

Kémiai Nobel-díj 2025: a fém–szerves vázszerkezetekért (MOF)

Udvardy Antal

vegyész, egyetemi adjunktus, TTK, Fizikai Kémiai Tanszék,
Debreceni Egyetem

*„egy részt annak a személynek, aki a legjelentősebb
felfedezést tette a kémia területén”*

Részlet Alfred Bernhard Nobel végrendeletéből, Párizs, 1895. november 27.

A kémiai Nobel-díjat 2025-ben Susumu Kitagawa (Kiotói Egyetem), Richard Robson (Melbourne-i Egyetem) és Omar M. Yaghi (Kaliforniai Berkeley Egyetem) kémikusoknak $\frac{1}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3}$ arányban megosztva ítélte oda a Svéd Királyi Tudományos Akadémia a fém–szerves vázszerkezetek kifejlesztéséért (Metal–Organic Framework).

A 2025-ös kémiai Nobel-díjról olvashatnak a Magyar Kémikusok Lapja februári (László, 2026), a Magyar Tudomány januári (Sápi – Kónya, 2026) és a Természet Világa januári számában is (Udvardy, 2026).

A 2025-ös kémiai Nobel-díjról több előadást is tartottam a közelmúltban (az MTA-Koordinációs Kémiai munkabizottság ülésén, a Nobel-napon a DAB-ban, a Science Cafe és a Hatvani István Szakkollégium előadás-sorozataiban).

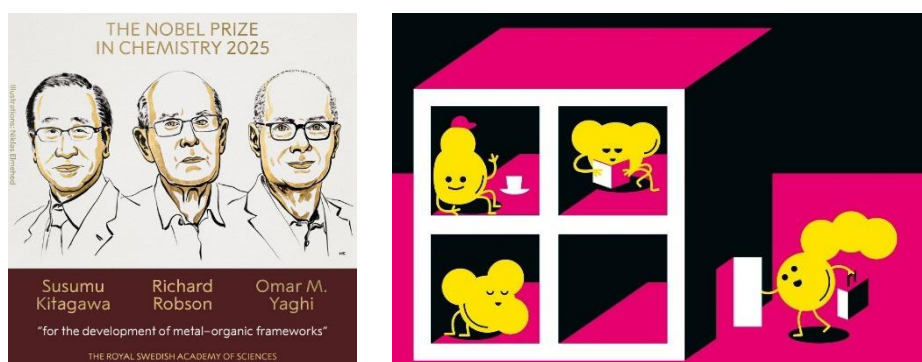
A MOF-ok, mint korszakalkotó anyagok

Már 2019-ben, évekkel a Nobel-díj előtt, az IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry, Nemzetközi Elméleti és Alkalmazott Kémiai Szövetség) a MOF-okat beválasztotta a tíz „világmegváltó” kémiai technológia közé (Gomollón-Bel, 2019). Ez az IUPAC-lista figyelemre méltó, hiszen az aszimmetrikus organokatalízis is szerepel rajta, amelyért 2021-ben Benjamin List és David W.C. MacMillan kémiai Nobel-díjat kaptak (Joó – Kathó – Udvardy, 2022).

A legnagyobb tudományos elismerés bejelentésekor Heiner Linke – a kémiai Nobel-bizottság elnöke – ötletesen mutatta be a fém–szerves vázszerkezeteket a nagyközönségnek. Ezeket a hasznos szerkezetű anyagokat úgy képzelhetjük el legkönnyebben, mint a közismerten okos Hermione Grangernek a feneketlennek tűnő varázslatos kék táskáját a Harry Potter-sorozatból. Vagy felidézhetjük még Mary Poppins hasonló elven működő elvarázsolt szőnyegtáskáját is. Ahogy a fenti táskák, a MOF-ok is kívülről kicsinek tűnnek, de meglepően nagy mennyiségű gázt vagy oldószert tárolhatunk ezekben a porózus, azaz nagy belső felülettel bíró anyagokban – jegyezte meg Linke. Azt is hozzátette, hogy a MOF-ok

családjában hatalmas lehetőség rejlik, mivel korábban elképzelhetetlennek tűnt egy ilyen új funkciókkal bíró, egyedi tervezésű anyagcsoport. Linke megfogalmazását nagyon szemléletesen mutatja a 2025-ös kémiai Nobel-díj „hivatalos ábrája is” (1. ábra jobb).

A Nobel-díj átadási ünnepségén Prof. Olof Ramström a Svéd Királyi tudományos Akadémia, a Nobel Kémiai Bizottság tagja a következőképpen beszélt a három tudós jelentőségéről: „*Susumu Kitagawa, Richard Robson és Omar Yaghi* úttörő felfedezéseket tettek a kémiában, amelyek a fém–szerves keretek kialakulásához vezettek. Ez valóban nagy eredmény az emberiség javára.” (1. ábra).



1. ábra: 2025. év kémiai Nobel-díjasai és a Nobel-díj hivatalos képe
(forrás: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2025/summary/>,
©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences)

A díj bejelentése után Perczel András (ELTE, a Magyar Tudományos Akadémia tagja, a Kémia Tudományok Osztályának elnöke) megjegyezte, hogy a 2025-ös kémiai Nobel-díjat egy olyan terület kapta, amely már legalább egy évtizede várománysága ennek a kitüntetésnek (Perczel, 2026).

A díjazottak

A tanulmányom következő része a három díjazott kémikus életútjába nyújt betekintést, életrajzi adatok és személyes történetek segítségével.

