Kompozitlerin batarya kutusu tasarımlarına entegre edilmesi; yüksek mekanik dayanım ile önemli ölçüde ağırlık azaltımını bir araya getirerek performansı artırmakta, ayrıca ısı kararlılık ile kimyasal direnci iyileştirmektedir. Batarya teknolojileri geliştikçe, bataryaları koruyan ve destekleyen muhafaza sistemlerinin de güvenlik, güvenilirlik ve uzun dönem dayanım gerekliliklerini karşılayacak biçimde eş zamanlı olarak ilerlemesi zorunludur.

Farklı batarya türlerine yönelik değerlendirme, batarya kutularına ilişkin gereksinimlerin uygulamaya bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini ortaya koymaktadır. Bu çeşitlilik, her kullanım alanına özgü çözümleri gerekli kılmaktadır. Kompozitler ise dayanıklılık, hafiflik ve yüksek tasarım esnekliği gibi karakteristik avantajları sayesinde bu ihtiyaca özellikle uygundur. Bu özellikler, kompozitleri yeni nesil batarya muhafaza sistemleri için öne çıkan bir aday haline getirmektedir.

Geleceğe bakıldığında kompozit batarya kutularının gelişim görünümü oldukça umut vericidir. Özellikle nanoteknoloji ve akıllı malzeme entegrasyonu tarafından yönlendirilen kompozit mühendisliğindeki ilerlemelerin; daha verimli, çok işlevli ve farklı koşullara uyarlanabilir muhafaza tasarımlarını mümkün kılması beklenmektedir. Buna paralel olarak, elektrikli mobilite ve yenilenebilir enerji depolama sistemlerinden kaynaklanan artan talep, hem araştırma faaliyetlerini hem de endüstriyel benimsemeyi hızlandıracaktır.

Bununla birlikte, kompozit batarya kutularının potansiyelinden tam anlamıyla yararlanılabilmesi için başta maliyet, üretim süreçlerinin ölçeklenebilirliği ve ömür sonu geri dönüştürülebilirlik olmak üzere bazı kritik zorlukların çözülmesi gerekmektedir. Bu engellerin aşılmasında disiplinler arası iş birliklerinin sürdürülmesi, araştırma yatırımlarının devamı ve üretim/işleme süreçlerinde yenilikçi yaklaşımların geliştirilmesi belirleyici olacaktır. Böylece kompozit batarya muhafazalarının yeni nesil uygulamalarda yaygın biçimde devreye alınmasının önü açılacaktır.

Kaynaklar

A Closer Look at Fanless Switch, <https://medium.com/@cloris326192312/a-closer-look-at-fanless-switch-f0d26a93c717>, Erişim Tarihi: 14 Ekim 2025

Al-Hallaj, S., & Selman, J. R. (2002). Thermal modeling of secondary lithium batteries for electric vehicle/hybrid electric vehicle applications. *Journal of Power Sources*, 110(2), 341-348.

Alotto, P., Guarnieri, M., & Moro, F. (2014). Redox flow batteries for the storage of renewable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 325-335.

- Baig, M. M. A., Hassan, S. F., Saheb, N., & Patel, F. (2021). Metal Matrix Composite in Heat Sink Application: Reinforcement, Processing, and Properties. *Materials*, 14(21), 6257.
- Banerjee, A., et al. (2020). Interfaces and Interphases in All-Solid-State Batteries with Inorganic Solid Electrolytes. *Chemical Reviews*, 120(14), 6878-6933.
- Behi, H., Karimi, D., Youssef, R., Suresh Patil, M., Van Mierlo, J., & Berecibar, M. (2021). Comprehensive Passive Thermal Management Systems for Electric Vehicles. *Energies*, 14(13), 3881.
- Bernardes, A. M., Espinosa, D. C. R., & Tenório, J. A. S. (2004). Recycling of batteries: a review of current processes and technologies. *Journal of Power Sources*, 130(1-2), 291-298.
- BMW (2013). BMW i3: Carbon Fiber Reinforced Plastic. Retrieved from BMW Group Press.
- Both, J., Brüggemann, T., Dosch, S., Elser, J., Kronthaler, M., Morasch, A., Otter, M., Pietzka, D., Selvaggio, A., Weddeling, C., Wehrle, E., Wirth, F., Baier, H., Biermann, D., Brosius, A., Fleischer, J., Lanza, G., Schulze, V., Tekkaya, A., & Zäh, M. (2011). Advanced manufacturing and design techniques for lightweight structures. *International Aluminium Journal*, 87, 60-64.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (9th ed.). Wiley.
- Chawla, K. K. (2012). *Composite Materials: Science and Engineering* (3rd ed.). Springer.
- Chen, C., Wang, Q., Xue, L., & Ling, Z. (2016). A review on the thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Energies*, 9(11), 1937.
- Chen, Q., Yang, K., Feng, Y., Liang, L., Chi, M., Zhang, Z., & Chen, X. (2024). Recent advances in thermal-conductive insulating polymer composites with various fillers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 178, 107998.
- Dyer, C. K. (1999). *Battery Technology Handbook*. CRC Press.
- Elfaleh, I., Abbassi, F., Habibi, M., Ahmad, F., Guedri, M., Nasri, M., & Garnier, C. (2023). A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials. *Results in Engineering*, 19, 101271.
- Falzon, B. G. (2009). Impact damage and repair of composite structures. *Aeronautical Journal*, 113(1134), 431-445.
- Fan, Q., Duan, H., & Xing, X. (2024). A review of composite materials for enhancing support, flexibility and strength in exercise. *Alexandria Engineering Journal*, 94, 90-103.
- Future BatteryLab, Solid state batteries at a glance, <https://futurebatterylib.com/solid-state-batteries-at-a-glance/>, Erişim Tarihi: 10 Eylül 2025
- General Motors, (2016). Chevrolet Volt: Engineering and Performance. Retrieved from GM Media.
- Global Sources, Flow Batteries: Safety, Cycle Life Advantages, <https://www.globalsources.com>, Erişim Tarihi: 11 Eylül 2025
- Goodenough, J. B., & Park, K. S. (2013). The Li-ion rechargeable battery: a perspective. *Journal of the American Chemical Society*, 135(4), 1167-1176.
- Grujicic, M., Sellappan, V., Omar, M. A., Seyr, N., Obieglo, A., Erdmann, M., & Holzleitner, J. (2008). An overview of the aerospace applications of polymer-matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 199 (1-3), 248-268.

- Haruna, T., & Yamamoto, M. (2005). Lightweight aluminum battery tray for hybrid vehicles. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 14(2), 239-244.
- Hu, H., Yuan, W.-W., Su, M., & Ou, K. (2023). Optimizing fuel economy and durability of hybrid fuel cell electric vehicles using deep reinforcement learning-based energy management systems. *Energy Conversion and Management*, 291, 116543.
- Huang, P.-H., Kuo, J.-K., & Huang, C.-Y. (2015). A new application of the UltraBattery to hybrid fuel cell vehicles. *International Journal of Energy Research*, 40
- Hull, D., & Clyne, T. W. (1996). *An Introduction to Composite Materials* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Hwang, F. S., Confrey, T., Reidy, C., Picovici, D., Callaghan, D., Culliton, D., & Nolan, C. (2024). Review of battery thermal management systems in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192, 114171.
- Ispas, A., Barz, C., & Coman, P. (2016). Nickel-metal hydride batteries: A new competitor for lithium-ion batteries? *Journal of Power Sources*, 327, 474-480.
- Işık, Y., Tekin, B., Yılmaz, A. F., Tatoglu, F., & Ozturk, D. (2020). Weight optimization of aluminum alloys used in vehicles. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering*, 7(11), 13-21.
- Jacob, G., Fellers, J., Simunovic, S., & Starbuck, J. (2002). Energy absorption in polymer composites for automotive crashworthiness. *Journal of Composite Materials*, 36(7), 813-850.
- Jannesar Niri, A., Poelzer, G. A., Zhang, S. E., Rosenkranz, J., Pettersson, M., & Ghorbani, Y. (2024). Sustainability challenges throughout the electric vehicle battery value chain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191, 114176.
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Suman, R., & Rab, S. (2021). Role of additive manufacturing applications towards environmental sustainability. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4(4), 312-322.
- Khan, F., Hossain, N., Mim, J. J., Rahman, S. M., Iqbal, M. J., Billah, M., & Chowdhury, M. A. (2024). Advances of composite materials in automobile applications – A review. *Journal of Engineering Research*.
- Kim, G. H., Pesaran, A., & Spotnitz, R. (2007). A three-dimensional thermal abuse model for lithium-ion cells. *Journal of Power Sources*, 170(2), 476-489.
- Kumar, S. S., & Rao, G. A. P. (2024). Recent progress on battery thermal management with composite phase change materials. *Energy Storage*, 6(4), 647.
- Li, X., Zhang, Y., Liao, Y., & Yu, G. (2024). Environmental impact assessment of battery boxes based on lightweight material substitution. *Scientific Reports*, 14(1), 2594.
- Linden, D., & Reddy, T. B. (2002). *Handbook of Batteries* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Maiti, S., Islam, M. R., Uddin, M. A., Afroj, S., Eichhorn, S. J., & Karim, N. (2022). Sustainable fiber-reinforced composites: A review. *Advanced Sustainable Systems*, 6, 2200258.
- Majid, M. A., Kumar J, C. R., & Ahmed, A. (2024). Advances in electric vehicles for a self-reliant energy ecosystem and powering a sustainable future in India. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 10, 100753.
- Mallick, P. K. (2007). *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design* (3rd ed.). CRC Press.

- Manthiram, A., Yu, X., & Wang, S. (2017). Lithium battery chemistries enabled by solid-state electrolytes. *Nature Reviews Materials*, 2, 16103.
- Mazumdar, S. K. (2001). *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*. CRC Press.
- Miller, J. M. (2010). *Propulsion Systems for Hybrid Vehicles*. IET.
- Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., & Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today*, 18(5), 252-264.
- Oladele, I. O., Okoro, C. J., Taiwo, A. S., Onuh, L. N., Agbeboh, N. I., Balogun, O. P., Olubambi, P. A., & Lephuthing, S. S. (2023). Modern Trends in Recycling Waste Thermoplastics and Their Prospective Applications: A Review. *Journal of Composites Science*, 7(5), 198.
- Ozawa, K. (2009). *Lithium-Ion Rechargeable Batteries*. Wiley-VCH.
- Pascault, J.-P., & Williams, R. J. J. (2018). Overview of thermosets: Present and future. In *Comprehensive Composite Materials II* (pp. 1-22). Elsevier.
- Pavlov, D. (2011). *Lead-Acid Batteries: Science and Technology*. Elsevier.
- Pesaran, A. A. (2002). Battery thermal management in EVs and HEVs: Issues and solutions. *Battery Man*, 44(5), 34-49.
- Pickering, S. J. (2006). Recycling of composite materials. In: *Advanced Composite Materials*, 15(4), 321-331
- Qiuju Xu , Na Wang , Tuo Xin , Xiangcheng Yuan , Yiqing Li , Qi Zhang , Jinzhang Liu (2023), A high-voltage and high-capacity aqueous rechargeable Zn-organic battery using ion-selective membranes, *Journal of Power Sources*, (50) 0378-7753
- Rajak, D. K., Wagh, P. H., & Linul, E. (2021). Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A Review. *Polymers*, 13(21), 3721.
- Rashid, A. B., Haque, M., Islam, S. M. M., & Uddin Labib, K. M. R. (2024). Nanotechnology-enhanced fiber-reinforced polymer composites: Recent advancements on processing techniques and applications. *Heliyon*, 10(2), e24692
- Roe, C., Feng, X., White, G., Li, R., Wang, H., Rui, X., Li, C., Zhang, F., Null, V., Parkes, M., Patel, Y., Wang, Y., Wang, H., Ouyang, M., Offer, G., & Wu, B. (2022). Immersion cooling for lithium-ion batteries – A review. *Journal of Power Sources*, 525, 231094.
- Rubino, F., Nisticò, A., Tucci, F., & Carlone, P. (2020). Marine Application of Fiber Reinforced Composites: A Review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), 26
- SGL Carbon, <https://www.sglcarbon.com>, Erişim Tarihi: 21 Ekim 2025
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318-345.
- Shearing, P. R., et al. (2012). A Review of Current and Future Battery Designs. *Journal of Energy Storage*, 5, 165-174.
- Singh, R., Dogra, S., Dixit, S., Vatin, N. I., Bhardwaj, R., Sundramoorthy, A. K., Perera, H. C. S., Patole, S. P., Mishra, R. K., & Arya, S. (2024). Advancements in thermoelectric materials for efficient waste heat recovery and renewable energy generation. *Hybrid Advances*, 5, 100176.

- Skyllas-Kazacos, M., et al. (2016). Progress in Flow Battery Research and Development. *Journal of the Electrochemical Society*, 163(1), A5014-A5022.
- Tesla, (2020). Tesla Model S: Lightweight Design. Retrieved from Tesla Official Website.
- Ursache, Ş., Cerbu, C., & Hadăr, A. (2024). Characteristics of Carbon and Kevlar Fibres, Their Composites and Structural Applications in Civil Engineering—A Review. *Polymers*, 16(1), 127.
- Wang, T., Tseng, K. J., & Zhao, J. (2014). Development of efficient air-cooling strategies for lithium-ion battery module based on empirical heat source model. *Applied Thermal Engineering*, 78, 399-408.
- Vijayan, D. S., Sivasuriyan, A., Devarajan, P., Stefańska, A., Wodzyński, Ł., & Koda, E. (2023). Carbon Fibre-Reinforced Polymer (CFRP) Composites in Civil Engineering Application—A Comprehensive Review. *Buildings*, 13(6), 1509.

BÖLÜM 2

HASSAS DÖKÜM TEKNOLOJİSİ: KAYBOLAN MUM YÖNTEMİ İLE ENDÜSTRİYEL ÜRETİM SÜREÇLERİ

1. MÜCAHİT ABDULLAH SARI¹

2. SİNAN ÇOBANER²

¹ Araştırma Görevlisi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Orcid: 0000-0003-4855-4195

² Araştırma Görevlisi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, Orcid: 0009-0000-6821-4265

Giriş

Hassas döküm teknolojisi, karmaşık geometrilere sahip metal parçaların yüksek boyutsal doğruluk ve mükemmel yüzey kalitesiyle üretilmesini sağlayan, kökleri antik çağlara dayanan ancak modern mühendisliğin en sofistike yöntemlerinden biri haline gelmiş bir imalat sürecidir. Bu yöntem, düşük erime sıcaklığına sahip bir modelin (genellikle teknik balmumu) seramik bir bulamaç ile kaplanarak bir kalıp oluşturulması ve ardından modelin ergitilerek uzaklaştırılması prensibine dayanmaktadır. "Kaybolan mum" veya "investment casting" olarak da adlandırılan bu süreç, kalıpta ayırma yüzeyi bulundurmaması sayesinde döküm sonrası talaşlı imalat ihtiyacını %90 oranında azaltarak operasyonel verimlilik ve hammadde tasarrufu sağlamaktadır.

Sunulan bu çalışmada, hassas dökümün tüm teknik safhaları; mum model üretiminden salkım oluşturmaya, seramik kabuk inşasından otoklav süreçlerine, sinterleme operasyonlarından döküm ve nihai polisaj işlemlerine kadar detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca, üretim sonunda ortaya çıkan seramik atıkların döngüsel ekonomi kapsamında geri kazanımı üzerine bilimsel veriler sunulmaktadır. Yapılan incelemeler, hassas dökümün sadece bir üretim yöntemi değil, aynı zamanda malzeme bilimi, termodinamik ve dijital simülasyon teknolojilerinin entegre olduğu bir mühendislik disiplini olduğunu göstermektedir.

Hassas döküm; İngilizce dilinde “investment casting” veya “ceramic shell casting” olarak geçer. Türk sanayisinde ise genelde “kaybolan mum yöntemi” olarak adlandırılmaktadır. Bu döküm yönteminin hassas olarak adlandırılmasının sebebi, kaybolan modelin (mum) çok iyi şekillendirilebilmesi ve model seramik ile kaplandıktan sonra ısıtılıp eritilerek uzaklaştırılabildiği için kalıpta ayırma yüzeyi olmamasıdır. Ayrıca seramik kaplama yapılırken mum modele ilk temas eden katmanlar çok ince taneli olduğu için, döküm sonrası parça yüzey kalitesi de diğer döküm yöntemlerine

kıyasla çok daha pürüzsüz elde edilir. Bu sebeplerle kum kalıba kıyasla daha yüksek kalitede yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluk verir. Bu üretim yöntemi, döküm işlemi ardından final şekle oldukça yakın parça elde etmek hususunda yüksek verimliliğe sahiptir Bu avantaj döküm sonrası işlemleri (CNC, torna, polisaj vb.) minimuma indirmektedir(Pattnaik, Karunakar, ve Jha 2012).

Hassas döküm teknolojisinin tarihsel gelişimi, insanlığın metalurji alanındaki serüveniyle paralel bir seyir izlemiştir. M.Ö. 4000’li yıllarda Mezopotamya, Mısır ve Çin’de dini objelerin, takıların ve sanatsal figürlerin üretiminde kullanılan bu teknik, o dönemlerde "kil kalıp" yöntemiyle uygulanmaktaydı. Antik Harappa medeniyetindeki ünlü "dans eden kız" heykeli, bu yöntemin binlerce yıl önce bile ne kadar karmaşık detayları başarıyla üretebildiğinin en somut kanıtlarından biridir. Orta Çağ’da Benvenuto Cellini gibi sanatçıların devasa bronz heykelleri dökmesiyle sanatsal zirvesine ulaşan yöntem, endüstriyel devrimle birlikte teknik bir dönüşüm yaşamıştır. Özellikle 19. yüzyılın sonlarında diş hekimliğinde altın dolgu ve kuronların üretimi için Dr. William Taggart tarafından geliştirilen santrifüj döküm makineleri, hassas dökümün modern mühendislik standartlarına geçişinde ilk adımı oluşturmuştur(Pattnaik vd. 2012).

İkinci Dünya Savaşı, hassas dökümün kaderini değiştiren en önemli küresel olay olmuştur. Savaş uçaklarının turboşarj bileşenlerinde ve jet motorlarının türbin kanatçıklarında ihtiyaç duyulan yüksek sıcaklık mukavemeti ve karmaşık soğutma kanalları, geleneksel talaşlı imalat veya kum döküm yöntemleriyle üretilememekteydi. Bu dönemde Austenal Laboratories tarafından geliştirilen kobalt bazlı "Vitallium" alaşımlarının hassas dökümle şekillendirilmesi, yöntemi stratejik bir üretim gücü haline getirmiştir. Günümüzde ise hassas döküm; mikro cerrahi aletlerinden uzay araçlarının yakıt nozullarına, otomobil motor bileşenlerinden lüks saat gövdelerine kadar geniş bir spektrumda, 0,3 mm et kalınlığı

ve $\pm 0,075$ mm boyutsal tolerans gibi inanılmaz hassasiyet limitlerinde hizmet vermektedir (Pattnaik vd. 2012; Türkmen, Erdoğan, ve Kaya 2019).

Modern imalat dünyasında hassas döküm, dökülebilen tüm metallere (karbon çelikleri, paslanmaz çelikler, nikel süper alaşımları, titanyum ve alüminyum) uygulanabilen, tasarımcıya parçaları birleştirme ve ağırlık azaltma konularında muazzam bir özgürlük tanıyan bir süreçtir. Geleneksel yöntemlerle işlenmesi mümkün olmayan iç kanallı yapılar, yazılar, gravürler ve vidalar bu yöntemle tek seferde dökülebilir. Talaşlı imalat yerine hassas dökümün tercih edilmesi, malzeme israfını %90 oranında azaltabilmekte ve üretim kapasitesini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu raporun ilerleyen bölümlerinde, her bir üretim aşamasının teknik parametreleri ve bu süreçlerdeki kritik başarı faktörleri detaylı bir şekilde analiz edilecektir(Jones ve Yuan 2003).

Şekil 1 Mum Modelaj, Seramik Kaplama, Otoklav, Döküm ve Parçaları Ayırma Süreci



Kaynak: (Wang vd. 2019)

Üretim Yöntemi

Hassas döküm üretim yöntemi, birbirini izleyen ve her biri nihai metal parçanın kalitesini doğrudan etkileyen sekiz temel aşamadan oluşur: Master kalıp tasarımı, mum model üretimi, model ağacı (salkım) oluşturma, seramik kabuk inşası, mumun uzaklaştırılması, seramik kalıbın sinterlenmesi, metal dökümü ve son olarak polisaj işlemleri. Sürecin başarısı, termal genleşme katsayılarının uyumu, seramik çamurunun kararlılığı ve metal-kalıp etkileşimlerinin kontrolü gibi çok sayıda bilimsel değişkene bağlıdır (Buj-Corral ve Dominguez-Fernández 2024; Sata vd. 2025).

Mum Modelaj

Hassas döküm sürecinin ilk fiziksel adımı, parçanın geometrisini tanımlayan ve döküm boşluğunu oluşturacak olan harcanabilir modellerin üretilmesidir. Modeller genellikle düşük erime noktasına sahip, kolay şekillendirilebilen ve kül bırakmadan yanabilen mum esaslı malzemelerden üretilir.

Model Mumlarının Karakteristikleri ve Seçimi

Üstün kaliteli bir döküm elde etmek için kullanılan mumun fiziksel ve mekanik özellikleri kritik öneme sahiptir. İdeal bir mum; düşük ısı genleşme göstermeli, oda sıcaklığında kırılmadan taşınabilecek kadar mukavemetli olmalı, kalıbın en ince detaylarını doldurabilecek düşük viskoziteye sahip olmalı ve sinterleme sonrası seramik kabuk içinde hiçbir kalıntı bırakmamalıdır(Kanyo vd. 2020; Türkmen vd. 2019).

Tablo 1 Model mumlarına yapılan katkıların fiziksel ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi

Mum Tipi	Kullanım Amacı	Avantajları	Dezavantajları
B140	Model Mumu	Yüksek boyutsal kararlılık, düşük çekme.	Yüksek maliyet.
B97	Yolluk Mumu	Ekonomik fiyat, kolay birleştirme.	Düşük mukavemet.

