

BİLİM KÜLTÜR VE EĞİTİM

Kimyada Tasarım Çağı: MOF'lar ve 2025 Nobel Kimya Ödülü

Elmas kristalinden ilham alan bir fikir, bugün su üretiminden karbon yakalamaya kadar uzanan devrimsel uygulamaların önünü açtı. 2025 Nobel Kimya Ödülü, metal-organik çerçevelerin bilimi nasıl yeniden şekillendirdiğini ortaya koyuyor.

Prof.Dr. Nihal SARIER

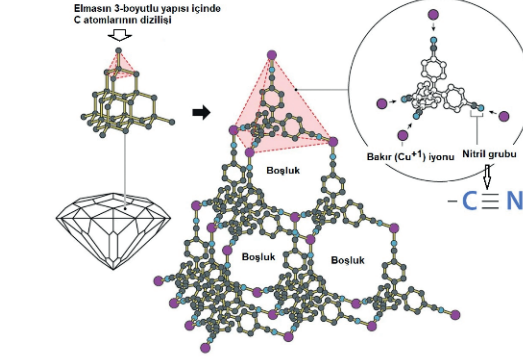
İstanbul Kültür Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Metal organik çerçevelerin (MOF'ların) bulunuş öyküsü

MOF'lar, metal kümeleri ile organik moleküllerin bir ağ gibi birbirine bağlanmasıyla oluşan, düzenli ve tasarlanmış bir mimariye sahip son derece gözenekli malzemelerdir. Bu yapı, malzemenin her noktasında mikroskobik boşluklar oluşmasını sağlar; böylece MOF'lar gazları ve sıvıları adeta bir sünger gibi içine çekip depolayabilir.

MOF'ların doğuş hikâyesi, doğadaki en tanıdık yapılardan biri olan elmas kristali ile başlar. **Richard Robson**, elmasa her bir karbon atomunun, piramit benzeri bir geometriyle dört karbon atomuna bağlanmasından ilham aldı. Karbon atomları yerine artı yüklü bakır iyonlarını (Cu^{+1}), karbon-karbon bağları yerine de uçlarında nitril grupları bulunan dört kollu organik molekülleri kullandı. Bakır iyonları ile nitril grupları arasındaki elektrostatik çekim sayesinde, tıpkı elmastaki gibi düzenli piramitlerden oluşan üç boyutlu bir yapı elde etti. Robson, 1989'da sentezlediği metal-organik kristalin, sayısız boşlukla dolu, gözenekli bir elmas gibi davrandığını gösterdi (bkz. Şekil 1). Üç boyutlu kafes yapının potansiyelini hemen fark etti, ancak yapı kararsızdı ve kolayca çöküyordu.

Bu aşamada sahneye Susumu Kitagawa ve Omar Yaghi çıktı. 1990'lı yıllar boyunca her iki araştırmacı da bu tür üç boyutlu kafes yapıların nasıl daha kararlı ve işlevsel hale getirilebileceği üzerine devrim niteliğinde çalışmalar yürüttü. Kitagawa, MOF'ların esnek davranabildiklerini ve gaz moleküllerinin bu yapıya girip çıkarken çerçevenin buna uyum sağlayabildiğini ortaya koydu. Yaghi, 300 °C'ye kadar kararlı MOF yapıları geliştirdi (1995). "Metal Organik Çerçeve (MOF)" terimi bilim literatürüne ilk kez Omar Yaghi tarafından kazandırılmıştır. 2000'li yıllarda Yaghi'nin araştırma grubu, kübik yapıda, yüksek gözenekliliğe ve



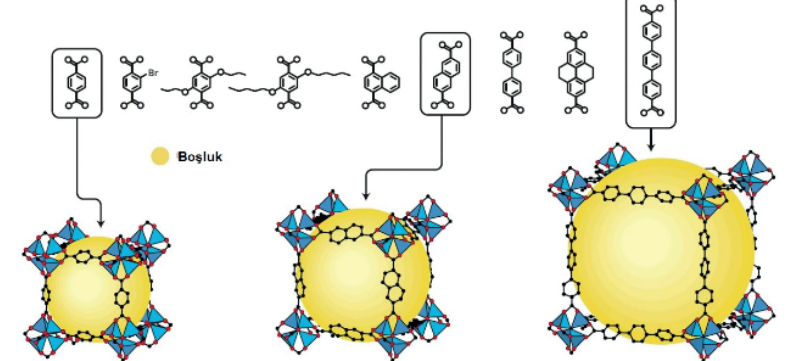
Şekil 1. Elmasın 3 boyutlu yapısı içinde karbon (C) atomlarının piramitler oluşturarak şekillenerek Richard Robson tarafından sentezlenen Bakır iyonu-Organik Molekül kristalinin üç boyutlu gösterimi. (Kaynak: <https://www.nobelprize.org/uploads/2025/10/press-chemistryprize2025-figure2.jpg>)

geniş bir yüzey alanına sahip çinko bazlı MOF'lar sentezledi (bkz. Şekil 2).

MOF'ların kimyasal yapısı ve özellikleri

Bir MOF'un yapısı, tekrarlayan iki temel bileşenden oluşur. İlki, düğümler olarak adlandırılan metal kümeleridir. Çinko (Zn^{+2}), bakır ($\text{Cu}^{+1/+2}$) veya demir (Fe^{+2}) gibi metal iyonlarından oluşan bu düğümler, yapının iskeletini ayakta tutan sağlam bağlantı noktalarıdır. İkinci bileşen olan bağlayıcılar, ligand adı verilen organik moleküllerdir. Bu moleküller, düğümleri birbirine bağlayan çubuklar veya köprüler gibi çalışır, yapı içinde oluşacak boşlukların, yani gözeneklerin boyutunu ve şeklini belirler. Metal düğümler ile organik bağlayıcılar, bir araya geldiğinde, kendiliğinden üç boyutlu ve son derece düzenli bir çerçeve oluşturur. Ortaya çıkan yapı, moleküler ölçekte kusursuzca planlanmış bir iskeleyi andırır.