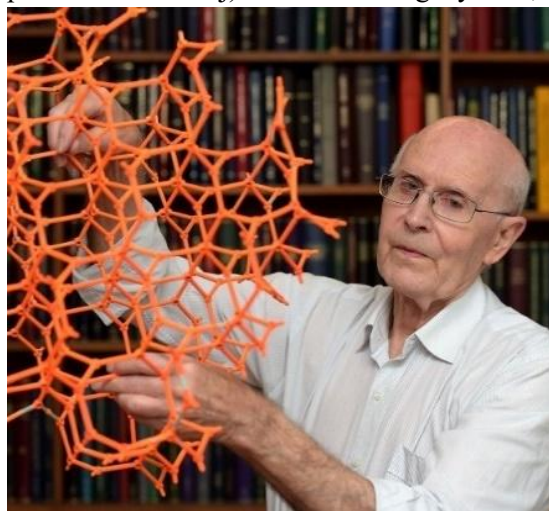
Susumu Kitagawa (1. kép) (北川 進) 1951. július 4-én született Kiotóban, Japánban. Tanulmányait a Kiotói Egyetemen végezte, ahol 1979-ben szerzett PhD-fokozatot szénhidrogén-kémiából. Pályafutása során a Kindai Egyetemen dolgozott adjunktusként, 1988-tól docensként, majd 1992-től a Tokió Metropolitan Egyetem kémiai tanszékén szerves kémia professzorként folytatta munkásságát.

1998-ban visszatért a Kiotói Egyetem Szintetikus Kémia és Biológiai Kémia tanszékre (Synthetic Chemistry and Biological Chemistry). 2007-ben társalapítója volt az Institute for Integrated Cell-Material Sciencesnek (iCeMS), ahol igazgatóhelyettesként dolgozott. Kitagawa 2013-tól 2023-ig vezette az iCeMS-t, majd 2024-ben kinevezték a Kiotói Egyetem kutatásfejlesztési ügyvezető alelnökévé.

A Nobel-díj bejelentésekor (2025. 10. 08.), amikor megcsörrent Kitagawa telefonja, eleinte szkeptikus volt, és „elég nyersen” szólt bele, mert azt hitte, valamilyen telemarketinges hívással zavarják. „Olyan nagy díj ez, hogy nem hittem el, tényleg igaz lehet?” – idézte fel a Kio-

tói Egyetemen tartott sajtótájékoztatón. „Amikor az egyik szakértő vette át a telefont és gratulált, akkor éreztem először, hogy valóban igaz, és megnyugodtam.”

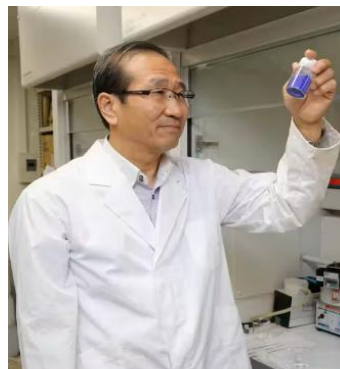
Egy mini-interjúban viccesen elmondta: azért lett kémikus, hogy tudja a különbséget a metanol és az etanol között. Rajong a kabukiért (hagyományos japán színházi műfaj) és a detektívregényekért, illetve európai thrillereket néz.



2. kép: Richard Robson
(forrás: University of Melbourne)

2024-ben a Melbourne-i Egyetemen egy professzori széket is elneveztek róla.

Robson rendkívül alázatos és közvetlen. Az India Today-nak elmondta, hogy a Nobel-díj híréért éppen vacsora közben kapta meg, ami nem zökkentette ki

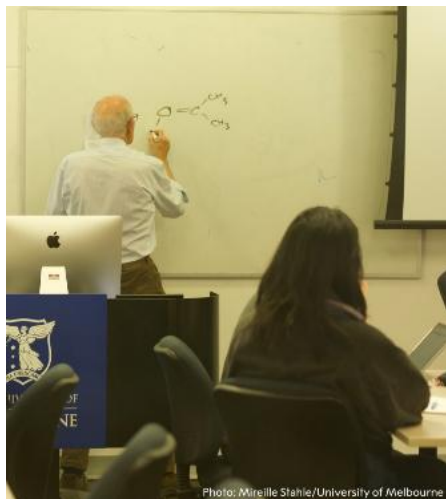


1. kép: Susumu Kitagawa
(©Sankei by Junpei Teraguchi)

Richard Robson (2. kép) 1937. június 4-én született Glusburnben (Yorkshire, Anglia). Tanulmányait az Oxfordi Egyetemen (Brasenose College) végezte, ahol 1962-ben doktori fokozatot szerzett.

Posztdoktori éveit a California Institute of Technology-n (Caltech) és a Stanfordon töltötte.

1966-ban a Melbourne-i Egyetemen helyezkedett el, ahol előadásokat tartott és tudományos munkát végzett, majd az egyetem professzora lett. 2004-ben nyugdíjba vonult, de még a mai napig is oktat az egyetemen.



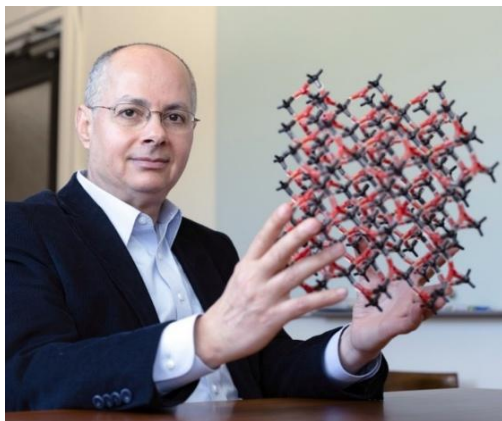
3. kép: Richard Robson a Nobel-díj másnapján
(forrás: University of Melbourne)

a napi rutinból, így először megette a halat, majd elmosogatott. A hirtelen támadt figyelem nem változtatta meg a mindennapi életét. A 88 éves Robson a melbourne-i otthonából az Associated Press-szel folytatott telefonbeszélgetésében azt is mondta, hogy „természetesen nagyon örülök, és egy kicsit meg is döbbentem”, majd hozzátette: „Ez egy hatalmas dolog, de az életemnek azon szakaszában ért, amikor már nem igazán vagyok olyan állapotban, hogy mindezt könnyen vegyem... De itt vagyok.”

Érdekesség, hogy állítása szerint matematikus szeretett volna lenni, és csak úgy belesodródott a kémiába.

