

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Investigation of MOF-303 – Active Carbon Mixtures for Passive Thermal Management Applications

A. Alperen Günay^{a,b}

Submitted: 11.05.2022 Revised: 29.08.2022 Accepted: 29.08.2022 doi:10.30855/gmbd.0705020

ABSTRACT

Keywords: Heat sink, metal-organic framework, active carbon, desorption, thermal management

^{a,*} The University of Tokyo,
Faculty of Engineering,
Dept. of Mechanical Engineering
113-8656 - Tokyo, Japan
Orcid: 0000-0002-2013-9101
e mail: gunaya@metu.edu.tr

^b Middle East Technical University,
Faculty of Engineering,
Dept. of Mechanical Engineering
06800 - Ankara, Türkiye

*Corresponding author:
gunaya@metu.edu.tr

Small sized electronics and IoT devices can be thermally managed through sorbent heat sinks if economical and efficient solutions are developed. Here, we investigate a mixture of metal-organic frameworks and active carbon to lower the costs and increase the water uptake capacity. The mismatch on particle size and physical properties between the two sorbents lead to favorable desorption characteristics while also cutting down on costs. We spray coat the mixture onto copper substrates to obtain passive sorbent heat sinks. Results of this study display an $\approx 30\%$ enhancement in the water uptake capacity and an $\approx 10\%$ improvement in the thermal performance for the heat sinks coated with the mixture when compared to the only MOF case. The enhancement is attributed to fast desorption in the early phases of operation and to slow desorption in the steady state. Furthermore, we also study the coating microscopically through infrared imaging and observe that the carbon is colder than the MOF particles due to the lower thermal conductivity it possesses. This study not only demonstrates an economic way of enhancing the cooling performance of sorbent heat sinks but it also serves as a guideline for the design of desorption driven thermal management strategies.

MOF-303 - Aktif Karbon Karışımlarının Pasif Isı Yönetimi Uygulamaları için İncelenmesi

ÖZ

Küçük boyutlu elektronik ve nesnelerin interneti cihazlarının ısı yönetimleri ekonomik ve yüksek verimli çözümler geliştirilmesi halinde desorpsiyon temelli ısı emiciler aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada, bu tarz sistemlerin maliyetlerini düşürmek ve su alım kapasitelerini artırmak amacıyla metal-organik çerçeve - aktif karbon karışımları incelenmektedir. İki emici arasındaki parçacık boyutu ve fiziksel özelliklerdeki farklılıklar uygun desorpsiyon özelliklerine yol açarken, aynı zamanda maliyetleri de düşürmektedir. Isıl yönetim uygulamaları için pasif desorpsiyon temelli ısı emiciler elde etmek amacıyla üretilen MOF-karbon karışımı bakır yüzeylere püskürtülmüştür. Elde edilen ısı emiciler test edilmiş olup; elde edilen sonuçlar yalnızca MOF temelli kaplama durumuna kıyasla MOF-karbon bazlı ısı emicilerin su alım kapasitesinde $\approx 30\%$ luk bir iyileşme ve termal performansta $\approx 10\%$ luk bir iyileşme elde edildiğini göstermektedir. Bu iyileşme, operasyonun erken aşamalarında hızlı desorpsiyona, ve sabit hal durumunda yavaş desorpsiyona atfedilmektedir. Ayrıca, kaplamalar kızılötesi görüntüleme yoluyla mikroskopik olarak da incelenmiş ve karbonun sahip olduğu daha düşük termal iletkenlik nedeniyle MOF parçacıklarından daha soğuk olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma sadece desorpsiyon temelli ısı emicilerin soğutma performanslarını arttırmanın ekonomik bir yolunu göstermekle kalmayarak, aynı zamanda desorpsiyon odaklı termal yönetim stratejilerinin tasarımı için bir kılavuz haline de gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: Isı emici, metal-organik çerçeve, aktif karbon, desorpsiyon, ısı yönetim

1. Giriş (Introduction)

Teknolojide son birkaç yıldır nanoteknoloji temelli büyük gelişmeler meydana gelmektedir[1]. Bu gelişmeler elektronik cihazların performansını ciddi ölçüde artırırken, belirli mühendislik sorunlarını da beraberinde getirmiştir[2]. Cihazların küçülmesi özellikle ısı yönetim açısından ciddi zorluklar ortaya koymaktadır[3]. Bu bağlamda, literatürde birçok ısı yönetim tekniği geliştirilmiş ve denenmiştir. Bunlara örnek olarak ısı emiciler[4], faz değişimli sistemler[5, 6], hava akımına maruz bırakılma [7] ve radyasyon yoluyla soğutma [8] gösterilebilir. Bu tekniklerden bir veya birkaçının beraber kullanımı sonucunda ısı yönetim performansında çok büyük gelişmeler görülebilmektedir. Örneğin, ısı emiciler durgun hava koşulları altında çok verimli soğutucular değillerdir[9]. Ancak, bir akımla birleştirildiklerinde çok yüksek ısı transferi değerleri gösterebilirler[10]. Bu nedenle, sistemlerin ihtiyaçları doğrultusunda detaylı bir ısı yönetim metot araştırması gerçekleştirilmelidir.

Önceki paragrafta belirtilen yöntemlerin her biri belirli şartlar altında büyük avantaj gösterebilir de, ne yazık ki her biri her sistem için uygun değildir. Isı emiciler belirli modifikasyonlara tabi tutulmadıkları sürece durgun hava altında kullanılmaları yüksek verim göstermemektedir[11]. Faz değişimli sistemlerde soğutma için genellikle buharlaşma [12] ve kaynama [13] kullanılmaktadır. Bu sistemler de fazını değiştirebilecekleri bir sıvı rezervuarına ve pompalama sistemlerine ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle, küçük sistemler için kullanımları ideal değildir[13]. Ayrıca, sıvıyla temas belli bir süre sonra korozyon gibi sonuçları da beraberinde getirmektedir ve uzun süreli kullanım için ideal değildir[13]. Akım bazlı sistemlerde de ekstra bir pompaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da, faz değişimli sistemlere benzer olarak, küçük sistemler için uygun değildir[14]. Son olarak, radyasyon bazlı soğuma sadece görece yüksek sıcaklıklar (>60 °C) için büyük getirileri sisteme sunmaktadır[15]. Bu nedenle, mesken elektronik cihazları için farklı çözümler bulunması gerekmektedir.

Bahsedilen ısı yönetim yöntemlerinden ısı emiciler ve radyasyon bazlı soğuma teknikleri pasif olarak adlandırılabilir, yani uygulama için ek bir enerjiye gereksinim duyulmamaktadır[16]. Isı yönetimini pasif yöntemlerle gerçekleştirme fikri bilim adamları için çok çekici ve araştırılmaya değer bir yöntem olarak gözlemlenmiştir[17]. Bu nedenle, son yıllarda küçük cihazların pasif yöntemlerle soğutulması üzerine birçok bilimsel çalışma yapılmıştır[5, 18]. Son yıllarda, emici malzemelerin atmosferden su çekmeleri ve çektikleri bu suyu bırakarak bir desorpsiyon bazlı soğuma elde edilmesi fikri de çalışılmıştır[19]. Silika jellerin soğutma için kullanımı uzun yıllar önce ortaya atılmış ve sistemin verimli çalışabilmesi için birkaç farklı prosesten oluşması gerektiği belirtilmiştir[20]. Sonraki çalışmalar da dikkate alındığında, silika jellerin hem düşük ısı iletkenlik kapasitesine hem de düşük su hasat kapasitesine sahip olmaları, randımanlı kullanımlarının önünde engel teşkil etmektedir[21]. Buna ek olarak, aktif karbon bazlı soğutucu sistemler de önerilmiş; ancak bunlar da genel olarak etil alkol ve benzeri akışkanlar için kullanılmışlardır[21]. Aktif karbonun düşük su hasat kapasitesi atmosferden su çekebilmesinin önündeki en büyük engeldir[22]. Belirli çalışmalarda zeolitler de bu bağlamda kullanılmış olsalar da gereken yüksek desorpsiyon sıcaklıkları nedeniyle çok verimli sistemler elde edilememiş, ve bu nedenle bilim insanları farklı malzeme ve yöntem arayışlarına girmişlerdir[19].

Son yıllarda, desorpsiyon bazlı soğuma için metal-organik çerçeve (MOF) malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemeler gözenek yapıları ve hidrofiliklikleri nedeniyle su hasadı için eşsiz avantajlar sunmaktadırlar[23]. Wang vd. bu fikri su çekme kapasitesi yüksek olan krom bazlı MIL-101 kullanarak elektronik cihazlar için denemiş ve soğutma performansında MOF kaplanmamış ısı emicilere göre %36'lık bir artış gözlemlemiştir[24]. Günay vd. benzer bir fikri aynı malzeme kullanılarak termoelektrik cihazlar için kullanmış ve termoelektrik güç üretiminde düşük sıcaklıkta (≈ 33 °C) normal bakır yüzeylere göre %300'lük bir artış gözlemlemiştir[25]. Her iki çalışmada da, MOF-101'in sunduğu yüksek radyasyon yayınlığının desorpsiyon davranışlarıyla birleşmesi böyle büyük artışlara neden olmuştur. Gelgelelim, birçok metal-organik çerçeve malzemenin üretimi meşakkatli ve pahalı bir süreci de beraberinde getirmektedir[26]. Bu nedenle, alternatif çözüm arayışları da bilimsel olarak önem teşkil etmektedir. Özellikle, su hasat kapasitelerinin ve desorpsiyon oranlarının artırılması bu tür uygulamalar için elzemdir ve araştırılmalıdır.