MOF'ları benzersiz kılan en dikkat çekici özellik, sahip oldukları olağanüstü geniş yüzey alanıdır. Bazı MOF türlerinde yalnızca **bir gram malzemenin yüzey alanı on bin metrekaareye (yaklaşık bir buçuk futbol sahası büyüklüğüne)** ulaşabilir. Bu kristaller, yapılarındaki gözenekler sayesinde molekülleri tutabilen, serbest bırakabilen veya seçici olarak ayıracılaben adeta **moleküler süngerler** gibi davranır. Gözeneklerin çapı genellikle insan saç telinden yaklaşık on bin kat daha küçük, birkaç nanometre mertebesinde. Metal merkezler ve organik bağlayıcılar değiştirilerek MOF'ların hangi molekülleri tutacağı, hangilerini



Şekil 2. 2000'lerin başlarında, Yaghi organik molekül halkalarını değiştirerek farklı özelliklerde kübik şekilde 16 farklı MOF sentezledi. (Kaynak: <https://www.nobelprize.org/uploads/2025/10/press-chemistryprize2025-figure6.jpg>)

dışarıda bırakma önceden belirlenebilir. Bu nedenle MOF'lar, yalnızca gözenekli değil, aynı zamanda "akıllı" malzemeler olarak tanımlanır.

2025 nobel kimya ödülü

MOF'lar, sundukları benzersiz özellikler nedeniyle uzun yıllardır Kimya Nobel Ödülü için en güçlü adaylar arasında gösteriliyordu. Bu beklenti, 2025 Nobel Kimya Ödülü'nün "metal-organik çerçevelerin geliştirilmesi" çalışmalarını nedeniyle **Susumu Kitagawa, Richard Robson ve Omar M. Yaghi**'ye ortaklaşa verilmesiyle karşılığını buldu.

Bu ödül, MOF'ların yalnızca bir malzeme sınıfı değil, aynı zamanda kimyanın nasıl tasarlanabilir bir bilim haline geldiğinin bir kanıtı olarak kabul edildi. Nobel Komitesi, MOF'ların kimyada yeni bir dönemi temsil ettiğini vurgulayarak, bu yapıların "yeni işlevlere sahip, özel olarak tasarlanmış malzemeler için daha önce öngörülemeyen fırsatlar sunduğunu" özellikle ifade etti.

MOF'ların kullanım olanakları

Sıra dışı özellikleri, MOF'lara çok geniş bir uygulama alanı kazandırmaktadır. Bunlar arasında en önemlileri şunlardır:

1. Havadan içme suyu üretimi: Bazı MOF'lar gece boyunca havadaki su buharını emer, gündüz hava ısındığında bu nemi temiz su olarak serbest bırakır. Bu basit emme-bırakma döngüsü, su kaynaklarına erişimi olmayan bölgeler için umut verici bir çözüm sunar.

2. Karbon dioksit (CO_2) yakalanması: MOF'lar, baca gazlarından ya da havadan karbon dioksiti yakalayıp küresel ısınmayla mücadelede önemli bir rol oynayabilir.



Susumu Kitagawa
(d.1951, Kyoto, Japonya)
(Kyoto Üniversitesi, Japonya)



Richard Robson
(d.1937, Glusburn, İngiltere)
(Melbourne Üniversitesi, Avustralya)



Omar M. Yaghi
(d.1965, Amman, Ürdün)
(California Üniversitesi, ABD)

3. Hidrojeni güvenli biçimde depolar: Hidrojen, temiz ve yüksek enerjili bir yakıttır ancak depolanması zordur. MOF'lar, son derece küçük gözenekleri sayesinde hidrojeni düşük basınçta bile tutabilir.

4. İlaç taşıyıcı akıllı MOF: MOF'lar, ilaç moleküllerini taşıyan moleküler kafesler gibi çalışır. İlaçı vücutta korur, yalnızca hedef noktaya ulaşıldığında, kontrollü bir şekilde serbest bırakır.

5. Akıllı sensör ve filtreler: MOF'lar, belirli kimyasalları tanıdıklarında renk veya elektriksel özellik değiştirerek tepki verebilir ve seçici olarak yakalayabilir. Bu sayede hava kirliliğini izlemek, endüstriyel güvenliği artırmak ve hatta patlayıcı maddeleri tespit etmek veya uzaklaştırmak mümkün olur.

Öte yandan, MOF'ların laboratuvarında gösterdiği üstün performansın günlük hayata ve sanayiye yansıtılması için en büyük engel, hâlen yüksek olan üretim maliyetleridir. Bu maliyetler düşürülebildiği ölçüde, MOF'ların temiz suya erişimden iklim değişikliğiyle mücadeleye, enerjiden sağlığa kadar pek çok alanda dönüştürücü bir rol üstlenmesi mümkün olacaktır.

Kaynaklar

1) Nobel Prize in Chemistry 2025. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach 2025. Wed. 24 Dec 2025. <<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2025/summary/>>

2) Serrano-Plana, J. (2025). A framework for chemists: 2025 Nobel prize in chemistry. Nature Chemistry, 17(12), 1802-1802.

3) Safaei, M., Foroughi, M. M., Ebrahimipour, N., Jahani, S., Omid, A., & Khatami, M. (2019). A review on metal-organic frameworks: Synthesis and applications. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 118, 401-425.