A Nobel-díj bejelentésének másnapján Robson ugyanúgy megtartotta az egyetemen az óráját mint addig (3. kép).

Omar Mwanne Yaghi (عمر مؤنس ياغي) (4. kép) 1965. február 9-én Ammanban, Jordániában született egy menekült palesztin családban. A szülei az 1948-as arab-izraeli háború alatt költöztek Jordániába egy gázai faluból, Al-Masmiyya al-Kabirából.



4. kép: O.M. Yaghi
(forrás: photo by Christopher Michel)

Gyermekkorát Jordániában töltötte nehéz körülmények között, mélyszegénységben. Egy szobában lakott testvéreivel és az állataikkal. A legnépszerűbb videómegosztó portálon elérhető „*Harvesting water from desert air*” (Yaghi, 2019) című előadásban is elmondta, hogy nagyon száraz, vízhiányos területen éltek, ezért is foglalkoztatta már fiatal korától kezdve, hogyan lehet a sivatagos területekről vizet kinyerni. A kémia iránti szeretete egy képletekkel teli könyv szerencsés fellapozásával kezdődött, amelyet véletlenül emelt le az iskolai könyvtár egyik polcáról.

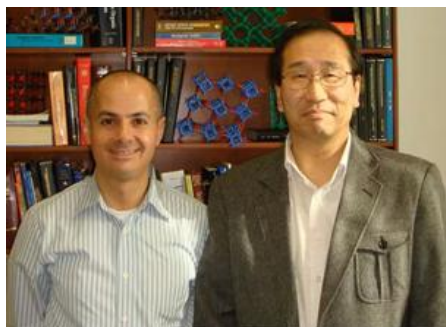
Yaghi 15 évesen költözött – apja szigorú utasítására – az Egyesült Államokba tanulni. Felsőfokú tanulmányait a State University of New Yorkban (jelenleg University of Albany) kezdte. Itt kémia alapdiplomát szerzett, majd a doktori dolgozatát a University of Illinois at Urbana-Champaignen védte meg 1990-ben. Ezután posztdoktori kutatóként a Harvard Egyetemen dolgozott.

Kutatói pályafutását adjunktusként 1992-ben kezdte az Arizonai Állami Egyetemen, azután a Michigani Egyetemen, majd az UCLA-n folytatta.

Yaghi 2012 óta a Kaliforniai Berkeley Egyetem professzora (ő a Berkeley 28. Nobel-díjasa), és több intézetet is vezet, például a Berkeley Global Science Institute-ot.

Yaghi a Nobel-díj bejelentésének napján éppen San Franciscoból Brüsszelbe utazott. Miközben Frankfurtban szállt át, rezegni kezdett a telefonja egy svédországi hívás miatt... Később egy sajtótájékoztatón elmondta: „Nem lehet felkészülni egy ilyen pillanatra”, „Az érzés leírhatatlan és rendkívül izgalmas.”

Az 5. képen együtt láthatjuk Yaghit és Kitagawat.

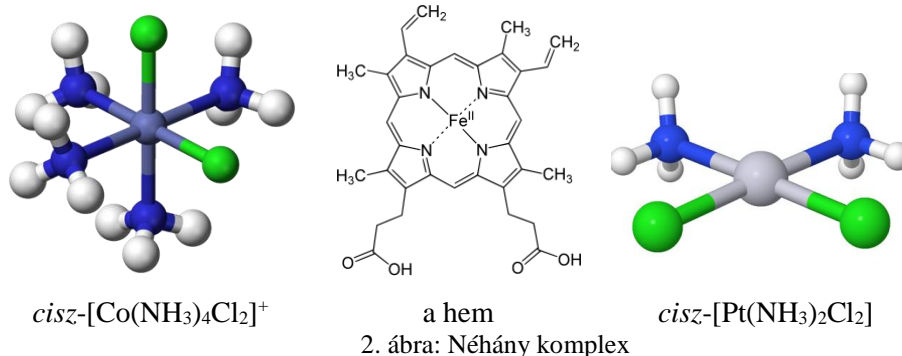


5. kép: Omar M. Yaghi és Kitagawa Susumu

A MOF-okhoz vezető út „vezető út”

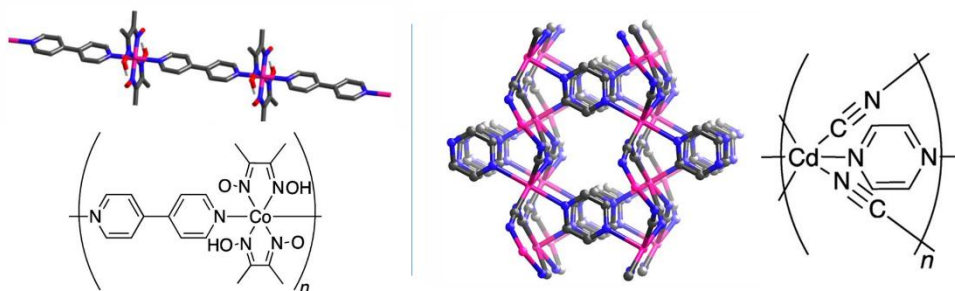
A MOF-okhoz vezető út legfontosabb előzménye a koordinációs vegyületek felfedezése és fejlődése volt, melyek fontos szerepet játszanak az új architektúrák megtervezésében. A MOF-okat gyakorlatilag koordinációs komplexek építik fel, mint ahogy Robson is elmondta, hogy ezek a struktúrák pusztán az évszázados koordinációs kémia területének alkalmazásai.

A koordinációs kémia alapjait a 19. század végén fektette le Alfred Werner, aki munkásságáért 1913-ban kémiai Nobel-díjat kapott. Werner egyik fontos megfigyelése volt, hogy pl. kobalt(III)-ionhoz hat ligandum kapcsolódhat oktaéderes térállásban (2. ábra). Ezekben a komplexekben a központi ion (pl. kobalt(III), vas(II), magnézium(II), platina(I), réz(I), réz(II) stb.) vagy atom köré elektron-donor molekulák (ligandumok: pl. halogenid-ionok, ammónia, szén-monoxid vagy polifunkciós szerves ionok) koordinálódnak datív vagy más néven: koordinatív kötéssel. Ilyen komplexek pl. a hem a klorofilban vagy a hemoglobinban, vagy a rákellenes *cisz*-platin.