Metal-organik çerçevelerin su hasat kapasitelerinin artırılması amacıyla birçok farklı metot incelenmiştir. Üretim esnasında bağların oluşması engellenerek kusurlar yaratılmış ve bu kusurların su molekülleriyle doldurulabildiği tespit edilmiştir[27]. Bir çalışmada, Palash vd. tarif içinde metal

kaynağı olarak kullanılan solüsyonları belli metal iyonlarıyla katkılamak suretiyle düşük-orta nem aralıklarında (%10-70) su hasat kapasitesini arttırmayı başarmıştır [28]. Ayrıca, interfazlarda gözenek oluşturmak için MOF malzemeler başka malzemelerle kompozitlenerek de atmosferden su çekme kapasiteleri artırılmıştır[29]. Ancak, bu teknikler MOF üretimindeki ekonomik sorunlara çözüm bulamamaktadır. Adsorpsiyon ve desorpsiyon sürecindeki su hasat dinamiklerini değiştirebilecek bir başka yöntem de değişik parçacık boyutlarının ve fiziksel özelliklerinin birlikte kullanımınıdır[30]. Farklı parçacık boyutlarındaki partiküllerin bir araya gelmesi adsorpsiyon açısından büyük avantajları beraberinde getirmekte, özellikle de adsorpsiyon hızının artırılmasına yardımcı olmaktadır[31]. Küçük boyutlu parçacık büyük boyutlunun etrafında yüzey alanını arttıracığından, büyük boyutlu parçacıklar tarafından emilemeyen su küçük boyutlu parçacıklar tarafından emilebilecektir. Bu da adsorpsiyon hızında ve hasat kapasitesinde artışa neden olabilmektedir[32]. Bu olguyu temel olan kaplamaların üretilmesi emici bazlı ısı yönetim yöntemlerinde performans artışına yol açabilecektir.

Bu çalışmada, laboratuvar ortamında üretilen bir metal-organik çerçeve ile piyasadan temin edilen aktif karbonun karışımının soğutucu performansını nasıl etkilediği araştırılmaktadır. MOF olarak alüminyum bazlı MOF-303 seçilmiştir. MOF-303 metal olarak görece daha ucuz olan alüminyum kullanması, ve su bazlı yöntemlerle üretilmesinden ötürü diğer MOF'lara göre çok daha ucuzdur[33, 34]; ancak hala yüksek sayılabilecek bir su hasat performansı göstermektedir. Üretilen MOF ile temin edilen aktif karbonun malzeme özellikleri deneysel yöntemlerle belirlenmiş, ve MOF'un hem su hasat kapasitesi hem de parçacık boyutu olarak aktif karbona göre çok daha yüksek değerler gösterdiği belirlenmiştir. Her iki malzemedeki kütlece eşit olarak solüsyonlar hazırlanmış ve spreyleme yöntemiyle endüstriyel bakır malzemelerin üzerine kaplanmıştır. Üretilen ısı emiciler bir iklimlendirme kabininin içinde adsorpsiyon, desorpsiyon ve ısı akısı nezdinde değerlendirilmiş ve karışımın her iki malzemeye göre daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Kaplama herhangi bir kaplama olmayan bakıra göre ısı akısında %33'lük bir artış gösterirken, MOF-303 bazlı kaplamaya göre yaklaşık %10'luk bir artışı beraberinde getirmiştir. Son olarak, aktif karbonun ve MOF parçacıklarının mikro düzeyde nasıl davrandıklarının görülmesi amacıyla mikro lens entegre edilmiş termografi testleri gerçekleştirilmiş ve ısı transferinde artışa yol açan mekanizmalar belirlenmiştir. Bu mekanizmalar uygulamanın erken kısımları için hızlı desorpsiyon, daha sonraki kısımlar içinse yavaş desorpsiyon olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada sunulan sonuçlar atmosferden su hasat edebilen pasif ısı emicilerin ekonomik bir şekilde verimlerinin artırılmasının ötesine geçerek malzemelerin hangi özelliklerinin sistemde ne rol oynadıklarını da gösteren bir tasarım kılavuzu ortaya koymuştur.

2. Yöntem (Method)

2.1. Parçacık üretimi (Particle Synthesis)

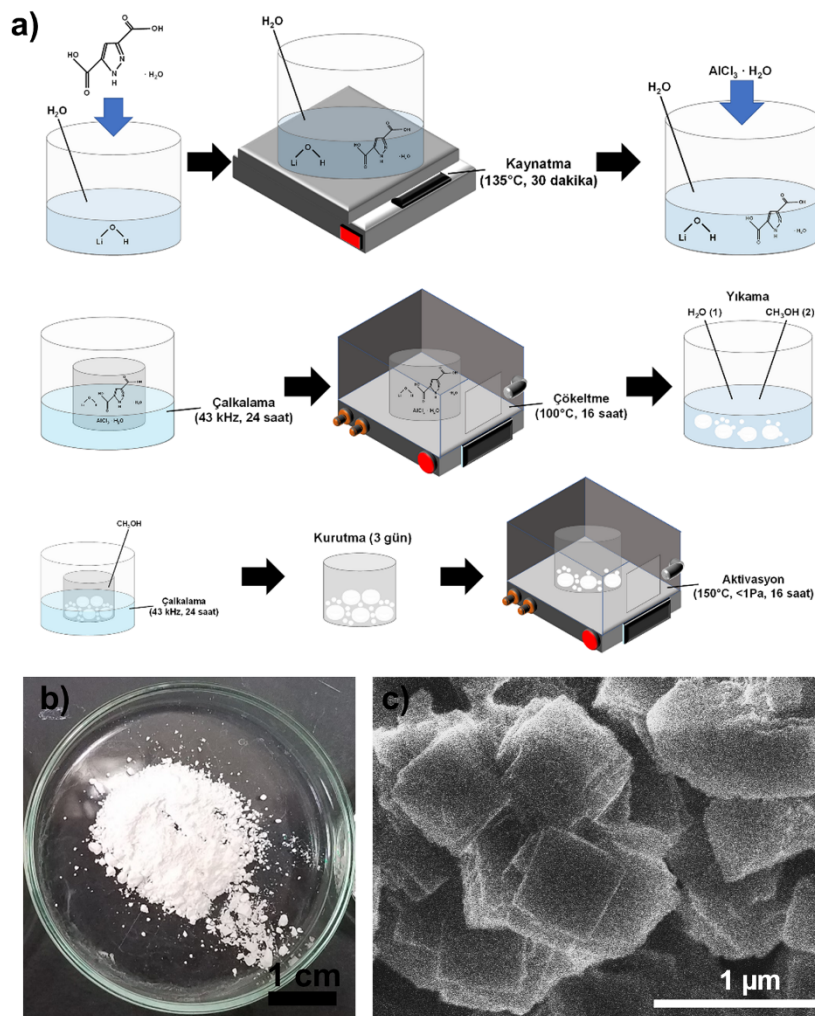
Diğer metal organik çerçeve yapılarına göre hem daha ucuz hem de belli konularda daha avantajlı olduğu literatürde belirtilmiş olan MOF-303 üretimi için literatürde belirtilmiş olan üretim teknikleri kullanılmıştır ([34], Şekil 1a). 15 gram 3,5 pirazol dikarboksilik asit monohidratı (Sigma Aldrich #303180-11-2) 1.5 kilogram saf su (Sigma-Aldrich #7732-18-5) ve 75 g Lityum Hidroksit (Sigma-Aldrich #1310-65-2) karışımından oluşan bir çözeltinin içinde çözündürülmüştür. Elde edilen çözelti öncelikle 135°C'de 30 dakika boyunca ısıtılmış, daha sonra içine 22.5 gram Alüminyum Klorit Heksahidrat (Sigma-Aldrich #7784-13-6) eklenmiştir. Elde edilen çözelti 43 kHz'de 24 saat boyunca çalkalanmıştır. Çalkalanan çözelti homojen ısı dağılımı özelliğine sahip bir fırının içinde 100°C'de 16 saat boyunca tutulmuştur. Elde edilen çökelti sırasıyla saf su ve metil alkol (Sigma-Aldrich #67-56-1) ile yıkanmış ve metil alkol içerisinde 43 kHz'de 24 saat boyunca tekrar çalkalanmıştır. Elde edilen çözelti normal ortamda 3 gün boyunca kurumaya bırakılmış ve son olarak yüksek vakumlu bir fırında (<1 Pa) 150°C'de 16 saat tutularak aktive edilmiştir. Üretim sonucu 10 gram civarı toz elde edilmiştir (Şekil 1b). Elde edilen tozların elektron mikroskopu analizleri kübik yapıda olduklarını ortaya koymuştur (Şekil 1c). Aktif karbon üretimi gerçekleştirilmemiş olup karbon kimyasal tedarikçilerden temin edilmiş ve karakterize edilmiştir (Sigma-Aldrich #7440-44-0).