Reçine Katkılı	Karmaşık Geometriler	Yüksek rijitlik, detay keskinliği.	Geri kazanım zorluğu.
Su Emülsiyonlu	Büyük Parçalar	Düşük çekme oranı, boyutsal hassasiyet.	Uzun kuruma süreleri

Kaynak: (Pattnaik vd. 2012)

Sektörde maliyet-performans dengesini sağlamak amacıyla parçanın asıl gövdesi için yüksek nitelikli (B140 gibi) mumlar, yolluk sistemleri için ise daha ekonomik (B97 gibi) mumlar kullanılır. Mumların özelliklerini iyileştirmek için soya fasulyesi unu, aktif kömür veya çeşitli sentetik reçineler dolgu maddesi olarak eklenerek çekme oranları %0,89 seviyelerine kadar indirilebilmektedir. Bunların haricinde otoklav süreci ardından geri kazanılan mumlarda yolluk sistemlerinde kullanılabilmektedir (Pattnaik vd. 2012; Singh, Singh, ve Boparai 2018).

Enjeksiyon Parametrelerinin Kontrolü

Mum modeller genellikle çelik veya alüminyumdan yapılmış hassas metal kalıplara yüksek basınçlı enjeksiyon presleri aracılığıyla basılır. Bu aşamada sıcaklık, basınç ve süre parametrelerinin yönetimi, parçanın boyutsal doğruluğunu doğrudan belirler (Wang vd. 2019).

- Sıcaklık Kontrolü: Enjeksiyon sıcaklığı arttıkça mumun akışkanlığı artar ancak bu durum yüksek sıcaklık gradyanlarına ve uçucu bileşenlerin kaybına yol açarak çekme hatalarını artırır. Çalışmalar, 68 °C enjeksiyon sıcaklığının birçok polimer katkılı mum için ideal olduğunu göstermiştir (Wang vd. 2019).
- Basınç ve Süre: Enjeksiyon basıncı, mumun kalıp içindeki tüm mikro detaylara nüfuz etmesini sağlar. Tutma süresi (holding time) ise mumun kalıp içinde katılaşıırken dışarıdan beslenmeye devam etmesini sağlayarak çekme boşluklarını engeller. 9 dakikalık bir

tutma süresinin boyutsal kararlılık üzerinde pozitif etkileri olduğu kaydedilmiştir (Wang vd. 2019).

- Kalıp Sıcaklığı: Metal kalıbın sıcaklığı, mumun katılaşma hızını belirler. Kalıp çok soğuksa "akış izleri" oluşur; çok sıcaksa mumun kalıptan çıkarılması zorlaşır ve deformasyon meydana gelir (Singh ve Singh 2016).

Model Ağacı ve Salkım Oluşturma

Hazırlanan bireysel mum modeller, ergimiş metalin dağılımını sağlayacak olan merkezi bir "yolluk" etrafına dizilir. Bu yapıya "model ağacı" veya "salkım" denir. Salkım oluşturulurken dikkat edilmesi gereken en önemli husus, benzer ağırlık ve et kalınlığına sahip modellerin aynı yolluğa dizilmesidir. İnce modeller ile kalın modellerin aynı yollukta olması, döküm sonrası soğuma hızlarındaki farktan dolayı boyutsal çarpılmalara ve mikro porozitelere neden olabilir (Adeleke vd. 2022; Amiri Farsani ve Gholamipour 2020).

Seramikhane

Seramikhane, mum salkımının etrafına yüksek sıcaklık ve metal basıncına dayanıklı, pürüzsüz yüzeyle bir seramik kabuğun inşa edildiği aşamadır. Bu aşama, döküm parçasının yüzey kalitesini ve metalurjik saflığını belirleyen en teknik süreçtir.

Seramik Çamuru ve Kaplama Katmanları

Seramik kabuk, salkımın sıvı bir seramik çamura (slurry) daldırılması ve ardından üzerine kuru refrakter taneciklerin (stucco) serpilmesiyle oluşturulan çok katmanlı bir yapıdır. Her katmandan sonra parçanın tamamen kuruması beklenir. Bu döngü, kabuk kalınlığı 3-15 mm arasına ulaşana kadar genellikle 5 ile 10 katman arasında tekrarlanır.

1. Birincil Kaplama (Prime Coat): Mum modele doğrudan temas eden ilk katmandır. Üstün yüzey kalitesi elde etmek için çok ince taneli (un kıvamında) zirkon ($ZrSiO_4$) veya alümina kullanılır. Zirkon, yüksek refrakterliği ve erimiş metallerle düşük reaktivitesi nedeniyle birincil kaplamada en çok tercih edilen malzemedir.
2. Destek Katmanları (Backup Coats): Kalıba yapısal mukavemet kazandırmak amacıyla oluşturulur. Burada daha kaba taneli kalsine kaolen, fused silika veya alümina-silikatlar kullanılır. Katmanlar ilerledikçe kullanılan refrakter tanecik boyutu artırılarak kabuğun hem mukavemeti hem de gaz geçirgenliği optimize edilir(Kanyo vd. 2020; Pattnaik vd. 2012).

Bağlayıcı Teknolojisi

Seramik çamurlarının kalbi bağlayıcı sistemidir. Günümüzde çevresel düzenlemeler nedeniyle solvent bazlı etil silikat bağlayıcıların yerini büyük ölçüde su bazlı "koloidal silika" almıştır. Silika partikülleri kuruma aşamasında jel fazına geçerek refrakter tanecikleri arasında siloksan bağları kurar (Adeleke vd. 2022).

Çamurun viskozitesi, daldırma işleminin başarısını belirleyen en kritik parametredir. Viskozitenin çok yüksek olması, dar kanallarda hava boşluklarına ve eksik kaplamaya neden olurken; çok düşük olması yetersiz kabuk kalınlığına ve döküm sırasında metal sızıntılarına yol açar. Viskozite kontrolü için çamur tanklarında sürekli karıştırma işlemi uygulanır (Jones ve Yuan 2003).

Geçirgenlik ve Mukavemet Dengesi

Seramik kabuk hem metalin ağırlığına dayanacak kadar güçlü hem de içindeki havayı tahliye edecek kadar gözenekli olmalıdır. Bu dengeyi sağlamak için çamura naylon veya polimer fiberler eklenebilir. Bu fiberler sinterleme sırasında yanarak

uzaklaşır ve kalıp içinde mikro-kanallar bırakarak gaz geçirgenliğini %86 oranında artırabilir. Ayrıca, yolluğa bağlanan model parçalarına hava kanalları bağlanılarak tahliye sağlanabilir. Bu seramik modelin gaz geçirgenliğine minimum ihtiyaç duyulması sağlar ve mukavemet ön plana çıkar (Yahaya vd. 2016).

Tablo 2 Model Üzerine Kaplanan Seramik Katmanları

Parametre	Birincil Katman	Destek Katmanları
Refrakter Malzeme	Zirkon Unu	Alümina-Silikat Kum
Tane Boyutu	325 mesh ve altı	30-80 mesh
Bağlayıcı Oranı	Yüksek	Orta
Kuruma Süresi	12-24 saat	4-8 saat
Ana Fonksiyon	Yüzey Pürüzsüzlüğü	Mekanik Dayanım

Kaynak: (Brum vd. 2009)

Otoklav ve Sinterleme

Seramik kabuk inşası tamamlandıktan sonra, kalıbın içindeki mumun zarar vermeden boşaltılması ve kalıbın döküme uygun metalürjik özelliklere ulaştırılması gerekir. Bu süreç iki kademeli bir ısıtım işlemi döngüsüdür (Wang vd. 2019).

Otoklav ile Mum Giderme

Mumun seramik kabuktan uzaklaştırılması, tüm sürecin en riskli aşamalarından biridir. Mumun ısıtım genleşme katsayısı seramikten çok daha yüksektir; yavaş ısıtım durumunda genişleyen mum, henüz tam mukavemet kazanmamış seramik kabuğu içeriden çatlatılabilir. Bu problemi aşmak için buharlı otoklav yöntemi kullanılır (Yahaya vd. 2016).

Modern işletmelerde kullanılan otoklav sistemleri, salkımı 3-4 saniye gibi kısa bir sürede 6-10 bar basınç ve yaklaşık 170-182 °C sıcaklığa maruz bırakır. Bu ani basınç ve sıcaklık artışı, mumun seramik yüzeye temas eden ince katmanının anında erimesini sağlar. Böylece mumun geri kalanı genleşmeden önce, eriyen dış katman bir yağlayıcı vazifesi görerek mumun tahliye kanallarından dışarı

akmasına olanak tanır ve kabuk üzerindeki baskıyı minimize eder. Otoklav süreci sonunda mumun yaklaşık %95'i geri kazanılır ve kirliliklerden arındırılarak yeniden üretim döngüsüne (özellikle yolluk kısımlarında) dahil edilir. Burada geri kazanılan mum ile ilk defa kullanılacak olan mum karıştırılarak tekrar kullanılabilir. Seramik çamurunun bu karışım muma, hiç kullanılmamış olan muma göre daha iyi tutunduğu bilinmektedir (Bae, Kim, ve Halloran 2019; Türkmen vd. 2019).

Seramik Kabuk Sinterleme Süreci

Mumdan arındırılmış kalıplar, içerde kalan mum kalıntıları tamamen buharlaştırmak ve seramik partiküllerini birbirine kaynatmak maksadı ile yüksek sıcaklık fırınlarında sinterlenir. Sinterleme sıcaklıkları dökülecek metalin ergime derecesine ve seramik kabuk katmanlarında kullanılan malzemelere bağlı olarak genellikle 850 °C ile 1100 °C arasında değişir (Valenza vd. 2010).

- Faz Dönüşümleri ve Kristobalit: Sinterleme sırasında fused silika bazlı kalıplarda β -kristobalit oluşumu gözlenir. Bu faz dönüşümü yüksek sıcaklıkta kabuğun şekil değişimine karşı direncini artırır; ancak soğuma sırasında meydana gelen hacimsel büzülme mikro çatlaklara neden olabilir. Bu nedenle kristobalit oranının %10-20 aralığında tutulması önemli bir kriterdir (Pattnaik vd. 2012; Valenza vd. 2010).
- Gaz Tahliyesi: Sinterleme işlemi sadece mukavemet kazandırmakla kalmaz, aynı zamanda seramik içindeki tüm organik bileşenleri yakarak döküm sırasında gaz çıkışına bağlı oluşabilecek hataların önüne geçer. Sinterleme başlangıcında kalıntı mumlar da sistemden uzaklaşmış olur (Martinez-Hernandez vd. 2012; Valenza vd. 2010).

Döküm Süreci

Döküm aşaması, mum modelaj sürecinden seramikخانه sürecine kadar yapılan hazırlıkların fiziksel bir metal parçaya dönüştüğü bir süreçtir.

Ön Tavlama ve Döküm Yöntemleri

Dökümden hemen önce sinterlenmiş seramik kalıplara, termal şoku önlemek ve metalin akışkanlığını artırmak amacıyla 800-1100 °C sıcaklıklara kadar ön ısıtma yapılır. Metal dökümü üç farklı ana yöntemle gerçekleştirilebilir:

- a. Yerçekimi Dökümü: En yaygın ve düşük maliyetli yöntemdir. Potada ergitilmiş sıvı metal seramik kalıp boşluğuna dökülür.
- b. Vakum Dökümü: Özellikle havacılık ve tıp sektörlerinde nikel ve titanyum gibi reaktif alaşımların oksidasyonunu önlemek için vakum altında gerçekleştirilir. Bu yöntem, hidrojen gevrekliği ve diğer gaz hatalarını minimize eder.
- c. Santrifüj Döküm: Küçük ve çok ince detaylı parçalarda (takı, diş protezi), metalin merkezkaç kuvvetiyle kalıp boşluğunun tamamını doldurmaya zorlanması prensibine dayanır.

Döküm sonrası metalin katılaşması çekirdeklenme ve tane büyümesi süreçleriyle gerçekleşir. Seramik kabuğun düşük termal iletkenliği, katılaşma hızını kontrol ederek daha homojen ve ince taneli bir mikroyapı oluşmasına yardımcı olur (Amiri Farsani ve Gholamipour 2020; Rezavand ve Behravesht 2007; Venkat vd. 2020).

Kabuk Kırma ve Yolluk Kesme

Metal tamamen soğuduktan sonra seramik kabuk kırılır. Bu işlem kumlama, mekanik vibrasyon veya yüksek basınçlı su püskürtme yöntemleriyle yapılabilir. Ardından parçalar model

ağacından (yolluklardan) dairesel testereler veya lazer kesicilerle ayrılır. Yolluk giriş noktalarında kalan çapaklar taşlama tezgahlarında temizlenir.

Polisaj ve Yüzey Bitirme

Hassas döküm parçaları döküm işlemi sonrasında genellikle 1 – 10 mikron arası bir pürüzlülüğe sahiptir. Ancak fonksiyonel gereklilikler doğrultusunda şu işlemler uygulanır:

1. Taşlama: Yolluk izlerini ve döküm çapaklarını gidermek için kullanılır.
2. Kumlama: Yüzeyi homojenleştirmek ve seramik kalıntılarını tamamen temizlemek için cam kürecik veya çelik bilyalarla yapılır.
3. Polisaj: Estetik parçalar ve biyomedikal implantlar için keçeler ve aşındırıcı pastalar kullanılarak parçaların yüzeyleri parlatılır.
4. Isıl İşlem: Döküm sonrası parçaların mekanik özelliklerini (sertlik, tokluk) optimize etmek amacıyla T6 gibi özel ısıtma işlem döngüleri uygulanabilir (Taşcıoğlu, İnem, ve Akar 2004).

Sonuç

Hassas döküm teknolojisi, tasarımın sınırlarını zorlayan geometrik kabiliyeti ve yüksek malzeme verimliliği ile modern imalat sanayisinin en kilit süreçlerinden biri olmayı sürdürmektedir. Bu çalışma boyunca incelenen süreç parametreleri, yöntemin başarısının rastlantısal değil; mumun fiziksel ve kimyasal yapısından seramiğin faz dönüşümlerine, otoklavın basınç dinamiğinden dökümün katılma kinetiğine kadar her aşamada titiz bir bilimsel kontrolün eseri olduğunu göstermektedir.

Özellikle nikel bazlı süper alaşımların dökümünde yttria ve zirkon esaslı yeni nesil seramik kalıpların kullanımı, reaktif etkileşimleri minimize ederek parça ömrünü uzatmaktadır. Sürdürülebilirlik perspektifinden bakıldığında, hassas döküm atık kumlarının seramik karo üretiminde %27'ye varan viskozite düşüşü ve %6 mukavemet artışı sağlayarak geri kazanılması, endüstriyel simbiyozun en başarılı örneklerinden biridir. Gelecekte, 3D yazıcılarla üretilen polimer ve mum modellerin (eklemeli imalat) sürece tam entegrasyonu, prototipleme sürelerini %89 oranında azaltarak hassas dökümü havacılık ve medikal gibi "kişiselleştirilmiş üretim" gerektiren alanlarda daha da hakim kılacaktır. Sonuç olarak hassas döküm; geçmişin ustalığını geleceğin mühendisliğiyle birleştirerek, imkansız görülen tasarımları gerçeğe dönüştürmeye devam eden dinamik bir teknoloji alanıdır.

Kaynakça

- Adeleke, Adekunle A., Makanjuola Oki, Ikechukwu K. Anyim, Peter P. Ikubanni, Adeolu A. Adediran, Ayokunle A. Balogun, Thomas A. Orhadahwe, Peter O. Omoniyi, Adebayo S. Olabisi, ve Esther T. Akinlabi. 2022. "Recent Development in Casting Technology: A Pragmatic Review". *Revue Des Composites et Des Matériaux Avancés* 32(2):91-102. doi:10.18280/rcma.320206.
- Amiri Farsani, Maryam, ve Reza Gholamipour. 2020. "Silica-Free Zirconia-Based Primary Slurry for Titanium Investment Casting". *International Journal of Metalcasting* 14(1):92-97. doi:10.1007/s40962-019-00335-y.
- Bae, Chang-Jun, Daniel Kim, ve John W. Halloran. 2019. "Mechanical and kinetic studies on the refractory fused silica of integrally cored ceramic mold fabricated by additive manufacturing". *Journal of the European Ceramic Society* 39(2):618-23. doi:https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.09.013.
- Brum, Fábio J. B., Sandro C. Amico, Ivo Vedana, ve Jaime A. Spim. 2009. "Microwave dewaxing applied to the investment casting process". *Journal of Materials Processing Technology* 209(7):3166-71. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.07.024.
- Buj-Corral, Irene, ve Alejandro Dominguez-Fernández. 2024. "Comparison Between the Investment Casting Process (Lost Wax Casting) and Machining (Turning) in Terms of Dimensional Accuracy and Surface Finish". Ss. 117-29 içinde *Notes for Manufacturing Instructors: From Class to Workshop*, editör D. Carou ve J. P. Davim. Cham: Springer Nature Switzerland.
- Jones, S., ve C. Yuan. 2003. "Advances in shell moulding for investment casting". *Journal of Materials Processing*

Technology 135(2):258-65. doi:10.1016/S0924-0136(02)00907-X.

- Kanyo, Janos E., Stefan Schafföner, R. Sharon Uwanyuze, ve Kaitlynn S. Leary. 2020. "An Overview of Ceramic Molds for Investment Casting of Nickel Superalloys". *Journal of the European Ceramic Society* 40(15):4955-73. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2020.07.013.
- Martinez-Hernandez, M., Arturo Juárez Hernandez, M. Vera, J. Ayala-Cazares, ve Marco A. L. Hernandez- Rodriguez. 2012. "Optimization of the investment casting process". *Metallurgija -Sisak then Zagreb* 51:273-76.
- Pattnaik, Sarojrani, D. Benny Karunakar, ve P. K. Jha. 2012. "Developments in Investment Casting Process—A Review". *Journal of Materials Processing Technology* 212(11):2332-48. doi:10.1016/j.jmatprotec.2012.06.003.
- Rezavand, S. A. M., ve A. H. Behraves. 2007. "An experimental investigation on dimensional stability of injected wax patterns of gas turbine blades". *Journal of Materials Processing Technology* 182(1):580-87. doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.09.029.
- Sata, Amit, Divya Mobarsa, Minal Shukla, ve Slaheddine Jarboui. 2025. "Smart and Secured Investment Casting Process for Better Sustainability". *Scientific Reports* 15(1):34866. doi:10.1038/s41598-025-13286-8.
- Singh, Daljinder, Rupinder Singh, ve Kamaljit Singh Boparai. 2018. "Development and surface improvement of FDM pattern based investment casting of biomedical implants: A state of art review". *Journal of Manufacturing Processes* 31:80-95. doi:10.1016/j.jmapro.2017.10.026.
- Singh, Sunpreet, ve Rupinder Singh. 2016. "Precision Investment Casting: A State of Art Review and Future Trends".

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 230(12):2143-64. doi:10.1177/0954405415597844.

Taşcıoğlu, Senay, Burhanettin İnem, ve Neşet Akar. 2004. “Conversion of an investment casting sprue wax to a pattern wax by the modification of its properties”. *Materials & Design* 25(6):499-505. doi:https://doi.org/10.1016/j.matdes.2003.12.006.

Türkmen, Mustafa, Gizem Erdoğan, ve Ayşe Nur Kaya. 2019. “HASSAS DÖKÜM YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN ALAŞIMLARIN MİKROYAPI VE SERTLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI”. *Technological Applied Sciences* 14(1):20-26.

Valenza, F., R. Botter, P. Cirillo, F. Barberis, M. di Foggia, ve D. Sottile. 2010. “Sintering of waste of superalloy casting investment shells as a fine aggregate for refractory tiles”. *Ceramics International* 36(2):459-63. doi:10.1016/j.ceramint.2009.09.009.

Venkat, Y., K. R. Choudary, D. K. Das, A. K. Pandey, ve Sarabjit Singh. 2020. “Ceramic shell moulds with zircon filler and colloidal silica binder for investment casting of shrouded low-pressure turbine blades”. *Ceramics International* 46(17):26572-80. doi:10.1016/j.ceramint.2020.07.125.

Wang, Jiayi, Santosh Reddy Sama, Paul C. Lynch, ve Guha Manogharan. 2019. “Design and Topology Optimization of 3D-Printed Wax Patterns for Rapid Investment Casting”. *Procedia Manufacturing* 34:683-94. doi:10.1016/j.promfg.2019.06.224.

Yahaya, B., S. Izman, M. H. Idris, ve M. S. Dambatta. 2016. “Effects of activated charcoal on physical and mechanical properties of microwave dewaxed investment casting moulds”. *CIRP*

Journal of Manufacturing Science and Technology 13:97-103. doi:10.1016/j.cirpj.2016.01.002.

BÖLÜM 3

EPOKSİ ESASLI KAPLAMALAR

Doç.Dr. İlyas KARTAL¹
Gamze BAYGELDİ²

¹Doç.Dr. İlyas Kartal, Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-9677-477X

²Gamze Baygeldi, Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Orcid: 0009-0004-0528-8119

GİRİŞ

Çoğu malzeme, mekanik ve fiziksel açıdan yeterli olsa da çevresel etkilere maruz kaldığında korozyon, aşınma, oksidasyon veya kimyasal bozulma gibi olumsuz süreçlerle karşılaşabilir. Malzemelerde meydana gelen bu olumsuzluklar, ekonomik kayıplar getirmesinin yanı sıra insan yaşamını tehlikeye atmak gibi ciddi problemler doğurur.