Ha a komplexeket több donor atomot tartalmazó, ún. polifunkciós ligandumokból építjük fel, akkor lehetőségük adódik végtelen szerkezetek kialakítására. Így alakulnak ki a koordinációs polimerek, a koordinációs hálózatok, amelyek, ha üregeket tartalmaznak, akkor lesznek MOF-ok.

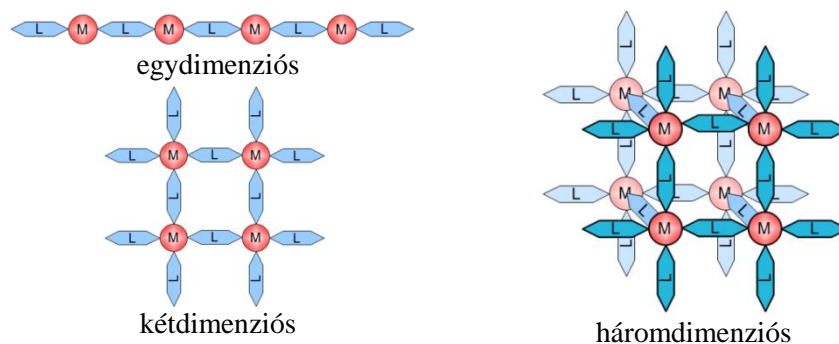
A koordinációs polimerek lehetnek bármilyen fém-ligandum „láncok”, amelyek ismétlődnek a tér valamely irányában (3. ábra) (Batten 2013).



3. ábra: Egy koordinációs polimer (Kübel – Strähle, 1982) és egy koordinációs hálózat Robson műhelyéből (Abrahams, 1994)
(bal: egydimenziós koordinációs polimer; jobb: háromdimenziós koordinációs molekulahálózat)

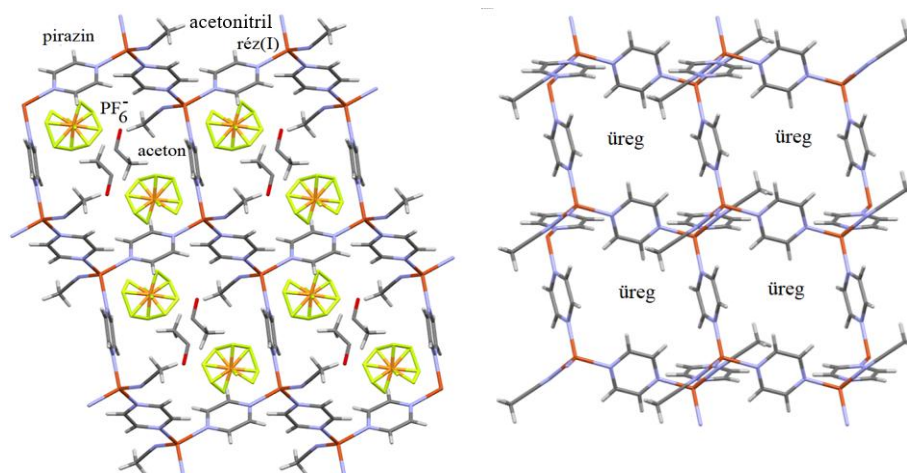
A koordinációs hálózatok olyan koordinációs polimerek, amelyben ezek a láncok össze is vannak kötve (keresztkötések, csomópontok, hurkok), így hálót, tehát összefüggő térbeli szerkezetet alkotnak (Batten, 2013).

A koordinációs polimerek és a molekulahálózatok esetében fontos, hogy hány dimenziósak. A 4. ábrán láthatjuk az egy-, két- és háromdimenziós koordinációs polimer sematikus felépítését. Az ábrán az M a fémcentrumokat (vagy a fémionokat), az L pedig a hídligandumokat jelenti.



4. ábra. Az egy-, kettő-, valamint a háromdimenziós koordinációs polimerek sematikus ábrázolása

A fém–szerves vázszerkezetek (MOF-ok), tehát olyan koordinációs hálózatok, amelyek üregeket tartalmazhatnak (Batten, 2013).



5. ábra: A kétdimenziós $\{[\text{Cu}(\text{pirazin})_{3/2}(\text{acetonitril})](\text{PF}_6) \times 0,5 \text{ aceton}\}_\infty$, és a „kiszárított” váz

Az 5. ábrán látható $\{[\text{Cu}(\text{pirazin})_{3/2}(\text{acetonitril})](\text{PF}_6) \times 0,5 \text{ aceton}\}_\infty$ -t Kitagawa és munkatársai állították elő (Kitagawa, 1992). A vegyület képletében láthatók szabad acetone molekulák és PF_6^- ionok. A MOF-szerkezet üregei úgy alakíthatók ki, ha ezeket az oldószereket „kiszárítjuk” a vázból, és az anionokat kisebb térkitöltésűre cseréljük. Akkor sikeres a MOF előállítása, ha a manipulációk után egyben marad a vázszerkezet.

