

Polimer/Faz Değişim Malzemesi (FDM) Hibrit Sistemleri: Termal Enerji Depolamada Yenilikçi Yaklaşımlar

Recep Taş¹

Derya Kahraman Doğuşcu²

Nilay Akkuş Taş³

Özet

Polimer/faz değişim malzemesi (FDM) hibrit sistemleri, termal enerji depolama teknolojilerinin performansını artırmak amacıyla geliştirilen yenilikçi kompozit yapılardır. FDM'ler yüksek gizli ısı depolama kapasiteleri sayesinde düşük sıcaklık farklarında büyük miktarda enerji depolayabilse de, düşük ısıl iletkenlik, faz sızıntısı, döngüsel kararsızlık ve hacim değişimi gibi sınırlamalar barındırmaktadır. Polimer matrisler, FDM'in yapısal bütünlüğünü koruyarak erime sırasında ortaya çıkan sızıntı sorununu ortadan kaldırmakta ve hibrit sistemin mekanik dayanımını artırmaktadır. Ayrıca nanodoldurucuların entegrasyonu, ısıl iletkenliği artırarak ısı transfer verimini iyileştirmekte ve hibrit malzemelerin uygulama potansiyelini genişletmektedir.

Bu çalışmada polimer/FDM hibrit sistemlerinin temel tasarım stratejileri; mikrokapsülleme, kompozit üretim teknikleri, gözenekli matris impregnasyonu ve şekil stabil FDM oluşum mekanizmaları bağlamında ele alınmıştır. Hibrit sistemlerin termal performansı diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), termogravimetrik analiz (TGA), termal iletkenlik ölçümleri, ısıl döngü testleri ve termal görüntüleme teknikleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, uygun polimer seçimi ve nanoadditif optimizasyonu ile yüksek enerji

- 1 Doç.Dr., Bartın Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoteknoloji Bölümü, rtas@bartin.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-3743-7770
- 2 Doç.Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü, derya.kahraman@gop.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-6181-5778
- 3 Dr. Öğr. Üyesi, Amasya Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü/Merkezi Araştırma Uygulama Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi (AUMAULAB), nilayakkustas@amasya.edu.tr, 0009-0004-8644-6659

depolama kapasitesi, iyi ısı kararlılık ve uzun dönem döngüsel dayanım elde edilebileceğini ortaya koymaktadır.

Polimer/FDM hibritleri; binalarda pasif ısı yönetim, elektronik soğutma, lityum-iyon batarya termal kontrolü, güneş enerjisi sistemleri, akıllı tekstiller ve soğuk zincir taşımacılığı gibi geniş bir uygulama alanında kullanılmaktadır. Bu bağlamda hibrit sistemler, enerji verimliliğinin artırılması ve sürdürülebilir malzeme teknolojilerinin geliştirilmesinde önemli bir potansiyel sunmaktadır.

1. Giriş

Termal enerji depolama (TED) teknolojileri, sürdürülebilir enerji sistemlerinin verimliliğinin artırılmasında ve enerji arz-talep dengesizliğinin giderilmesinde temel bir rol oynamaktadır. Güneş, jeotermal veya atık ısı gibi kesintili enerji kaynaklarının verimli şekilde kullanılmasını sağlayan TED sistemleri arasında, faz değişim malzemeleri (FDM) son yıllarda dikkat çekici şekilde öne çıkmıştır. FDM'ler, erime–donma süreçlerinde yüksek gizli ısı depolama kapasitesine sahip olmaları nedeniyle, birim hacim veya kütle başına yüksek miktarda enerjiyi depolayabilmektedir. Bu özellikleri sayesinde bina yalıtımı, elektronik soğutma, batarya termal yönetimi, akıllı tekstiller ve yenilenebilir enerji entegrasyonu gibi geniş bir uygulama alanı bulmaktadır (Brechtel et al., 2024; Zalba, Marín, Cabeza, & Mehling, 2003).

Bununla birlikte geleneksel FDM'lerin kullanımı çeşitli sınırlayıcı faktörlerle karşı karşıyadır. Özellikle parafin temelli organik FDM'lerde görülen düşük ısı iletkenlik, faz sızıntısı, hacim değişimi, ısıtma-soğutma döngülerinde kararlılık kaybı ve yanıcılık gibi problemler teknolojik ölçeklendirmeyi zorlaştırmaktadır. İnorganik FDM'ler (tuz hidratlar vb.) yüksek ısı iletkenliğe sahip olsa da aşırı soğuma, faz ayrışması ve korozyon gibi ciddi sorunlar gözlenmektedir. Bu teknik engellerin giderilmesi için araştırmalar polimer/FDM hibrit sistemlerine yönelmiştir (A. B. Liu, Xie, Wu, & Wang, 2022).

Polimer matrisler, FDM'leri fiziksel veya kimyasal olarak bünyelerinde tutarak sızıntı problemini engeller, şekil stabilitesi sağlar, döngüsel dayanımı artırır ve yapıların mekanik dayanımını iyileştirir. Ayrıca nano doldurucularla modifiye edilmiş polimer matrisler, FDM sistemlerinin ısı iletkenliğini anlamlı düzeyde artırabilmektedir (Nagar & Sreenivasa, 2024). Bu nedenle polimer/FDM hibritleri, ısı depolamada yeni nesil fonksiyonel kompozit malzemelerin geliştirilmesinde oldukça kritik bir konuma sahiptir. Literatürde özellikle grafen, karbon nanotüp (CNT), metal oksit nanoparçacıklar ve biyopolimer sistemler ile desteklenen FDM kompozitlerinin enerji depolama performansında kayda değer iyileşmeler rapor edilmektedir.

Ayrıca güncel çalışmalar, hibrit sistemlerin sadece termal depolama kapasitesini artırmakla kalmayıp akıllı davranışlar (ör. kendini iyileştirme, sıcaklık duyarlı renk değişimi, ısı akışı kontrolü) gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Bu yenilikçi yaklaşımlar, polimer/FDM hibritlerini geleceğin binalarında pasif soğutma, elektroniklerde hızlı termal yönetim, batarya güvenliği ve akıllı ambalajlama gibi stratejik uygulamalarda kullanılabilir hâle getirmektedir.

Sonuç olarak, polimer/FDM hibrit sistemleri geleneksel FDM'lerin teknik sınırlamalarına çok yönlü çözümler sunmakta ve enerji depolama alanında yüksek performanslı, güvenilir ve sürdürülebilir malzeme tasarımlarının geliştirilmesi için önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Bu bölümde, polimer matrisli FDM hibritlerinin temel kavramları, üretim yöntemleri, termal performansları ve geleceğe yönelik yenilikçi yaklaşımları ayrıntılı biçimde ele alınacaktır.

2. Faz Değişim Malzemeleri (FDM): Temel Kavramlar

FDM, son yıllarda enerji verimliliği ve sürdürülebilir enerji yönetimi alanlarında giderek artan bir ilgiyle karşılanmaktadır. FDM'ler, belirli bir sıcaklık aralığında faz değişimi gerçekleştirerek, ısı enerjisiyi gizli ısı olarak depolayabilen ve gerektiğinde serbest bırakabilen fonksiyonel malzemelerdir. Bu özellikleri sayesinde, enerji depolama sistemlerinde, binalarda, elektronik cihazlarda, tekstil ürünlerinde ve daha birçok alanda yenilikçi uygulamalara olanak sağlamaktadırlar (Kale et al., 2025). FDM'lerin temel kavramlarının anlaşılması, bu malzemelerin potansiyelinin ortaya konulması ve uygulama alanlarının genişletilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

FDM'leri, kimyasal bileşimlerine göre üç ana grupta incelenmektedir: organik, inorganik ve ötektik FDM'ler. Organik FDM'ler, özellikle parafinler ve yağ asitleri gibi maddeleri içerirken, inorganik FDM'ler ise genellikle tuz hidratları ve metal alaşımlarını kapsamaktadır. Ötektik FDM'ler ise iki veya daha fazla bileşenin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen ve tek bir sıcaklıkta faz değişimi gösteren malzemelerdir (M. S. Mert, Sert, & Mert, 2018). Organik FDM'ler, katı-sıvı faz değişimi sırasında küçük hacim değişimi göstermeleri ve yüksek gizli ısı depolama kapasitelerine sahip olmaları nedeniyle diğer türlere göre daha çok tercih edilmektedir (Feldman, Shapiro, & Banu, 1986). Bununla birlikte, inorganik FDM'ler genellikle daha yüksek ısıl iletkenlik ve daha geniş sıcaklık aralıklarında çalışabilme avantajına sahiptir (Cárdenas & León, 2013).