Günümüz mühendislik uygulamalarında kaplama teknolojileri, malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmeye yönelik temel yöntemlerden biri olarak önemli bir yer tutmaktadır. Bu teknolojiler, malzemenin dayanıklılığını artırmanın yanı sıra çevresel etkilere karşı koruyucu bir bariyer oluşturarak korozyon, oksidasyon ve benzeri bozunma mekanizmalarının önüne geçmektedir. Ayrıca, yüzeye istenen optik, elektriksel ve mekanik özelliklerin kazandırılmasına olanak tanıyarak malzemenin performansını iyileştirir. Bununla birlikte, kaplamalar estetik açıdan da katkı sağlayarak, malzemeye hem fonksiyonel hem de görsel değer kazandıran çok yönlü bir çözüm sunar. Dolayısıyla kaplama teknolojileri, hem yapısal malzemelerin hizmet ömrünü uzatmak hem de yüksek performans gerektiren sistemlerde fonksiyonel çözümler geliştirmek açısından geniş bir uygulama alanına sahiptir. Kaplama teknolojileri, otomotiv, havacılık, enerji, inşaat, elektronik ve tıp gibi pek çok endüstriyel sektörde sürdürülebilirlik, verimlilik ve maliyet etkinliği bakımından stratejik önem aşmaktadır.

Uygulanan kaplama tabakaları, kullanım amacına ve hedeflenen yüzey özelliklerine bağlı olarak metalik, seramik, polimerik veya kompozit yapıda tasarlanabilmektedir. Günümüzde kaplama sistemleri yalnızca geleneksel boya veya galvanizleme yöntemleriyle sınırlı kalmayıp; organik kaplamalar (epoksi,

[Buraya yazın]

poliüretan, akrilik), metalik kaplamalar (galvaniz, krom, nikel), seramik kaplamalar, ince film teknolojileri (PVD, CVD) ve termal sprey uygulamaları gibi gelişmiş yüzey modifikasyon tekniklerini de kapsamaktadır. Özellikle epoksi esaslı kaplamalar, yüksek yapışma kabiliyeti, kimyasal dirençleri ve geniş uygulama alanları ile günümüz endüstrisinde en çok tercih edilen kaplama türlerinden biridir.

KAPLAMALARDA KULLANILAN BAĞLAYICILAR

Kaplama sistemleri, uygulama amacına bağlı olarak bağlayıcı, pigment ve dolgu maddeleri içerebilmektedir. Kaplama sistemlerinde bağlayıcı türü, film oluşum mekanizması, polimer ağ yapısı ve kürlenme davranışı üzerinden kaplamanın mekanik, kimyasal ve çevresel dayanım özelliklerini belirleyen temel unsurdur. Günümüzde endüstriyel kaplamalarda en yaygın olarak epoksi, polyester, poliüretan, vinilester ve alkid esaslı bağlayıcı sistemler kullanılmaktadır. Bu bağlayıcılar, sahip oldukları moleküler yapı ve kürlenme mekanizmaları bakımından birbirlerinden belirgin şekilde ayrılmaktadır.

Epoksi Bağlayıcılar

Epoksi esaslı bağlayıcılar, yüksek mekanik dayanım, güçlü aderans ve üstün kimyasal direnç özellikleri nedeniyle kaplama teknolojilerinde en yaygın kullanılan termoset bağlayıcı sistemler arasında yer almaktadır. Bu bağlayıcılar, moleküler yapılarında reaktif epoksi (oksiran) halkaları içeren reçinelerden oluşmakta ve uygun sertleştiriciler ile reaksiyona girerek üç boyutlu, kimyasal olarak çapraz bağlı bir polimer ağ yapısı oluşturmaktadır (May,1988; Pascault & Williams, 2010).

Epoksi bağlayıcıların kaplama performansı, kürlenme sonrası oluşan ağ yapısının yoğunluğu ve homojenliği ile doğrudan ilişkilidir. [Buraya yazın]

Yüksek çapraz bağ yoğunluğu, kaplamaya artan mekanik dayanım, düşük moleküler geçirgenlik ve etkili bariyer özellikleri kazandırmakta; bu durum özellikle kimyasal maddelere ve korozyif ortamlara karşı direnç açısından kritik önem taşımaktadır (Wicks et al., 2007). Bu özellikler, epoksi esaslı kaplamaların endüstriyel zeminler, boru hatları, denizcilik yapıları ve ağır hizmet korozyon koruma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır.

Epoksi bağlayıcıların öne çıkan bir diğer avantajı, metal, beton ve kompozit yüzeyler dâhil olmak üzere çok çeşitli alt tabakalara güçlü bir yapışma göstermeleridir. Bu yüksek aderans, epoksi reçinelerin polar karakteri ve yüzeyle oluşturdıkları fiziksel ve kimyasal etkileşimlerden kaynaklanmaktadır (Petrie, 2006). Ayrıca epoksi sistemler, kürlenme sırasında düşük hacimsel büzülme sergileyerek iç gerilmelerin sınırlı kalmasına ve kaplama bütünlüğünün korunmasına katkıda bulunmaktadır.

Bununla birlikte, epoksi esaslı bağlayıcıların bazı sınırlamaları da mevcuttur. Özellikle aromatik yapılı epoksi reçineler, ultraviyole (UV) ışınımına karşı sınırlı dayanım gösterebilmekte; uzun süreli dış ortam maruziyetlerinde sararma ve yüzey tebeşirlenmesi gibi bozunma mekanizmaları ortaya çıkabilmektedir (Allen & Edge, 1992). Bu nedenle epoksi kaplamalar çoğunlukla astar veya ara kat olarak kullanılmakta, dış ortam uygulamalarında ise poliüretan gibi UV dayanımı yüksek üst kaplama sistemleri ile birlikte tercih edilmektedir.

Epoksi esaslı bağlayıcıların fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri; kullanılan epoksi reçinenin türü (örneğin diglisidil eter bazlı bisfenol A – DGEBA), sertleştirici tipi, stokiyometrik oranlar ve kürlenme koşulları gibi parametreler aracılığıyla geniş bir aralıkta ayarlanabilmektedir. Bu ayarlanabilir yapı, epoksi bağlayıcıları hem yapısal hem de fonksiyonel kaplama uygulamaları için son derece [Buraya yazın]

esnek ve çok yönlü bir malzeme grubu hâline getirmektedir (Pascault & Williams, 2010).

Polyester esaslı bağlayıcılar

kaplama ve kompozit teknolojilerinde yaygın olarak kullanılan termoset sistemler arasında yer almakta olup, çoğunlukla doymamış polyester reçinelerin serbest radikal polimerizasyonu yoluyla kürlenmesi ile elde edilmektedir. Bu sistemlerde reçine, genellikle stiren gibi reaktif seyrelticiler ile formüle edilmekte ve uygun başlatıcılar (örneğin organik peroksitler) yardımıyla üç boyutlu bir ağ yapısı oluşturmaktadır (Mallick, 2007; Goodman, 1998).

Polyester bağlayıcıların öne çıkan avantajları arasında nispeten düşük maliyetli olmaları, kolay işlenebilirlikleri ve yüksek yüzey sertliği sağlamaları yer almaktadır. Kürlenme sonrası oluşan yapı, epoksi sistemlere kıyasla daha esnek zincir segmentleri içermekte olup bu durum darbe dayanımı ve titreşim sönümleme özelliklerini olumlu yönde etkileyebilmektedir. Bu özellikler, polyester esaslı bağlayıcıların özellikle dekoratif kaplamalar, cam elyaf takviyeli kompozitler ve genel amaçlı endüstriyel uygulamalarda tercih edilmesine olanak sağlamaktadır (Peters, 2011).

Bununla birlikte polyester bağlayıcıların performansı, çevresel dayanım açısından bazı sınırlamalar içermektedir. Moleküler yapılarında bulunan ester grupları, nemli ve kimyasal açıdan agresif ortamlarda hidrolize karşı duyarlıdır. Bu durum, uzun süreli su temasında mekanik özelliklerde azalma, yapışma kaybı ve kaplama bütünlüğünde bozulmalara yol açabilmektedir (Wicks et al., 2007). Ayrıca polyester sistemler, epoksi bağlayıcılara kıyasla daha yüksek geçirgenlik değerlerine sahip olup, korozyon koruma performansları sınırlı kalabilmektedir.

[Buraya yazın]

Bu nedenlerle polyester esaslı bağlayıcılar, genellikle yüksek kimyasal direnç veya uzun süreli korozyon koruması gerektiren uygulamalardan ziyade, orta düzey koruma gerektiren veya dekoratif amaçlı kaplama sistemlerinde kullanılmaktadır. Kaplama performansının iyileştirilmesi amacıyla polyester bağlayıcılar zaman zaman vinilester veya epoksi esaslı sistemlerle modifiye edilmekte, böylece mekanik ve kimyasal dayanım özellikleri geliştirilmektedir (Mallick, 2007; Peters, 2011).

Vinilester Esaslı Bağlayıcılar

Vinilester esaslı bağlayıcılar, epoksi reçinelerin doymamış monokarboksilik asitler ile modifikasyonu sonucu elde edilen ve yapısal olarak hem epoksi hem de polyester sistemlerin özelliklerini bünyesinde barındıran termoset polimerlerdir. Bu bağlayıcılar, polyester sistemlerde olduğu gibi serbest radikal mekanizması ile kürlenmekte; ancak epoksi kökenli ana zincir yapıları sayesinde daha yüksek mekanik ve kimyasal dayanım sunmaktadır (Pascault & Williams, 2010; Mallick, 2007).

Vinilester bağlayıcıların en önemli avantajı, ester gruplarının yalnızca zincir uçlarında bulunmasıdır. Bu yapı, polyester reçinelere kıyasla hidrolize karşı daha yüksek direnç sağlamakta ve özellikle asidik, bazik ve solvent içeren agresif ortamlarda kaplama performansını önemli ölçüde artırmaktadır. Bu nedenle vinilester esaslı kaplamalar; kimyasal tanklar, deniz yapıları ve ağır hizmet korozyon koruma uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir (Wicks et al., 2007).

Bununla birlikte vinilester bağlayıcılar, epoksi sistemlere kıyasla daha yüksek büzülme oranlarına sahip olabilmekte ve kürlenme sırasında iç gerilme oluşumu gözlemlenmektedir. Ayrıca stiren gibi uçucu reaktif seyrelticilerin kullanımı, iş sağlığı ve çevresel açıdan dikkatli formülasyon gerektirmektedir. Bu sınırlamalara rağmen [Buraya yazın]

vinilester bağlayıcılar, epoksi ve polyester sistemler arasında performans–maliyet dengesi açısından önemli bir alternatif sunmaktadır (Peters, 2011).

Poliüretan Esaslı Bağlayıcılar

Poliüretan esaslı bağlayıcılar, izosiyanat grupları ile hidroksil fonksiyonlu bileşikler arasındaki reaksiyonlar sonucunda oluşan ve geniş bir özellik aralığı sunabilen termoset veya termoplastik sistemlerdir. Moleküler yapılarındaki sert ve yumuşak segmentlerin oranı, poliüretan bağlayıcıların mekanik özelliklerinin hassas şekilde ayarlanmasına olanak tanımaktadır (Petrie, 2008).

Poliüretan bağlayıcılar, yüksek elastikiyet, üstün aşınma dayanımı ve mükemmel UV direnci ile öne çıkmaktadır. Bu özellikler, poliüretan esaslı kaplamaların özellikle dış ortam uygulamalarında, epoksi sistemlerin UV dayanım eksikliğini tamamlayıcı bir üst kat olarak kullanılmasını yaygınlaştırmıştır. Ayrıca poliüretan kaplamalar, atmosferik koşullara ve kimyasal etkilere karşı uzun süreli renk ve parlaklık stabilitesi sunmaktadır (Wicks et al., 2007).

Bununla birlikte izosiyanat bazlı sistemler, nem hassasiyeti ve iş sağlığı açısından dikkatli kullanım gerektirmektedir. Kurlenme sırasında çevresel nem ile reaksiyon riski, uygulama koşullarının kontrollü olmasını zorunlu kılmaktadır. Tüm bu hususlara rağmen poliüretan esaslı bağlayıcılar, mekanik esneklik ve çevresel dayanımın birlikte talep edildiği kaplama sistemlerinde vazgeçilmez bir konuma sahiptir (Petrie, 2008).

Alkid Esaslı Bağlayıcılar

Alkid esaslı bağlayıcılar, çok değerli alkoller, polibazik asitler ve yağ asitlerinin kondenzasyon reaksiyonları sonucu elde edilen

[Buraya yazın]

termoset veya yarı termoset reçinelerdir. Yapılarında bulunan yağ asidi segmentleri, alkid reçinelere iyi film oluşturma kabiliyeti, esneklik ve yüzey parlaklığı kazandırmaktadır (Yürekli, 1996).

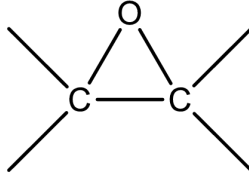
Alkid bağlayıcılar, genellikle hava ile kuruyan sistemler olup kürlenme mekanizması oksidatif çapraz bağlanma esasına dayanmaktadır. Bu özellikleri sayesinde solvent bazlı boya ve kaplama uygulamalarında uzun yıllar boyunca yaygın olarak kullanılmıştır. Alkid esaslı kaplamalar, iyi yüzey düzgünlüğü ve dekoratif görünüm sağlamakla birlikte, orta seviyede mekanik dayanım ve sınırlı kimyasal direnç sunmaktadır (Paksoy, 1999).

Ancak alkid bağlayıcıların suya, alkalilere ve güçlü kimyasallara karşı dirençleri epoksi ve poliüretan sistemlere kıyasla düşüktür. Ayrıca uzun kürlenme süreleri ve dış ortam koşullarına bağlı performans değişkenliği, bu bağlayıcıların ağır hizmet korozyon koruma uygulamalarında kullanımını sınırlandırmaktadır. Günümüzde alkid esaslı bağlayıcılar daha çok dekoratif kaplamalar, iç mekân uygulamaları ve düşük kimyasal maruziyet gerektiren alanlarda tercih edilmektedir (Wicks et al., 2007).

EPOKSI

Epoksi, diğer adıyla oxirane ($-C_2H_4O-$), iki karbon ve bir oksijen atomu içeren üç üyeli halkalı bir eterdir. Epoksi halkasında yer alan karbon atomları, sp^3 hibridleşmesine sahip olup, ideal tetrahedral geometriye göre bağ açıları 109.5° olmalıdır. Ancak, üç üyeli halkalarda bu açı yaklaşık 60° 'ye düşer. Bağ açılarındaki bu belirgin sapma, sistemde yüksek düzeyde açısal gerilme (angle strain) ve bağ gerilimi (ring strain) oluşturur. Sonuç olarak, halka yapısı kararsız hâle gelir ve önemli miktarda enerji biriktirir. Bu yüksek içsel gerilme enerjisi, epoksi halkasının son derece reaktif olmasının temel sebebidir.

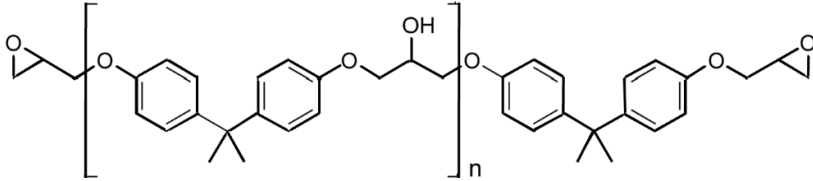
[Buraya yazın]



Şekil 1: Üç üyeli, iki karbon ve bir oksijen atomundan oluşan gerilimli halka yapısı; epoksi fonksiyonel grubunun karakteristik iskelet formu.

Epoksi reçineler, zincirlerinin uçlarında (ve bazen yan zincirlerinde) epoksi fonksiyonel grupları ($-C_2H_4O-$) taşıyan amorf yapıli termoset prepolimerlerdir. Reçinede bulunan Epoksi grupları yüksek reaktivitenin yanısıra güçlü yapışma özelliği sağlar.

Kullanılan ön polimer türü ve formülasyondaki bileşenlerin seçimi sayesinde cam geçiş sıcaklığı (T_g) yaklaşık $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında geniş bir aralıkta ayarlanabilmektedir. Bu geniş aralık, reçinelerin hem ısıya dayanıklı hem de üstün mekanik özelliklere sahip olacak şekilde özelleştirilebilmesine olanak tanır. Üretim şekli ve mol kütlesine bağlı olarak sıvı, katı veya viskoz sıvı formlarında elde edilebilirler.



Şekil 2: Bisfenol-A bazlı epoksi reçinesinin (DGEBA) prepolimer birim yapısı.

[Buraya yazın]

Ticari olarak en fazla kullanılan reçinelerden olan epoksi reçineleri, başlangıçta düşük moleköl ağırlıklı ve mekanik olarak zayıf oligomerler olarak bulunması sebebiyle tek başlarına işlevsel ürünler oluşturmazlar. Kullanışlı ve dayanıklı malzemeler elde edilebilmesi için, kûrlenme reaksiyonunun gerçekleşmesi gerekir. Epoksi grupları sertleştirici ile reaksiyona girerek açılır ve zincirler arasında kovalent çapraz bağlar oluşturur veya diğeri bir ifadeyle kûrlenir; böylece üç boyutlu bir polimer ağı meydana gelir. Bu çapraz bağlı polimer ağı, reçineye yüksek mekanik dayanım, termal stabilite ve kimyasal direnç kazandırır. Dolayısıyla epoksi reçinenin güçlü, dayanıklı ve işlevsel bir malzeme olarak kullanılabilirliği, çapraz bağlı ağ yapısının oluşmasına doğrudan bağlıdır.

Epoksi sistemlerinin özellikleri, sert ve dayanıklı yapıdan yüksek mukavemetli ve tok yapılara kadar çeşitlilik gösterebilir. Çeşitli ticari epoksi reçineler için çekme dayanımları tipik olarak 30–90 MPa civarındadır ve basınç dayanımı çekme dayanımından yüksek. Basınç dayanımı genellikle bu değerin yaklaşık iki katı seviyededir. Bu yüksek dayanım, tipik olarak %5 ila %10 aralığında değişen kopma uzaması (elongation at break) ile birlikte kullanışlı bir süneklik seviyesiyle dengelenir.

Epoksi reçineler, tek başına kullanıldıklarında yaklaşık 280 kgf/cm² düzeyinde çekme dayanımı sergilerler. Ancak cam lifi veya karbon lifi gibi takviye malzemeleriyle güçlendirildiklerinde bu değeri yaklaşık 1 400 kgf/cm²'ye kadar yükselir. Epoksi-novolak kopolimerleri halinde, özellikle cam lifi takviyesiyle birlikte, malzemenin sertlik değeri ise formülasyondaki bileşenlerin türüne ve oranına bağlı olarak değişkenlik gösterir.

[Buraya yazın]

Kimyasal direnç açısından epoksi reçineleri, organik çözücülere, zayıf asit ve bazlara karşı oldukça dayanıklıdır; ancak kuvvetli asit ve bazlardan belirli ölçüde etkilenirler. Atmosferik koşullar ve gün ışığına maruz kalmaları durumunda fiziksel ve kimyasal özelliklerinde önemli bir bozulma gözlenmez, bu da dış ortam uygulamaları için avantaj sağlar.

Isıl özellikleri değerlendirildiğinde, epoksi reçinelerin ısı iletkenlikleri genel olarak diğer termoplastik malzemelerinkine benzer düzeydedir. Yük altında eğilme sıcaklığı (HDT) ise kullanılan dolgu maddeleri ve kimyasal bileşime bağlı olarak geniş bir aralıkta değişmekte olup yaklaşık 105 °C ila 240 °C arasında seyretmektedir.

Endüstride en yaygın kullanılan epoksi reçine türü, bisfenol A diglisidil eteri (DGEBA)'dır. Bu tür, tüm epoksi üretiminde yaklaşık %70'in üzerinde bir paya sahiptir (Kumar et al., 2022). DGEBA, yüksek reaktivitesi, iyi mekanik performansı ve kimyasal direnç özellikleri nedeniyle hem yapısal yapıştırıcılarda hem de kompozit sistemlerde temel bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Yapıştırıcı olarak kullanıldığında yüksek performans gösteren epoksi sistemleri, alüminyum-çelik birleşimlerinde yaklaşık 300 kgf/cm²'lik kesme dayanımına ulaşabilir; bu da 1 dm²'lik bir yüzey alanının yaklaşık 30 tonluk çekme kuvvetine karşı koyabilmesi anlamına gelir.

Epoksi Sertleştiricileri

Çapraz bağlayıcılar, genellikle sertleştiriciler veya kürleme maddeleri olarak adlandırılan, epoksi reçinedeki epoksi veya hidroksil grupları ile kimyasal reaksiyona girerek veya bu grupların reaksiyonunlarını katalize ederek reçinenin çapraz bağlanmasını ve üç boyutlu polimer ağı oluşturmasını sağlayan kimyasallardır.

[Buraya yazın]

Sertleştiriciler vasıtasıyla gerçekleşen kürlenme sonucunda reçine, mekanik olarak dayanıklı ve işlevsel bir malzeme hâline gelir.

Uygun sertleştirici seçimi, uygun baz reçinenin seçilmesi kadar önemli olmakla beraber, seçilen sertleştirici türü; seçilen uygulama yönteminin getirdiği kısıtlamalara, çevresel koşullara ve kaplama filmin çalışma prensibi gibi parametrelere bağlıdır. Örneğin, Bazı kaplamalar, yüzey ile dış ortam arasında fiziksel bir engel oluşturarak koruyucu bir tabaka meydana getirirken; bazıları ise elektrokimyasal ya da kimyasal süreçler aracılığıyla yüzeyin bozunmasını engeller. Bu nedenle, kullanılacak sertleştirici ile sistemin reaksiyon kinetiği, film tabakasının oluşum mekanizması ve ortaya çıkan kaplamanın yoğunluk, geçirgenlik veya esneklik gibi özellikleri arasında uygun bir denge kurulması, kaplamanın performansını belirleyen temel etkenlerdir. Sertleştirici türü ve miktarı, film oluşumu sırasında gerçekleşen çapraz bağlanma derecesini ve bunun sonucunda gelişen mikroyapıyı doğrudan etkiler. Çapraz bağ yoğunluğundaki artış, film bütünlüğünü ve kimyasal dayanımı artırırken; aşırı çapraz bağlanma, kırılganlık ve elastikiyet kaybı gibi olumsuz etkiler yaratabilir. Bu nedenle, sertleştirici seçimi yalnızca kimyasal uyumluluk açısından değil, aynı zamanda istenen film özelliklerinin dengeli biçimde elde edilmesi açısından da kritik öneme sahiptir.