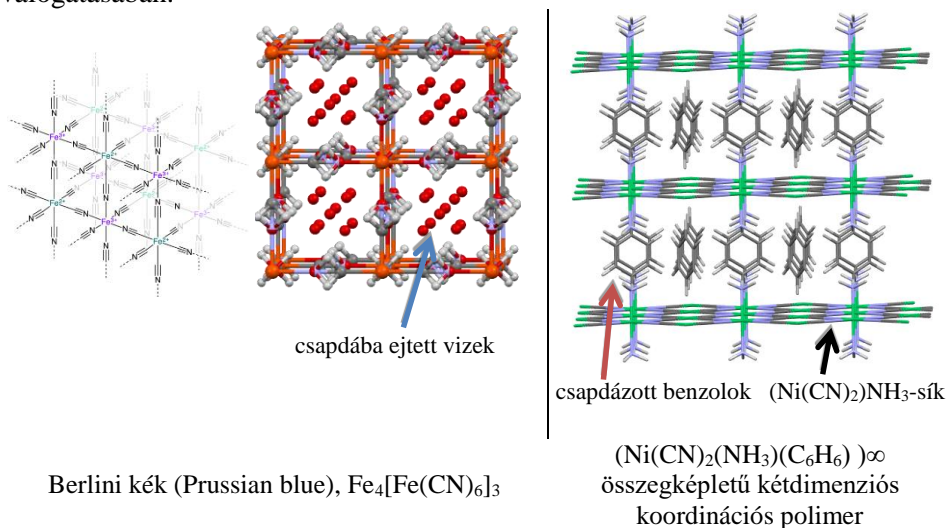
A Metal–Organic Framework magyar fordítása lehet a fém–szerves–váz-szerkezetek vagy -térhálók. A fémorganikus vázszerkezetek elnevezés is gyakori

a magyar nyelvű szakirodalomban, feltehetően azért, mert MOF-okat a fémorganikus kémia határterületéhez soroljuk. Félreértésre adhat okot, hogy a fémorganikus vegyületekben fém-szén kötés található (IUPAC, 1995), azonban a MOF-okban ez a kötéstípus igen ritka, ezért nem klasszikus „fémorganikus” vegyületek. A fém-szén kötés azért sem számottevő ebben a vegyületcsaládban, mert a klasszikus fém-organikus vegyületek rosszul kristályosodnak. Az elmúlt évtizedekben csak néhány képviselőjük (MC-MOFs=Metal-Carbon-Metal-Organic Frameworks) állították elő.

A fém-szerves vázszerkezetek (MOF) előfutárai a berlini kék vegyület ($\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$) és a Hofmann-klatrátok (Hofmann clathrates), amelyeket koordinációs hálózatnak tekinthetünk, azaz koordinációs komplexek ismétlődéséből felépülő vegyületeknek.

A berlini kék, azaz a $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ komplex neturondiffrakciós módszerrel meghatározott szerkezetében látszik (Herren, 1980), hogy a vázszerkezet üregeiben vízmolekulák vannak. Fontos, hogy ezek még nem MOF-ok, ugyanis, ha a csapdába ejtett vizeket el szeretnék távolítani, a háromdimenziós szerkezet összeomlik.

Karl A. Hofmann benzolt diffundáltatott $\text{Ni}(\text{CN})_2$ -t és ammóniát tartalmazó oldatba, és ekkor egy halványibolya színű kristályos anyag képződött, amelyről később kimutatták, hogy kétdimenziós nikkel-cianid koordinációs polimer, és a rétegek között benzol molekulák estek csapdába (Büttner, 1994). Ezeknek a klatrátoknak fontos szerepük lehet a különböző xilolok (pl. festékek oldószerei) szétválogatásában.



6. ábra: A berlini kék és egy Hofmann-klatrát

Ezeknek a koordinációs vegyületeknek kulcsfontosságú a szerkezeti meghatározása, mivel így kerülhet sor a kémiai tulajdonságaik magyarázatára. Ilyen

módszerek lehetnek az UV-Vis spektroszkópia, IR-spektroszkópia, a multinukleáris nukleáris mágneses magrezonancia (NMR) spektroszkópia vagy a tömegspektrometria.

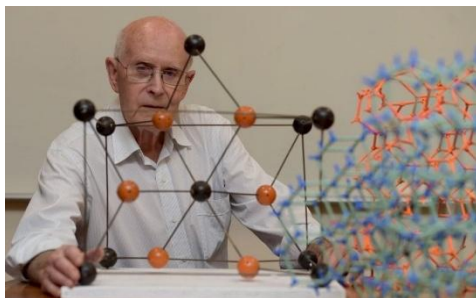
Az anyagok pontos háromdimenziós szerkezetének meghatározása pedig egykristály röntgendiffrakciós mérésekkel lehetséges (SCXRD). A röntgenkristallográfia olyan korszerű, nagyműszeres szerkezet-meghatározó módszer, amelyben a kristályon áthaladó röntgensugarak diffrakciós mintázatából atomi pontosságú térszerkezetet lehet feltérképezni. A módszer segítségével meghatározhatjuk a kötéstávolságokat és a kötéstávolságokat is.

A kristallográfiai vizsgálatokért kapta 1964-ben Dorothy Hodgkin a kémiai Nobel-díjat. Az SCXRD nélkülözhetetlen módszer a MOF szerkezetének felderítésében ugyanúgy, mint az NMR-spektroszkópia, aminek módszertani fejlesztéseiért 1991-ben Richard R. Ernst érdemelt szintén kémiai Nobel-díjat (A módszer elvének felismeréséért 1952-ben fizikai Nobel-díjat adtak.).

Nagyon fontos módszer még a termogravimetria (TGA) is, amely méri az anyag tömegvesztését a hőmérséklet emelkedésével, információt szolgáltatva a termikus stabilitásról, az oldószermaradványokról.

Mivel a MOF-ok porózus anyagok, nagy belső felülettel rendelkeznek, ezért nitrogénadszorpciós (BET felületmérés) mérésekkel tudjuk meghatározni specifikus felületüket, pórustérfogatukat és a pórusméret-eloszlást. Ez az egyik legfontosabb paraméter a gáztárolási és szeparációs alkalmazások szempontjából.