FDM'lerin enerji depolama sistemlerindeki temel işlevi, faz değişimi sırasında ısıyı sabit sıcaklıkta depolayabilmeleridir. Bu süreçte, malzeme

erirken çevresinden ısı alır ve bu ısıyı gizli ısı olarak bünyesinde tutar. Katılma sırasında ise bu ısıyı tekrar ortama bırakır. Bu özellik, özellikle güneş enerjisi sistemleri, ısıtma-soğutma uygulamaları ve elektronik cihazların termal yönetimi gibi alanlarda enerji talebinin ve arzının zamansal olarak dengelenmesini sağlar (Kerroumi, 2017). Örneğin, güneş enerjisiyle çalışan bir su ısıtıcısında, gündüz depolanan ısı gece kullanıma sunulabilir (Oudaoui & Faraji, 2022). Bu sayede, enerji üretimi ile tüketimi arasındaki zaman farkı minimize edilir ve sistem verimliliği artırılır (Zohra, Amine, & Alhamany, 2019).

FDM'lerin temel termal özellikleri arasında gizli ısı kapasitesi, özgül ısı, erime ve donma sıcaklıkları ile ısı iletkenlik yer almaktadır. Gizli ısı kapasitesi, malzemenin faz değişimi sırasında depolayabileceği enerji miktarını belirlerken, ısı iletkenlik ise bu enerjinin ne kadar hızlı transfer edilebileceğini gösterir (Kale et al., 2025). Ancak, FDM'lerin pratik uygulamalardaki en büyük kısıtlarından biri düşük ısı iletkenlikleridir. Bu durum, enerji depolama ve boşaltma süreçlerinde ısı transferinin yavaşlamasına neden olur (N. Zhang et al., 2018). Bu sorunun üstesinden gelmek için, FDM'lere yüksek ısı iletkenliğe sahip katkı maddeleri eklenmekte veya kapsülleme teknikleri kullanılmaktadır (Lin, Jia, Alva, & Fang, 2018). Örneğin, karbon bazlı nanoparçacıklar veya metal oksit nanoparçacıklar eklenerek ısı iletkenlikte önemli artışlar sağlanabilmektedir (Temel & Çiftçi, 2018). Temel ve arkadaşlarının çalışmasında, %5 oranında grafen nanoparçacık (GNP) katılan bir organik FDM kompozitinin ısı iletkenliğinde %154,9 oranında iyileşme elde edildiği belirtilmiştir. Ayrıca, ZnO nanoparçacıklarının gizli ısı kapasitesini artırıcı etkisi olduğu da gözlemlenmiştir (Temel & Çiftçi, 2018).

FDM'lerin bir diğer önemli özelliği ise uzun dönemli termal ve kimyasal kararlılıklarıdır. Özellikle enerji depolama uygulamalarında, malzemenin tekrar tekrar faz değişimi yaparken özelliklerini kaybetmemesi gerekmektedir. Bu amaçla, mikro veya makro kapsülleme yöntemleriyle FDM'lerin yapısal bütünlükleri korunmakta ve sızdırma problemleri önlenmektedir (H. H. Mert, Mert, & Mert, 2020). Mert ve arkadaşlarının çalışmasında, n-hekzadekan/modifiye montmorillonit kompozit FDM'lerin faz inversiyon emülsifikasyonu yöntemiyle hazırlanarak, düşük sıcaklıktaki ısıtma ve soğutma sistemlerinde kullanılabilecek yüksek termal kararlılığa sahip mikro kapsüller elde edildiği belirtilmiştir (H. H. Mert et al., 2020). Benzer şekilde, n-oktadekan bazlı FDM'lerin modifiye montmorillonit kil ile mikro kapsüllemesiyle, düşük sıcaklık aralığında (20-35°C) kullanılabilecek, yüksek termal enerji depolama kapasitesine ve kararlılığa sahip malzemeler geliştirilmiştir (H. H. Mert & Bayram, 2020).

FDM'lerin temel kavramlarının anlaşılması, bu malzemelerin enerji depolama ve termal yönetim uygulamalarındaki potansiyelinin ortaya konulması açısından kritik öneme sahiptir. FDM'lerin kimyasal yapısı, termal özellikleri, kapsülleme teknikleri, katkı maddeleri ve uygulama alanları üzerine yapılan araştırmalar, bu malzemelerin daha verimli ve güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için yol göstermektedir. Enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda, FDM'lerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, geleceğin enerji sistemlerinde önemli bir rol oynayacaktır.

2.1. Polimer Matrislerin Temel Özellikleri

Polimer matrisler, günümüzün ileri malzeme teknolojilerinde çok çeşitli uygulama alanları bulan, yapısal ve fonksiyonel özellikleriyle öne çıkan temel malzeme sınıflarından biridir. Polimerlerin temel özellikleri, onları hem mühendislik hem de enerji uygulamalarında vazgeçilmez kılmaktadır. Özellikle termoplastikler ve termosetler gibi iki ana polimer grubu, farklı yapısal düzenleri ve çapraz bağlanma dereceleri sayesinde çok çeşitli performans gereksinimlerine cevap verebilmektedir. Polimerlerin termal, mekanik ve kimyasal dayanımları, bu malzemelerin hem geleneksel hem de yenilikçi uygulamalarda tercih edilmesinin başlıca nedenlerindendir. Son yıllarda ise polimerlerin termal enerji depolama sistemlerinde kullanımı, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır.

Polimerlerin termal, mekanik ve kimyasal dayanımları, onların mühendislik uygulamalarındaki başarısını belirleyen en önemli parametrelerdendir. Örneğin, grafen oksit katkılı polipropilen (PP) kompozitler üzerine yapılan bir çalışmada, grafen oksit ilavesinin PP polimerinin çekme dayanımını %42, elastiklik modülünü ise %71 oranında artırdığı, buna karşılık kopma uzaması ve darbe dayanımlarında sırasıyla %341 ve %56 oranında azalma olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, grafen oksit katkısı ile ısı sapma sıcaklığı (HDT) ve Vicat yumuşama sıcaklığında da artış gözlenmiştir. Bu bulgular, polimer matrislerin mekanik ve termal özelliklerinin, katkı maddeleriyle önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermektedir (Yetgin, Karadeniz, & Guleşen, 2017). Bu tür modifikasyonlar, polimerlerin yüksek sıcaklık uygulamalarında veya mekanik yük altında çalışacağı ortamlarda daha dayanıklı hale gelmesini sağlar.