2.2. Kaplama yapımı (Application of the coating)

Kaplamalar için spreyleme yöntemi kullanılmıştır. Literatürde kullanılan kaplama tarifleri hem MOF-303 hem de aktif karbon için denenerek en iyi kaplamayı veren optimum bir tarif belirlenmiştir[25]. Eşit gramajda aktif karbon ve MOF-303 bir santrifüj içerisinde karıştırılmış ve daha sonra saf su ve etil alkolden oluşan bir çözeltinin içerisine eklenmiştir. Bu çözelti 43 kHz'de 45 dakika boyunca

çalkalanmış ve sonrasında içerisine bağlayıcı olarak sodyum silikat eklenmiştir. Bağlayıcıyı da içeren çözelti 43 kHz'de 60 dakika daha çalkalanmıştır. Elde edilen çözelti kütle olarak 1:4.80:4.80:19.32:60.70 (Sodyum Silikat:Aktif Karbon:MOF-303:Saf Su:Etil Alkol) oranındadır. Bu çözelti bir püskürtücünün içerisine taşınarak kaplama spreyi hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan sprey istenilen kaplama kalınlığı elde edilene kadar tedarikçilerden temin edilen endüstriyel (Nilaco #CU-113551) bakır yüzeylerin üzerine püskürtülerek ısı emiciler hazırlanmıştır. Bakır numunelerin kalınlığı 2 mm olarak seçilmiştir.

Karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla, aktif karbon içermeyen bir çözelti de hazırlanmış ve sprey olarak hazırlanmıştır. Orijinal çözeltideki aktif karbon kadar MOF-303 daha eklenerek çözeltideki emici miktarı sabit tutulmuştur. Referans çözeltinin kütle oranı 1:9.60:19.32:60.70 (Sodyum Silikat:MOF-303:Saf Su:Etil Alkol) olarak belirlenmiştir. Aktif karbon için de bu oran aynıdır. Her iki tarz kaplamanın da çok yüksek tekrarlanabilirliğe sahip olduğu görülmüştür.

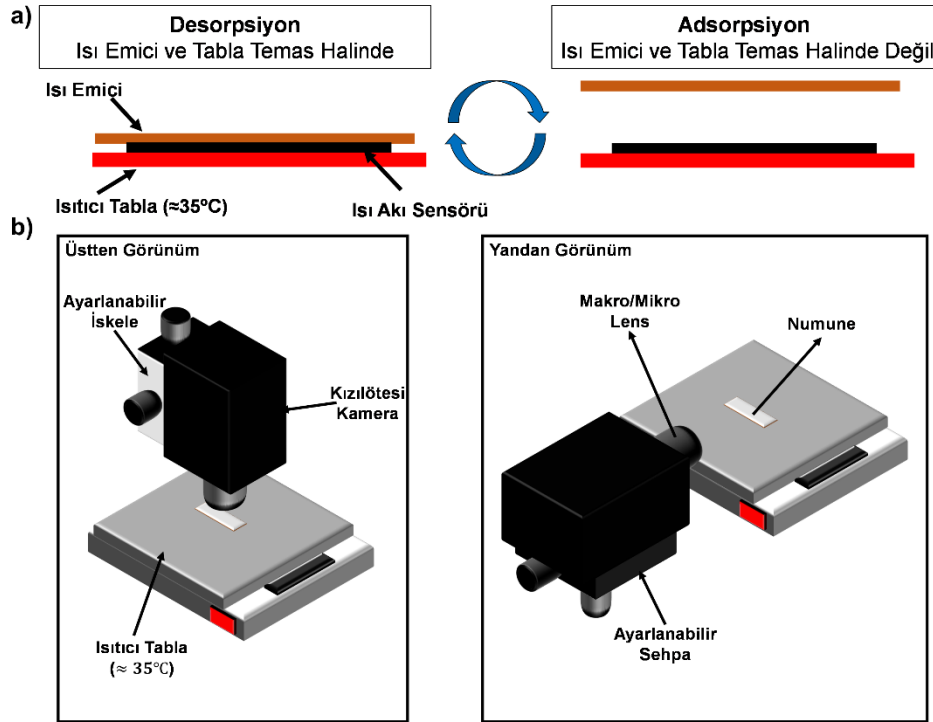


Şekil 1. a) MOF-303 sentez prosedürü, b) sentezlenmiş MOF-303 tozlarının görüntüsü, c) sentezlenmiş tozların elektron mikroskop görüntüsü ((a) MOF-303 synthesis procedure, (b) synthesized MOF-303 powders, (c) SEM image of the synthesized powders))

2.3. Deneysel düzeneği ve prosedürü (Experimental setup and procedure)

Deneylerde kullanılan kaplamaların su emme özelliklerine sahip olmalarından ötürü ortamın nem ve sıcaklık kontrolü büyük önem arz etmektedir. Bu sebeple, kaplamalar arasında adil bir karşılaştırma yapabilmek adına testler bir iklimlendirme kabini içinde gerçekleştirilmiştir. Isı transferi ve su hasadı testleri için kullanılan deneysel düzeneği önceki çalışmalarımızda detaylıca verilmiştir [25]. Deneyleri yapabilmek için, 0.1 mg ölçüm hassasiyetine sahip bir tartı iklimlendirme kabininin içine yerleştirilmiş ve sabitlenmiştir. Ayrıca, desorpsiyon testleri için de bir ısıtıcı tabla kabinin içine yerleştirilmiştir (Şekil

2a). İklimlendirme kabinindeki sıcaklık ve nem sabit değerlere ulaştıktan sonra içindeki su tamamen buharlaştırılmış olan (yüksek sıcaklıkta tutulmuş olan) ısı emiciler tartının içine yerleştirilmiş ve veri toplama işlemi başlatılmıştır. Önceden belirlenen süreye gelindiğinde su hasadını gerçekleştirilmiş olan ısı emici 35°C'de tutulan ısıtıcı tablanın üzerine yerleştirilmiş ve belirli aralıklarla veri toplanmıştır. Bu süreçte, ısı emici ile ısıtıcı yüzey arasında bir ısı akı sensörü de yerleştirilmiş ve ısı emici ile sıcak yüzey arasındaki ısı transferi karakteristikleri de deneysel olarak belirlenmiştir. Veriler aralıksız olarak toplanarak ısı transferinde artış meydana gelen bölgeler belirlenmiştir.



Şekil 2. a) Uygulama detayları, b) kızılötesi deneyler için kurulan deney düzeneği ((a) Details of the application, b) Experimental procedure for the IR experiments))

Isı transferi artışı ve sorpsiyon mekanizmalarının çalışabilmesi için yüksek hassasiyete sahip bir kızılötesi kamera da sisteme entegre edilmiştir. Sabit halde görüntüleme yapılarak belirli bölgelerdeki sıcaklık farklarını çalışmak suretiyle kaplamadaki aktif karbon ve MOF-303'ün rollerinin ayrı ayrı çalışılması hedeflenmiştir. Bu düzenek de Şekil 2b'de verilmiştir. Kızılötesi kamerayla hem tepeden hem de yandan görüntüleme yapılarak sistemdeki sıcaklık farkları çalışılmıştır. Son olarak, dinamik ışık saçınımı gibi deneysel karakterizasyon yöntemleri kullanılarak çalışmanın tabanını oluşturan varsayımlar temellendirilmeye çalışılmıştır.

3. Bulgular (Findings)

3.1. Malzeme karakterizasyonu (Material characterization)

Üretilen MOF-303 ve temin edilen aktif karbonun belli özellikleri uygulama öncesi deneysel olarak karakterize edilmiştir. MOF-303'ün elektron mikroskopunda incelenmesi sonucu kristal yapısının kübik olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, hem MOF-303 hem de aktif karbon için dinamik ışık saçılımı (DLS) yöntemiyle parçacık boyut analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre aktif karbonun ortalama parçacık çapının (d_{AC}) ≈ 210 nm, MOF-303 ortalama parçacık çapının ise (d_{303}) ≈ 700 nm olduğu belirlenmiştir (Tablo 1). İki yapı arasındaki bu fark, değişik parçacık boyutlarına ve dağılımına sahip emici yapıların su hasat performanslarının farklılık göstereceğine dair hipotezimizi bu iki yapıyı kullanarak test edebileceğimizi temin etmektedir.

İki yapının tozları ayrıca yoğunluklarının belirlenmesi amacıyla helyum piknometresinde de test edilmiştir. Deneylerimiz sonucunda aktif karbon için literatürdeki değerlere paralel olarak (ρ_{AC}) 2080 kg/m³ değerine ulaşılmışken, MOF-303 için ise (ρ_{303}) bu değer 1670 kg/m³ olarak belirlenmiştir[25]. Ayrıca, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) yöntemi kullanılarak tozların özgül ısı kapasiteleri de

hesaplanmıştır. Bu değerler aktif karbon için ($c_{p,AC}$) ≈ 850 J/kg·K ve MOF-303 için ($c_{p,303}$) ≈ 1150 J/kg·K olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu bulgular daha sonra ısı transferi mekanizmalarını ve iki malzemenin de bireysel rollerinin değerlendirilmesini anlamada büyük önem teşkil edecektir.