Epoksi reçine esaslı kaplamalarda en yaygın olarak kullanılan kürlenme maddeleri, oda sıcaklığında kürlenene kaplamalar için amin fonksiyonlu malzemeler, toz kaplamalar için disiyandiamid veya asit fonksiyonlu polyesterler ve ısı ile kürlenene sıvı kaplamalar için amino reçineler veya fenolik rezol reçinelerdir. Daha spesifik performans gereksinimlerinde tercih edilen amin türevi kürlenme maddeleri arasında fenalkaminler, sikloalifatik aminler ve ketiminler bulunur.

[Buraya yazın]

Epoksi sistemlerinde, amidoaminler, alifatik aminler ve epoksi-amin adüktleri yaygın olarak kullanılan kürleme ajanları arasında yer alır. Endüstride en sık kullanılan alifatik aminler arasında dietilentriamin (DETA), trietilentetramin (TETA) ve tetraetilenpentamin (TEPA) bulunur. DETA ve TETA gibi düşük molekül ağırlıklı aminler, epoksi reçineleriyle ön reaksiyona sokularak epoksi-amin adüktleri elde edilebilir; bu adüktler, saf aminlere göre daha düşük reaktiviteye sahip olup daha kontrollü sertleşme davranışı ve gelişmiş film özellikleri sağlar.

Alifatik Amin Sertleştiriciler

Alifatik aminler, epoksi reçine ile oda sıcaklığında ve hızlı bir kürlenme reaksiyonu veren tipik bir kürleme maddesidir. Alifatik aminlerle kürlenen epoksi reçineler, yüksek mekanik dayanım ve üstün yapışma özellikleri sergilemektedir. Bu tür sistemler alkalilere ve bazı inorganik asitlere karşı dirençli olup, su ve birçok çözücüye karşı tatmin edici bir kimyasal dayanım göstermektedir; ancak çeşitli organik çözücülere karşı dirençleri sınırlı olabilmektedir. Öte yandan, alifatik aminlerin cilt üzerinde tahriş edici etkileri bulunmakta ve toksik özellikler gösterebilmektedir. Molekül ağırlığı yüksek ve buhar basıncı düşük olan aminler nispeten daha düşük toksisiteye sahiptir.

En çok tercih edilen alifatik aminler; dietilaminpropilamin (DEAPA), dietilentriamin (DETA), Dipropilen triamin (DPTA) ve Trietilen tetraamin (TETA) dır.

Tersiyer amin grubu içermeyen amin sertleştiriciler, genellikle teorik stokiyometrik orana eşit ya da bu orana oldukça yakın miktarlarda epoksi sistemine ilave edilmektedir. Buna karşılık, tersiyer amin fonksiyonelliğine sahip kürleme ajanları, katalitik etkileri nedeniyle [Buraya yazın]

daha düşük oranlarda kullanılmaktadır. Oda sıcaklığında kürlenmiş sistemlere yüksek sıcaklıkta uygulanan ikincil bir kürleme işlemi, elde edilen malzemenin termal ve mekanik performansını belirgin şekilde artırabilmektedir. DGEBA esaslı epoksi sistemlerinde ısı deformasyon sıcaklığı, sertleştirici türü ve kürleme rejimine bağlı olarak geniş bir aralıkta değişebilmekte; özellikle alifatik aminlerle oda sıcaklığında kürlenen sistemlerde bu değer çoğunlukla 120 °C'nin altında kalmaktadır.

Anhidrit ve Asit Sertleştiriciler

Anhidrit yapılı sertleştiriciler ile epoksi reçinesinin kürlenmesi, amin fonksiyonlu sertleştiricilerden sonra en çok tercih edilen sistemdir (Yürekli, 1996). Bu sistemde, asit anhidritin yapısında bulunan karboksil grupları ile epoksi reçinesinin yapısında bulunan hidroksil grupları birbirleriyle reaksiyon gerçekleştirerek esterleşme reaksiyonu meydana getirir. Bu reaksiyonun ardından, anhidritin yapısındaki ikinci karboksil grubu serbest kalarak başka bir epoksi reçine grubu ile reaksiyona girer. Dolayısıyla, kürleme reaksiyonu ilerledikçe, çok sayıda çapraz bağlanma meydana gelir. Bu durum, mekanik özellikler için önemli avantajlar doğurur (May C. A., 2018).

Anhidritler ile epoksi reçine kürleşme reaksiyonlarında dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, reaksiyona katalizör ilave edilmezse reaksiyon 200 °C' de bile çok yavaş gerçekleşir (Yürekli, 1996) Reaksiyon hızını arttırmak için asidik veya bazik katalizörler kullanılır (Pascault & Williams, 2010). Baz katalizör tercih ederken zayıf bir baz olan tersiyer aminler (R_2N) kullanılabilir. Asit katalizör olarak ise bor triflorür (BF_3) gibi zayıf lewis asitleri tercih edilmelidir (May C. A., 2018).

[Buraya yazın]

Aromatik Amin Sertleştiriciler

Aromatik aminler, alifatik aminlere kıyasla daha düşük bazlık ve nükleofiliklik sergilemektedir. Bu durum, amin azotunun serbest elektron çiftinin aromatik halka ile rezonans etkileşimine girmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, aromatik halkanın neden olduğu konformasyonel ve elektronik kısıtlamalar, amin grubunun epoksi halkasına etkin şekilde yaklaşmasını zorlaştırmakta ve bu nedenle aromatik aminler epoksi reçinelerle oda sıcaklığında yavaş kürlenmekte ya da kürlenme için genellikle yüksek sıcaklık gerektirmektedir.

Aromatik amin sertleştiricilerle kürlenmiş epoksi sistemler, sağladıkları yüksek ısıl dayanım, mekanik mukavemet ve kimyasal direnç nedeniyle ileri mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu sistemler özellikle yüksek servis sıcaklıklarının söz konusu olduğu ve uzun süreli performans kararlılığının beklenildiği uygulamalarda öne çıkmaktadır. Aromatik aminlerin epoksi ağ yapısında oluşturduğu yoğun çapraz bağlanma, malzemelerin yüksek ısı deformasyon sıcaklıklarına ulaşmasını mümkün kılmaktadır (Zhou, Liu, Feng, & Liu, 2025)

Elektronik endüstrisinde, aromatik aminle kürlenmiş epoksi reçineleri; iyi elektriksel yalıtım özellikleri, düşük dielektrik kayıpları ve kimyasal ortamlara karşı dirençleri sayesinde enkapsülasyon, potting ve baskılı devre elemanlarının korunması gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Petrie, 2006). Yüksek sıcaklıklarda dahi yapısal bütünlüğünü koruyabilmeleri, bu malzemeleri elektronik bileşenlerin uzun süreli güvenilirliği açısından kritik hale getirmektedir.

Havacılık ve uzay uygulamalarında ise aromatik amin bazlı epoksi sistemler, yüksek rijitlik, boyutsal kararlılık ve termal dayanım

[Buraya yazın]

gerektiren yapısal kompozitlerde tercih edilmektedir. Özellikle karbon fiber takviyeli kompozitlerde, aromatik aminlerin sağladığı yüksek cam geçiş sıcaklığı (T_g) ve ısı deformasyon sıcaklığı (HDT) sayesinde servis koşullarında mekanik performans kaybı minimuma indirilmektedir (Wang et al., 2023).

Kompozit malzemeler alanında aromatik amin sertleştiriciler, yüksek lif–matris aderansı, kimyasal dayanım ve çözücü direnci sayesinde kimyasal tanklar, boru sistemleri ve yapısal bileşenler gibi agresif ortamlara maruz kalan uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu özellikler, malzemelerin uzun süreli kullanımda dahi yapısal bütünlüğünü korumasını sağlamak ve aromatik aminleri çözücülere karşı yüksek direnç gerektiren sistemler için uygun kürlleme ajanları haline getirmektedir (May & Tanaka, 2018; Pascault & Williams, 2009).

Latent Kürlleme Ajanları

Latent kürlleme sistemlerinde kullanılan sertleştirici veya katalizörler, epoksi reçine matrisi içerisinde başlangıçta kimyasal olarak pasif veya düşük aktif bir durumda bulunur. Kürlleme reaksiyonu, genellikle ısı etkisiyle bu bileşiklerin aktif hâle gelmesi sonucunda başlar. Bu bağlamda bor triflorür–amin kompleksleri, epoksi kaplamalarda yaygın olarak kullanılan tipik latent kürlleme ajanları arasında yer almaktadır. BF₃ bileşiğinin amin ile komplekslenmesi, Lewis asidinin oda sıcaklığındaki aşırı reaktivitesini baskılamak ve böylece sistemin kontrollü bir şekilde depolanmasına ve işlenmesine imkân tanımaktadır (Petrie, 2006).

Sıcaklığın artırılmasıyla birlikte amin–BF₃ kompleksinin ayrışması gerçekleşmekte ve serbest hâle geçen BF₃, epoksi halkalarının katyonik polimerizasyonunu başlatmaktadır. Bu mekanizma sayesinde kürlleme reaksiyonu, önceden belirlenmiş sıcaklık

[Buraya yazın]

aralığında ani ve etkin bir şekilde ilerlemektedir. Bu özellik, özellikle elektriksel yalıtım laminatları ve kompozit malzemelerin üretiminde, homojen ağ yapısının elde edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Wicks et al., 2007).

Latent kürleme sistemlerinin bir diğer önemli avantajı, kürlenmiş epoksi ağ yapısının yüksek termal stabilite sergilemesidir. BF_3 -amin kompleksleri ile kürlenen epoksi sistemlerde elde edilen yüksek cam geçiş sıcaklığı (T_g) ve ısı deformasyon sıcaklığı (HDT), bu kürleme yaklaşımının yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte, katyonik mekanizma ile kürlenen epoksi sistemlerin kimyasal dirençlerinin, amin veya anhidrit esaslı sistemlere kıyasla görece daha sınırlı olabileceği literatürde bildirilmektedir (May, 1988; Pascault & Williams, 2010).

Poliamid Sertleştiriciler

İki bileşenli, oda sıcaklığında kürlenen epoksi kaplamalar için en yaygın amin türevi poliamidlerdir. Poliamidlerin yanı sıra, amidoaminler, alifatik aminler ve epoksi – amin adüktleri de kullanılır.

Poliamid ile sertleştirilen epoksi kaplamalar, nemli veya yüzey hazırlığı yetersiz tabakalara karşı güçlü yapışma özelliği ve önemli ölçüde korozyon direnci sağlar. Epoksi reçinelerde olduğu gibi, poliamidler de çeşitli moleküler ağırlıklara sahip oligomer karışımlarından oluşur. Bu nedenle, farklı poliamid türleri; viskozite, amin eşdeğer ağırlığı ve reaktivite açısından belirgin çeşitlilik gösterir. Poliamid esaslı kür sistemleri, poliamin adüktlerine kıyasla yaşlanma koşullarında genellikle daha iyi esneklik ve darbe dayanımı sergiler. Her ne kadar solvent ve asit direnci, diğer amin bazlı sertleştiriciler kadar yüksek olmasa da, poliamidler çoğu [Buraya yazın]

endüstriyel uygulamada yeterli kimyasal dayanım sunar ve maliyet açısından ekonomik bir alternatif oluşturur.

Sikloalifatik Amin ve Ketimin Sertleştiriciler

Epoksi kaplamalarda kullanılan sikloalifatik aminler, mekanik dayanımı yüksek ve kontrollü reaktiviteye sahip özel amin türleridir. Tipik örnekler arasında isophorone diamine, bis(p-aminocyclohexyl) methane, endüstride PACM olarak bilinir ve 1,2-diaminocyclohexanen (DACH) yer alır. Bu aminler, düşük moleküler ağırlıklı epoksi reçineleri ile doğrudan reaksiyona girerek kaplamayı kürleyebilirler. Bunun yanı sıra, sikloalifatik aminler ketonlarla reaksiyona sokularak ketiminler oluşturabilir; ketiminler, su ile hidroliz olduklarında tekrar aktif poliamin hâline dönüşür ve epoksi reçinelerle reaksiyona girerek kürlenmeyi sağlar. Bu mekanizma, aminlerin uçuculuğunu düşürür, kontrollü sertleşme davranışı sağlar ve uygulama sırasında güvenliği artırır. Ketimin bazlı sistemler, özellikle oda sıcaklığında kürlenen kaplamalarda, hem kontrollü reaktivite hem de uzun süreli dayanıklılık açısından avantajlıdır.

Hibrit Epoksi-Polyester Toz Kaplamalar

Epoksi reçineler, hibrit toz kaplamalar üretmek amacıyla asit fonksiyonlu polyesterlerle formüle edilir. Bu sistemlerde, polyesterin uç karboksil grupları epoksi gruplarıyla reaksiyona girerek fırınlama sırasında çapraz bağlı bir polimer matriks oluşturur. Epoksi ve polyester oranı genellikle %30–70 ile %50–50 arasında değişir; bu oran, kaplamanın mekanik ve kimyasal özelliklerini belirleyen önemli bir parametredir. Toz kaplamalarda kullanılan ana kürleyici disiandiamiddir; yüksek sıcaklıkta epoksi grupları ile reaksiyona girerek kaplamayı sertleştirir. Reaksiyon hızı genellikle imidazol veya epoksi-imidazol adüktleri gibi katalizörler ile artırılır. İmidazol tipi katalizörler tek başına da kullanılabilir ve [Buraya yazın]

epoksi gruplarının homopolimerizasyonunu başlatarak ek çapraz bağ oluşumuna katkı sağlar. Ayrıca, fenolik fonksiyonlu polietilerler ve fenolik rezoller gibi özel kürleme maddeleri, yüksek performans ve kimyasal direnç gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Bu kombinasyon, epoksi toz kaplamaların mekanik dayanım, kimyasal direnç ve uzun süreli stabilite açısından üstün özellikler sergilemesini sağlar.

EPOKSI REÇİNELERİN KULLANIM ALANLARI

Epoksi reçineler, esnek, kimyasal maddelere karşı dirençli ve çeşitlilikleriyle hem sivil hem askeri alanda büyük bir kullanım alanına sahiptirler.

Epoksi reçinelerin en çok tercih edildiği alan yüzey kaplamasıdır. Ek olarak, kalıplama ve döküm, yapıştırıcı olarak, matris malzemesi olarak ve mobilya sektöründe tercih edilirler.

Epoksi reçineler, farklı uygulama gereksinimlerine göre toz kaplamalar, su bazlı kaplamalar, yüksek katı maddeli çözücü bazlı kaplamalar ve elektrokaplamalar gibi çeşitli kaplama sistemlerinin formülasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kaplama türleri, kaplamalarda epoksi reçine kullanımının dörtte üçünden fazlasını oluşturmaktadır.

Toz kaplamalar, kullanım amaçlarına göre dekoratif ve fonksiyonel olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Fonksiyonel toz kaplamalar, genellikle 3 mm'den daha kalın film tabakaları oluşturacak şekilde uygulanır; bu şekilde yüksek mekanik ve çevresel dayanım göstermeleri hedeflenir. Bu tür kaplamalar, boru yüzeyleri, elektronik cihaz gövdeleri ve inşaat demirleri gibi zorlayıcı koşullara maruz kalan yüzeylerde yaygın olarak kullanılır.

[Buraya yazın]

Su bazlı sistemlerde su, çözücü olarak organik bileşiklerin yerini alır; bu da hem uygulama sırasında toksik buhar oluşumunu azaltır hem de sürdürülebilir üretim hedefleriyle uyum sağlar. Su bazlı epoksi kaplamalar, özellikle beton zeminlerde, metal yapı elemanlarında, depolama tanklarında ve gıda endüstrisine yönelik ambalaj kaplamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, bira ve meşrubat kutularının iç yüzeylerinde kullanılan su bazlı epoksi astarlar, solvent kalıntısı bırakmadıkları ve gıda temasına uygun formülasyonlara sahip oldukları için tercih edilmektedir. Koku yapmaması ve kolay temizlenmesi gibi avantajları sayesinde iç mekan duvar boyaı veya dekoratif amaçlı epoksi sistemlerinde de tercih edilir.

Yüksek katı içeriğine sahip çözücü bazlı kaplamaların (High solids solvent-borne coating) büyük bir kısmını endüstriyel bakım ve deniz boyaı oluşturur. Gemi gövdeleri, boru hatları, depolama tankları, rafineri ekipmanları ve çelik konstrüksiyon elemanları bu uygulamalara örnek olarak verilebilir.

Epoksi reçine elektrokaplama kaplamaları, anyonik veya katyonik epoksi reçine polimerlerinden formüle edilmiş su bazlı kaplamalardır. Özellikle epoksi bazlı katodik elektrokaplama (Cathodic Electrodeposition – CED) sistemleri, otomotiv astar kaplamalarında baskın bir konuma sahiptir ve bu uygulama grubunda tüm elektrokaplama kaplamalarının yaklaşık %70'ini oluşturur. Günümüzde Amerika, Avrupa ve Japonya'da üretilen neredeyse tüm otomobiller, epoksi bazlı CED astar ile kaplanmaktadır.

CED sistemleri, özellikle üstün korozyon direnci, yüksek yapışma gücü ve karmaşık geometrilere sahip yüzeylerde bile homojen film oluşturabilme özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Sprey veya fırça gibi geleneksel uygulama yöntemlerinin erişemediği [Buraya yazın]

bölgelerde bile etkin koruma sağlayarak otomotiv sektöründe standart bir yüzey hazırlama yöntemi haline gelmiştir

EPOKSI REÇİNELERDE KULLANILAN DOLGU VE KATKILAR

Epoksi reçineler, üstün mekanik dayanımları ve kimyasal dirençleriyle dikkat çekmelerine rağmen, modifiye edilmemiş halleri genellikle yüksek viskozite, yüksek maliyet ve belirli uygulamalar için fazla sertlik gibi bazı dezavantajlara sahiptir. Bu nedenlerle reçinelerin özellikleri, seyrelticiler, dolgu maddeleri ve esnekleştiriciler eklenerek iyileştirilir.

Seyrelticiler, reçinenin viskozitesini düşürmek ve uygulama kolaylığı sağlamak için kullanılır. Günümüzde çevresel etkiler nedeniyle hidrokarbon çözücüler tercih edilmez; bunun yerine fenil glisidil eter, butil glisidil eter ve oktilen oksit gibi reaktif seyrelticiler kullanılmaktadır. Ancak bu maddeler, kürleşmeyi geciktirebilir ve bazıları cilt tahrişine neden olabileceğinden dikkatli kullanılmalıdır. Bu nedenle genellikle 10 phr'den fazla oranda kullanılmazlar (May & Tanaka, 2018).

Dolgu maddeleri, maliyeti düşürmenin yanı sıra kürleşme büzülmesini azaltmak, termal genişleme katsayısını düşürmek, ekzotermik reaksiyonu hafifletmek ve ısıl iletkenliği artırmak amacıyla eklenir. Örneğin, kalıplama ve döküm uygulamalarında iç kısımlarda kum tercih edilirken, yüzey tabakalarında metal tozları, öğütülmüş cam elyafı veya metal oksit dolgular kullanılabilir (Pascault & Williams, 2010).

Epoksi reçinelerin esnekliğini artırmak için, epoksi ağıyla kimyasal olarak etkileşime girebilen veya giremeyen polimerik esnekleştiriciler, poliaminler ve poligliserol diepoksiler gibi bileşenler

[Buraya yazın]

eklenir. Düşük molekül ağırlıklı poliamidler, yalnızca esnekleştirici olarak değil, aynı zamanda tahriş edici olmayan amin sertleştiriciler olarak da kullanılabilir (Riew & Kinloch, 1993). poliamidler, viskoz yapıları nedeniyle genellikle yüksek sıcaklıklarda veya çözelti formunda uygulanır. Bu yüksek sıcaklık koşulları, kürleşme sürecinin etkin şekilde gerçekleşmesi için gereklidir. Ancak, poliamid modifikasyonu yapılan epoksi sistemlerinde üretilen laminatların kimyasal dirençleri, modifiye edilmemiş epoksilere kıyasla daha düşük olma eğilimindedir (May & Tanaka, 2018). Bu durum, poliamidlerin endüstriyel kullanımlarını sınırlandırmış ve özellikle kaplama ve yapıştırıcı formülasyonlarında sınırlı uygulama alanı bulmalarına yol açmıştır.

Geniş kullanım potansiyeline sahip bir diğer esnekleştirici sınıf ise polisülfürlerdir. Polisülfürler, yaklaşık 1 Pa·s viskoziteye sahip, nispeten düşük yoğunluklu sıvılar olarak epoksi reçinelerde esnekleştirici görevinde kullanılırlar. Bununla birlikte, düşük viskoziteleri nedeniyle reaktif seyreltici olarak da işlev görebilir ve karışımın akışkanlığını artırarak işlenebilirliğini kolaylaştırırlar. Epoksi reçinelerle herhangi bir oranda karıştırılabilirler ve yalnızca epoksi kullanılarak yumuşak kauçuklardan sert reçinelere kadar farklı ürünler elde edilebilir. Polisülfür miktarı arttıkça dielektrik sabiti yükselirken, hacimsel elektrik direnci azalır. Bununla birlikte, çekme dayanımı ve HDT değerlerinde düşüş gözlenirken, esneklik ve darbe dayanımı artar (May & Tanaka, 2018).

Polisülfürler, epoksi grupları ile reaksiyona girerek zincir uzamasına neden olurlar, ancak çapraz bağ oluşumu sağlamazlar. Bu nedenle, reçine sisteminde yeterli sertlik elde edebilmek için normal sertleştirici miktarının korunması gerekir (Pascault & Williams, 2010). Polisülfür modifikasyonu, epoksi reçinelerin darbelere karşı tokluğunu ve düşük sıcaklık dayanımını artırırken, kimyasal dirençte

[Buraya yazın]

hafif bir azalmaya yol açabilir. Bu nedenle, uygulama koşulları dikkatle değerlendirilmelidir (Riew & Kinloch, 1993).