Polimer matrislerin termal enerji depolama sistemlerinde kullanılabilirliği, özellikle FDM'lerin polimerlerle birleştirilmesiyle daha da artmaktadır. Bu tür kompozitler, enerji depolama kapasitesini artırırken, aynı zamanda sistemin mekanik ve kimyasal stabilitesini de iyileştirmektedir. Metal

oksit nanoparçacıklarla güçlendirilmiş polietilen glikol (PEG) bazlı FDM'ler üzerine yapılan bir çalışmada, PEG'in termal iletkenliğinin %27-34 oranında arttığı ve ısı şarj/deşarj sürelerinin önemli ölçüde azaldığı gösterilmiştir. Ayrıca, bu kompozitlerin faz değişim sıcaklıklarında küçük kaymalar ve termal enerji depolama kapasitesinde %1-5 arasında azalma olduğu, ancak genel olarak iyi bir döngüsel kimyasal stabilite ve TED güvenilirliği sunduğu belirtilmiştir (Ouikhalfan, Hekimoglu, Sari, Gencel, & Tyagi, 2022). Bu bulgular, polimer matrislerin, özellikle nanoparçacık katkılarıyla, termal enerji depolama sistemlerinde verimli ve güvenilir bir çözüm sunabileceğini göstermektedir. Literatürde, polimer matrislerin FDM'lerle birlikte kullanıldığı çeşitli uygulamalar mevcuttur. Örneğin, polimer kapsüller içinde mikroenkapsüle edilen FDM'leri, güneş enerjisiyle ısıtma uygulamalarında yüksek termal kararlılık ve güvenilirlik sunmaktadır. Docosane'in polimetilmetakrilat (PMMA) ile mikroenkapsülasyonu üzerine yapılan bir çalışmada, elde edilen mikroenkapsüle faz değişim malzemesinin (MEFDM) iyi bir kimyasal stabiliteye ve termal döngü dayanımına sahip olduğu, ayrıca 41°C'de erime ve 40,6°C'de kristalleşme sıcaklıklarına sahip olduğu gösterilmiştir. Bu özellikler, MEFDM'lerin güneş enerjisiyle ısıtma gibi termal enerji depolama uygulamalarında potansiyelini ortaya koymaktadır (Alkan, Sari, Karaieklı, & Uzun, 2009).

Polimerlerin termal enerji depolama sistemlerinde kullanılabilirliği, aynı zamanda enerji dönüşüm verimliliği ve sistem entegrasyonu açısından da önemlidir. Termal enerji depolama sistemlerinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyonu, enerji arzının sürekliliği ve güvenilirliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. TED sistemleri üzerine yapılan kapsamlı bir bibliyometrik analizde, son yirmi yılda TED araştırmalarında önemli bir artış olduğu ve ana araştırma temaları arasında FDM'lerin geliştirilmesi, TED sistemlerinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyonu ve sistem optimizasyonunun yer aldığı belirtilmiştir. Ayrıca, polimer matrisli FDM'lerin geliştirilmesi ve uygulanması, enerji depolama kapasitesinin artırılması ve sistem güvenilirliğinin sağlanması açısından önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır (Karadağ, Akçay, & Karakurt, 2024). Bu analizde, TED sistemlerinin sürdürülebilir ve verimli enerji çözümleri sunma potansiyeli vurgulanmıştır.

Polimer matrislerin termal enerji depolama uygulamalarında kullanılabilirliği, aynı zamanda yeni nesil enerji sistemlerinin tasarımında da önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle güneş enerjisiyle çalışan konsantre güneş enerjisi (CSP) santrallerinde, polimer matrisli FDM'leri ve kompozitler, enerji depolama kapasitesini ve sistem esnekliğini artırmaktadır. CSP santrallerinde termal enerji depolama sistemlerinin entegrasyonu üzerine

yapılan bir çalışmada, TED'nin enerji üretimini %48 oranında artırdığı ve özellikle olumsuz hava koşullarında enerji arzının sürekliliğini sağladığı gösterilmiştir. Bu bulgular, polimer matrisli TED sistemlerinin, yenilenebilir enerji projelerinde güç kalitesini artırmada ve enerji yönetiminde esneklik sağlamada önemli bir araç olduğunu göstermektedir (Al-Failkawi & Abdulrahman, 2025).

Polimer matrislerin termal enerji depolama uygulamalarındaki başarısı, aynı zamanda mikro ve nano ölçekli kapsülleme tekniklerinin geliştirilmesiyle de ilişkilidir. Polimer matrisli FDM'lerin mikro/nanoenkapsülasyonu, FDM'lerinin sızmasını önlerken, aynı zamanda ısı transfer yüzey alanını artırarak sistemin genel verimliliğini yükseltmektedir. Yenilenebilir termal enerji depolamada polimer kapsüllü FDM'ler üzerine yapılan kapsamlı bir incelemede, mikro/nanoenkapsülasyon, gözenekli polimerik yapı ve şekil-stabilizasyon stratejilerinin, FDM'lerin enerji depolama sistemlerinde etkinliğini artırdığı belirtilmiştir. Ayrıca, bu tür sistemlerin güneş termofotovoltaik, atık ısı geri kazanımı, güneş termal elektrik jeneratörleri ve binalarda enerji tasarrufu gibi geniş bir uygulama alanına sahip olduğu vurgulanmıştır (Kumar, Sarkar, & Saha, 2024). Bu bulgular, polimer matrislerin, enerji depolama teknolojilerinde çok yönlü ve yenilikçi çözümler sunduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, polimer matrislerin temel özellikleri, onları hem mühendislik hem de enerji uygulamalarında vazgeçilmez kılmaktadır. Termoplastikler ve termosetler arasındaki yapısal ve fonksiyonel farklılıklar, polimerlerin geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmasını sağlamaktadır. Polimerlerin termal, mekanik ve kimyasal dayanımları, bu malzemelerin hem geleneksel hem de yenilikçi uygulamalarda tercih edilmesinin başlıca nedenlerindendir. Özellikle termal enerji depolama sistemlerinde polimer matrislerin kullanımı, enerji verimliliği, sistem güvenilirliği ve sürdürülebilirlik açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Literatürdeki güncel çalışmalar, polimer matrislerin katkı maddeleriyle ve mikro/nanoenkapsülasyon teknikleriyle geliştirilerek, termal enerji depolama uygulamalarında yüksek performanslı ve çevre dostu çözümler sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

2.2. Polimer/FDM Hibrit Sistemlerinin Tasarımı

Polimer/FDM hibrit sistemlerinin tasarımı, günümüzde enerji verimliliği, sürdürülebilirlik ve çoklu uygulama alanları açısından büyük önem taşımaktadır. Isıl enerji depolama teknolojilerinde FDM'ler, yüksek gizli ısı depolama kapasiteleri ve sabit sıcaklıkta enerji depolama yetenekleri sayesinde öne çıkmaktadır. Ancak, bu malzemelerin doğrudan kullanımı,

düşük ısı iletkenlik, sızdırma riski ve yapısal kararsızlık gibi çeşitli zorluklar içermektedir. Bu nedenle, polimer matrislerle hibritleştirilen FDM sistemleri hem enerji depolama kapasitesini hem de yapısal bütünlüğü artırmak amacıyla multidisipliner bir araştırma alanı olarak ön plana çıkmaktadır. Polimer/FDM hibrit sistemleri, FDM'lerin termal enerji depolama kapasitesini korurken sızıntı, düşük ısı iletkenlik ve zayıf mekanik dayanım gibi sınırlamaları gidermek amacıyla geliştirilen malzeme tasarımlarıdır. Bu sistemlerde FDM, polimer matris içinde fiziksel veya kimyasal yollarla stabilize edilir; böylece şekil stabilitesi, ısı transfer performansı ve döngüsel kararlılık önemli ölçüde iyileştirilir. Hibrit yapıların tasarımında kapsülleme, kompozitleştirme, gözenekli yapı entegrasyonu ve nano-dolgu takviyesi gibi çeşitli stratejiler kullanılmaktadır (H. Zhang, Shi, & Ma, 2021).