Tozların ısı iletim katsayılarının ölçülmesi elimizdeki deneysel düzeneklerle mümkün olmamaktadır. Bu sebeple, yöntem kısmında belirtilen tarifler kullanılarak hem MOF-303 hem de aktif karbon için kaplamalar hazırlanmıştır. Bu kaplamaların lazer parlama tekniği (LFA) kullanılarak ısı difüzyon katsayıları belirlenmiş, daha sonra hali hazırda bilinen yoğunluk ve özgül ısı kapasiteleri bilgileri kullanılarak ısı iletim katsayıları hesaplanmıştır ($k = \alpha \cdot \rho \cdot c_p$). Analizler sonucunda aktif karbon için (k_{AC}) 0.63 W/m·K, MOF-303 için (k_{303}) 0.75 W/m·K değerlerine ulaşılmıştır. Son olarak, yüzeylerin radyasyona tepkilerini gözlemleyebilmek amacıyla Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometre (FTIR) kullanılarak kaplamaların geniş aralıklı kızılötesi yayınlırlıkları (ϵ) ölçülmüştür. Her iki kaplama için de bu değer 0.99 olarak belirlenmiştir. Bu değer yüksek olması ısı emicilerin radyasyon yoluyla soğumalarına olanak sağlayacak olup, her iki malzeme için de aynı olması da kızılötesi kamera yoluyla adil bir değerlendirme yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bağlayıcı sodyum silikatın kütesinin emici malzemeye göre yeterince küçük olmasından ötürü özellikleri yok sayılmıştır.

Tablo 1. Deneysel karakterizasyon sonucu elde edilen parametreler (Material properties obtained by experimental characterization)

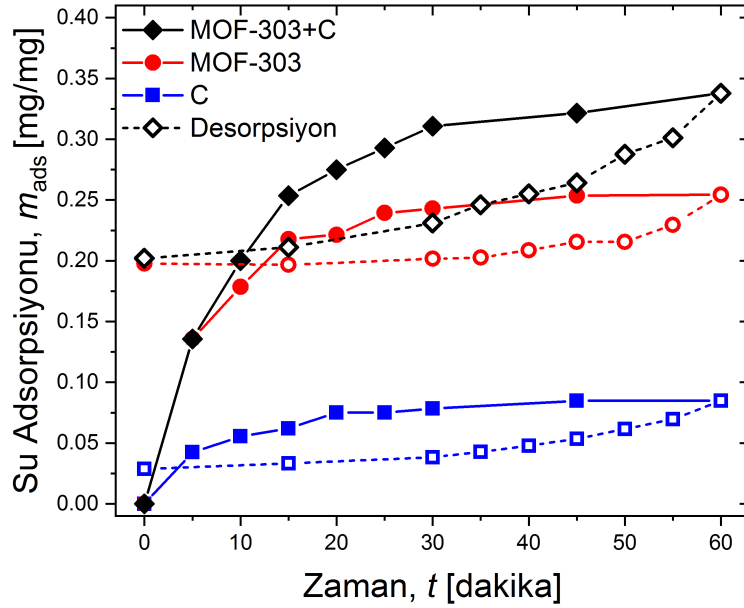
| Parametre | Aktif Karbon | MOF-303 | Yöntem |
|-----------------------------|--------------|-----------|---------------------|
| ρ (kg/m ³) | 2080±45 | 1670±100 | Helyum piknometresi |
| c_p (J/g·K) | 850 | 1150 | DSC |
| k (W/m·K) | 0.63±0.02 | 0.75±0.25 | LFA |
| δ (nm) | 210±40 | 700±50 | DLS |
| ϵ (-) | 0.99 | 0.99 | FTIR |

3.2. Su hasadı (Water uptake)

Malzeme etkisini tarafsız ve adil olarak gözlemleyebilmek adına aynı parçadan kesilmiş olan endüstriyel bakırın üzerine eşit kütlede kaplamalar yapılmıştır. Kaplama yapılmadan önce kesilmiş olan bakır yüzeyler kütle ve yüzey kalitesi için incelenmiş ve farklar en aza indirilmiştir. Yöntem kısmında belirtilen tarifler kullanılarak hem MOF-303, hem aktif karbon, hem de ikisinin karışımı için aynı şartlar altında kaplamalar üretilmiştir. Kaplama kütleleri dikkatlice ölçülmüş ve eşit olmalarına dikkat edilmiştir (25 gram kaplama). Elde edilen kaplanmış ısı emici yüzeyler 22.5 °C ve %60 neme sahip bir ortamda test edilmiştir. Sonuçlar Şekil 3'te gösterilmiştir. Sonuçlar dikkatlice incelendiğinde MOF-303 ve aktif karbonun karıştırılması sonucu elde edilen kaplamanın hem aktif karbona hem de MOF-303'e göre çok daha yüksek adsorpsiyon gösterdiği görülmektedir. Karışım temelli kaplama 60 dakika sonunda ağırlığının yaklaşık %34'ü kadar atmosferik su hasadı gerçekleştirmiştir. Bu değerler MOF-303 temelli kaplama için yaklaşık %26 ve aktif karbon için yaklaşık %8.5 olarak ölçülmüştür. Bu artışa sebep olarak iki parçacık arasındaki hem boyut hem de değişik ısı iletim katsayısı ve difüzyon yeteneğinden kaynaklanan etkileşim gösterilebilir[30]. Doğunluğa ulaşmış MOF-303 tarafından emilemeyen su molekülleri MOF-303 arasında yerleşmiş olan aktif karbon molekülleri tarafından emilebilmekte ve bu bağlamda aktif karbon MOF-303'e atmosferden su adsorpsiyonu konusunda ek destek sağlayabilmektedir. Bu destek sayesinde MOF-303'ün 60 dakika sonunda hasat ettiği su miktarı artış göstermiştir. Bir diğer önemli nokta ise bu değer 60 dakika sonunda hala doyun değere ulaşmamış olmasıdır. Deneylere devam edilmiş ve 24 saat sonunda doyunluk değeri olarak %37.5'lük bir değer belirlenmiştir. Bu değer literatürde belirtilen %36'lık MOF-303 değerinden fazladır[25], ancak çok büyük bir artış değildir. Bunun sebebi olarak moleküller arasındaki boyut farklılıklarının temel olarak adsorpsiyon hızına etki etmesi ve kapasiteyi çok fazla arttıramaması gösterilebilir[35]. Su tutma kapasitesinin artırılması için karbon ve MOF değişik yöntemlerle yüksek sıcaklık altında tepkimeye sokulmalıdır[36]. Bu tarz uygulamalar bu çalışmanın amacı dâhilinde değerlendirilmemiştir.

Adsorpsiyon davranışlarındaki değişimlere ek olarak, kaplamaların desorpsiyon davranışları da incelenmiştir. Isı emicilerin soğutma kapasiteleri atmosferden hasat edilmiş suyun desorpsiyonu yoluyla artırılacaktır. Bu bağlamda, desorpsiyonun zamana bağlı değişimi büyük önem teşkil etmektedir[37]. Isı emicilerin çalışması öngörülen şartlar altında desorpsiyonun nasıl gerçekleşeceğini anlaşılabilmesi amacıyla, kaplanmış bakır yüzeyler 35°C'lik bir yüzeye yerleştirilmiş ve kütlelerindeki değişimler gözlemlenmiştir. Ortam nemi ve sıcaklığı adsorpsiyon deneyleriyle aynı tutulmuştur. Şekil 3 dikkatlice incelendiğinde her üç kaplamanın da üstel fonksiyon normlarını takip ederek desorpsiyon yaptıkları gözlemlenmektedir. Buradaki önemli nokta desorpsiyonun ters olarak

çizildiği ve 60. dakikada başlatılarak zamanın geri doğru sarıldığıının anlaşılmasıdır. Grafik ters çevrildiğinde aslında adsorpsiyonla aynı şekilde bir davranış göstermektedir. Ancak, su hasadı 60. dakika sonunda elde edilen değerden başlayarak üstel bir şekilde düşüş gösterecektir. Ayrıca, desorpsiyon ne yazık ki adsorpsiyondan daha yavaş bir şekilde gerçekleşmektedir. Bunun sebebi olarak su buharının yüzeye bağ oluşturmasının büyük parçacıklarda ve mezogözenekli malzemelerde oluşmuş bağların koparılmasına nazaran daha az enerjiye ihtiyaç duyması gösterilebilir[38]. Bu nedenle, desorpsiyon adsorpsiyondan bağımsız bir şekilde irdelenmeli ve veriler bu kavram göz önünde bulundurularak değerlendirilmelidir.