Amin bazlı esnekleştiriciler, dietilentriamin gibi sertleştiricilerin siyanoetilasyonu ile üretilir ve yalnızca iki reaktif hidrojen içerir; böylece difonksiyonel özellik kazanırlar. Amin sertleştiricinin kademeli olarak düşük viskoziteli bir esnekleştirici ile yer değiştirmesi, karışımın viskozitesini düşürür, işlenebilirlik süresini (pot life) uzatır ve kürleşmiş sistemin HDT değerini azaltır. Sertleştirici ve esnekleştirici yaklaşık eşit oranlarda kullanıldığında darbe dayanımı artar. Mevcut sertleştirici miktarına ek olarak esnekleştirici kullanıldığında ise çok esnek ürünler elde edilebilir. Amin bazlı esnekleştiriciler, bazı açılardan sıvı polisüfürlere benzer etki gösterse de, sistemin reaktivitesini azaltmaları ve farklı oda sıcaklığı sertleştiricileriyle uyumlu olmaları nedeniyle ayrılırlar. Ayrıca düşük koku seviyeleri ile uygulama avantajlarına sahiptirler.

EPOKSİ KAPLAMALARDA KULLANILAN TEST VE ANALİZLER

Epoksi esaslı kaplamaların performanslarının değerlendirilmesinde; yapışma, mekanik dayanım, kimyasal direnç, termal stabilite ve yüzey özelliklerini belirlemeye yönelik çok çeşitli test ve analiz yöntemleri kullanılmaktadır.

Mekanik Testler

Sertlik, aşınma ve darbe dayanımı gibi özellikler, epoksi esaslı kaplamaların çizilme, sürtünme ve mekanik zorlanmalar karşısındaki davranışını tanımlayan temel mekanik parametrelerdir.

[Buraya yazın]

Bu özellikler, kaplamanın kullanım sırasında maruz kalacağı fiziksel etkiler altında bütünlüğünü koruyabilme yeteneği hakkında önemli bilgiler sunar.

Mekanik testler, epoksi kaplamanın uygulandığı yüzeye tutunma kabiliyeti ile dış etkilere karşı gösterdiği direnci ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilmektedir. Kaplamanın alt tabaka ile oluşturduğu bağın kalitesi, servis ömrünü doğrudan etkileyen en önemli parametrelerden biridir.

Epoksi kaplamaların alt yüzeye tutunma performansının belirlenmesi amacıyla kafes kesme (cross-cut) ve çekme koparma (pull-off) testleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Kafes kesme testi, ASTM D3359 standardına uygun olarak uygulanmakta olup, kaplama yüzeyine oluşturulan kesitlerin bant yardımıyla soyulması sonucu adhezyon kalitesi görsel olarak değerlendirilmektedir. Çekme koparma testi ise ASTM D4541 standardına göre gerçekleştirilmekte ve kaplamanın yüzeyden ayrılması için gerekli kuvvet ölçülerek nicel adhezyon dayanımı belirlenmektedir. Kalem sertliği testi (ASTM D3363), kaplama yüzeyinin çizilmeye karşı direncini belirlemek amacıyla uygulanırken, Shore D sertlik testi (ASTM D2240) kaplamanın yüzey sertliğini ölçmek için kullanılmaktadır.

Termal Analizler

Epoksi esaslı kaplamaların termal özellikleri, özellikle yüksek sıcaklık koşullarına maruz kalan uygulamalarda ve dış ortam etkilerinin söz konusu olduğu sistemlerde kritik bir rol oynamaktadır. Kaplamanın sıcaklık değişimleri karşısındaki davranışı, polimer ağ yapısının kararlılığı ve kürlenme derecesi ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle termal analizler, epoksi kaplamaların hem üretim sürecinde hem de servis koşullarında

[Buraya yazın]

gösterdiği performansın değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) analizi, epoksi kaplamaların cam geçiş sıcaklığının (T_g) belirlenmesi ve kurlenme reaksiyonlarının incelenmesi açısından temel bir yöntemdir. T_g değeri, kaplamanın mekanik özelliklerinde sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen değişimleri tanımlayan önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir. Termogravimetrik Analiz (TGA) ise kaplamanın artan sıcaklık altında sergilediği kütle kaybı davranışını inceleyerek, termal bozunma sıcaklıklarının ve genel termal stabilitenin belirlenmesine olanak sağlamaktadır.

Buna ek olarak Dinamik Mekanik Analiz (DMA) yöntemi, epoksi kaplamaların sıcaklığa bağlı viskoelastik davranışını, depolama modülü (E'), kayıp modülü (E'') ve tan δ parametreleri üzerinden ayrıntılı biçimde değerlendirmektedir. DMA sonuçları, kaplamanın elastik ve sönümleme özellikleri hakkında derinlemesine bilgi sunarak, termal ve mekanik davranışların birlikte yorumlanmasını mümkün kılmaktadır.

Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi

hacimsel özdirenç (volume resistivity), yüzeysel özdirenç (surface resistivity), dielektrik dayanım ve dielektrik sabiti (ϵ) gibi temel parametreler; kaplamaların elektriksel davranışlarının belirlenmesinde, kaplamanın elektrik alan ve akım etkileri altındaki güvenilirliğini ve uzun süreli kullanım performansını doğrudan tanımlamaktadır.

Hacimsel özdirenç, epoksi kaplamanın malzeme hacmi boyunca elektrik akımına karşı gösterdiği direnci ifade ederken; yüzeysel özdirenç, kaplama yüzeyi üzerinden gerçekleşebilecek kaçak akımların değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Dielektrik

[Buraya yazın]

dayanım, kaplamanın belirli bir elektrik alan şiddetine kadar elektriksel delinmeye karşı gösterebildiği maksimum direnci tanımlayan kritik bir parametredir. Dielektrik sabiti (ϵ) ise epoksi kaplamanın elektrik alan altındaki kutuplaşma davranışını ve enerji depolama kapasitesini yansıtmaktadır.

Bu elektriksel parametrelerin birlikte değerlendirilmesi, epoksi esaslı kaplamaların farklı ortam koşullarında ve elektriksel yükler altında yalıtım güvenilirliğinin öngörülmesine ve uygulama alanına uygunluklarının belirlenmesine yardımcı olmaktadır.

Kimyasal ve Korozyon Dayanaklılığının Değerlendirilmesi

Epoksi esaslı kaplamalar, agresif çevresel koşullara karşı sağladıkları yüksek bariyer özellikleri sayesinde kimyasal ve korozyon dayanımı gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kaplamanın kimyasal ortamlara karşı direnci; polimer ağ yapısının yoğunluğu, kurlenme derecesi ve kaplama–alt tabaka ara yüzeyinin bütünlüğü ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle kimyasal ve korozyon dayanımının değerlendirilmesi, epoksi kaplamaların uzun süreli performansının öngörülmesi açısından kritik önem taşımaktadır.

Kimyasal dayanım testleri, epoksi kaplamaların asidik, bazik ve çözücü ortamlar karşısındaki stabilitesini belirlemek amacıyla genellikle belirli sürelerle kimyasal ortamlara daldırma yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Testler sonucunda kaplamada gözlenen kimyasal etkileşimlere bağlı fiziksel ve morfolojik değişimler (renk değişimi, şişme, çatlama ve yüzey bozulmaları) üzerinden değerlendirilmektedir.

Epoksi kaplamaların kimyasal yapısının ve kurlenme mekanizmasının doğrulanmasında Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ve Raman spektroskopisi yaygın olarak [Buraya yazın]

kullanılmaktadır. Bu teknikler, epoksi halkasının açılması, amin veya anhidrit bazlı kürlenme reaksiyonlarının gerçekleşmesi ve fonksiyonel gruplardaki değişimlerin izlenmesine olanak sağlayarak kaplamanın kimyasal dayanımını belirleyen yapı ozellik ilişkilerinin anlaşılmasına katkı sunmaktadır.

Korozyon dayanımının değerlendirilmesinde ise epoksi kaplamaların metal yüzey üzerindeki bariyer performansı esas alınmaktadır. Tuz püskürtme (salt spray) testi, kaplamanın klorür içeren nemli ortamlara karşı koruyucu etkinliğini hızlandırılmış koşullarda incelerken; Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) yöntemi, kaplamanın zamanla meydana gelen bozulma davranışını ve elektrolit geçişine karşı direncini hassas biçimde izlemeye olanak tanımaktadır.

Fiziksel ve Morfolojik  zelliklerin Değerlendirilmesi

Epoksi esaslı kaplamaların yapısal bütünlüğünün ve yüzey özelliklerinin değerlendirilmesinde fiziksel ve morfolojik karakterizasyon yöntemleri önemli bir yer tutmaktadır. Bu kapsamda, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kaplamanın yüzey ve kesit morfolojisini incelemek için yaygın olarak kullanılmakta; kaplama alt tabaka ara yüzeyi, kalınlık dağılımı ve mikro ölçekteki yapısal kusurların tespitine olanak sağlamaktadır. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ise yüzey topografyasını nanometre ölçeğinde analiz ederek yüzey pürüzlülüğü ve faz dağılımı hakkında ayrıntılı bilgiler sunmaktadır.

Fiziksel karakterizasyon kapsamında kaplama kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve temas açısı ölçümleri sıklıkla uygulanmaktadır. Kaplama kalınlığı, kaplamanın bariyer performansı ile doğrudan ilişkiliyken; yüzey pürüzlülüğü mekanik dayanım ve aşınma davranışı üzerinde etkili olmaktadır. Temas açısı ölçümleri ise

[Buraya yazın]

kaplamanın hidrofilik veya hidrofobik karakterini belirleyerek sıvı etkileşimleri ve korozyon direnci hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır.

Bu yöntemler, mekanik, termal ve kimyasal karakterizasyon testleriyle birlikte değerlendirildiğinde, epoksi esaslı kaplamaların yapı–özellik–performans ilişkilerinin bütüncül olarak yorumlanmasına olanak tanımaktadır.

SONUÇ

Son yıllarda epoksi esaslı kaplamalara yönelik araştırmalar, bu sistemlerin yalnızca yüksek mekanik dayanım ve kimyasal direnç sunan geleneksel koruyucu kaplamalar olmanın ötesine geçtiğini ortaya koymaktadır. Güncel çalışmalar, epoksi kaplamaların performans sınırlarının; nanodolgu takviyesi, hibrit bağlayıcı sistemler ve çevresel açıdan daha sürdürülebilir formülasyon yaklaşımları ile genişletilebildiğini göstermektedir. Özellikle grafen türevleri, metal oksit nanoparçacıkları ve hibrit dolgu sistemlerinin epoksi matrisine entegrasyonu ile kaplama filminin bariyer özelliğinin güçlendirildiği, buna bağlı olarak korozyon direncinin ve uzun dönem stabilitenin önemli ölçüde arttığı bildirilmektedir (Mittal, 2015; Ghaffari et al., 2021).

Öne çıkan bir diğer önemli eğilim ise epoksi kaplamalarda aktif ve çok işlevli koruma mekanizmalarının geliştirilmesidir. İnhibitör yüklü nanoyapılar, kendini onarabilen sistemler ve çok katmanlı kaplama mimarileri sayesinde, epoksi kaplamaların yalnızca pasif bir fiziksel bariyer olarak değil, aynı zamanda çevresel etkiler karşısında tepki verebilen fonksiyonel sistemler olarak tasarlanabildiği görülmektedir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi ve hızlandırılmış korozyon testleri ile desteklenen bu çalışmalar, kaplamaların zamanla bozunma davranışlarının daha

[Buraya yazın]

ayrıntılı biçimde anlaşılmasını sağlamış ve performans optimizasyonuna yönelik önemli veriler sunmuştur (Pascault & Williams, 2010; Ghaffari et al., 2021).

epoksi esaslı kaplamaların çok yönlü performans gereksinimlerini karşılayabilen, gelişime açık ve stratejik öneme sahip malzeme sistemleri olduğunu ortaya koymaktadır. Bağlayıcı kimyası, kürleme mekanizması ve fonksiyonel katkıların birlikte ele alındığı bütüncül yaklaşımlar, epoksi kaplamaların gelecekte daha akıllı, sürdürülebilir ve yüksek performanslı uygulamalara uyarlanmasının önünü açmaktadır. Bu bağlamda epoksi kaplamalar, hem temel bilimsel araştırmalar hem de ileri mühendislik uygulamaları açısından önemini korumaya devam edecektir.

Kaynakça

Allen, N. S. (1992). *Fundamentals of polymer degradation and stabilization*. Dordrecht: Springer.

Białkowska, A. (2023). Hybrid epoxy nanocomposites: Improvement in mechanical properties with ternary systems. *Polymers*.

Derahman, A. &. (2021). Mechanical properties of bio-epoxy resins and synthetic epoxy resins blends. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1176(1), 012005.

Ghaffari, M., Mirabedini, S. M., & Attar, M. M. (2021). Recent advances in epoxy-based nanocomposite coatings for

[Buraya yazın]

- corrosion protection. *Progress in Organic Coatings*, 151, 106067.
- Goodman, S. H. (1998). *Handbook of thermoset plastics*. Norwich: William Andrew Publishing.
- Hepburn, C. (1992). *Polyurethane elastomers*. London: Elsevier Applied Science.
- Lambourne, R. &. (1999). *Paint and surface coatings: Theory and practice*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Mabrouk, S. S., & Fayek, S. A. (2017). Epoxy coatings for corrosion protection: A review. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 198-212.
- Mallick, P. K. (2007). *Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design*. Boca Raton: CRC Press.
- May, C. A. (1988). *Epoxy resins: Chemistry and technology*. New York: Marcel Dekker.
- May, C. A. (2018). *Epoxy resins: Chemistry and technology (2nd ed.)*. CRC Press.
- Menard, K. P. (2008). *Dynamic mechanical analysis: A practical introduction*. Boca Raton: CRC Press.
- Mittal, V. (2015). *Polymer nanocomposites for corrosion protection*. Amsterdam: Elsevier.
- Oldring, P. K. (2004). *Resins for surface coatings*. London: Marcel Dekker.
- Pascault, J.-P., & Williams, R. J. (2010). *Epoxy polymers: New materials and innovations*. Weinheim: Wiley-VCH.

[Buraya yazın]

- Patel, R. V. (2023). Physical, mechanical, and thermal properties of natural fiber-reinforced epoxy composites for construction and automotive applications. *Applied Sciences*, 13(5126), 1–28.
- Peters, S. T. (2011). *Handbook of composites*. New York: Springer.
- Petrie, E. M. (2006). *Epoxy adhesive formulations*. New York: McGraw-Hill.
- Randall, D. &. (2002). *The polyurethanes book*. Chichester: Wiley.
- Sinko, J. (2021). Progress in organic coatings for corrosion protection of metal. *Progress in Organic Coatings*, 267-282.
- Wicks, Z. W., Jones, F. N., Pappas, S. P., & Wicks, D. A. (2007). *Organic coatings: Science and technology*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.
- Yürekli, Ş. (1996). *Reçine ve boya teknolojileri*. İstanbul.
- Zhang, T. C. (2025). Enhanced mechanical properties of epoxy composites reinforced with silane-modified Al₂O₃ nanoparticles. *Coatings*, 9(5), 252.
- Zheludkevich, M. L., & al., e. (2005). Corrosion protective coatings containing conducting polymers. *Corrosion Science*, 3368-3383.
- Zheng, T. (2020). The curing kinetics and mechanical properties of epoxy resins: Effects of modifiers and processing parameters. *Journal of Polymer Science*.

Zhou, Y., Liu, W., Feng, Y., & Liu, Z. (2025). Effect of the Structure of Aromatic Diamine on High-Performance Epoxy Resins. *Polymers*.

BÖLÜM 4 MAGNEZYUM METALİ VE YAPIŞTIRMA İLE BİRLEŞTİRME TEKNOLOJİSİ

Özlem YAVAŞ^{*1}, Gamze TERBAŞ^{*2}, Dr. Öğr. Ü. Güven YARKADAŞ^{*+3}, Doç. Dr.
Hüseyin Şevik⁺⁴

^{*}Mersin Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Mersin

⁺Termox Metalurji Ltd. Şti.

ORCID:¹0009-0004-5214-0440

²0009-0006-5186-9517

³0000-0002-4592-2768

⁴0000-0002-2065-412X

1. Giriş

Hafif malzemeler, sürdürülebilirlik ve verimli enerji kullanımı talepleri tarafından yönlendirilen endüstriyel gelişimin odak noktası olmuştur. Magnezyum alaşımları hafif ve enerji tasarruflu bir malzeme olarak ortaya çıkmaktadır ve özellikle ulaşım ve otomotiv üretim sektörlerinde ağırlık azaltma uygulamaları için muazzam bir potansiyele sahiptir. Magnezyum alaşımlarının daha geniş uygulamaları, zayıf korozyon direnci ve yetersiz yüksek sıcaklık dayanımı gibi dezavantajları nedeniyle sınırlıdır (Kim ve ark., 2010; Mordike & Ebert, 2001; Önür ve ark., 2020; Germen ve ark., 2015; M. Pekguleryuz ve ark., 2013; Kulwinder Singh & Mittal, 2018).

Magnezyum alaşımlarının çeşitli alanlarda geniş çapta uygulanabilmesi için sürekli iyileştirme çalışmaları (farklı döküm yöntemleri ile üretim, ısıtma işlemi gibi) yapıldığı literatürde gözlenmektedir (Dobes ve ark. 2020; Kim ve ark., 2010; Germen ve ark., 2015; Singh ve ark., 2018; Önür ve ark., 2020; Zhang ve ark. 2010). Son yıllar da ise endüstriye kazandırılmış magnezyum alaşımlarının spesifik kullanımları için temel gereksinimleri karşılamasını sağlayacak birleştirme teknikleri ve yüksek performanslı kaynak teknolojileri gibi kaynaklanabilir çalışmalara da odaklanmıştır (Kulwant Singh ve ark., 2018; Yang ve ark., 2024; Junlei Zhang ve ark., 2025).

Bu bölümde, magnezyum alaşımlarının yapıştırıcı ile yapıştırılmasına ilişkin araştırmalar ve ilerlemeler ile yapıştırıcı ile yapıştırmanın temel süreçleri ile ilgili genel bilgiler verilecektir. Ayrıca, magnezyum metalinin (korozyon hassasiyeti nedeniyle) diğer metallere yapıştırıcı ile yapıştırılmasında yüzey işlemi çok önem arz etmektedir. Bu nedenle yüzey özellikleri de bu bölümde ele alınacaktır.

2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ YAPIŞTIRMA İLE BİRLEŞTİRİLMESİ

2.1.Genel Bakış

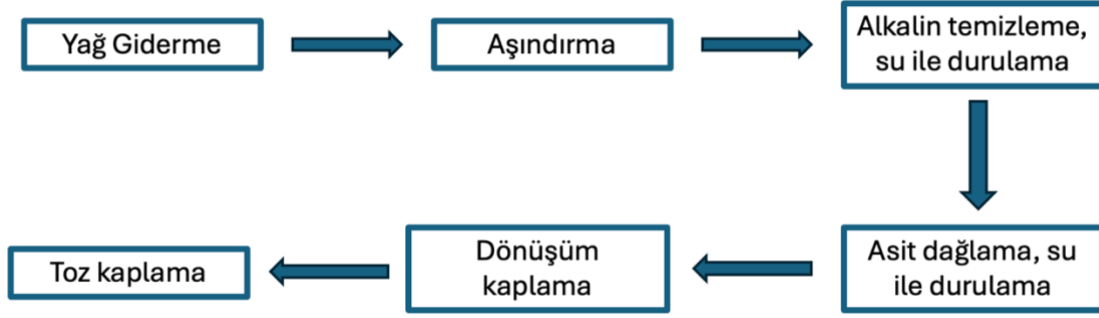
Yapısal yapıştırıcı bağlama ilk olarak 1950'li yıllarda havacılık endüstrisinde kullanılmaya başlanmış ve yapıştırma teknolojisi ile farklı malzemelerin birleştirilebilir olduğunun görülmesiyle yapısal hafiflik, otomotiv, havacılık, demiryolu ve denizcilik endüstrilerinde enerji tasarrufu ve emisyon azaltımı açısından özellikle önem kazanmıştır. Bu endüstrilerde yapıştırıcı ile yapıştırılmış yapıların yaygın olarak kullanılması, bir dizi işlevsel bileşeni daha verimli bir şekilde birbirine bağlamayı mümkün kılar. Kaynak, perçinleme ve cıvatalama gibi geleneksel bağlantı yöntemleriyle karşılaştırıldığında, yapıştırıcı ile yapıştırılmış bağlantı bazı ayırt edici özelliklere sahiptir (Carrere ve ark. 2015; Sun ve ark. 2022). Bunlar;

- Yapıştırıcı ile yapıştırma işlemi ve birleştirilen alt tabakaları zarar vermeden benzer veya farklı malzemelerden alt tabakaları etkili bir şekilde birleştirmeyi sağlar, bu da özellikle hafiflik amacıyla kompozit ve ince cidarlı yapılar için faydalıdır.
- Yapıştırıcı malzemenin elastik modülü (2–7 GPa) genellikle yapıştırılacak bileşenlerin elastik modülünden (20–200 GPa) çok daha düşüktür. Bu durum olumsuz mekanik özellik eldesine neden olur
- Yapıştırıcı ile yapıştırma işlemi ince cidarlı yapılarda uygulandığı zaman, eğme deformasyonları nedeniyle sıyırma gerilimi daha yüksek olabilir.
- Kesme ve sıyırma gerilmeleri, ek yerlerinin çatlamaya eğilimli olduğu yapıştırma kenarlarında yoğunlaşabilir.