2.2.1. Kapsülleme – Mikro/Nano Kapsül FDM Sistemleri

Polimer/FDM hibrit sistemlerinin geliştirilmesinde nano ve mikro boyutta kapsülleme teknikleri kullanılmaktadır. FDM'lerin mikrokapsül veya nanokapsül formunda kullanılması, sızıntı problemlerine karşı etkili stratejilerden biridir. Kapsülleme yönteminde FDM, polimer kabuk malzemesi ile çevrelenerek çekirdek-kabuk (core-shell) tipi kompozitler oluşturulur. Özellikle parafin gibi organik FDM'lerin mikro boyutta kapsüllemesi, sıvı fazda sızdırma riskini ortadan kaldırmakta ve ısı kararlılığı artırmaktadır. Örneğin, n-oktadekan, yüzeyi modifiye edilmiş montmorillonit kili varlığında faz inversiyon emülsifikasyonu yöntemiyle mikro boyutta kapsüllemiştir. Hazırlanan mikrokapsüllerin faz değişim sıcaklık aralığı, ısı enerji depolama kapasiteleri ve ısı kararlılıkları, düşük sıcaklıktaki (20-35°C) gizli ısı depolama uygulamalarında kullanılabilir potansiyelini göstermektedir (H. H. Mert & Bayram, 2020). Bu tür kapsülleme teknikleri, polimer/FDM hibrit sistemlerinin çok çeşitli uygulama alanlarında kullanılmasını mümkün kılmaktadır.

2.2.2. Polimer Kompozit FDM Yapıları

Bu yapılar, FDM'in polimer matrisle karıştırılması sonucu elde edilir. Polimer, FDM'i fiziksel olarak hapseder ve kompozit malzeme şeklinde bir şekil-stabil FDM ortaya çıkar. Polimer/FDM hibrit sistemlerinin tasarımında, polimer matrisler hem mekanik dayanıklılık hem de şekil kararlılığı sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Örneğin, emülsiyon şablonlama yöntemiyle sentezlenen poli(stiren-ko-divinil benzen) esaslı gözenekli polimerler, modifiye edilmiş kaolinit kil ile kullanılarak n-nonadekan esaslı şekilce kararlı faz değiştiren maddelerin hazırlanmasında destek malzemesi olarak görev almaktadır. Bu tür hibrit sistemlerde, gözenekli yapı sayesinde FDM'in

sızdırmazlığı sağlanırken, polimer matrisin yüzey alanı ve ısıl kararlılığı da artırılmaktadır. Özellikle %1 dolgu içeren gözenekli kompozitlerin en yüksek ısıl kararlılık ve yüzey alanına sahip olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, bu yöntemle üretilen n-nonadekan içeren şekilce kararlı tüm FDM'lerin yüksek ısıl enerji depolama kapasitesine sahip olduğu ve sızdırmazlık özelliği gösterdiği tespit edilmiştir (Bayram, Mert, & Mert, 2023). Bu bulgu, polimer/FDM hibrit sistemlerinin enerji depolama uygulamalarında güvenilirliğini ve uzun ömürlülüğünü artıran önemli bir tasarım kriteridir.

2.2.3. Gözenekli Polimerlerde FDM Emprenye Teknikleri

Polimer/FDM hibrit sistemlerinin tasarımında bir diğer önemli yaklaşım, polimer matrisin gözenekli yapısının optimize edilmesidir. Gözenekli polimerler, FDM'in homojen dağılımını ve hızlı ısı transferini destekler. Modifiye edilmiş kaolinit kil katkılı poli(stiren-ko-divinil benzen) matrisli kompozitlerde, hiyerarşik gözenekli yapı elde edilerek, FDM'in hem sızdırmazlığı hem de yüksek enerji depolama kapasitesi sağlanmıştır. Bu tür sistemlerde, gözenek morfolojisinin iyileştirilmesi ve dolgu oranının optimize edilmesi, kompozitin ısıl kararlılığını ve yüzey alanını artırmaktadır (Bayram et al., 2023). Böylece, polimer/FDM hibrit sistemleri, enerji depolama uygulamalarında hem mekanik hem de termal açıdan üstün özellikler sunmaktadır.

2.3. Üretim ve Sentez Yöntemleri

Polimer/FDM hibrit sistemlerinin performansı, kullanılan üretim yöntemleri ve prosese bağlı morfolojik yapı tarafından doğrudan belirlenmektedir. Üretim süreci; FDM'nin polimer matris içinde dağılımını, sızıntı kontrolünü, ısıl iletkenlik profilini, çevrimsel dayanımı ve mekanik özellikleri etkileyen kritik bir parametredir. Bu nedenle uygun üretim stratejisinin seçilmesi, uygulamaya bağlı olarak malzemenin hem mikroyapısal hem de makro ölçekli özelliklerinin optimize edilmesi açısından büyük önem taşır (Agyenim, Hewitt, Eames, & Smyth, 2010).

2.3.1. Emülsiyon ve İnterfaz Polimerizasyonu ile Mikro/Nano Kapsül Sentezi

Mikrokapsül ve nanokapsül FDM sistemleri, çekirdek (FDM) ve kabuk (polimer) olmak üzere iki fazlı bir yapıdan oluşur. Kabuk oluşumu genellikle **emülsiyon polimerizasyonu**, **interfaz (ara yüzey) polimerizasyonu** veya **in-situ polimerizasyon** teknikleriyle sağlanır. Bu teknikle, özellikle mikro ve makro kapsülasyon işlemlerinde, FDM'lerin polimer matrisler içinde mikro boyutta kapsüllenmesini sağlar. Örneğin, n-hekzadekan/

modifiye montmorillonit kompozit faz değiştiren maddeler, faz inversiyon emülsifikasyonu yöntemiyle hazırlanmış ve polistiren-ko-divinilbenzen kopolimer kabuk içerisinde mikro boyutta kapsüllenmiştir (H. H. Mert et al., 2020). Bu yöntemde, yüzey modifiye montmorillonit (MMT) kili, emülsiyon sistemine farklı oranlarda ilave edilerek, kapsülün hem ısı hem de yapısal kararlılığı artırılmıştır. Hazırlanan mikrokapsüllerin ısı, morfolojik ve yapısal özellikleri incelenmiş ve elde edilen kompozit malzemelerin düşük sıcaklıktaki (18-30°C) ısıtma ve soğutma sistemlerinde enerji depolanması amacıyla kullanılabilecek potansiyele sahip olduğu gösterilmiştir. Polimer/FDM hibrit sistemlerinin sentezinde, kapsülasyon teknikleri de yaygın olarak kullanılmaktadır. Makro, mikro ve nano ölçekli kapsülasyon işlemleriyle, FDM'lerin sıvı fazda sızdırma problemi ortadan kaldırılırken, ısı transfer yüzeyi artırılarak enerji depolama kapasitesi optimize edilmektedir (H. H. Mert et al., 2020). Örneğin, n-hekzadekan faz değiştiren maddesi, stiren ve divinilbenzen kabuk içinde mikro boyutta kapsüllenmiş ve elde edilen mikrokapsüllerin erime entalpisi 131,074 J/g olarak bulunmuştur. Kapsülleme işlemi sayesinde, FDM'lerin dış çevrelerden etkilenme derecesi azaltılmakta ve malzemenin katıdan sıvıya geçişi esnasında mevcut kabuk hacminde sabit tutulması mümkün olmaktadır (H. H. Mert & Mert, 2020).