A Nobel-díjas kutatók fém–szerves vázszerkezetei

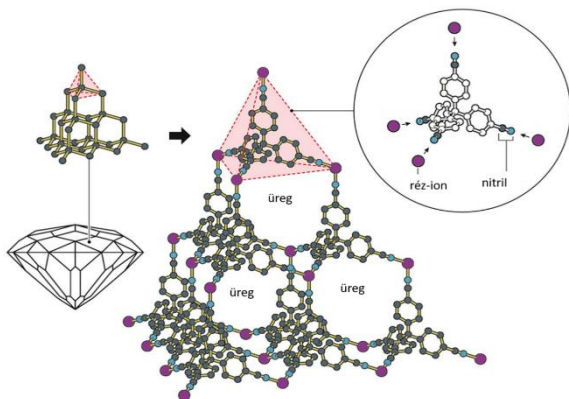


6. kép: Robson a „modellekkel”
forrás: Paul Burstson/Melbourne-i Egyetem

lyett, molekulákat a rudak helyett. Akkor még csak ő sejtette, hogy ezek a modellek – nátrium-klorid, cézium-klorid – egy teljesen új kémiai területet hoznak létre.

Richard Robson az 1980-as évek végén kezdett bele abba a kutatási programba, amelynek célja egy előre megjósolható szerkezetű, kiterjedt koordinációs hálózat felépítése volt jól megtervezett építőelemekből (mint a LEGO), irányított szintézissel.

Robson kezdő oktató korában feladatul kapta, hogy készítsen nagy, kristályszerkezeti modelleket az elsőéves kémiai előadásokhoz. A modellekhez különböző színű fagolyókat szerelt össze, amelyek atomokat vagy ionokat jelképeztek (mint a nátrium-ion és kloridion a konyhasókristály esetében), és azokat a megfelelő irányú rudakkal kötötte össze. Ekkor gondolt arra, hogy mi lenne, ha ionokat, vagy nagyobb klasztereket használna a golyók helyett,



7. ábra: Robson kristályos háromdimenziós váza
(forrás: ©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences)

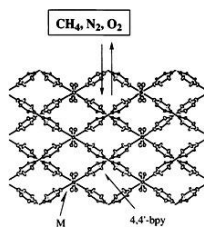
A munka kezdetekor a legegyszerűbb kristályszerkezetet választotta: a gyémántot. A szerkezet megvalósításához egy tetraédres geometriájú fémion és a merev, tetranitril típusú szerves ligandumok kombinációja esélyt adhat egy gyémántszerű, üregeket tartalmazó háromdimenziós szerkezet kialakítására. Ennek megvalósításához a réz(I)-iont választotta, mivel az a nitrilekkel gyakran tetraédres koordinációt alakít ki (7. ábra). A 4',4'',4''',4''''-tetracianotetrafenil-metán (merev tetranitril ligandum) segítségével Robsonnak sikerült is kristályos, gyémántszerű, kiterjedt vázhálózatot létrehoznia. A vegyület nagy üregeket és „mozgékony” oldószer-molekulákat, illetve anionokat tartalmazott. Mindenképpen egy teljesen új típusú anyagot sikerült előállítani (Hoskins – Robson, 1989).

Ezzel bebizonyította, hogy a koordinációs hálózatok szerkezete előre tervezhető. Számos fontos tulajdonságukat jósolta meg, például alkalmazhatók lesznek molekuláris szitaként, az ionok lecserezhetők a szerkezetben, az oldószerek kiszáríthatók, így a vázak utólag is módosíthatók. Előre látta, hogy ezekbe a hálózatokba katalizátor-centrumok is beépíthetők. Az új MOF-okat vagy a koordinációs hálózatokat bemutató közleményét azzal zárta, hogy majd ezek az anyagok mire lesznek jók, ha néhány paramétert, pl. a stabilitásukat sikerül finomhangolni.

Munkája hatalmas lendületet adott a koordinációs hálózatok és a későbbi MOF-kémia fejlődésének az 1990-es években. A nagyszámú új anyaggal Robson alapvetően hozzájárult a porózus koordinációs vegyületek és a MOF-ok modern kutatásának megalapozásához.

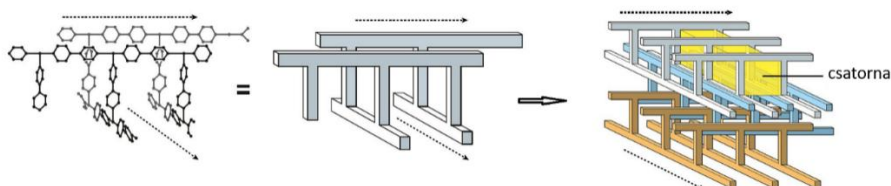
Kitagawa Susumu is jelentős szerepet játszott a fém–szerves vázszerkezetek kifejlesztésében.

Az általa képviselt „koordinációs térkémia” (coordination space chemistry) abból az úttörő felismerésből indult ki, hogy a kristályos hálózatok nemcsak merevek lehetnek, hanem olyan „élő” porózus struktúrák is, amelyek például gázt tudnak felvenni és kiengedni anélkül, hogy a rendszer szerkezete összeomolna.



8. a ábra

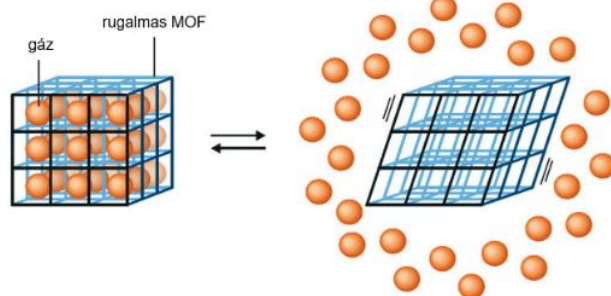
Kitagawa és munkatársai 1997-ben megmutatták, hogy egy kobalt(II)–4,4'-bipiridin–nitrát alapú „nyelv–horony” (tongue-and-groove) szerkezet képes gázmolekulákat adszorbeálni szobahőmérsékleten, például: metánt, nitrogént vagy akár oxigént. (A 8. a ábrán az eredeti cikk grafikus összefoglalója látható.) A váz szerkezetét úgy tervezték, hogy az egyes részei kiemelkedtek (nyelvek), a szomszédos rétegekben pedig bemélyedések (hornyok) alakultak ki, ezek pontosan egymásba illeszkedtek, mégis hagytak üregeket (csatornákat) a vendégmolekuláknak. A pórusokat eredetileg víz töltötte ki, de a kiszáritás közben megmaradt a váz, és képes volt gázt felvenni és leadni. A lélegzés közben is megőrizte a vegyület a kristályságát (Kondo, Mitsuru et al., 1997) (8. ábra).