Mg alaşımı ve diğerk metallerin kaynak teknolojisi üzerine yapılan araştırmalar geniş uygulama olanaklarına sahiptir. Bununla birlikte, Mg alaşımlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri, kaynağına zorluklar getirir ve ana problemler aşağıdaki gibi özetlenebilir(Liu et al., 2023; Liu, 2010; Li ve ark. 2013);

- **Oksidasyon ve buharlaşma:** Mg alaşımının kaynama noktası yaklaşık 1100°C'dir. Daha yüksek sıcaklıklarda buharlaşma ile metal kaybı meydana gelir, ve ısı kaynağıının etkisiyle rahatlıkla oksijen ve havadaki nitrojen ile reaksiyona girer ve bu durumda bağılantı noktasında inklüzyonlar oluşturmasına neden olur.
- **Kaba daneler:** Saf Mg ve alaşımlarının düşük ergime sıcaklığı ve yüksek ısı iletkenliğı nedeniyle, nispeten daha yüksek güç girişine sahip bir ısı kaynağı gereklidir, bu da kolayca aşır ısınmaya neden olur, kaynak bölgesinde ve kaynak bölgesine yakın yerlerde kaba daneler oluşturur, bu da kaynak özelliklerini etkiler.
- **Termal gerilme ve atlak:** Saf magnezyum ve alaşımlarının genleşme katsayısı çok büyük olduğından dolayı kaynak işleminde deformasyon ve kaynaktan dolayı kalıntı gerilme kolayca oluşur. Ayrıca bazı alaşım elementleri ile düşük ergime sıcaklığına sahip tektikler oluşabilir ve geniş kırılğan alana sahip termal çatlaklar meydana gelebilir.
- **Kaynaklarda gözenekler (poroziteler):** Magnezyum alaşım kaynağı sürecinde H₂ üretmek kolaydır. Erimiş havuzun hızlı soğıumasından kaynaklı olarak H₂ zamanında kaçamaması gözenekler oluşumuna neden olur. Bu gözeneklerin varlığı birleşimin performansını ciddi şekilde etkiler.

Yapıştırıcılar ile birleştirme işleminde tatmin edici (evresel ve termal kararlılık gibi) bir uygulama gerçekleştirilmesi için yapıştırıcı uygulanmadan önce malzeme yüzeyi n işlemden geçirilmelidir. Yaygın olarak kullanılan yüzey işlem yöntemleri arasında yağı giderme yöntemleri, aşındırma yöntemleri ve kimyasal yöntemler bulunur ve genel ön işlem süreci şekil 2.1'de gösterilmektedir. Yağıdan arındırma ve aşındırma yöntemlerinin tümü uygulanabilir olup, kimyasal yöntem mukavemet ve uzun vadeli stabilizasyon sağılayan bağılar sağılar(Takai ve ark. 2008, Bretz ve ark. 2004).



Şekil 2.1 Yapıştırıcı uygulamadan önce genel ön işlem süreci (Bretz ve ark. 2004)

Yağ giderme yöntemi, organik bir çözücü ile bir yüzeyden yağı giderme işlemidir ve bu işlem buharla yağ giderme, püskürtme, daldırma ve ultrasonik fırçalama yöntemlerini içerir. Normal koşullar altında, temiz aseton kullanılarak magnezyum yüzeyler temiz bir fırça veya bezle fırçalanır veya silinir. Yüzeyin daha ince bir işleme tabi tutulması gerekiyorsa, aerosol sprey uygun olabilir. Bu işlemten sonra, buharla yağ giderme daha ileri işlemler için kullanılabilir ve şu anda buharla yağ giderme için trikloroetilen tercih edilmektedir. Birçok malzeme için, yüzeylerin hafifçe aşındırılması, yüksek parlaklıkta bir yapıştırıcı kullanıldığında daha iyi performans sağlayabilir; bu nedenle aşındırma yöntemleri yararlıdır. Yapıştırılacak yüzeyler uygun bir aşındırıcı bez, tel fırça veya su geçirmez aşındırıcı kağıt kullanılarak yüzey hafifçe aşındırılıp yüzey pürüzlülüğü sağlanabilir. Yüzeyin daha güçlü bir aşındırma gerektirmesi durumunda, hava veya su ile taşlanmış kum püskürtme uygun yöntemdir. Aşındırma yöntemleri uygulandıktan sonra, yüzeyin gevşek ve zayıf bağlı parçacıklardan tamamen arındırıldığından emin olmak için yumuşak bir fırça veya temiz ve kuru basınçlı hava püskürtme kullanılabilir (Liu, 2010; Bretz ve ark. 2004).

Kimyasal olarak aktif bir doğal metal olan magnezyum alaşımı, dikkatli bir yüzey işlemine ihtiyaç duyar. Magnezyum alaşımının yapıştırıcı ile yapıştırılmasında, yapıştırıcı ile metal arasındaki potansiyel reaksiyon nedeniyle arayüzde bazı yan ürünler oluşabilir ve bu da zayıf kohezif özelliklere neden olabilir. Bu nedenle, yağdan arındırma ve aşındırma işlemlerinden sonra bazı kimyasal veya anodik işlemler gereklidir ve bu işlemler, kohezif özellikleri iyileştirmek için magnezyum yüzeyinde ince inorganik kimyasal filmlerin oluşmasına neden olur. Magnezyum ve alaşımlarının aktif yapısı nedeniyle, yüzey işlemlerinde korozyon önleme dikkate alınmalıdır. Yüzey işleminin anahtarı, korozyonu önlemek için yeterli kalınlıkta kaplama uygulamaktır, ancak kaplama, yapıştırma performansını etkileyecek kadar kalın

olmamalıdır. Alkali deterjan çözeltisi (ASTM D2651) magnezyum işlemlerinde genellikle aşağıdaki şekilde kullanılır (Mayeaux ve ark. 2019, NASA; Liu, 2010):

- Yağdan arındırma işlemi yapılmalı (metal parçacıkları, yağlar vb. kirlenici maddeler yangın veya patlama tehlikesi oluşturabileceğinden dikkatli olunmalı). Detay parçalar, metallerde metil etil keton (MEK) veya izopropanol kullanılarak yağ, gres, mürekkep vb. maddelerden arındırılmalıdır. MEK ile uyumlu olmayan termoplastikler, termosetler, boyalar, kaplamalar vb. için izopropanol veya aseton kullanılabilir. İzopropanol ve aseton alt tabakayı etkiliyorsa, yağ giderici çözücüler kullanılmadan önce alt tabaka ile uyumlu olduğu doğrulanmalıdır. Yapıştırılmış montajlar için detay parçaları işlenirken silikon bazlı kesme ve şekillendirme sıvıları kullanılmamalıdır.
- 60–71 °C sıcaklıkta alkali deterjan çözeltisine (Sodyum metasilikat(%2.5) Trisodyum pirofosfat(%1.1), Sodyum hidroksit(%1.1), Nacconal(alkilbenzen sülfonik asidin sodyum tuzu) NR veya eş değeri(%0.3) ve su (%95) 10 dakika boyunca daldırın.
- İyiye durulayın
- 60 °C'yi geçmeyecek şekilde kurutun.

Yapıştırıcı bağlantının dayanıklılığı, yapıştırıcı özelliklerine, yapıştırıcıya ve bunlar arasındaki arayüze bağlıdır. Yapıştırıcı bağlantı arızası genellikle aşındırıcı ortama uzun süre maruz kaldıktan sonra arayüzlerde meydana gelir. İşlem görmemiş magnezyum alaşımlarında, yapışkan yüzeydeki oksit oluşumu genellikle uzun süreli aşındırıcı ortamda en zayıf bölgedir ve oksit, gerilim yüklendiğinde hata oluşmasına yol açar. Yapıştırıcı ile yapıştırma öncesinde bir dönüşüm kaplaması, oksidin etkisini durdurmak için uygun korozyon önleme amacıyla oksidi stabilize edebilir. Korozyondan koruma teknolojileri, atmosferik ortamda aktif olan magnezyum daha geniş uygulama alanı bulabilmesi için anahtar rol oynadığı düşünülmektedir (Mayeaux ve ark. 2019, NASA; Liu, 2010; Bretz ve ark. 2004).

Dönüşüm kaplamaları genellikle krom ve krom içermeyen olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Krom dönüşüm kaplamalarının mükemmel korozyon koruması sağladığı uzun zamandır bilinmektedir. Krom, yüzeyde “kendi kendini onaran” bir koruyucu tabaka görevi gören altı değerlikli bir kompleks oluşturur (Cavezza ve ark, 2020; Bretz ve ark. 2004). Saf magnezyum metali üzerinde oluşan küçük çizikler, aşındırıcı bir ortama maruz kaldıklarında aşırı korozyon uğradıkları literatürde belirtilmiştir. Krom dönüşüm yöntemi, sıcak kromik asidi aşağıdaki şekilde kullanır: (Liu 2010; Bretz ve ark. 2004).

- Aşağıdaki çözelti içinde 71–87,8 °C sıcaklıkta 10 dakika boyunca daldırılır:
Kromik asit (CrO₃) (1 pbw), Su (4 pbw)
- İyice durulanır
- 60 °C üzerinde olmayan bir sıcaklıkta kurutulur.

Bu yöntem, bağlanma mukavemetini artırmak için alkali deterjan çözeltisi yöntemi (ASTM D2651) ile birleştirilebilir. Sıcak kromik asit çözeltisi yöntemi, alkali deterjan yönteminden sonra uygulanmalı ve aralarında su ile durulama yapılmalıdır(Liu 2010).

Bununla birlikte, krom sistemleri çevreye zararlıdır ve bunların azaltılması yönünde çeşitli önlemler alınmaktadır. Krom içermeyen işlemler arasında permanganat, florozirkonat dönüşüm kaplamaları, organometalik titanyum-zirkonyum kaplamalar (Ti/Zr) ve Mg(OH)₂ kaplaması bulunur (Bretz ve ark. 2004, Liu, 2010). AZ31B ve AZ91D magnezyum alaşımları üzerinde dönüşüm kaplamasının bağlanma mukavemeti araştırılmıştır ve Mg(OH)₂ kaplama, epoksi reçine ile yapılan çekme kesme mukavemeti testinde kromat dönüşüm kaplamasından daha yüksek çekme kesme mukavemeti gösterebilir; manganer dönüşüm kaplaması ve kalay dönüşüm kaplaması, modifiye silikon reçine ile yapılan çekme kesme mukavemeti testinde kromat dönüşüm kaplamasına yaklaşık olarak eşit çekme kesme mukavemeti gösterir; kalay dönüşüm kaplaması, modifiye silikon reçine-fenol-formaldehit reçine ile yapılan kesme mukavemeti testinde(Çekme testi) kromat dönüşüm kaplamasından daha yüksek çekme kesme mukavemeti göstermiştir. Bu nedenle, bazı kromat içermeyen dönüşüm kaplamaları, Mg-Mg yapıştırıcı bağlama için yüzey işlemi olarak uygulanabilir (Takai ve ark, 2008; Liu 2010; Cavezza ve ark 2020).

Kapsamlı yüzey işleminden sonra, birleştirilecek metal parçaların birleşme yüzeylerine yapısal yapıştırıcı uygulanır ve yapıştırıcının eşit bir şekilde kaplanması önemlidir. Uygun korozyon koruması uygulandığında, magnezyumun yapıştırılmasında çeşitli yapıştırıcılar kullanılabilir. Magnezyumun yapıştırılmasında kullanılan yapıştırıcılar arasında; *Epoksi-fenolikler* (Epoksi yapıştırıcılar, birçok alt tabakaya iyi yapıştıkları ve çok çeşitli özellikler elde etmek için kolayca modifiye edilebildikleri için muhtemelen en çok yönlü yapıştırıcı ailesidir.), *poliüretanlar*, *silikonlar*, *siyanoakrilatlar*, *polivinil asetat* vb. bulunur (Liu 2010; Cavezza ve ark 2020).

Bazı yapıştırıcılar, uygulandıktan sonra mukavemetini artırmak için yeterli süre boyunca kürlenmelidir. Oda sıcaklığında kürlenmiş yapıştırıcılar genellikle birkaç saat, ısı ile kürlenmiş

yapıştırıcılar ise genellikle birkaç dakika içinde kürlenir. Kürlenme süresince, montaj bazı basınç altında desteklenmelidir. Magnezyum ve magnezyum alaşımlarının kimyasal olarak aktif yapısı nedeniyle, oksidasyonu önlemek için ısı ile kürleme işlemi inert atmosferde gerçekleştirilmelidir. Gerçek uygulamada, en iyi sonucu elde etmek için uygun bir sıcaklık ve basınç seçilmelidir ve kesin koşullar, belirli yapıştırıcının özelliklerine bağlılık gösterir. Kürleşme sıcaklıkları oda sıcaklığından yaklaşık 350 °C'ye kadar değişir, ancak magnezyumun ve intermetalik fazlarının düşük erime noktaları nedeniyle, yüksek kürleşme sıcaklığına sahip yapıştırıcılar kullanılmamalıdır (Liu 2010).

Yapıştırıcı bağlantılar, magnezyum alaşımlarında kullanılabilir ve özellikle otomotiv endüstrisinde Mg kullanımına yönelik açık bir eğilim vardır. Çünkü magnezyumun daha fazla otomobil üretimine girişi, otomobil gövde yapılarının ağırlığını azaltmak için temel teknolojilerden biri olarak görülebilir. Yapıştırıcı bağlantıların daha geniş kullanımına ilişkin temel sorunlardan biri, bu sistemlerin aşındırıcı ve korozyif ortamlara maruz kaldıklarında dayanıklılığıdır.

Kaynaklar;

- Carrere N, Martin E., Laguillon D.,(2015). Comparison between models based on a coupled criterion for the prediction of the failure of adhesively bonded joints. *Eng. Fracture Mech.* 138, 185-201. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.03.004>
- Cavezza, F., Boehm M., Terryn H., Hauffman T., (2020) A review on Adhesively Bonded Aluminium Joints in the Automotive Industry. *Metals*, 10,730, 1-32. doi:10.3390/met10060730
- Dobeš, F., & Dymáček, P. (2020). Creep behavior of AJ62 Magnesium–Aluminum–Strontium alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 8(2), 414–420. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.03.001>
- Germen G., Yarkadaş G., Şevik H. (2015). Influence of strontium addition on the wear behavior of Mg-3Al-3Sn alloys produced by gravity casting. *Material Testing*, 57 11-12, 997-1000.
- Kim, B. H., Park, K. C., Park, Y. H., & Park, I. M. (2010). Microstructure and creep properties of Mg-4Al-2Sn-1(Ca,Sr) alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 20(7), 1184–1191. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60276-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60276-4)
- Klenam, D. E., Ogunwande, G. S., Omotosho, T., (2021). Welding of magnesium and its alloys: an overview of methods and process parameters and their effects on mechanical behaviour and structural integrity of the welds. *Manufacturing Review*, 8(29), 1-31.
- Li, N., & Zheng, Y. (2013). Novel Magnesium Alloys Developed for Biomedical Application: A Review. *Journal of Materials Science and Technology*, 29(6), 489–502. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.02.005>
- Liu, Y. Q., Yu, D., Zhang, Y., Zhou, J. P., Sun, D. Q., & Li, H. M. (2023). Research advances on weldability of Mg alloy and other metals worldwide in recent 20 years. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 3458–3481. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.184>
- Liu Liming, (2010). *Welding and Joining of Magnesium Alloys*, Woodhead Publishing in Materials, Cambridge, UK.
- Mayeaux, B., Juby, I., Hacopian, E., Fowler, M., NASA(2019) Process Specification for Adhesive Bonding. Lyndon B. Johnson Space Center, Texas.
- Mordike, B. L., & Ebert, T. (2001). Magnesium Properties - applications - potential. *Materials Science and Engineering A*, 302(1), 37–45. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01351-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01351-4)
- Önür, A., Germen Tutaş, G., & Şevik, H. (2020). Role of Cerium on the creep properties of the

- Mg-Sn-Al based alloys. *International Journal of Cast Metals Research*, 33(6), 278–285.
<https://doi.org/10.1080/13640461.2020.1853929>
- Pekguleryuz, M., Kainer, K., & Kaya, A. A. (2013). Fundamentals of magnesium alloy metallurgy. In *Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy*.
<https://doi.org/10.1533/9780857097293>
- Pekguleryuz, M. O., & Kaya, A. A. (2003). Creep resistant magnesium alloys for powertrain applications. *Advanced Engineering Materials*, 5(12), 866–878.
<https://doi.org/10.1002/adem.200300403>
- Singh, Kulwant, Singh, G., & Singh, H. (2018). Review on friction stir welding of magnesium alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*, 6(4), 399–416.
<https://doi.org/10.1016/j.jma.2018.06.001>
- Singh, Kulwinder, & Mittal, R. (2018). The effect of lanthanum on Microstructure & Mechanical properties of stir casted Mg alloy. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 6360–6369. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.246>
- Tan Caiwang, Xiao Liyuan, Liu Fuyun, Chen Bo, Song Xiaoguo, Li Liqun, et al.(2017). Influence of laser power on the microstructure and mechanical properties of a laser welded-brazed Mg alloy/Ni-coated steel dissimilar joint. *J Mater Eng Perform*, 26(6).
- Takai M., Takaya M.,(2008). Influence of Conversion Coating on Magnesium and Aluminum Alloys by Adhesion Method. *Mater. Trans.* 49, 1065-1070.
- Tian Lan, Du Shuangming, Hu Jie. (2016). The effect of holding time on the microstructure and mechanical properties of AZ31B magnesium alloy/aluminum/copper diffusion brazing joints[J]. *Mater Mech Eng.*, 40(2):66-70.
- Yang, C., Chen, G., Qiao, J., Wu, C., Zhou, M., Zhang, G., & Shi, Q. (2024). Material flow during dissimilar friction stir welding of Al/Mg alloys. *International Journal of Mechanical Sciences*, 272(December 2023), 109173.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109173>
- Zhang, J., Zhang, M., Meng, J., Wu, R., & Tang, D. (2010). Microstructures and mechanical properties of heat-resistant high-pressure. *Materials Science & Engineering A*, 527(10–11), 2527–2537. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.12.048>
- Zhou H, Gu X., Gu X., Dong J., Xu G. (2022). Improvement in microstructure and mechanical properties of laser welded steel/aluminum alloy lap joints using high-entropy alloy interlayer. *Journal of Materials Processing Technology*, 20(139-146).
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.063>.

PACKED-BED (DOLGU YATAK) SİSTEMLERİ İLE TERMAL BÖLÜM 5

ENERJİ DEPOLAMA: PRENSİPLER, MALZEMELER VE UYGULAMALAR

SAVAŞ ÖZTÜRK

Giriş

Sistem Yapısı ve Çalışma Mekanizması

Packed-Bed (dolgu yatak) termal enerji depolama (TES: thermal energy storage) sistemleri, bir tank içerisinde rastgele veya düzenli olarak istiflenmiş katı dolgu malzemelerinden (taş, seramik, metal köpük, bilye vb.) oluşan, nispeten basit ancak yüksek verimlilik sunan ısı depolama çözümleridir (Gil et al., 2010). Bu sistemlerde, bir ısı taşıyıcı akışkanın (hava, buhar, termal yağ, egzoz gazı) dolgu yatağı boyunca akarak katı dolgu malzemesi ile ısı alışverişinde bulunması prensibiyle çalışmaktadır. Şarj modunda sıcak akışkan dolguyu ısıtırken, deşarj modunda soğuk akışkan dolgudan ısıyı geri kazanmaktadır (Dincer & Rosen, 2011).

Sistem, temelde silindirik/prizmatik bir tank, akışkan giriş-çıkış manifoldları, dolgu malzemesi ve yalıtım katmanlarından oluşmaktadır. Tank geometrisi, basınç kaybı ve ısı kayıpları üzerinde doğrudan etkili olduğu yapılan araştırmalarda belirtilmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklık uygulamalarında genellikle silindirik tanklar tercih edilmektedir. Dolgu malzemesinin boyutu, şekli ve düzeni ise sistemin ısı kapasitesi, ısı transfer katsayısı, basınç düşümü ve termal front davranışını belirleyen kritik parametreler olarak ifade edilmektedir (Zanganeh, Pedretti, Zavattoni, Barbato, & Steinfeld, 2012). Isının akış yönü genellikle doğal taşınım etkilerinden faydalanmak için dikey olarak tasarlanmaktadır. Üniform akış dağılımı için delikli plakalar veya akış düzenleyiciler kullanılmaktadır. Sistem, hareketli parça içermemesi nedeniyle düşük bakım gereksinimi, yüksek verim, uzun ömür ve çevresel dayanıklılık gibi

Doç. Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 0000-0003-2661-4556

avantajlar sunmaktadır. Bu da onu Konsantre Güneş Enerjisi (KGE: CSP (Concentrated solar power)) santralleri, endüstriyel atık ısı geri kazanımı ve yüksek sıcaklık proses ısı depolaması için ideal bir seçenek haline getirmektedir (Sarbu & Sebarchievici, 2018).

2. Termal Front ve Sıcaklık Dağılımı

Dolgu yataklı TES sistemlerindeki en karakteristik bölge termal front olarak adlandırılan, sıcak ve soğuk bölgeleri ayıran ve yatak boyunca ilerleyen ince sıcaklık geçiş bölgesidir. Bu frontun davranışı, sistemin enerji depolama verimliliği, ısı transfer hızı, çıkış sıcaklığının kararlılığı ve kullanılabilir enerji miktarını doğrudan belirler (Huang, Liu, Mu, Yang, & Ding, 2023; Sommer et al., 2014).

Şarj işlemi sırasında, sıcak akışkan yatağa girerek giriş bölgesindeki parçacıkları ısıtmaktadır. Parçacık-akışkan arasındaki ısı transfer katsayısı (h), parçacık boyutu, porozite ve akış rejimi gibi parametrelere ilişkilendirilmiştir. Yerel termal denge sağlandıkça, sıcaklık artışı yatak boyunca ilerler ve bu ilerleyen sınır şarj termal frontu olarak adlandırılmıştır (McTigue, 2016). Termal frontun kalınlığı, sistem performansını belirleyen en önemli parametrelerden biridir. İnce bir front, enerjinin etkin kullanımını sağlarken, kalın bir front çıkış sıcaklığında dalgalanmaya ve kullanılabilir enerjinin azalmasına neden olmaktadır. Front kalınlığını etkileyen temel parametreler arasında akışkan hızı, akış rejimi, parçacık boyutu ve şekli, dolgu malzemesinin ısıl iletkenliği, tank boyutları ve termal yayılma katsayısı yer almaktadır (Sommer et al., 2014).