2.3.2. Elektroçigirme (Electrospinning) ile FDM-Polimer Lif Üretimi

Elektroçigirme tekniği, polimer nanoliflerin üretiminde sağladığı esneklik, ölçeklenebilirlik ve morfolojik kontrol avantajlarıyla dikkat çekmektedir. Elektroçigirme ile üretilen liflerin çapı genellikle 100 nm ile birkaç mikrometre arasında değişmektedir ve bu lifler, yüksek yüzey alanı/hacim oranı, gözeneklilik ve fonksiyonel katkı maddelerinin homojen dağılımı gibi özellikler sunar (Frenot & Chronakis, 2003). Elektroçigirme sürecinde, polimer çözeltilerinin veya eriyiklerinin bir elektrik alanı altında ince lifler halinde çekilmesiyle sürekli ve homojen lifler elde edilir. Bu süreçte, polimer çözeltisinin konsantrasyonu, viskozitesi, elektriksel iletkenliği ve yüzey gerilimi gibi parametreler, elde edilen liflerin morfolojisi ve çapı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (S. Q. Liu, White, & Reneker, 2019). Liu ve arkadaşlarının çalışmasında, polimer çözeltisinin konsantrasyonu, elektriksel iletkenliği ve yüzey geriliminin ayarlanmasıyla, polimer nanoliflerin çapı ve morfolojisinin hassas bir şekilde kontrol edilebildiği gösterilmiştir (S. Q. Liu et al., 2019). Bu tür parametrelerin kontrolü, FDM-polimer liflerin istenen özelliklerde üretilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Elektroçigirme ile FDM-polimer lif üretimi, özellikle termal enerji depolama uygulamalarında büyük bir potansiyel sunmaktadır. Babapoor ve

arkadaşlarının çalışmasında, PEG gibi FDM'leri, poliamid-6 (PA6) ve çeşitli nanopartiküllerle birlikte tek nozullu elektroegirme yöntemiyle kompozit nanolifler halinde üretilmiştir (Babapoor, Karimi, & Khorram, 2016). Bu çalışmada, elde edilen nanokompozit liflerin yüksek termal stabiliteye ve güvenilirliğe sahip olduğu, ayrıca nanoparçacık yüklemesinin artırılmasıyla lif çapının azaldığı gözlemlenmiştir. Özellikle Al_2O_3 katkılı kompozitlerin termal iletkenlikte maksimum artış sağladığı belirtilmiştir (Babapoor et al., 2016). Bu bulgular, elektroegirme ile üretilen FDM-polimer liflerin, enerji depolama ve ısı yönetimi uygulamalarında kullanılabilirliğini göstermektedir.

Elektroegirme ile FDM-polimer lif üretiminde, çekirdek-kabuk (core-sheath) yapılarının geliştirilmesi de önemli bir araştırma alanıdır. Arat ve arkadaşlarının çalışmasında, poliakrilonitril (PAN) kabuk ve PEG veya Poli(etilen glikol) metil esterler (PEGME) çekirdekten oluşan nanolifler, koaksiyel elektroegirme yöntemiyle üretilmiştir (Noyan, Onder, Sarier, & Arat, 2018). Bu çalışmada, üretilen liflerin morfolojisi, termal stabilitesi ve faz değişim performansları detaylı olarak incelenmiştir. DSC analizleri sonucunda, PAN-PEG ve PAN-PEGME nanoliflerinin ısıtma entalpilerinin sırasıyla 38-133 J/g ve 29-60 J/g arasında değiştiği ve iyi bir enkapsülasyon verimliliği sağlandığı gösterilmiştir (Noyan et al., 2018). Ayrıca, tekstil bazlı sandviç yapılar halinde kullanılan bu nanoliflerin, çevre sıcaklık değişimlerine karşı tamponlayıcı bir işlev gördüğü ve termal özelliklerinin arttığı belirtilmiştir (Noyan et al., 2018). Bu tür çekirdek-kabuk yapılar, FDM'in polimer matris içinde sızmasını engelleyerek, uzun ömürlü ve güvenilir enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

2.3.3. 3B Yazdırma (Additive Manufacturing) ile FDM-Polimer Yapıları

3B yazdırma teknolojileri, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla karmaşık geometrilerin hızlı, hassas ve malzeme israfı olmadan üretilmesine olanak tanır. Bu teknoloji, özellikle enerji depolama ve yönetimi uygulamalarında, FDM-polimer kompozitlerinin istenen şekil ve boyutlarda üretilmesini mümkün kılarak, uygulama alanlarını genişletmektedir. Ramesh ve arkadaşları, 3B yazdırma teknolojisinin endüstrideki hızlı gelişimini ve gelecekteki potansiyelini vurgulayarak, bu teknolojinin özellikle yeni nesil kompozit malzemelerin üretiminde önemli bir rol oynadığını belirtmiştir (Ramesh, Niranjana, Bhoopathi, & Rajeshkumar, 2024). Ayrıca, 3B yazdırma ile üretilen polimer matris kompozitlerin mekanik, elektriksel ve termal özelliklerinin, kullanılan katkı maddelerine ve matrisin yapısına bağlı olarak değiştirilebildiği ifade edilmiştir. Singh ve arkadaşları, 3B yazdırma ile üretilen polimer matris kompozitlerin, özellikle enerji depolama, otomotiv,

havacılık ve biyomedikal alanlarda geniş uygulama potansiyeline sahip olduğunu belirtmiştir (Singh, Kumar, & Chohan, 2020).

FDM-polimer kompozitlerinin 3B yazdırma ile üretimi, malzeme seçimi ve üretim parametrelerinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesini gerektirir. Fused Deposition Modeling (FDM) veya Fused Filament Fabrication (FFF) gibi yaygın 3B yazdırma tekniklerinde, polimer matris içerisine mikroenkapsüle FDM'ler, karbon nanotüpler, metal teller veya bor nitrür gibi katkı maddeleri eklenerek kompozit filamentler hazırlanır. Park ve arkadaşları, FDM tabanlı 3B yazdırmada kullanılan polimer kompozit filamentlerin üretim yöntemlerini, fiziksel ve mekanik özelliklerini detaylı bir şekilde incelemiş ve karbon nanomalzemeler, metaller ve seramiklerin polimer matrislere entegre edilmesiyle fonksiyonel kompozitlerin üretilebileceğini göstermiştir (Park & Fu, 2021). Bu tür kompozit filamentler, enerji depolama ve termal yönetim uygulamalarında kullanılmak üzere karmaşık geometrilere 3B yazdırılabilmektedir.

2.3.4. Fiziksel ve Kimyasal Karışım Teknikleri

FDM-polimer kompozitlerinin geliştirilmesinde karşılaşılan başlıca zorluklardan biri, FDM'lerin düşük termal iletkenliği ve yapısal stabilitesidir. FDM'lerin doğrudan kullanımı, özellikle TED uygulamalarında, sızıntı, düşük mekanik dayanım ve yetersiz ısı transferi gibi sorunlara yol açabilmektedir. Bu nedenle, FDM'lerin polimer matrislerle fiziksel veya kimyasal yollarla birleştirilmesi, hem enerji depolama kapasitesini hem de mekanik ve termal dayanımı artırmak için yaygın olarak tercih edilmektedir (Kale et al., 2025). FDM-polimer kompozitlerinde karışım tekniklerinin seçimi, malzemenin uygulama alanına göre değişmekte ve nihai ürünün performansını doğrudan etkilemektedir.

Fiziksel karışım teknikleri, FDM ve polimer matrisin mekanik olarak bir araya getirilmesini içerir. Bu yöntemler arasında çözeltiden dökme, sıcak presleme, ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama gibi işlemler yer alır. Örneğin, polipropilen/montmorillonit (PP/MMT) kompozit köpüklerin üretiminde, polimer ve seramik bileşenler ekstrüzyon makinesinde eriyik olarak karıştırılarak homojen bir karışım elde edilmiştir. Ardından, kimyasal köpürtücü ajan eklenerek ekstrüde edilen karışım köpük formunda granüllere dönüştürülmüş ve bu granüller enjeksiyon makinesinde kalıplanmıştır. Bu süreçte, fiziksel karışımın homojenliği ve bileşenlerin dağılımı, kompozitin termal ve mekanik özelliklerini belirlemiştir. Ayrıca, kil ilavesinin polimerin termal direncini artırdığı, ancak gözenek artışı ile termal özelliklerin olumsuz etkilendiği gözlemlenmiştir (Ulutaş, Taşdemir, Korkmaz, Kuvvet, & Duran,

2024). Bu çalışma, fiziksel karışım tekniklerinin, özellikle ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama gibi yöntemlerin, FDM-polimer kompozitlerinin üretiminde yaygın olarak kullanıldığını ve bu tekniklerin malzemenin mikroyapı ve termal özellikleri üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir.