Şekil 3. Kaplamalar için elde edilen adsorpsiyon ve desorpsiyon dinamikleri (Adsorption/desorption dynamics of the coatings)

Daha önce de belirtildiği gibi, desorpsiyon da adsorpsiyon gibi üstel fonksiyon bazlı bir eğilim göstermektedir. Bu da desorpsiyonun özellikle erken zamanlarda ısı transferi için önemli olduğu anlamına gelmektedir. Erken zamanlarda su kütleindeki değişim oranı yüksek olacağı için soğutma kapasitesine olan katkı yüksek olacakken, denge haline yaklaşıldıkça bu eğim azalacağından soğutma kapasitesine yapılan etki oldukça azalacaktır. Bu olgu bir sonraki kısımda kapsamlıca değerlendirilecektir. Şekil 3'ten elde edilebilecek bir başka bulgu da MOF-303'ün denge değerlerine çok erken ulaşmasıdır. MOF-303'ün su hasat kapasitesi çalışılan aralıktaki nem ve sıcaklık değişimleriyle çok büyük değişiklik göstermediğinden, denge bir an önce kurulabilmektedir[34]. Aktif karbon içinse bu durum farklıdır. Aktif karbonda desorpsiyon düşüş göstermeye devam etmektedir. Ancak, karbonun su hasat kapasitesi düşük olduğu için bu desorpsiyonun soğutma kapasitesine katkısı düşük olacaktır. Gelgelelim, karbon ve metal organik çerçevenin karışımından oluşan kaplamanın yüksek su hasat kapasitesi ile yüksek desorpsiyonu birleştirdiği gözlemlenmiştir. Adsorpsiyonda olduğu gibi, malzemelerin farklılıklarından doğan getiriler desorpsiyonda da bu kaplamayı ön plana çıkarmıştır. Bu kaplama 60 dakika sonunda tuttuğu suyun neredeyse yarısını tekrar atmosfere göndererek yüksek bir desorpsiyon göstermiştir. Bu nedenle, ısı emici olarak diğer yüzeylere nazaran hem operasyon süresi hem de soğutma kapasitesi bakımından daha iyi bir kaplama olacağı öngörülmektedir.

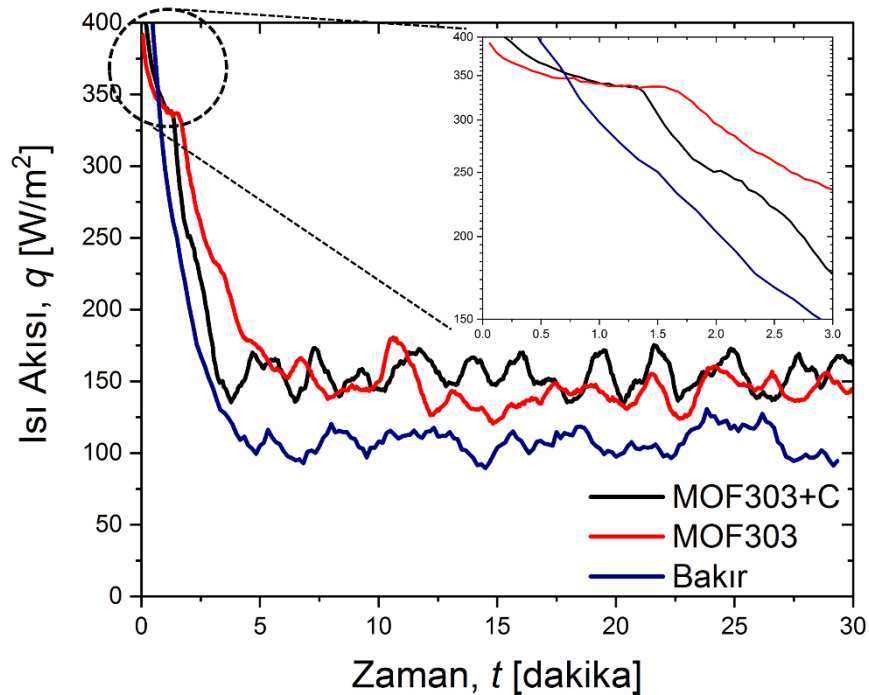
3.3. Isı transferi (Heat transfer)

Su hasadı testlerinin tamamlanmasının ardından su emme kapasitesine ulaşmış olan ısı emiciler ısı akı sensörü entegre edilmiş ısıtıcı tablanın üzerine yerleştirilerek aralarındaki ısı transferi gözlemlenmiştir. Nesnelerin interneti cihazlarının çalışma sıcaklıkları göz önüne alınarak ısıtıcı tabla 35 °C'de sabitlenmiştir. Isıtıcı tabla burada soğutulacak olan yüzeyi temsil etmektedir. Endüstriyel bakır, MOF-303 ve MOF-303 – aktif karbon karışımılı ısı emiciler için elde edilmiş ısı akı değerleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekilden görüleceği gibi ısı transferi kaplanmış numuneler için birkaç farklı aralıktan oluşmaktadır. Bunlar: 1) hızlı desorpsiyonun domine ettiği erken bölüm (0-90 sn), 2) geçiş

değerlerinin domine ettiği bölüm (90-400 sn), 3) sabit hal durumu (7 dk - ..). Mekanizmaların anlaşılabilmesi için üç bölgenin de doğru bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Şekil 4'teki yakınlaştırılmış bölge dikkate alındığında hızlı desorpsiyon bölgesinde aktif karbon – MOF-303 karışımının daha yüksek performans gösterdiği açıkça görülebilmektedir. Bunun sebebi aktif karbon – MOF-303 karışımının daha yüksek desorpsiyon sebepli buharlaşma yoluyla soğutma kapasitesi göstermesidir. Şekil 4'te görüldüğü gibi, bu karışım MOF-303'e göre daha yüksek adsorpsiyon göstermiştir. Bu da zamana göre eğiminin (kütle değişim oranının) daha yüksek olmasına yol açmaktadır[39]. Bu oran buharlaşma için yüzeyden çekilen ısının daha yüksek olmasına yol açmakta ve daha yüksek bir soğuma kapasitesine neden olmaktadır. Bu yüksek eğim 90 saniye kadar bu sistemi domine etmektedir. Daha sonra, hızlı desorpsiyon yerini daha düşük eğimli, yavaş bir desorpsiyon haline bırakmaktadır[24]. Bu da ortamdan çekilen ısının hızlı bir şekilde azalmasına yol açmaktadır. Burada sistemin sıcaklık dengesini kurabilmesi için gereken geçiş bölgesine girilmiştir. Burada domine eden değerlerin bulunabilmesi için ısı transferi denkleminin ölçekleme yöntemiyle çözülmesi gereklidir. Genel hatlarıyla ısı transferi denklemi Eşitlik (1)'de verilmiştir:

$$\sum_i m_i c_{p,i} \frac{dT_i}{dt} = A_s (q - h_n (T_s - T_\infty) - \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4)) - \dot{m} h_{des}, \quad (1)$$

Burada m kütleyi, A_s yüzey alanını, q ısı akısını, h_n konveksiyon için ısı transfer katsayısını, σ Stefan-Boltzmann sabitini, \dot{m} su hasadının kütleli değişim oranını, h_{des} desorpsiyon için buharlaşma ısısını temsil etmektedir. Ayrıca, i alt indisi ilgili yüzeyi (bakır, kaplama vb.), s alt indisi atmosferle temas halindeki yüzeyi, ∞ alt indisi ise içinde bulunulan ortamı temsil etmektedir. Eşitlik (1)'i ölçekleyebilmek için tüm terimlere tek tek bakmak gerekmektedir. Öncelikle, iki yüzey için de kütle, yayınlılık, ve konveksiyon katsayıları eşittir. Bu nedenle bu terimler direkt olarak yok sayılabilir. Ayrıca, yavaş desorpsiyon geçiş bölgesinde sıcaklık değişiminden kaynaklanan ısıya göre çok daha düşük bir ısı transferi değeri göstermektedir. Bu nedenle, desorpsiyon değerleri de yok sayılabilir. Bu da Eşitlik (1)'in ölçekleme sonucunda $c_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \sim q$ formuna geldiği gözlemlenmiştir. Deneylerimizdeki ölçümlerimize göre iki sistem için de yüzey sıcaklıkları arasında elde edilen farklar çok küçüktür. Ayrıca, bu sıcaklıkların zamana göre değişimleri her iki yüzey için de neredeyse aynıdır. Bu nedenle, ısı transferinde bu kadar büyük bir farka yol açmaları imkansızdır. Bu bağlamda, geçiş bölgesindeki ısı transferinin direkt olarak özgül ısı kapasitesine bağlı olduğu, ve bu kapasitesi yüksek olan kaplama için daha yüksek bir değere ulaşacağı görülmektedir. Şekil 4 elde edilmiş ve Tablo 1'de sunulmuş olan özgül ısı değerleri ışığında değerlendirildiğinde, özgül ısı kapasitesi yüksek olan MOF-303 için bu bölgede ısı transferinin daha yüksek olmasının teoriyle birebir örtüştüğü görülmektedir.