8. b ábra: A kobalt(II)–4,4'-bipiridin alapú „nyelv–horony” típusú váz
(forrás: ©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences)

Ennek a vegyületnek a megtervezése rendkívül fontos volt, mert megmutatta, hogy nem csupán statikus pórusokat lehet létrehozni, hanem olyan vázszerkezeteket is, amelyek dinamikusan reagálnak a vendégmolekulák be- és kilépésére.

Kitagawa 1998-ban felvetette, hogy a MOF-ok nem kell, hogy rideg struktúrák legyenek: elképzelése szerint lehetnek rugalmas keretek is, amelyek a pórus méretét és alakját képesek változtatni például gáztöltés vagy -ürítés közben (Horike, 2009) (9. ábra). A 2009-ben a *Nature Chemistry*-ben megjelentett közleményének a címe is nagyon találó: *Soft porous crystals*.



9. ábra: A rugalmas MOF-ok a gáztárolásban
(forrás: ©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences)

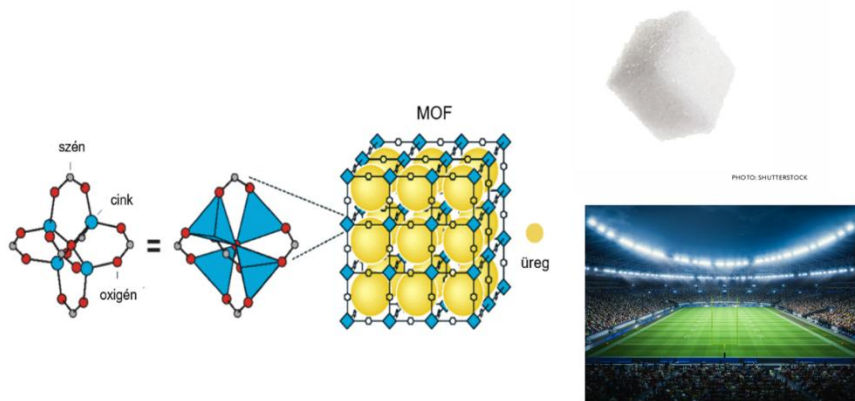
Ez a rugalmasság rendkívüli előnyt jelent az alkalmazások szempontjából: olyan anyagokat kapunk, amelyek reagálnak a környezetre, és optimalizálhatók a különféle molekulák befogására és irányított elengedésükre.

Omar M. Yaghi és munkatársai 1998-ban cink(II)-ionok és 1,4-benzil-dikarboxilát (tereftálsav) reakciójában porózus vázszerkezetet alakítottak ki. Az így létrejövő anyag azonban nem volt elég tartós, kiszárítása közben elvesztette kristályosságát, így a funkcióját is (Li, 1998).

Az igazi áttörést a MOF-5 előállításával érték el 1999-ben, amelyben a kutatók a bázisos cink-oxidot (Zn_4O) kötötték össze az 1,4-benzildikarboxiláttal, így nagy stabilitást értek el (10. ábra). A tartós sarokkővet úgy alakították ki, hogy a cink-oxid és a tereftálsav oldatához hidrogén-peroxidot adtak.

A kiszáritott MOF-5 nagy mennyiségű oldószert és különböző gázokat képes befogadni, meglepően stabilis, ugyanis még $300\text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékleten is megőrzi kristályos szerkezetét. A MOF-5 felülete 2200 m^2 grammonként, azaz egy kockacukornyi ebből az anyagból egy focipálya nagyságú belső felülettel rendelkezik (Li, 1999).

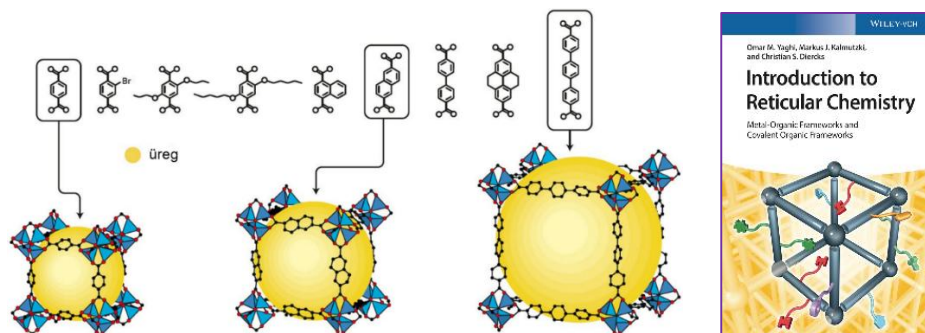
Nagyon fontos megemlíteni, hogy Yaghi használta először a MOF kifejezést is.



10. ábra: A MOF-5

(forrás: ©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences)

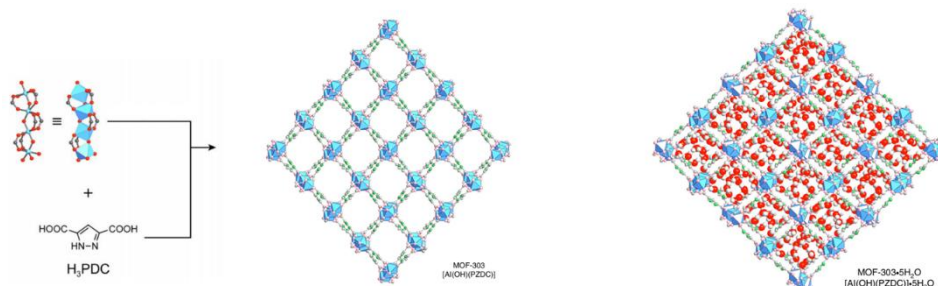
Ezután a bázisos cink-oxidot különböző szerkezetű dikarboxilát molekulákkal kötötték össze, így finomhangolták a MOF-ok felületét és az üregek méretét (11. ábra), létrehozva ezzel a retikuláris kémiát. Egyik képviselőjük hatalmas mennyiségű metángázt tudott tárolni, amelyet Yaghi javaslata szerint megújuló gázzal működő járművekben lehetne felhasználni – ezt tesztelték is, és a járművel „körbeautózták” a világot.