Kimyasal karışım teknikleri ise, FDM ve polimer matris arasında kimyasal bağların oluşturulmasını veya arayüzey etkileşimlerinin güçlendirilmesini amaçlar. Bu teknikler, özellikle polimer matris ile FDM arasında uyumluluğun artırılması, sızıntının önlenmesi ve termal iletkenliğin iyileştirilmesi açısından önemlidir. Kimyasal karışım tekniklerinde, yüzey modifikasyonu, bağlayıcı ajanlar (örneğin, maleik anhidrit aşıllı polipropilen gibi), çapraz bağlama ve fonksiyonel grupların eklenmesi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Örneğin, polipropilen/kalsiyum borat/maleik anhidrit aşıllı polipropilen (MA-g-PP) kompozitlerinde, MA-g-PP'nin uyumlaştırıcı olarak kullanılması, kalsiyum borat partiküllerinin PP matrisinde daha homojen dağılmasını ve arayüzey yapışmasının artmasını sağlamıştır. Bu kimyasal karışım yaklaşımı, kompozitin yoğunluk, HDT, Vicat yumuşama noktası, nem içeriği, LOI, sertlik ve elastiklik modülü gibi özelliklerinde iyileşmelere yol açmıştır (Ulutaş & Taşdemir, 2024). Bu bulgu, kimyasal karışım tekniklerinin, özellikle fonksiyonel dolgu maddeleri ve uyumlaştırıcı ajanların kullanımıyla, FDM-polimer kompozitlerinde arayüzey etkileşimlerini güçlendirdiğini ve malzemenin performansını artırdığını göstermektedir. Başka bir çalışmada stearik asidin SiO₂ ve PMMA kabukları içinde kapsüllenerek PMMA matrisine dahil edilmesiyle elde edilen kompozitler, sızıntı olmadan uygun depolama kapasitesi ve şekillendirilebilirlik sunmuştur (Sahan & Paksoy, 2018). Bu örnek, fiziksel karışım tekniklerinin, özellikle kapsülleme ve matris entegrasyonu yoluyla, FDM-polimer kompozitlerinin uygulama alanlarını genişlettiğini göstermektedir.

2.3.5. Yeşil ve Sürdürülebilir Üretim Yaklaşımları

Polimer/FDM hibrit sistemlerinin sentezinde, doğal ve yenilenebilir kaynaklı polimerlerin kullanımı da sürdürülebilirlik açısından önem taşımaktadır. Selüloz nanofibril (SNF) temelli parafin esaslı kompozit FDM'ler, dondurarak şablonlama ve tek adımda impregnasyon yöntemleriyle üretilmiş ve enerji etkin, çevre dostu yeşil binalarda iç mekan uygulamaları için uygun adaylar olarak değerlendirilmiştir (Kanlı, Mert, & Mert, 2021). Bu çalışmada, SNF köpük matrisi içerisine n-hekzadekan emdirilmiş ve elde edilen kompozitlerin erime entalpisi 54,7 J/g olarak bulunmuştur. Kompozitlerin faz geçiş sıcaklığı ve gizli ısı depolama kapasitesi, enerji verimliliği gerektiren uygulamalarda kullanılabilirliğini göstermektedir.

2.4. Polimer/FDM Hibrit Sistemlerinin Termal Performans Analizi

Polimer/FDM hibrit sistemlerinin enerji depolama kapasitesi, ısı iletkenlik davranışı, döngüsel kararlılığı ve faz değişim karakteristikleri, malzemenin uygulamalardaki verimliliğini doğrudan belirlemektedir. Termal performansın analizi için diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), termogravimetrik analiz (TGA), termal iletkenlik ölçümü, ısı döngü testleri, sıcaklık dağılım analizleri ve ısı depolama-boşaltma kinetikleri gibi analitik teknikler kullanılmaktadır.

Polimer/FDM hibrit sistemlerinin ısı enerji depolama verimliliğinin belirlenmesinde en kritik parametreler; faz değişim sıcaklığı (T_m), faz değişim entalpisi (ΔH) ve özgül ısı kapasitesidir (C_p). Bu termofiziksel özelliklerin hassas karakterizasyonu için Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) altın standart olarak kabul edilmektedir. DSC analizleri, polimerik matris içerisine hapsedilen FDM'in erime ve donma davranışlarını ortaya koyarken, aynı zamanda polimer ağ yapısının FDM kristalizasyonu üzerindeki olası kısıtlayıcı etkilerini (confinement effect) ve aşırı soğuma (supercooling) derecesini belirlemeye olanak tanır. İdeal bir hibrit sistemde, FDM'in kütle oranına bağlı olarak teorik enerji depolama kapasitesinin mümkün olduğunca korunması ve polimer matrisin ısı transferine engel oluşturmayacak bir arayüzey uyumu sergilemesi beklenir.

Enerji depolama kapasitesinin yanı sıra, geliştirilen kompozit yapının termal kararlılığı ve uzun vadeli performansı, malzemenin endüstriyel uygulanabilirliği açısından belirleyicidir. Termogravimetrik Analiz (TGA), hibrit malzemenin bozunma sıcaklığını (T_{deg}) tespit ederek çalışma sıcaklığı aralığının güvenli sınırlarını çizer. Buna ek olarak, polimerlerin doğası gereği düşük olan termal iletkenlik katsayılarının iyileştirilmesi, şarj/deşarj (erime/donma) sürelerini kısaltmak adına elzemdir; bu nedenle Lazer Flash Analizi (LFA) veya Hot Disk yöntemleri ile ısı iletkenlik değişimleri izlenmelidir. Son olarak, malzemenin binlerce kez tekrarlanan ısınıp soğuma süreçlerinde kimyasal yapısını ve fiziksel bütünlüğünü koruyup korumadığı, hızlandırılmış termal döngü testleri ile doğrulanarak sistemin sızıntı yapmama (leakage-proof) özelliği garanti altına alınmalıdır.

2.5. Uygulama Alanları

Polimer/FDM hibrit sistemleri, yüksek gizli ısı depolama kapasiteleri, şekil stabilite, gelişmiş termal kararlılıkları ve tasarıma uygun morfolojileri sayesinde geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Özellikle polimer matris tarafından sağlanan mekanik dayanım, FDM'in sızıntı problemini ortadan kaldırması ve nano doldurucular ile artırılan ısı iletkenlik özellikleri, bu

hibritleri enerji verimliliği gerektiren pek çok sektörde öne çıkarmaktadır (Brecht et al., 2024).

Bu hibrit sistemlerin en önemli kullanım alanlarından biri bina ve yapı malzemeleridir. Binalarda pasif ısı yönetiminde kullanılan FDM-polimer kompozitleri, duvar panelleri, alçıpan sistemleri, yalıtım katmanları ve çatı kaplamalarına entegre edilerek iç ortam sıcaklık dalgalanmalarını azaltır. Bu sayede yaz aylarında serinletme, kış aylarında ise ısıtma yükleri ciddi oranda düşürülür. Özellikle akrilik, epoksi ve polietilen matrisli şekil stabil FDM'ler, 20–35 °C sıcaklık aralığında etkili oldukları için konut ve ofis uygulamalarında yoğun bir şekilde tercih edilmektedir (Faraj, Khaled, Faraj, Hachem, & Castelain, 2021). Yapı sektöründe hibrit sistemler sadece enerji verimliliği değil, aynı zamanda yangın dayanımı, nem kontrolü ve uzun dönem döngüsel stabilite açısından da avantaj sağlamaktadır.