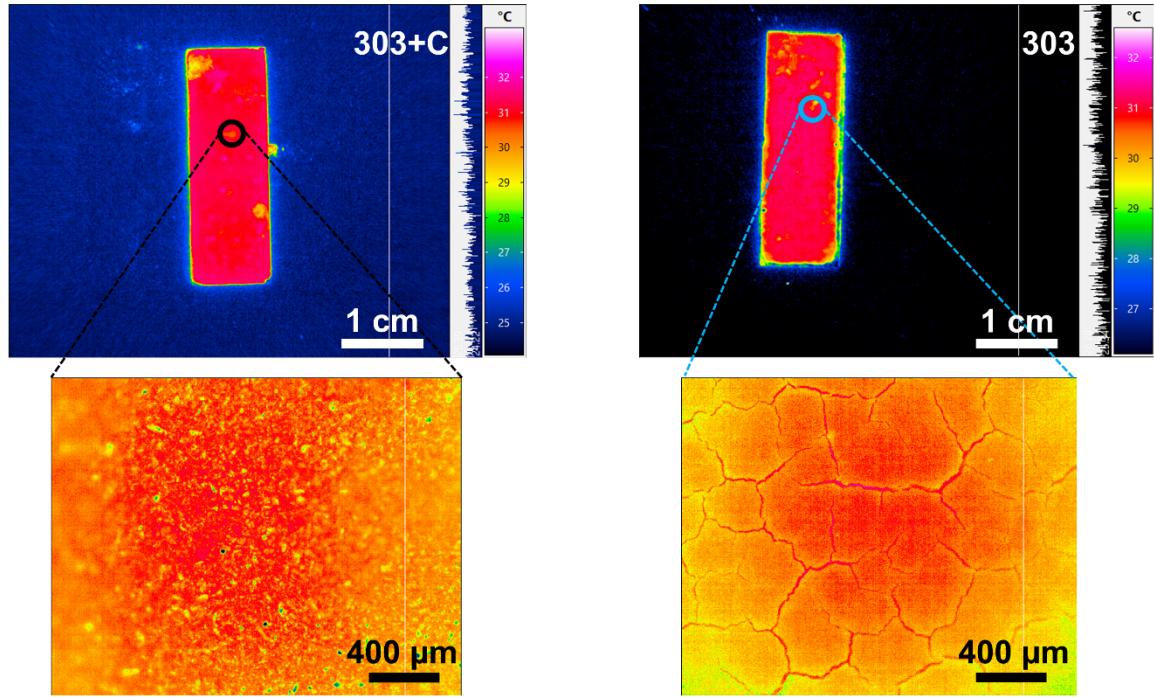
Şekil 4. Isı emici numuneler için toplanan ısı akısı verileri (Experimental heat flux values for the heat sinks)

Son bölge olan ve analiz edilen sürenin büyük bölümünü oluşturan (7 dk - ..) sabit hal bölgesinde ise durum farklıdır. Bu bölgede sıcaklık değerleri neredeyse sabitlenmiş olduğundan, $(\Delta T/\Delta t)$ direkt olarak yok sayılabilir. Eşitlik (1) tekrar değerlendirildiğinde ve ölçeklendiğinde, $\dot{m}h_{des} + h\Delta T + \epsilon\sigma\Delta T^4 \sim q$ olarak yazılabilmektedir. Bu bağlamda yayınlıkların aynı olması ve yüzey parametrelerinin benzerlik göstermesi nedeniyle, ayrıca aradaki sıcaklık farkının çok küçük olması nedeniyle konveksiyon ve radyasyon terimleri yok sayılabilir. Bu da aradaki farkın yavaş desorpsiyon kaynaklı olduğunu göstermektedir ($\dot{m}h_{des} \sim q$). Karbonla karıştırılmış MOF-303, temel MOF-303'e göre daha uzun süreli desorpsiyon özellikleri göstermektedir (Şekil 3). Bu nedenle, efektif ısı iletkenlik katsayısı düşmüş de olsa, karışım içeren kaplama sabit halde daha iyi performans göstermektedir.

Isı transferi genel olarak değerlendirildiğinde, 30 dakikalık kullanım süresince MOF-303 bazlı kaplama 151.69 W/m^2 'lik ortalama ısı akısı (\bar{q}) göstermiştir. Bu değer MOF-303 ve aktif karbon karışımından oluşan kaplama için 164.90 W/m^2 olarak belirlenmiştir. Kaplamaya aktif karbon eklenmesi ekonomik getirilerinin yanı sıra toplam kullanımda yaklaşık %10'luk bir artışa da önyak olmuştur. Ayrıca, herhangi bir kaplama uygulanmamış olan bakır yüzey için bu değer 124.12 W/m^2 olarak ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda MOF-303 temelli kaplamanın %22.5, MOF - karbon karışımlı kaplamanın da %33'lük bir performans artışına yol açtığı görülmüştür. Endüstriyel bakırın yayınlık değerinin kaplamaya göre çok daha düşük olması bu denli büyük bir farka neden olmuştur. Bu farklar desorpsiyonun kuvvetli olduğu erken fazlar için daha da büyük olarak belirlenmiştir. Operasyon süresince ölçülen ısı transferi değerlerindeki dalgalanmalar ısıtıcı tablanın sıcaklığı sabit tutmak amaçlı güç dalgalanmaları oluşturmalarının yanı sıra, iklimlendirme kabininin de ortam sıcaklığını ve nemini belirli aralıklarla kontrol etmesinin yol açtığı değişikliklerle ilişkilendirilmektedir. Bu sebeple, ortalama değerler alınmış ve bu değerler karşılaştırılmaya tabi tutulmuştur. Bu deneyler 30 dakika sonunda kesilmemiş olup 180 dakika boyunca devam ettirilmişlerdir. 180 dakikalık kullanım sonunda sabit hal durumundaki ısı akı değerlerinde herhangi bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Ayrıca, önceki çalışmalarda bu tarz kaplamaların döngüsel olarak yüzlerce kez aynı performansta çalışabileceği de gösterilmiştir[25]. Bu tarz kaplamaların kalınlıkları artırılarak günlük uygulamalarda, azaltılarak da kısa süreli dalga uygulamalarında kullanılabilirler mümkündür.

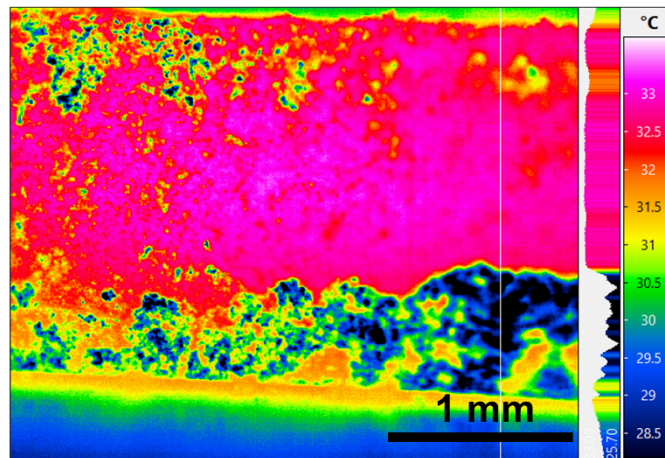
3.4. Kaplamadaki malzemelerin mikro ölçekte bireysel durumlarının analizi (Microscale analysis of the individual states of each material inside the coating)

Bir önceki kısımda belirtilen analizlerde MOF-303 - aktif karbon karışımının endüstriyel bakırların soğutma kapasitesini artırdığı belirtilmiş ve bu artışa neden olan etmenler makro ölçekte ele alınmıştır. Ancak, konvansiyonel ısı transferi deneyleri ve cihazlarıyla kaplamanın içindeki karbon ve metal organik çerçevenin durumlarının anlaşılabilirliği mümkün değildir. MOF-303 ve aktif karbon kimyasal olarak tepkimeye girmedikleri için ve her iki malzeme de kullanılan sıvıların içinde tam olarak çözülmediği için elde edilen kaplamada ayrı parçacıklar halinde bulunmaktadır. Bu sebeple, malzemelerin mikro ölçekte davranışlarının da incelenmesi amacıyla deney düzeneğine bir adet kızılötesi kamera da entegre edilmiştir (Şekil 2b). Bu şekilde, kızılötesi kamera yardımıyla aynı dış ortam koşullarında (22.5°C , %60 nem) ve tabla sıcaklığında (35°C) hem makro ölçekli hem de mikro ölçekli gözlemler yapılmıştır. Sabit hal için yukardan görünümü içeren gözlem sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. Makro ölçekli lens ile ölçümler yapıldığında her iki kaplama için de belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Ancak, mikro ölçekli lens yardımıyla belirli noktalara odaklanıldığında farklar ortaya çıkmaya başlamıştır. MOF-303 bazlı kaplama için kaplamadaki kusurlar hariç sıcaklıkta belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Kusurların yoğun olduğu, yani kaplamanın incelendiği ve kılcal şekilde alttaki bakırın ortaya çıktığı bölümlerde dahi sıcaklık neredeyse aynı olarak ölçülmüştür. Malzemenin ısı iletkenlik katsayısı ve yoğunluğu gibi özelliklerin homojenlik göstermesinden ötürü bu sonuçlar sürpriz değildir. Ancak, MOF-303 - aktif karbon karışımı için farklı bir durum ortaya çıkmaktadır. MOF-303 ve aktif karbon arasındaki yoğunluk farkından ötürü spreyde belirli noktalar daha çok MOF-303 ile, belirli noktalar ise daha çok aktif karbon ile kaplanmıştır. Bu durum yakınlştırılmış olan termografi görüntüsünden de açıkça görülebilmektedir. MOF-303'ün daha yoğun kaplandığı ve daha büyük parçacık boyutlarıyla gözlemlenen bölümler, aktif karbonun daha yoğun olarak kaplandığı ve daha küçük parçacık boyutlarıyla tane tane gözlemlenen kısımlara göre daha sıcaktır. Bu MOF-303'ün aktif karbona göre daha yüksek olan ısı iletkenlik katsayısıyla açıklanabilir. Bakır numunenin ısıtıcı tabladan aldığı ısıyı daha iyi bir iletken olması nedeniyle MOF-303 yoluyla ortama yayması aktif karbona göre daha kolay olmaktadır. Bu da MOF-303'ün sıcaklığını aktif karbona göre daha yüksek değerlere çıkarmaktadır.