Termal frontun matematiksel modellemesi genellikle aksiyal dispersiyon modeli ve akışkan ile katı faz için ayrı ayrı yazılan enerji korunum denklemleri ile yapılmaktadır (Bergman, 2011). Basitleştirilmiş bir enerji dengesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\text{Katı Faz: } (1 - \varepsilon)\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = hA_s(T_f - T_s) + k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\text{Akışkan Faz: } \varepsilon\rho_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f c_f u \frac{\partial T_f}{\partial z} = hA_s(T_s - T_f) \quad (2)$$

Burada: ε : porozite, ρ_s, c_s, T_s : katı dolgu malzemesinin yoğunluğu, özgül ısısı, sıcaklığı, ρ_f, c_f, T_f : akışkanın yoğunluğu, özgül ısısı, sıcaklığı, k_s : dolgu malzemesinin ısı iletkenliği, h : konvektif ısı transfer katsayısı, u : akışkan hızı, z : akış yönünde koordinat.

İnce ve kararlı bir termal front elde etmek için daha küçük parçacık boyutu, yüksek akış hızı, yüksek ısı iletkenlikli dolgu malzemeleri, optimum tank boyut oranları ve iyileştirilmiş akış dağıtıcı tasarımları gibi stratejiler uygulanmaktadır.

3. Packed-Bed Sistemlerinde Kullanılan Dolgu Malzemeleri

Dolgu malzemesi, bir dolgu yataklı TES sisteminin termal kapasitesini, ısı transfer hızını, mekanik dayanımını ve ömrünü belirleyen en kritik bileşenidir. Malzeme seçiminde yüksek özgül ısı, yüksek ısı iletkenlik, yüksek mekanik dayanım, yüksek sıcaklık kararlılığı (800–1100°C), termal şok direnci, kimyasal inertlik, düşük maliyet ve uzun çevrim ömrü gibi kriterler göz önünde bulundurulmaktadır (Khare, Dell'Amico, Knight, & McGarry, 2013).

3.1. Packed-Bed Sistemlerinde Kullanılan Malzeme Sınıfları

Packed-bed sistemlerinde kullanılan dolgu malzemeleri doğal taş ve mineraller, seramikler, metaller ve metal köpükleri olarak sınıflandırılmaktadır. Packed-bed sistemlerinde kullanılan bazı malzemelerin özellikleri ve avantaj ve dezavantajları Tablo 1’de verilmiştir.

Doğal Taşlar ve Mineraller: Bazalt, granit, kuvarsit gibi malzemeler düşük maliyetleri nedeniyle, özellikle büyük ölçekli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. 600-900°C aralığında faz yapısı açısından kararlı kalabilirler. Ancak yüksek sıcaklıklarda faz dönüşümü riski taşıdıkları için kullanımları risklidir.

Seramikler: Alümina (Al_2O_3), zirkonya (ZrO_2), mullit ve silikon karbür (SiC) gibi seramikler $1000^\circ C$ üzeri uygulamalar için ideal olarak kabul edilmektedir. Yüksek ısı iletkenlik, termal şok dayanımı ve kimyasal stabilite gibi üstün özelliklere sahip olmaları tercih edilmelerinde birinci sebeplerdir.

Metaller ve Metal Köpükler: Çelik bilyeler, dökme demir parçalar veya alüminyum/nikel köpükler, çok yüksek ısı iletkenlik gerektiren durumlarda kullanılmaktadır. Metal köpükler, yüksek yüzey alanı/porozite oranları sayesinde ısı transferini artırırken basınç kaybını kabul edilebilir seviyelerde tutmaktadır.

Tablo 1. Packed-bed TES sistemlerinde kullanılan bazı dolgu malzemelerinin karşılaştırılması

Malzeme	Çalışma Sıcaklığı ($^\circ C$)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Avantajlar	Dezavantajlar
Doğal Taş (Bazalt, Granit)	600-800	1-3	Düşük maliyet	Termal şok riski, mineralojik bozulma
Seramik Taneler (Pebbles)	800-1200	2-5	Yüksek sıcaklık stabilitesi	Orta düzey maliyet
Alümina Küreler	1000+	5-30	Çok yüksek ısı iletkenlik	Yüksek maliyet, yüksek yoğunluk
Silika Kum	600-900	1-2	Düşük maliyet, kararlı	Düşük ısı iletkenlik
Çelik Bilyeler	≤ 600	15-30	Çok yüksek ısı iletkenlik	Oksidasyon, sınırlı sıcaklık aralığı

3.2. Geometri ve Termal Dayanıklılık

Dolgu malzemesinin geometrisi (küre, silindir, kırık parça, köpük) basınç düşümü, porozite, akış dağılımı ve termal front keskinliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (von Seckendorff & Hinrichsen, 2021). Malzemelerin termal kararlılığı, özellikle yüksek sıcaklıklarda tekrarlanan ısıtma-soğutma döngüleri altında çatlama, ufalanma, sinterleşme veya kimyasal bozulma gibi mekanizmalarla test edilmektedir.

4. Packed-Bed TES Sisteminin Isıl ve Akışkanlar Mekaniği Analizi

Packed-bed sistemlerinin analizi hem ısı süreçleri hem de akışkan akışını içermektedir. Bu analiz üç ana çerçevede ele alınmaktadır.

4.1. Isıl Analiz

Sistemdeki ısı transferi, akışkan-katı taşınımı, katı fazda iletim, radyatif ısı transferi (yüksek sıcaklıklarda) ve aksiyal/radyal dispersiyonun birleşiminden oluşmaktadır (Wang et al., 2025). Taşınım ısı transfer katsayısı genellikle Nusselt sayısı korelasyonları ile belirlenmektedir. Yüksek sıcaklıklarda, etkin ısıl iletkenlik radyasyonun katkısını da içerecek şekilde hesaplanmaktadır.

$$k_{\text{eff}} = k_s + \frac{16\sigma T^3}{3\beta} \quad (3)$$

Burada σ Stefan-Boltzmann sabiti ve β soğurma katsayısıdır.

4.2. Akışkan Akışı ve Basınç Kaybı

Packed-bed yapısı nedeniyle akışkan, poroz yapıdan geçerken sürtünme ve daralma–genişleme etkileri nedeniyle basınç kaybına uğrar. Bu kayıp, Ergun denklemi (Zhang, Hommes, Schuring, & Yue, 2025) ile hesaplanmaktadır. Bu denklem, laminar ve türbülanslı rejimleri birlikte ifade etmektedir.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu(1-\varepsilon)^2}{d_p^2\varepsilon^3}u + \frac{1.75\rho(1-\varepsilon)}{d_p\varepsilon^3}u^2 \quad (4)$$

4.3. Termal Verim ve Performans Kriterleri

Sistem performansı termal depolama kapasitesi, çıkış sıcaklık kararlılığı, termal front keskinliği, ısı kayıpları, basınç düşümü, şarj/deşarj verimi ve malzeme degradasyonu parametreleri ile değerlendirilmektedir. İyi tasarlanmış bir sistemde termal verim %85'in üzerine olabilir (Medrano, Gil, Martorell, Potau, & Cabeza, 2010).

5. Faz Değiştiren Malzeme (FDM) Entegre Packed-Bed Sistemleri

Doç. Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 0000-0003-2661-4556

Klasik dolgu yatak sistemleri yalnızca duyulur ısı depolamaktadır. FDM entegrasyonu ile sistemler hem duyulur hem de gizli ısı depolayarak enerji yoğunluğunu 2-5 kat artırabilmektedir (Codd, Gil, Manzoor, & Tetreault-Friend, 2020).

FDM kullanımı, daha yüksek enerji depolama kapasitesi, deşarj sıcaklığının sabitlenmesi, daha küçük tank hacmi ve termal front kontrolünün iyileşmesi gibi avantajlar sağlamaktadır (Yu et al., 2024). FDM'ler packed-bed entegrasyonu kapsülleme ve hibrit yapıların şeklinde uygulamalar ile sağlanmaktadır. Kapsülleme yönteminde çelik, alüminyum veya polimer kapsüller içine (makro veya mikro ölçekte) FDM doldurulmaktadır. Hibrit yapılarda ise FDM'in seramik süngerler veya metal köpükler gibi yüksek iletkenliğe sahip poroz yapılara emdirilmesi sonrasında kullanılmaktadır (Dong et al., 2021; Kucukdogan et al., 2024).

FDM'lerin düşük ısı iletkenliği, kapsül mekanik dayanımı, yüksek sıcaklıkta kimyasal kararlılık, erime sırasında sızıntı ve faz ayrışması gibi zorluklar bulunmaktadır. Bu zorluklar, kompozit FDM-seramik veya FDM-metal köpük hibrit tasarımlarla aşılabilmektedir.

6. Yüksek Sıcaklık Packed-Bed Sistemleri

Yüksek sıcaklık rejimlerinde çalışan packed-bed TES sistemleri, özellikle yoğun ısı taleplerin karşılandığı endüstriyel prosesler, konsantre güneş enerjisi (KGE) santralleri, atık ısı geri kazanım üniteleri ve yüksek sıcaklıkta çalışan kimyasal-termal proses entegrasyonlarında kritik bir teknoloji olarak ön plana çıkmaktadır. Bu sistemlerde depolama sıcaklıkları tipik olarak 500°C ile 1200°C aralığındadır. Bu sıcaklık aralığında yoğun ısı akıları altında hem ısı hem de mekanik açıdan yüksek dayanım gerektiren operasyon koşulları söz konusudur. Yüksek sıcaklık packed-bed sistemlerinin tasarımı, malzeme seçimi, akışkan-katı etkileşimi, termal front kontrolü, basınç düşümü, radyatif ısı transferi, çevrim ömrü ve maliyet etkileri gibi çok disiplinli parametrelerin bir arada değerlendirilmesini gerektirmektedir (Mao & Zhang, 2020).

Doç. Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 0000-0003-2661-4556

500-1200°C aralığında çalışan dolgu yataklı sistemler, KGE santralleri, metalurji, cam ve çimento endüstrilerindeki atık ısı geri kazanımı ve yüksek sıcaklık kimyasal prosesler için kritik bir teknolojidir. Yüksek sıcaklık sistemleri, refrakter kaplamalı tanklar, çok katmanlı yalıtım (seramik fiber, aerogel), ve yüksek sıcaklığa dayanıklı dolgu malzemeleri (örn., yüksek saflıkta alümina, SiC) gerektirir (Barua et al., 2026). Bu sistemler için malzeme seçiminde termal kararlılık, termal şok dayanımı, düşük termal genleşme ve oksidasyon direnci ön plandadır.

Yüksek sıcaklıklarda (> 1000 °C), ısı transferine radyasyonun katkısı T^3 ile orantılı olarak belirgin şekilde artmaktadır. Radyatif ısı transferi arttırmak amacıyla yüksek yayıcılığa (emissivity) sahip SiC gibi seramikler veya poroz seramik köpükler kullanılarak önerilmektedir. Bu tip durumlarda akışkan ve katı faz sıcaklıklarının farklı olabileceğini kabul eden Lokal Termal Dengesizlik (LTNE) modelleri daha gerçekçi sonuçlar vermektedir (Cheng & Wong, 2024).

$$\text{Katı faz için: } (1 - \varepsilon)\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = hA_s(T_f - T_s) + k_{s,eff} \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \quad (5)$$

$$\text{Akışkan faz için: } \varepsilon\rho_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f c_f u \frac{\partial T_f}{\partial z} = hA_s(T_s - T_f) \quad (6)$$

Yüksek sıcaklıklarda radyasyon, termal frontun yayılmasına neden olabilmektedir. Front kararlılığını korumak için tasarım optimizasyonu yapılması gerekmektedir. Gazların viskozite ve yoğunluğundaki değişimler basınç kaybını etkileyen önemli değişkenlerdir. Ergun denklemi sıcaklık bağımlı özelliklerle kullanılmalıdır (Koekemoer & Luckos, 2015). 1000°C civarında, 20-40 cm kalınlığında çok katmanlı yalıtım ile ısı kayıpları minimize edilir.

Sistem performansı, termal verim ($\geq 85\%$), kullanılabilir enerji oranı ve çevrimsel dayanıklılık ile ölçülür. Malzeme degradasyonu (sinterleşme, oksidasyon, termal şok) sistem ömrünü sınırlayan ana etkidir. Bu sistemler KGE kuleleri, metalurji fırınları ve Power-to-Heat-to-Power çevrimleri gibi ileri uygulamalarda kullanılmaktadır.

Referanslar

- Barua, B., Bowen, C. P., Yu, W., Du, W., France, D. M., Albrecht, K., . . . Singh, D. (2026). Design of a SiC-Si moving packed-bed particle-to-sCO₂ heat exchanger for high temperature concentrating solar power applications. *Solar Energy*, 303, 114114.
- Bergman, T. L. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer*: John Wiley & Sons.
- Cheng, L.-C., & Wong, S.-C. (2024). A new LTNE analysis process for predicting the steady-state temperature distribution in a fixed bed of randomly packed mono-sized rough spheres based on pore-scale simulations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 221, 125036.
- Codd, D. S., Gil, A., Manzoor, M. T., & Tetreault-Friend, M. (2020). Concentrating solar power (CSP)—thermal energy storage (TES) advanced concept development and demonstrations. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 7(2), 17-27.
- Dincer, I., & Rosen, M. A. (2011). *Thermal energy storage: systems and applications*: John Wiley & Sons.
- Dong, Y., Wang, F., Yang, L., Shi, X., Zhang, G., & Shuai, Y. (2021). Thermal performance analysis of PCM capsules packed-bed system with biomimetic leaf hierarchical porous structure. *Journal of Thermal Science*, 30(5), 1559-1571.
- Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lázaro, A., Dolado, P., Zalba, B., & Cabeza, L. F. (2010). State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(1), 31-55.
- Huang, G., Liu, L., Mu, M., Yang, J., & Ding, H. (2023). Prediction of Dynamic Temperature and Thermal Front in a Multi-Aquifer Thermal Energy Storage System with Reinjection. *Energies*, 16(21), 7358.
- Khare, S., Dell'Amico, M., Knight, C., & McGarry, S. (2013). Selection of materials for high temperature sensible energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 115, 114-122.
- Koekemoer, A., & Luckos, A. (2015). Effect of material type and particle size distribution on pressure drop in packed beds of large particles: Extending the Ergun equation. *Fuel*, 158, 232-238.
- Kucukdogan, N., Sutcu, M., Ozturk, S., Yaprak, H., Memis, S., Gencel, O., . . . Erdogmus, E. (2024). Phase change material incorporated paper pulp sludge/gypsum composite reinforced by slag and fly ash for energy efficient buildings: Solar thermal regulation, embody energy, sustainability index and cost analysis. *Energy and Buildings*, 325, 114969.
- Mao, Q., & Zhang, Y. (2020). Thermal energy storage performance of a three-PCM cascade tank in a high-temperature packed bed system. *Renewable Energy*, 152, 110-119.

- McTigue, J. (2016). *Analysis and optimisation of thermal energy storage*. Department of Engineering, University of Cambridge,
- Medrano, M., Gil, A., Martorell, I., Potau, X., & Cabeza, L. F. (2010). State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2—Case studies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(1), 56-72.
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2018). A comprehensive review of thermal energy storage. *Sustainability*, 10(1), 191.
- Sommer, W., Doornenbal, P., Drijver, B., Van Gaans, P., Leusbrock, I., Grotenhuis, J., & Rijnaarts, H. (2014). Thermal performance and heat transport in aquifer thermal energy storage. *Hydrogeology Journal*, 22(1), 263-279.
- von Seckendorff, J., & Hinrichsen, O. (2021). Review on the structure of random packed - beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 99, S703-S733.
- Wang, M., Bu, S., Zhou, B., Gong, B., Lian, Q., Li, Z., . . . Wang, Q. (2025). Effect of particle breakage on heat and mass transfer characteristics of packed bed at low Reynolds numbers: Pore-scale simulation. *Energy*, 138402.
- Yu, X., Zhang, Z., Qian, G., Jiang, R., Wang, L., Huang, R., & Li, Z. (2024). Evaluation of PCM thermophysical properties on a compressed air energy storage system integrated with packed-bed latent thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 81, 110519.
- Zanganeh, G., Pedretti, A., Zavattoni, S., Barbato, M., & Steinfeld, A. (2012). Packed-bed thermal storage for concentrated solar power—Pilot-scale demonstration and industrial-scale design. *Solar Energy*, 86(10), 3084-3098.
- Zhang, L., Hommes, A., Schuring, R., & Yue, J. (2025). An experimental study of pressure drop characteristics under single - phase flow through packed bed microreactors. *AIChE Journal*, 71(2), e18640.

BÖLÜM 6 MAGNEZYUM METAL VE KAYNAK TEKNOLOJİSİ

Dr. Gülşah GERMEN TUTAŞ^{^3}, Dr. Öğr. Ü. Güven YARKADAŞ^{*,+2}, Doç. Dr. Hüseyin Şevik⁺¹

^{*}Mersin Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Mersin

⁺Termox Metalurji Ltd. Şti.

[^] Niğde Ömer Halis Üniversitesi Endüstriyel Hammaddeler ve Yapı Malzemeleri

Uygulama ve Araştırma Merkezi, Niğde

ORCID: ¹0000-0002-2065-412X

²0000-0002-4592-2768

³0000-0002-7705-7465

1. Giriş

Karbondioksit emisyonunun her geçen gün büyüyen çevresel tehdidi, azalan kaynaklar ve enerji kazanımının sınırlılığı araştırma konularının çok hafif ve aynı zamanda geri dönüşümü mümkün konstrüksiyon malzemelerin geliştirilmesi üzerine olmasına neden olmuştur. Dahası magnezyum alaşımları, ağırlık azaltma konusunda ciddi gereksinimleri olan havacılık, otomotiv ve diğer alanlarda potansiyel uygulama alanlarına sahiptir. Hafiflik ve geri dönüştürülebilir kavramları göz önüne alındığı zaman, magnezyum ve alaşımlarının oldukça önem kazandığını göstermektedir (Kim et al., 2010; Mordike & Ebert, 2001; Önür et al., 2020; M. Pekgülyüz et al., 2013; Kulwinder Singh & Mittal, 2018) Bu bağlamda literatür yeni alaşım geliştirilmesi, magnezyum esaslı kompozit malzeme ve/veya üretim teknikleri gibi konu başlıklarına yoğunlaşırken, son yıllar da endüstriye kazandırılmış magnezyum alaşımlarının spesifik kullanımları için temel gereksinimleri karşılamasını sağlayacak birleştirme teknikleri ve yüksek performanslı kaynak teknolojileri gibi kaynaklanabilme çalışmalarına da odaklanmıştır (Kulwant Singh et al., 2018; Yang et al., 2024; Junlei Zhang et al., 2025).

Magnezyum alaşımlarının çeşitli alanlarda geniş çapta uygulanması, ilgili işleme teknolojilerinin geliştirilmesini gerektirir ve döküm ve dövme magnezyum alaşımlı parçaların imalatı ve döküm kusurlarının onarımı için kaynak teknolojisi gereklidir. Magnezyum alaşımlarının birbirine birleştirilmesi ve magnezyumun çelik veya alüminyuma birleştirilmesi gibi kaynak edilebilme sorunları, son yıllarda giderek daha fazla ilgi görmektedir.

Bu bölüm magnezyum alaşımlarının birleştirme teknolojileri ile ilgili uyumu hakkında kısa bir bilgi verilecektir. Ayrıca birleştirme teknolojilerinin geliştirilmesinde tekil birleştirme teknolojileri ve proses ile ilgili özelliklere yer verilmiştir. Magnezyum alaşımlarının birleştirilmesi ile ilgili muhtemel izlenimleri vermek amaçlanmıştır.

2. MAGNEZYUM METALİNİN BİRLEŞTİRME TEKNOLOJİLERİ İLE UYUMU

2.1.Genel Bakış

Tablo 1’de görüldüğü gibi saf Mg ve alaşımları ile diğer metallerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin oldukça farklı olması nedeniyle magnezyum metalinin diğer metallerle kaynaklanabilirliği oldukça zordur. Gerek saf magnezyumun gerekse alaşımlarının diğer metaller ile birlikte kullanımı, iki metalin ekonomik avantajlarından tam olarak yararlanılmasını sağlayabilir.

Tablo 1. Bazı metallerin fiziksel ve kimyasal Özellikleri

Metal	Ergime sıcaklığı, (°C)	Yoğunluk (g/cm ³)	Isıl Genleşme Katsayısı ($\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$)(25 °C)	Isıl İletkenlik, (W/m.K)
Magnezyum	650	1.738	24.8	156
Demir	1538	7.874	11.8	80.4
Titanyum	1677	4.5	8.2	13.8
Alüminyum	660	2.7	23.6	237

Günümüzde Mg alaşımlarından üretilen ürünlerin birçoğu otomotiv sektöründe kullanılmaktadır, bunu dışında magnezyum alaşımları hafif elektronik ürünler elde etmek için dijital kameralar, cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar ve stent gibi biyo malzeme endüstrisinde de kullanıldığı gözlenmektedir(Dobeš & Dymáček, 2020; Li & Zheng, 2013; Nabyouni et al., 2018; M. Pekguleryuz et al., 2013; M. O. Pekguleryuz & Kaya, 2003; Staiger et al., 2006; Jinghuai Zhang et al., 2010). Bu nedenle, Mg alaşımı ve diğer metallerin kaynak teknolojisi üzerine yapılan araştırmalar geniş uygulama olanaklarına sahiptir. Bununla birlikte, Mg alaşımlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri, Mg alaşımlarının kaynağına zorluklar getirir, ana problemler aşağıdaki gibi özetlenebilir(Liu et al., 2023; Liu, 2010);

- **Oksidasyon ve buharlaşma:** Mg alaşımının kaynama noktası sadece 1100°C'dir. Buharlaşma kaybı yüksek sıcaklıklarda meydana gelir, ve ısı kaynağının etkisi altında oksitler oluşturmak için oksijen ve havadaki nitrojen ile reaksiyona girmesi kolaylaşır, bu da bağlantı noktasında inklüzyonlar oluşturmaya neden olur.
- **İri daneler:** Saf Mg ve alaşımlarının düşük ergime sıcaklığı ve yüksek ısı iletkenliği nedeniyle, nispeten daha yüksek güç girişine sahip bir ısı kaynağı gereklidir, bu da kolayca aşırı ısınmaya neden olur ve kaynak bölgesinde ve kaynak bölgesine yakın yerlerde kaba taneler oluşturur, bu da kaynak özelliklerini etkiler. Kaba taneler, kaynak özelliklerini etkileyen ana faktörlerden biridir.
- **Termal gerilme ve çatlak:** Mg alaşımlarının genleşme katsayısı çok büyük olduğundan, kaynak işleminde deformasyon ve kaynaktan dolayı kalıntı gerilme oluşması kolaydır. Ayrıca bazı alaşım elementleri ile düşük ergime noktalı ötektikler oluşabilir ve geniş kırılmalı alana sahip termal çatlaklar meydana gelebilir.
- **Kaynaklarda gözenekler (poroziteler):** Mg alaşım kaynağı sürecinde H₂ üretmek kolaydır. Erimiş havuzun hızlı soğuması H₂ zamanında kaçamadığında, gözenekler oluşacaktır. Bu gözeneklerin varlığı birleşimin performansını ciddi şekilde etkiler.