Bir diğer önemli uygulama alanı elektronik cihazların termal yönetimidir. Mikroişlemciler, LED modülleri, bataryalar ve güç dönüştürücüler gibi ısı yoğunluğu yüksek elektronik bileşenlerin aşırı ısınması performans kaybına ve ciddi güvenlik risklerine yol açmaktadır. Polimer/FDM hibritleri, yüzeye yakın konumlandırılarak ısıнын anlık olarak depolanmasını ve daha sonra kontrollü şekilde geri verilmesini sağlar. Özellikle grafen, karbon nanotüp ve bor nitrid gibi yüksek iletken dolgu malzemeleri ile desteklenmiş FDM kompozitleri elektronik soğutma uygulamalarında ısı iletkenliği artırarak hızlı ısı transferine olanak tanımaktadır (Saha & Dutta, 2012). Bu hibritler aynı zamanda esnek elektroniklerde ve giyilebilir teknoloji bileşenlerinde de uygulanmaktadır.

Polimer/FDM sistemlerinin yükselen bir diğer uygulama alanı **batarya termal yönetimidir**. Lityum-iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle ısı kaçak (thermal runaway) riski taşımaktadır. FDM kompozitlerinin batarya modüllerine entegre edilmesi, hücre sıcaklığını dar bir aralıkta sabit tutarak bataryaların güvenli çalışma performansını artırır. Bu hibritler, şarj sırasında oluşan aşırı ısının FDM tarafından absorbe edilmesini sağlarken, polimer matris aracılığıyla mekanik dayanımı da artırır. Özellikle elektrikli araçlarda, grafen ve metal oksit takviyeli FDM-polimer yapılar batarya yönetim sistemlerinde kritik bir yenilikçi çözüm olarak değerlendirilmektedir (Alva, Liu, Huang, & Fang, 2017).

Güneş enerjisi sistemleri, hibrit FDM uygulamalarının bir başka önemli alanıdır. Güneş kolektörlerinde FDM tabakaları, gündüz depolanan ısının gece boyunca yavaşça geri verilmesini sağlar. Aynı şekilde, polimer matris içinde stabilize edilmiş FDM'ler, fotovoltaik (PV) panellerin yüzey sıcaklığını düşürerek panel verimini artırır. Güneş enerjisi kurutucuları, su ısıtma

sistemleri ve termal depolama tankları gibi cihazlarda hibrit sistemlerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır (Gadhane, Pathan, Kore, & Prabhune, 2021).

Polimer/FDM hibritleri ayrıca akıllı tekstiller alanında da yenilikçi uygulamalar sunmaktadır. Elektroegirme veya mikroenkapsülleme teknikleriyle üretilen FDM yüklü polimer lifleri, sıcaklık değişimlerine adaptif tepki veren giysilerin üretiminde kullanılmaktadır. Bu tekstiller, vücut sıcaklığını belirli aralıkta tutarak sporcular, askerî personel ve açık hava çalışanları için konfor artırıcı çözümler sunmaktadır. Giyilebilir sensörlerle entegre edildiğinde hibrit FDM sistemleri hem ısı yönetim hem de elektronik bileşenlerin stabil çalışması için ikili fonksiyon sağlayabilmektedir (Nagar & Sreenivasa, 2024).

Bir başka uygulama alanı da soğuk zincir lojistiği ve tıbbi taşımacılıktır. Aşılar, biyolojik örnekler, ilaçlar ve donma hassasiyeti olan gıdalar, belirli sıcaklık aralıklarında taşınmalıdır. Şekil stabil FDM-polimer paketleri bu malzemelerin ısı düzenini uzun süre koruyarak bozulmayı engeller. Bu sistemlerin en büyük avantajı, sızıntı yapmamaları ve tekrar kullanılabilir olmalarıdır.

Son olarak polimer/FDM hibritleri savunma sanayi, havacılık, otomotiv ve akıllı ambalaj teknolojileri gibi stratejik alanlarda da uygulanmaktadır. Termal kamuflaj malzemeleri, hafif kompozit kaplamalar, motor çevresi ısı yönetim komponentleri gibi çeşitli sistemlerde hibrit FDM yapılarının kullanımı giderek artmaktadır.

3. Sonuç

Polimer/FDM hibrit sistemleri, termal enerji depolama teknolojilerinin mevcut sınırlılıklarını aşmak için geliştirilmiş, çok yönlü ve yüksek performanslı malzemeler olarak ön plana çıkmaktadır. FDM'lerin doğal olarak sahip olduğu yüksek gizli ısı depolama kapasitesi, polimer matrislerin sağladığı mekanik dayanım, şekil stabilitesi ve işlenebilirlik özellikleriyle birleştiğinde hem laboratuvar ölçeğinde hem de endüstriyel uygulamalarda son derece başarılı sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Polimer matrisler, FDM'in erime sırasında karşılaşılan sızıntı problemini etkin şekilde çözerken, nano doldurucuların eklenmesiyle ısı iletkenlik değerleri iyileştirilmekte ve hibrit sistemlerin hızlı ısı depolama-boşaltma performansı geliştirilebilmektedir.

Güncel literatür, polimer/FDM hibritlerinin sadece enerji depolama verimini artırmakla kalmadığını; aynı zamanda elektroniklerde termal yönetim, binalarda pasif ısı düzenleme, bataryalarda güvenlik ve sıcaklık kontrolü, giyilebilir teknolojilerde konfor sağlama gibi pek çok uygulama

alanında kritik bir teknolojik bileşen hâline geldiğini göstermektedir. Bu hibrit sistemlerin esnek üretim yöntemleri (mikrokapsülleme, çözelti dökümü, elektroegirme, 3B yazdırma vb.), malzeme tasarımının farklı sektör ihtiyaçlarına göre özelleştirilebilmesine olanak tanımaktadır. Böylece hem geleneksel malzemelerle uyumlu kompozitler geliştirilmekte hem de tamamen yeni fonksiyonel yapılar ortaya çıkmaktadır.

Bununla birlikte hibrit sistemlerin büyük ölçekli üretimi, maliyet etkinliği, uzun süreli döngüsel dayanımı, ara yüzey etkileşimlerinin kontrolü ve çevresel etkiler gibi konularda hâlen çözülmesi gereken bazı bilimsel ve mühendislik sorunları bulunmaktadır. Polimerlerin termal bozunmaya karşı dayanımının artırılması, FDM-polimer etkileşimlerinin daha iyi anlaşılması, yüksek ısıl iletkenlik sağlayan ancak mekanik özellikleri koruyan dolgu stratejilerinin geliştirilmesi gelecekteki araştırmaların öncelikli alanları arasında yer almaktadır. Ayrıca yapay zekâ destekli malzeme optimizasyonu, biyobozunur polimerlerle sürdürülebilir hibrit sistemler ve yeni nesil mikro/nano mühendislik teknikleri gibi yenilikçi yaklaşımlar, polimer/FDM hibrit sistemlerinin gelişiminde önemli rol oynayacaktır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, polimer/FDM hibrit sistemleri hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalar açısından büyük potansiyel taşımakta olup enerji verimliliğinin artırılması, karbon ayak izinin azaltılması ve sürdürülebilir malzeme teknolojilerinin geliştirilmesi gibi hedefler doğrultusunda önemli bir çözüm sunmaktadır. Bu nedenle, hibrit sistemlerin tasarımı, üretimi ve performans değerlendirmesine yönelik çalışmaların artarak devam etmesi, geleceğin enerji odaklı malzeme bilimi uygulamalarında kritik öneme sahiptir.