Şekil 5. Kaplanmış numunelerin makro ve mikro ölçekli termografi görüntüleri (IR images of the coated substrates in the macro/microscale)

Bu durumun gerçekliğini daha da iyi anlayabilmek amacıyla ısı emicinin yan tarafından da termografik görüntüler alınmıştır (Şekil 6). Karbonun yoğunluğunun metal organik çerçeveye göre daha yüksek olması, onun yan yüzeyde daha çok aşağı kısımlara kaplanmasına neden olmuştur. MOF-303 ise daha çok üst yüzeylere kaplanmıştır. Şekil 6 incelendiğinde çok ilginç bir olguyla karşı karşıya kalınmıştır. Aktif karbon sıcak yüzeye daha yakın da olsa, daha üst kısımlara kaplanmış olan MOF-303'e göre daha düşük sıcaklık göstermektedir. Her iki malzemenin de yansızlıklarının aynı olmasından ötürü, bu kavram iki malzeme arasındaki ısı iletkenlik katsayısında ve desorpsiyon davranışlarında ortaya çıkan farklarla ilişkilendirilebilir. Aktif karbonun ısı iletkenlik katsayısı MOF-303'e göre daha düşük olduğundan ötürü enerjinin yayılımında daha az tercih edilmesi, ve sıcaklığının MOF'a göre daha az artması normaldir. Ayrıca, aktif karbonla karıştırılmış MOF-303, temel MOF-303'e göre daha uzun süre desorpsiyon yapabilmektedir (Şekil 3). Bu kavram da aktif karbon parçacıklarının sıcaklıklarını belirli bir oranda düşürmektedir.



Şekil 6. MOF-303 – Aktif Karbon karışımıyla kaplanmış numunenin yandan termografi görüntüsü (Side-view IR image of the substrate coated with MOF-303 – active carbon mixture)

Kızılötesi kamerayla, özellikle mikro ölçekli lens kullanılarak yapılan gözlemler, nanomalzeme temelli kaplamalarda makro ölçekli analizlerin yanı sıra ancak mikro ölçekli gözlemlerin de yapılarak mekanizmaların temeline inilebileceğini göstermektedir.

4. Sonuç ve Tartışma (Conclusions and Discussion)

Bu çalışmada, nesnelerin interneti cihazları ya da küçük elektronik cihazlar gibi düşük sıcaklıklarda çalışan cihazların verimlerini arttırmak amacıyla kullanılabilecek emici kaplamalar geliştirilmiş ve test edilmiştir. Laboratuvarda üretilen alüminyum bazlı bir metal-organik çerçeve (MOF-303) kaplamada temel malzeme olarak kullanılmış ve bu malzemenin su emme döngüsü kullanılarak desorpsiyon temelli bir soğutma etkisi yaratılmıştır. Ayrıca, üretimi ve temini MOF'lara göre çok daha kolay olan aktif karbon malzemesi de MOF ile birleştirilerek parçacık boyunda bir gradyan oluşturulmak suretiyle su emme dinamikleri modifiye edilmiştir. Hem MOF malzeme hem de aktif karbon için SEM, DLS gibi deneysel karakterizasyon yöntemleri kullanılmış ve gerekli malzeme özellikleri elde edilmiştir. MOF-303 ve aktif karbon bir spreyn içinde birleştirilerek endüstriyel bakır yüzeylere kaplanmıştır. Kaplanan yüzeyler 22.5 °C sıcaklık ve %60 nem oranında sabitlenmiş olan bir iklimlendirme kabininde denemelere tabi tutulmuş ve performans değerleri not edilmiştir. MOF-303 – aktif karbon karışımı parçacık boyutu ve ısı iletkenlik katsayısında oluşturulan gradyanlar sayesinde her iki bileşenine göre daha yüksek adsorpsiyon ve desorpsiyon göstermiştir. Karışım bazlı kaplama 60 dakikada atmosferden ağırlığının %34'ü kadar su çekme başarısı göstermiştir. Bu değerler MOF-303 için %26 iken, aktif karbon için %8.5 olarak ölçülmüştür. Ayrıca, ısı transferi özelliklerinin de ölçülebilmesi amacıyla numuneler 35°C'ye sabitlenmiş bir ısıtıcı tablanın üzerine yerleştirilmek suretiyle soğutma testlerine tabi tutulmuştur. Tabla ile numune arasında yerleştirilen ısı akı sensörleri yoluyla ısı transferi dinamikleri ölçülmüştür. MOF-303 – aktif karbon karışımından elde edilen kaplama endüstriyel bakıra göre %35, MOF-303'e göre ise %10'luk bir performans artışı göstererek 164 W/m²'lik bir ortalama soğutma akısı göstermiştir. Bu artışın operasyonun erken fazlarında hızlı desorpsiyon temelli olarak geç fazlarında yavaş desorpsiyon temelli olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, hem MOF temelli hem de karışım temelli iki kaplama için de yayınlık değerleri 0.99 olarak ölçüldüğünden endüstriyel bakıra göre radyasyon temelli büyük bir artış gözlemlenmiştir. Son olarak, aktif karbon ve MOF'un kaplama içerisinde nasıl davranış gösterdiklerinin anlaşılabilmesi amacıyla sisteme bir kızılötesi kamera entegre edilmiştir. Bir mikro lens yardımıyla kaplama hem yüzeyden hem de yandan gözlemlenmiş, ve karbonun MOF'a göre daha düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip olması nedeniyle daha düşük sıcaklığa sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, iki malzeme arasındaki yoğunluk farklarından ötürü mikro düzeyde homojen bir kaplama elde edilemediği de belirlenmiştir. Makro ölçüde ise belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir. Bu çalışmada sorpsiyon, morfoloji, ve fiziksel özelliklerinde farklar bulunan değişik malzemelerin karıştırılmasının ısı transferini pozitif yönde etkileyebileceği gösterilmiştir. Desorpsiyon temelli soğutucular üretilirken yeni sorbent malzemelerin araştırılmasına paralel olarak, hali hazırda elde bulunan malzemelerin kombinasyonlarının da denenmesi yüksek fayda sağlayabilecektir. Bu bağlamda, bu çalışma hem desorpsiyon bazlı kaplamaların soğutma kapasitelerinin ekonomik yöntemlerle nasıl arttırılabileceğini araştırmış, hem de makro ve mikro ölçekli desorpsiyon, radyasyon ve ısı transferi karakterizasyonları için bir kılavuz ortaya koymuştur.

Teşekkür (Acknowledgment)

Yazar Dr. Sivasankaran Harish ve Prof. Dr. Junichiro Shiomi'ye bu çalışmadaki destekleri için şükranlarını sunar.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar (References)

- [1] B. Barat and Baumann, *Springer handbook of nanotechnology*. Vol. 2, Berlin:Springer, 2007.
- [2] A. L. Moore and L. Shi, "Emerging challenges and materials for thermal management of electronics," *Materials Today*, vol. 17, no. 4, pp. 163-174, 2014. doi:10.1016/j.mattod.2014.04.003
- [3] R. J. McGlen, R. Jachuck, and S. Lin, "Integrated thermal management techniques for high power electronic devices," *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, no. 8, pp. 1143-1156, 2004. doi:10.1016/j.applthermaleng.2003.12.029
- [4] Z. He, Y. Yan, and Z. Zhang, "Thermal management and temperature uniformity enhancement of electronic devices by micro heat sinks: A review," *Energy*, vol. 216, p. 119223, 2021. doi:10.1016/j.energy.2020.119223
- [5] R. Kandasamy, X.-Q. Wang, and A. S. Mujumdar, "Application of phase change materials in thermal management of