2.2. Kaynak Türleri

2.2.1. Füzyon Kaynağı

Füzyon kaynağı, iki veya daha fazla malzemeyi ergime noktalarına kadar ısıtarak birleştirme işlemidir(Liu et al., 2023). Mg alaşımları ve diğer metaller için yaygın olarak kullanılan füzyon kaynak yöntemleri arasında lazer kaynağı, elektron ışını kaynağı (EBM), gaz metal ark kaynağı (GMAW) ve ark kaynağı bulunmaktadır. Füzyon kaynağı, iş parçasının şekli ve boyutu konusunda özel bir gereklilik içermez, uygulama alanı nispeten geniştir, işlemi basittir ve ekipman fiyatı düşüktür. Ancak, farklı metallerin birleştirilmesi esnasında farklı veya daha yoğun intermetalik bileşik (IMC) oluşur ve bu da bağlantının performansı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Mg alaşımının lazer kaynağı genellikle direksiyon simidi şasisi, radyatör braketi vb. gibi otomobil üretim süreçlerinde kullanılır. Kaynak işleminde, Mg alaşımının performans üzerindeki geçiş kaybının etkisini önlemek için ısı girişi sıkı bir şekilde kontrol edilmelidir(Liu et al. 2023; Klenam et al. 2021).

2.2.1.1 Lazer Kaynağı;

Mg alaşımlarının modern kaynak teknikleri arasında, lazer kaynağı, yüksek kaynak hızı, güç çıkışının hassas kontrolü, kontrol edilebilir ısı girişi, daha az ısıdan etkilenen bölge (HAZ), düşük bozulma, düşük ekipman fiyatı ve mükemmel çevre uyumluluğu nedeniyle daha fazla potansiyele sahip olarak kabul edilmektedir(Liu ve ark. 2011; Liu ve ark. 2023; Klenam ve ark. 2021).

Kaynaklanan magnezyum alaşımları için en önemli sınırlama uygun kaynak tellerinin eksikliğidir. Ayrıca, 1.6 mm'den daha düşük çaplardaki teller çok az bulunur ve 1.2 mm'nin altında hiçbir şekilde kullanılabilir değildir. Kaynak teknoloji ile magnezyum alaşımlarının üretim maliyeti halen karmaşık üretim prosesleri ve düşük talepten dolayı ekonomik değildir(Kainer 2001; Modrike 2001; Liu et al. 2023; Klenam et al. 2021).

Sonuç olarak, lazer kaynağı farklı metaller için yaygın bir kaynak yöntemidir ve yüksek verimlilik, kontrol edilebilir ısı girişi ve düşük ekipman fiyatı gibi avantajlara sahiptir. Otomobil üretim sürecinde, manuel kaynak kusurlarını önlerken üretim verimliliği artırılabilir. Ancak, diğer metallerin magnezyum alaşımları ile kaynak sürecinde, oluşan intermetallikler kaynağın performansını bozar. Kaynak performansını iyileştirmek için, genellikle üçüncü metal ara katman olarak kullanılır (Liu ve ark. 2023, Zhou ve ark. 2022).

Mg alaşım / Mg alaşım Lazer Kaynağı

Elde edilen lazer kaynak bağlantılarının kalitesi, kaynak parametreleri ve dolayısıyla kusurların varlığı ve ortaya çıkan kaynağın mikro yapıları tarafından belirlenir. Örneğin, çok düşük lazer güç yoğunluğu kullanılırsa, kaynak bağlantılarında alt kesikler veya düşük penetrasyon gibi makro kusurlarla karşılaşılabilir (Cao ve ark. 2006; Nan ve ark. 2020). Öte yandan, aşırı ısı girişi, magnezyum ve alaşım elementlerinin yanarak kaybolmasına yol açabilir ve bu da dolgunun tam olarak doldurulmamasına neden olur. Uygun dolgu metali (tel şeklinde) kullanılması, bu metal kayıplarını etkili bir şekilde telafi edebilir. Kararlı bir kaynak işlemi ve kabul edilebilir kaynak kalitesi (makro kusurlar olmadan) elde etmek için, lazer çıkış gücü, kaynak hızı, odaklama ve diğer parametreler arasında bir denge kurulmalıdır. İç gözeneklilik, kaynak bağlantılarının kalitesini bozabilecek başka bir makro kusur türüdür. Sonuç olarak, lazer kaynağı esnasında Mg alaşımını etkileyen ana faktör ısı girdisidir ve bu nedenle kaynak kusurlarının oluşmasını önlemek için ısı girdisi kontrol edilmelidir (Liu ve ark. 2023; Wang ve

ark. 2011). İyi kaynaklanabilir dökümler üretmek için, örneğin vakumlu döküm kullanarak Mg alaşımlarındaki gözenekliliği azaltmak gerekir. Ayrıca, bazı Mg alaşımları doğası gereği kaynaklanabilirliği düşüktür; bunun tipik bir nedeni, alaşımları katılaşma çatlamasına duyarlı hale getiren geniş sıcaklık katılaşma aralığıdır. (Mg-Zn-Zr veya Mg-Al-Zn alaşımları en tipik örneklerdir) (Cao ve ark. 2006).

Yapılan bir çalışmada, AZ61 Mg alaşımının vakumlu elektron ışını kaynağını gerçekleştirmiştir. Sonuçlar, kaynak bölgesinin α -Mg fazı ve $Al_{12}Mg_{17}$ fazından oluştuğunu göstermektedir. Kaynak tamamen nüfuz etmiş ve kaynağın sertliği ana metalinkinden daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Liu ve ark. 2011). Elektron ışını kaynağı arayüzünün mikro yapısı ve mekanik özelliklerindeki değişiklikleri daha ayrıntılı olarak incelemek için Wang ve ark., AZ31B Mg alaşımı üzerinde elektron ışını kaynağı gerçekleştirmiş ve mükemmel birleşim yerleri elde etmişlerdir. Isıdan etkilenen bölgedeki tanelerin büyüdüğü ve içlerinde ince dendritler ve eş eksenli taneler bulunduğunu gözlemlemişlerdir. Birleşim yerinin maksimum çekme mukavemeti 242 MPa'ya ulaşabilmektedir. Wang ve arkadaşları da yapmış oldukları başka bir çalışmada benzer sonuçlar elde etmiştir (Liu ve ark. 2023; Liu ve ark. 2011).

Mg alaşım / Çelik Lazer Kaynağı

Mg alaşımı, düşük yoğunluğu ve hafifliği nedeniyle genellikle çelikte birlikte kullanılır. Böylece tasarlanan ürünlerin ağırlığını azaltmada önemli rol oynar (Miao ve ark. 2010). Mg alaşımı ve çelik bileşenler genellikle gövde ağırlığını azaltmak için kullanılır, böylece emisyonlar azaltılır ve otomobil üretiminde enerji tasarrufu ve emisyon azaltımı sağlanır. Lazer kaynağı, Mg/çelik farklı metaller için yaygın bir kaynak yöntemidir. Ancak, fiziksel ve kimyasal özelliklerin farkı çok büyük olduğundan, birbiri ile kaynaklanabilirlik kabiliyetleri zayıftır. Ek yerinin performansını iyileştirmek ve daha yaygın olarak kullanılmasını sağlamak için Cu, Sn, V, Ag, Ni, Cu-Zn alaşımı, ek yerinin performansını optimize etmek ve kaynak zorluğunu azaltmak için ara katman olarak kullanılabilir (Miao ve ark. 2010; Tan ve ark. 2017).

Mg/çeliğin doğrudan kaynağında, erimemiş ve çatlaklar gibi kaynak kusurları ortaya çıkar, ancak bunlar ara katman kullanılarak önlenabilir. Casalino ve ark., AZ31B Mg alaşımı ve 316 paslanmaz çelik üzerinde lazer kaynağı gerçekleştirmiştir. Işın ofsetinin bağlantı performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kaynak sırasında, ışın sırasıyla 0,3 mm ve 0,4 mm paslanmaz

elik tarafına doğru kaydırılmıştır. Ofset 0,4 mm olduğunda, aşırı ofset ısı girişini yetersiz hale getirir ve kaynağın tam olarak erimemesine neden olur.

2.2.2. Difüzyon Kaynağı

Difüzyon kaynağı, belirli bir sıcaklık ve basınçta iki malzemede var olan atomların difüzyon mekanizmasıyla birleştirme işlemini gerçekleştirmektedir. Kaynak süresinin ve kaynak sıcaklığının uzamasıyla, difüzyon kaynaklı bağlantıların performansı önce artar, sonra azalır. Bunun temel nedeni, kaynak sıcaklığı ve kaynak süresinin uzamasıyla elementlerin difüzyonu hızlanırken, difüzyon süresi ve sıcaklığı çok yüksek olduğunda bağlantıda intermetalikler oluşması ve bağlantının performansını ciddi şekilde düşürmesidir (Tian ve ark, 2016; Shang ve ark. 2012).

Mg alaşımının difüzyon kaynağını etkileyen ana faktörler kaynak sıcaklığı, bekleme süresi ve kaynak basıncıdır. Bu kaynak parametreleri ayarlanarak bağlantının performansı iyileştirilir. Cu ve Al de arayüz reaksiyonunu iyileştirmek için eklenebilir, böylece arayüz bağlantının mekanik özelliklerini iyileştirmeye elverişli intermetalikler üretir ve böylece bağlantının kalitesi iyileştirilir (Shang ve ark. 2012).

Füzyon kaynağına kıyasla, difüzyon kaynağı Mg alaşımı ve çeliğin kaynağı için daha uygundur. Difüzyon kaynağı, esas olarak kaynak sıcaklığını ve bekleme süresini ayarlayarak bağlantı performansını optimize eder. Kaynak koşullarını iyileştirmek ve kaynak kalitesini artırmak için ara katman olarak Cu ve Ni de ekleyebilirsiniz (Liu ve ark. 2023).

2.2.3. Sürtünme Kaynağı

Sürtünme kaynağı, sürtünmeden kaynaklanan ısıyı birleştirme için ısı kaynağı olarak kullanır, böylece bağlantı parçasının sıcaklığı hızla artar ve kaynak işlemi gerçekleştirilir. Düşük kaynak ısı girişi, küçük ısıdan etkilenen bölge, evre dostu olma özelliklerine sahiptir ve üretilen bazı intermetalikleri ekleme yerine ekstrüde edebilir. Sürtünme kaynak teknolojisi kullanılarak Mg alaşımının difüzyon kaynağı, kaynak hızı ve dönme hızının neden olduğu aşırı ısı girdisinden kaynaklanan kaynak kusurlarını ve aşırı kayıpları sıkı bir şekilde kontrol etmelidir (Liu ve ark. 2023).

Sürtünme kaynağı, literatüre bakıldığında magnezyum alaşımlarının birleştirilmesi için çok uygun olduğu görülmektedir. Sürtünme kaynağı işlemi sırasında, işlem parametreleri birleşimin mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerinde çok belirgin bir etkiye sahiptir. Yapılan bir çalışmada, AZ31 Mg alaşımı üzerinde sürtünme karıştırma kaynağı işlemi gerçekleştirmiştir (Yang ve ark. 2019). İşlem parametrelerinin mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri gözlenmiş ve kaynak işleminde, bağlantının performansını etkileyen iki tür kaynak kusurunun varlığı beyan edilmiştir. Bunlardan biri, mekanik ısıdan etkilenen bölge çevresindeki geometrik kusurun ters “V” yapısıdır ve açı, kaynak parametrelerine göre değişir. Diğer ise sınır yeniden kristalleşmesi nedeniyle ilk arayüzde metalurjik kusurların oluşturduğu ince parçacıklar ve oksitlerden oluşan süreksiz arayüzdür. Bu çalışmada her iki kusur da bağlantıların mekanik özellikleri üzerinde önemli etkilere sahip olduğu bildirilmiştir. Mg alaşımının sürtünme kaynağı sürecinde, dönme hızı; bağlantı oluşumunu ve arayüzdeki intermetaliklerin miktarını ve türünü etkileyen çok önemli bir faktördür (Yang ve ark. 2019).

Mg alaşımlarının kaynaklanabilirliğini ve Mg alaşımı ile diğer metallerin kaynaklanmasında karşılaşılan temel sorunları ele almaktadır. Çeşitli alaşım elementlerinin Mg alaşımı kaynak işlemi üzerindeki etkileri öncelikle araştırılmış, ancak henüz sistematik bir şekilde incelenmemiştir. Mg alaşımlarının başarılı bir şekilde kaynaklanması ve birleştirilmesi, özellikle Mg alaşımının diğer metallerle karşılaştırmalı olarak incelenmesi, teorik olarak çok önemli görünmektedir. Bu nedenle, Mg alaşımlarının metalik kaynağına ilişkin daha fazla araştırma yapılması acil bir ihtiyaçtır.

Sürtünme kaynağı Mg/Çelik birleştirmesi için son derece uygun bir yöntemdir. Geleneksel kaynak yöntemiyle karşılaştırıldığında, sürtünme kaynağı gözenekleri, çatlakları ve diğer yapısal kusurları etkili bir şekilde önleyebilir ve kaynak işleminde oluşan intermetalikler de daha az gözlenebilir. Mg alaşımı ve çeliğin sürtünme kaynağında, kaynak parametreleri arayüz elemanlarının difüzyonu üzerinde büyük bir etkiye sahiptir ve bu da bağlantının oluşumunu etkiler. Örneğin, Wang ve arkadaşları, DP600 galvanizli çelik ve AZ31B Mg alaşımını birleştirmek için anahtarsız sürtünme kaynak teknolojisini kullanmış ve kaynak parametrelerinin bağlantıdaki elemanların difüzyonu üzerindeki etkisini incelemiştir. Mg/çelik sürtünme kaynak bağlantısının uygun kaynak parametreleri altında güvenilir olabileceği rapor

edilmiştir. Arayüzde Fe-Al, Mg-Zn, Mg-Al intermetalikleri oluşturmak için metalurjik reaksiyonlar meydana gelir. Ayrıca, intermetalik tabakasının kalınlığı dönme hızının artmasıyla artar. Difüzyon kaynağında, bindirme sırasının birleştirme performansı üzerinde çok belirgin bir etkisi vardır.

Sonuç olarak, bu derlemede Mg alaşımlarının çeşitli kaynak yöntemleri ve süreçleri ele alınmış ve Mg alaşımı ile diğer metallerin kaynaklanmasında karşılaşılan temel sorunlara değinilmiştir. Mg alaşımlarının başarılı bir şekilde kaynaklanması ve birleştirilmesi, özellikle Mg alaşımının diğer metallerle karşılaştırmalı olarak incelenmesi, literatür durumunu göz önüne alındığında teorik olarak çok önemli görünmektedir. Bu nedenle, Mg alaşımlarının metalik kaynağına ilişkin daha fazla araştırma yapılması gerekliliği gözlenmektedir.

Kaynaklar;

- Cao, X., Jahazi, M., Immarigeon, J.P., Wallace, W. (2006). A review of laser welding techniques for magnesium alloys. *Journal of Materials Processing Technology* 171 188–204. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.06.068
- Casalino G, Guglielmi P, Lorusso VD, Mortello M, Peyre P, Sorgente D. (2017). Laser offset welding of AZ31B magnesium alloy to 316 stainless steel[J]. *J Mater Process Technol.*, 52, 9.
- Dobeš, F., & Dymáček, P. (2020). Creep behavior of AJ62 Magnesium–Aluminum–Strontium alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 8(2), 414–420. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.03.001>
- Kim, B. H., Park, K. C., Park, Y. H., & Park, I. M. (2010). Microstructure and creep properties of Mg-4Al-2Sn-1(Ca,Sr) alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 20(7), 1184–1191. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60276-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60276-4)
- Klenam, D. E., Ogunwande, G. S., Omotosho, T., (2021). Welding of magnesium and its alloys: an overview of methods and process parameters and their effects on mechanical behaviour and structural integrity of the welds. *Manufacturing Review*, 8(29), 1-31.
- Li, N., & Zheng, Y. (2013). Novel Magnesium Alloys Developed for Biomedical Application: A Review. *Journal of Materials Science and Technology*, 29(6), 489–502. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.02.005>
- Liu, Y. Q., Yu, D., Zhang, Y., Zhou, J. P., Sun, D. Q., & Li, H. M. (2023). Research advances on weldability of Mg alloy and other metals worldwide in recent 20 years. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 3458–3481. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.184>
- Liu, L, Ren,D., Li, Y. (2011). Static mechanics analyses of different laser weld bonding structures in joining AZ61 Mg alloy. *Int. Journal of Adhesion and Adhesives*, 31, 660–665. doi:10.1016/j.ijadhadh.2011.06.009
- Liu Liming, (2010). *Welding and Joining of Magnesium Alloys*, Woodhead Publishing in Materials, Cambridge, UK.
- Miao, Yugang, Han DUANFENG, Jingzheng YAO, (2010). Effect of laser offsets on joint

- performance of laser penetration brazing for magnesium alloy and steel[J]. *Mater Des*, 31(6) <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.12.035>.
- Mordike, B. L., & Ebert, T. (2001). Magnesium Properties - applications - potential. *Materials Science and Engineering A*, 302(1), 37–45. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01351-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01351-4)
- Nabiyouni, M., Brückner, T., Zhou, H., Gbureck, U., & Bhaduri, S. B. (2018). Magnesium-based bioceramics in orthopedic applications. *Acta Biomaterialia*, 66, 23–43. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2017.11.033>
- Nan, X., Lu, C., Chen, L., Sun, W., Yu, H., Liu, L., Chen K., Xiong, Z., Gao Z., Li J. (2020). Preparation of laminated structure in AZ31 magnesium alloy by explosive welding. *Materials Letter*, 268, 127574. doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127574
- Önür, A., Germen Tutaş, G., & Şevik, H. (2020). Role of Cerium on the creep properties of the Mg-Sn-Al based alloys. *International Journal of Cast Metals Research*, 33(6), 278–285. <https://doi.org/10.1080/13640461.2020.1853929>
- Pekguleryuz, M., Kainer, K., & Kaya, A. A. (2013). Fundamentals of magnesium alloy metallurgy. In *Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy*. <https://doi.org/10.1533/9780857097293>
- Pekguleryuz, M. O., & Kaya, A. A. (2003). Creep resistant magnesium alloys for powertrain applications. *Advanced Engineering Materials*, 5(12), 866–878. <https://doi.org/10.1002/adem.200300403>
- Singh, Kulwant, Singh, G., & Singh, H. (2018). Review on friction stir welding of magnesium alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*, 6(4), 399–416. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2018.06.001>
- Singh, Kulwinder, & Mittal, R. (2018). The effect of lanthanum on Microstructure & Mechanical properties of stir casted Mg alloy. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 6360–6369. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.246>
- Staiger, M. P., Pietak, A. M., Huadmai, J., & Dias, G. (2006). Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: A review. *Biomaterials*, 27(9), 1728–1734. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.10.003>
- Tan Caiwang, Xiao Liyuan, Liu Fuyun, Chen Bo, Song Xiaoguo, Li Liqun, et al.(2017). Influence of laser power on the microstructure and mechanical properties of a laser welded-brazed Mg alloy/Ni-coated steel dissimilar joint. *J Mater Eng Perform*, 26(6).
- Tian Lan, Du Shuangming, Hu Jie. (2016). The effect of holding time on the microstructure

- and mechanical properties of AZ31B magnesium alloy/aluminum/copper diffusion brazing joints[J]. *Mater Mech Eng.*, 40(2):66-70.
- Shang Jing, Wang Kehong, Zhou Qi, et al.(2012). The effect of welding temperature on the microstructure and properties of Mg/Al diffusion welded joints[J]. *Chin J Nonferrous Metals* ;22(8):1961e6.
- Yang, C., Chen, G., Qiao, J., Wu, C., Zhou, M., Zhang, G., & Shi, Q. (2024). Material flow during dissimilar friction stir welding of Al/Mg alloys. *International Journal of Mechanical Sciences*, 272(December 2023), 109173. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109173>
- Yang Xiawei, Feng Wuyuan, Li Wenya (2019). Microstructure and properties of AZ31 magnesium alloy needleless friction stir spot welding joints[J]. *Chin J Nonferrous Metals* 29(11), 2300-9.
- Wang, Z., Gao, M., Tang, H., Zeng,X. (2011). Characterization of AZ31B wrought magnesium alloy joints welded by high power fiber laser, *Mater. Charact.* 62 943–951, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.07.002>.
- Zhang, Jinghuai, Zhang, M., Meng, J., Wu, R., & Tang, D. (2010). Microstructures and mechanical properties of heat-resistant high-pressure. *Materials Science & Engineering A*, 527(10–11), 2527–2537. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.12.048>
- Zhang, Junlei, Zhang, H., Chen, X., Li, Z., & Huang, G. (2025). Microstructural mechanisms and mechanical behavior of friction-stir-welded Mg alloy laminate joints. *Journal of Materials Processing Technology*, 338(February), 118779. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2025.118779>
- Zhou H, Gu X., Gu X., Dong J., Xu G. (2022). Improvement in microstructure and mechanical properties of laser welded steel/aluminum alloy lap joints using high-entropy alloy interlayer. *Journal of Materials Processing Technology*, 20(139-146). <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.063>.