Kaynakça

- Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., & Smyth, M. (2010). A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 615-628.
- Al-Failkawi, F., & Abdulrahman, B. (2025). Evaluating the Role of Thermal Energy Storage in the Performance of Concentrated Solar Power Plants. *Proceedings of 15th International Conference on Renewable and Clean Energy, Icrce 2025*, 1434, 47-54.
- Alkan, C., Sari, A., Karaipekli, A., & Uzun, O. (2009). Preparation, characterization, and thermal properties of microencapsulated phase change material for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(1), 143-147.
- Alva, G., Liu, L. K., Huang, X., & Fang, G. Y. (2017). Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 68, 693-706.
- Babapoor, A., Karimi, G., & Khorram, M. (2016). Fabrication and characterization of nanofiber-nanoparticle-composites with phase change materials by electrospinning. *Applied Thermal Engineering*, 99, 1225-1235.
- Bayram, S., Mert, H. H., & Mert, M. S. (2023). Modifiye edilmiş kaolinit kil katkılı poli (stiren-ko-divinil benzen) matrisine sahip n-nonadekan içeren şekilce kararlı kompozit faz değiştiren maddelerin hazırlanması ve özelliklerinin belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(1), 435-450.
- Brechtl, J., Ullman, A. M., Li, K., Yang, G., Nanda, J., Nawaz, K., & Sacchi, R. L. (2024). Phase change electrolytes for combined electrochemical and thermal energy storage. *Energy Reports*, 11, 3931-3940.
- Cárdenas, B., & León, N. (2013). High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 27, 724-737.
- Faraj, K., Khaled, M., Faraj, J., Hachem, F., & Castelain, C. (2021). A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications. *Journal of Energy Storage*, 33.
- Feldman, D., Shapiro, M., & Banu, D. (1986). Organic phase change materials for thermal energy storage. *Solar energy materials*, 13(1), 1-10.
- Frenot, A., & Chronakis, I. S. (2003). Polymer nanofibers assembled by electrospinning. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 8(1), 64-75.
- Gadhave, P., Pathan, F., Kore, S., & Prabhu, C. (2021). Comprehensive review of phase change material based latent heat thermal energy storage system. *International Journal of Ambient Energy*.

- Kale, P., Gondane, P., Bhutada, P., Patil, A., Patil, Y., & Yadav, R. (2025). Phase Change Materials in Thermal Energy Storage: A Comprehensive Review of Properties, Advances, and Challenges. 2025 International Conference on Sustainable Energy Technologies and Computational Intelligence (SETCOM),
- Kanlı, Z., Mert, M. S., & Mert, H. H. (2021). Isıl Enerji Depolama Uygulamaları İçin Selüloz Nanofibril Temelli Parafin İçeren Kompozit Faz Değiştiren Maddelerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(22), 273-281.
- Karadağ, M., Akçay, İ. T., & Karakurt, A. S. (2024). Trends and Emerging Themes in Thermal Energy Storage: A Bibliometric Study. *Journal of Marine and Engineering Technology*, 4(2), 44-53.
- Kerroumi, N. (2017). Solar thermal energy storage using latent heat: discharging energy from phase change material. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 4(3), 37-45.
- Kumar, S., Sarkar, C., & Saha, S. (2024). Renewable thermal energy storage in polymer encapsulated phase-change materials: a comprehensive overview. *Challenges and Opportunities of Distributed Renewable Power*, 181-214.
- Lin, Y. X., Jia, Y. T., Alva, G., & Fang, G. Y. (2018). Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 82, 2730-2742.
- Liu, A. B., Xie, H. Q., Wu, Z. H., & Wang, Y. Y. (2022). Advances and outlook of TE-PCM system: a review. *Carbon Neutrality*, 1(1).
- Liu, S. Q., White, K. L., & Reneker, D. H. (2019). Electrospinning Polymer Nanofibers With Controlled Diameters. *Ieee Transactions on Industry Applications*, 55(5), 5239-5243.
- Mert, H. H., & Bayram, S. (2020). Isıl Enerji Depolama Uygulamalarına Yönelik Mikrokapsüllenmiş N-Oktadekan/Nanokil Kompozit Faz Değiştiren Malzemelerin Geliştirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 675-687.
- Mert, H. H., & Mert, M. S. (2020). Faz Değiştiren Madde Olarak n-Hekzadekan Esaslı Mikrokapsüllerin Hazırlanması, Karakterizasyonu ve Isıl Performansının T-Kayıt Yöntemiyle Belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(18), 148-161.
- Mert, H. H., Mert, M. S., & Mert, E. H. (2020). N-Hekzadekan/Montmorillonit Kompozit Faz Değiştiren Maddelerin Hazırlanması Ve Özelliklerinin Belirlenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(1), 229-239.
- Mert, M. S., Sert, M., & Mert, H. H. (2018). Isıl Enerji Depolama Sistemleri İçin Organik Faz Değiştiren Maddelerin Mevcut Durumu Üzerine Bir İnceleme. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(1), 161-174.

- Nagar, S., & Sreenivasa, S. (2024). Polymer-based supporting materials and polymer-encapsulated phase change materials for thermal energy storage: A review on the recent advances of materials, synthesis, and characterization techniques. *Polymer Engineering and Science*, 64(9), 4341-4370.
- Noyan, E. C. B., Onder, E., Sarier, N., & Arat, R. (2018). Development of heat storing poly(acrylonitrile) nanofibers by coaxial electrospinning. *Thermochimica Acta*, 662, 135-148.
- Oudaoui, K., & Faraji, M. (2022). Numerical Study of Latent Heat Discharge of a Phase Change Material Shell-and-Tube Thermal Energy Storage System. International Moroccan Congress of Mechanics,
- Ouikhalfan, M., Hekimoglu, G., Sari, A., Gencel, O., & Tyagi, V. V. (2022). Metal Oxide Nanoparticle Dispersed-Polyethylene Glycol: Thermal Conductivity and Thermal Energy Storage Properties. *Energy & Fuels*, 36(5), 2821-2832.
- Park, S., & Fu, K. (2021). Polymer-based filament feedstock for additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 213.
- Ramesh, M., Niranjana, K., Bhoopathi, R., & Rajeshkumar, L. (2024). Additive manufacturing (3D printing) technologies for fiber-reinforced polymer composite materials: A review on fabrication methods and process parameters. *E-Polymers*, 24(1).
- Saha, S. K., & Dutta, P. (2012). Thermal Management of Electronics Using PCM-Based Heat Sink Subjected to Cyclic Heat Load. *Ieee Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology*, 2(3), 464-473.
- Sahan, N., & Paksoy, H. (2018). Novel shapeable phase change material (PCM) composites for thermal energy storage (TES) applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 174, 380-387.
- Singh, B., Kumar, R., & Chohan, J. S. (2020). Polymer matrix composites in 3D printing: A state of art review. *Materials Today-Proceedings*, 33, 1562-1567.
- Temel, Ü. N., & Çiftçi, B. Y. (2018). Determination of Thermal Properties of A82 Organic Phase Change Material Embedded with Different Type Nanoparticles. *Isi Bilimi Ve Teknigi Dergisi-Journal of Thermal Science and Technology*, 38(2), 75-85.
- Ulutaş, E., & Taşdemir, M. (2024). Polipropilen (Pp)/Kalsiyum Borat [Ca₃(Bo₃)₂]/Maleik Anhidrit Aşılı Polipropilen (Ma-G-Pp) Polimer Kompozitinin Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3), 1421-1431.
- Ulutaş, E., Taşdemir, M., Korkmaz, Ö. F., Kuvvet, N., & Duran, M. C. (2024). Polipropilen/montmorillonit kompozit köpüğünün fiziksel, termal ve

- morfolojik özelliklerinin incelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 14(4), 1207-1218.
- Yetgin, S. H., Karadeniz, B., & Guleşen, M. (2017). Grafen Oksit Katkılı Polipropilen Polimer Kompozitlerin Mekanik ve Termal Özelliklerin İncelenmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4(2), 34-40.
- Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251-283.
- Zhang, H., Shi, T., & Ma, A. (2021). Recent advances in design and preparation of polymer-based thermal management material. *Polymers*, 13(16), 2797.
- Zhang, N., Yuan, Y. P., Cao, X. L., Du, Y. X., Zhang, Z. L., & Gui, Y. W. (2018). Latent Heat Thermal Energy Storage Systems with Solid-Liquid Phase Change Materials: A Review. *Advanced Engineering Materials*, 20(6).
- Zohra, M. B., Amine, R., & Alhamany, A. (2019). Development of thermal energy storage system based on phase change materials. 2019 International Conference of Computer Science and Renewable Energies (ICCSRE).