- electronics," *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, no. 17, pp. 2822-2832, 2007. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.12.013>
- [6] T. J. Lu, "Thermal management of high power electronics with phase change cooling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 43, no. 13, pp. 2245-2256, 2000. doi:[https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(99\)00318-X](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00318-X)
- [7] W. Nakayama, "Thermal management of electronic equipment: a review of technology and research topics," 1986.
- [8] A. Krishna and J. Lee, "Morphology-Driven Emissivity of Microscale Tree-like Structures for Radiative Thermal Management," *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, vol. 22, no. 2, pp. 124-136, 2018. doi:[10.1080/15567265.2018.1446065](https://doi.org/10.1080/15567265.2018.1446065)
- [9] D. Christen, M. Stojadinovic, and J. Biela, "Energy Efficient Heat Sink Design: Natural Versus Forced Convection Cooling," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 11, pp. 8693-8704, 2017. doi:[10.1109/TPEL.2016.2640454](https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2640454)
- [10] P. Teertstra, M. M. Yovanovich, and J. R. Culham, "Analytical Forced Convection Modeling of Plate Fin Heat Sinks," *Journal of Electronics Manufacturing*, vol. 10, no. 04, pp. 253-261, 2000. doi:[10.1142/s0960313100000320](https://doi.org/10.1142/s0960313100000320)
- [11] S. S. Haghghi, H. R. Goshayeshi, and M. R. Safaei, "Natural convection heat transfer enhancement in new designs of plate-fin based heat sinks," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 125, pp. 640-647, 2018. doi:[10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.122](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.122)
- [12] L. H. Saw, H. M. Poon, H. S. Thiam, Z. Cai, W. T. Chong, N. A. Pambudi, and Y. J. King, "Novel thermal management system using mist cooling for lithium-ion battery packs," *Applied Energy*, vol. 223, pp. 146-158, 2018. doi:[10.1016/j.apenergy.2018.04.042](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.042)
- [13] S. Lin, K. Sefiane, and J. R. E. Christy, "Prospects of confined flow boiling in thermal management of microsystems," *Applied Thermal Engineering*, vol. 22, no. 7, pp. 825-837, 2002. doi:[10.1016/S1359-4311\(01\)00124-7](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00124-7)
- [14] D. Shin, S. W. Chung, E. Y. Chung, and N. Chang, "Energy-Optimal Dynamic Thermal Management: Computation and Cooling Power Co-Optimization," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 6, no. 3, pp. 340-351, 2010. doi:[10.1109/TII.2010.2052059](https://doi.org/10.1109/TII.2010.2052059)
- [15] H. Zu, W. Dai, Y. Li, K. Li, and J. Li, "Analysis of enhanced heat transfer on a passive heat sink with high-emissivity coating," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 166, p. 106971, 2021. doi:[10.1016/j.ijthermalsci.2021.106971](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106971)
- [16] A. M. Omer, "Renewable building energy systems and passive human comfort solutions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 6, pp. 1562-1587, 2008. doi:[10.1016/j.rser.2006.07.010](https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.010)
- [17] H. Ye and G. Zhang, "A review of passive thermal management of LED module," *Journal of Semiconductors*, vol. 32, no. 1, p. 014008, 2011. doi:[10.1088/1674-4926/32/1/014008](https://doi.org/10.1088/1674-4926/32/1/014008)
- [18] R. Hu, Y. Liu, S. Shin, S. Huang, X. Ren, W. Shu, J. Cheng, G. Tao, W. Xu, R. Chen, and X. Luo, "Emerging Materials and Strategies for Personal Thermal Management," *Advanced Energy Materials*, vol. 10, no. 17, p. 1903921, 2020. doi:[10.1002/aenm.201903921](https://doi.org/10.1002/aenm.201903921)
- [19] J. Xu, J. Chao, T. Li, T. Yan, S. Wu, M. Wu, B. Zhao, and R. Wang, "Near-Zero-Energy Smart Battery Thermal Management Enabled by Sorption Energy Harvesting from Air," *ACS Central Science*, vol. 6, no. 9, pp. 1542-1554, 2020. doi:[10.1021/acscentsci.0c00570](https://doi.org/10.1021/acscentsci.0c00570)
- [20] B. B. Saha, E. C. Boelman, and T. Kashiwagi, "Computational analysis of an advanced adsorption-refrigeration cycle," *Energy*, vol. 20, no. 10, pp. 983-994, 1995. doi:[10.1016/0360-5442\(95\)00047-K](https://doi.org/10.1016/0360-5442(95)00047-K)
- [21] R. P. Sah, B. Choudhury, and R. K. Das, "A review on adsorption cooling systems with silica gel and carbon as adsorbents," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 123-134, 2015. doi:[10.1016/j.rser.2015.01.039](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.039)
- [22] F. Stoeckli, T. Jakobov, and A. Lavanchy, "Water adsorption in active carbons described by the Dubinin-Astakhov equation," *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*, vol. 90, no. 5, pp. 783-786, 1994. doi:[10.1039/FT9949000783](https://doi.org/10.1039/FT9949000783)
- [23] M. Ejeian and R. Z. Wang, "Adsorption-based atmospheric water harvesting," *Joule*, vol. 5, no. 7, pp. 1678-1703, 2021. doi:[10.1016/j.joule.2021.04.005](https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.04.005)
- [24] C. Wang, L. Hua, H. Yan, B. Li, Y. Tu, and R. Wang, "A Thermal Management Strategy for Electronic Devices Based on Moisture Sorption-Desorption Processes," *Joule*, vol. 4, no. 2, pp. 435-447, 2020. doi:[10.1016/j.joule.2019.12.005](https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.12.005)
- [25] A. A. Günay, S. Harish, M. Fuchi, I. Kinefuchi, Y. Lee, and J. Shiomi, "Metal-organic framework coated porous structures for enhanced thermoelectric performance," *Energy Conversion and Management*, vol. 255, p. 115289, 2022. doi:[10.1016/j.enconman.2022.115289](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115289)
- [26] L. Aftab, N. Iqbal, A. Asghar, and T. Noor, "Synthesis, characterization and gas adsorption analysis of solvent dependent Zn-BTC metal organic frameworks," *Separation Science and Technology*, vol. 56, no. 13, pp. 2159-2169, 2021. doi:[10.1080/01496395.2020.1813176](https://doi.org/10.1080/01496395.2020.1813176)
- [27] J. Choi, L.-C. Lin, and J. C. Grossman, "Role of Structural Defects in the Water Adsorption Properties of MOF-801," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 122, no. 10, pp. 5545-5552, 2018. doi:[10.1021/acs.jpcc.8b00014](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b00014)
- [28] M. L. Palash, I. Jahan, T. H. Rupam, S. Harish, and B. B. Saha, "Novel technique for improving the water adsorption isotherms

- of metal-organic frameworks for performance enhancement of adsorption driven chillers," *Inorganica Chimica Acta*, vol. 501, p. 119313, 2020. doi:10.1016/j.ica.2019.119313
- [29] L. Garzón-Tovar, J. Pérez-Carvajal, A. Yazdi, J. Hernández-Muñoz, P. Tarazona, I. Imaz, F. Zamora, and D. Maspoch, "A MOF@COF Composite with Enhanced Uptake through Interfacial Pore Generation," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 58, no. 28, pp. 9512-9516, 2019. doi:10.1002/anie.201904766
- [30] X. Zheng, L. W. Wang, R. Z. Wang, T. S. Ge, and T. F. Ishugah, "Thermal conductivity, pore structure and adsorption performance of compact composite silica gel," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 68, pp. 435-443, 2014. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.09.075
- [31] M. Yeşilbaş and J.-F. Boily, "Particle Size Controls on Water Adsorption and Condensation Regimes at Mineral Surfaces," *Scientific Reports*, vol. 6, no. 1, p. 32136, 2016. doi:10.1038/srep32136
- [32] M. Manyangadze, N. H. M. Chikuruwo, C. S. Chakra, T. B. Narsaiah, M. Radhakumari, and G. Danha, "Enhancing adsorption capacity of nano-adsorbents via surface modification : a review," *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 31, no. 1, pp. 25-32, 2020. doi:10.1016/j.sajce.2019.11.003
- [33] F. Fathieh, M. J. Kalmutzki, E. A. Kapustin, P. J. Waller, J. Yang, and O. M. Yaghi, "Practical water production from desert air," *Science Advances*, vol. 4, no. 6, p. eaat3198, 2018. doi:10.1126/sciadv.aat3198
- [34] N. Hanikel, M. S. Prévot, F. Fathieh, E. A. Kapustin, H. Lyu, H. Wang, N. J. Diercks, T. G. Glover, and O. M. Yaghi, "Rapid Cycling and Exceptional Yield in a Metal-Organic Framework Water Harvester," *ACS Central Science*, vol. 5, no. 10, pp. 1699-1706, 2019/10/23 2019. doi:10.1021/acscentsci.9b00745
- [35] J. D. Howe, C. R. Morelock, Y. Jiao, K. W. Chapman, K. S. Walton, and D. S. Sholl, "Understanding Structure, Metal Distribution, and Water Adsorption in Mixed-Metal MOF-74," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 121, no. 1, pp. 627-635, 2017/01/12 2017. doi:10.1021/acs.jpcc.6b11719
- [36] I. A. Khan, A. Badshah, N. Haider, S. Ullah, D. H. Anjum, and M. A. Nadeem, "Porous carbon as electrode material in direct ethanol fuel cells (DEFCs) synthesized by the direct carbonization of MOF-5," *Journal of Solid State Electrochemistry*, vol. 18, no. 6, pp. 1545-1555, 2014. doi:10.1007/s10008-013-2377-8
- [37] S. Ito, H. Huang, F. Watanabe, H. Yuan, M. Hasatani, and N. Kobayashi, "Heat Transfer during Microwave-Assisted Desorption of Water Vapor from Zeolite Packed Bed," *Drying Technology*, vol. 30, no. 15, pp. 1707-1713, 2012. doi:10.1080/07373937.2012.714825
- [38] J. Chorover and M. L. Brusseau, "Kinetics of sorption—desorption," in *Kinetics of water-rock interaction*: Springer, 2008, pp. 109-149.
- [39] A. A. Günay, "Analysis and Optimization of Activated Carbon Coated Heat Sinks," *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, vol. 42, no. 1, pp. 65-74, 2022. doi:10.47480/isibted.1107445

This is an open access article under the CC-BY license