11. ábra. A MOF-5 változtatásával előállított finomhangolt vázszerkezetek (a Yaghi-féle MOF-ok)

(forrás: ©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences)

A 12. ábra a MOF-303-t szemlélteti, amelyet Yaghi és munkatársai állítottak elő 2018-ban. Olyan készülék prototípusát alkották meg, amely laboratóriumi körülmények között fél kilónyi MOF-303 segítségével akár 105 g vizet is termelhetett, így az alacsony páratartalom mellett (sivatagi körülményeket szimulálva) a vízgyűjtés egy lépéssel közelebb került a gyakorlati megvalósításhoz. Az így nyert víz egyébként nagyon tiszta (Fathieh, 2018).



12. ábra: A MOF-303 előállítása és a vízzel telt szerkezete



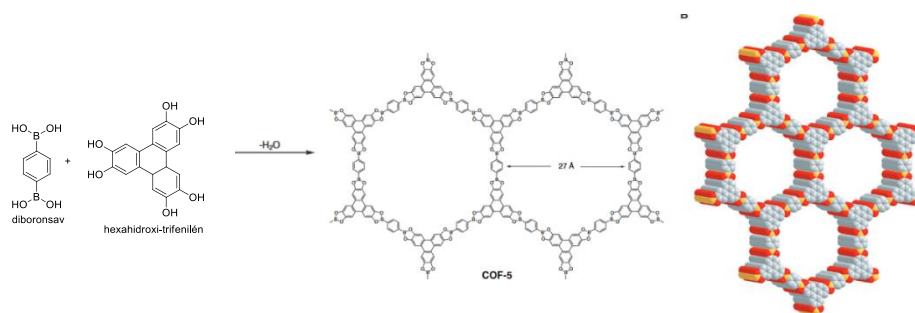
13. ábra: A vízgyűjtő készülék a Halál völgyében

Yaghi 2020-ban megalapította az Atoco nevű céget, amely MOF-okat használ szén-dioxid befogására, hogy a légkörben csökkentse a gáz mennyiségét, vagy a levegőből származó vizet befogva bővítse az ivóvízhez való hozzáférést. 2022-ben Yaghi és munkatársai több MOF-ot teszteltek Death Valley-ben, Kaliforniában, és megállapították, hogy 1 kg MOF napi 114–210 gramm vizet tud kinyerni a száraz levegőből, ezzel bizonyítva,

hogy ez a MOF nagy mennyiségű vizet képes reverzibilisen megkötni (Song, 2023). További részleteket tudhatunk meg a témával kapcsolatban a legnépszerűbb videomegosztó portálon látható Yaghi „*Water Harvesting from Air Anytime Anywhere*” című előadásából (Yaghi, 2020, 2022). A tanulmány szerzője szerint a MOF-303-ért járt a Nobel-díj. Ma már ott tartanak a fejlesztések, hogy akár 1000 liter vizet is képesek begyűjteni áram nélkül a sivatag levegőjéből.

Yaghi-nak úttörő szerepe volt a kovalens-szerves vázszerkezetek (COFs-ok, Covalent-Organic-Framework) felfedezésében is, ugyanis 2005-ben munkatársaival elsőként közölt COF-ot. Ezek a vegyületek, például a COF-5, kizárólag könnyű elemekből állnak (pl. C, B, N, O), és köztük kovalens kötések alakulnak ki. A COF-ok is kristályos és nagy pórusméretű hálózatokat alakítanak ki (14. ábra) (Côté, 2005).

Yaghi munkásságának egyik fontos újítása volt, hogy megmutatta: a dinamikus kovalens kémia elvei mentén ezek az anyagok előre tervezhető szerkezetűek, hosszú távon stabilak és flexibilisek. A COF-ok pontosan hangolható pórusszerkezetük és kémiai funkcionalitásuk révén ígéretesek a gázmegkötés, a katalízis, az energiátárolás és a szenzorika területén. Természetesen több COF előállításáról és alkalmazásáról is beszámoltak 2005-ös bemutatásuk óta.

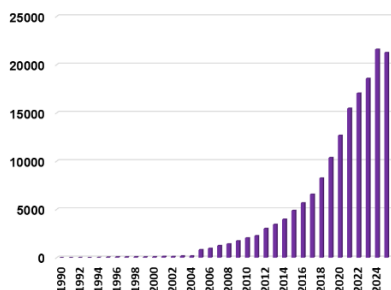


14. ábra: A COF-5 előállítása és a kovalens vázszerkezet

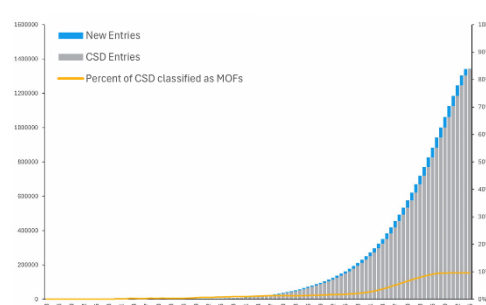
A MOF-ok előállítása, felhasználási területei

A MOF-okkal kapcsolatban megjelent publikációk száma folyamatosan növekszik – az 1990 óta megjelent közlemények számát mutatja be a 15. ábra.

A MOF-ok családja mára már több mint 140.000 tagot számlál. A Cambridge Structural Database, azaz a röntgendiffrakciós módszerekkel meghatározott 1,4 millió vegyületének közel 10%-a MOF.

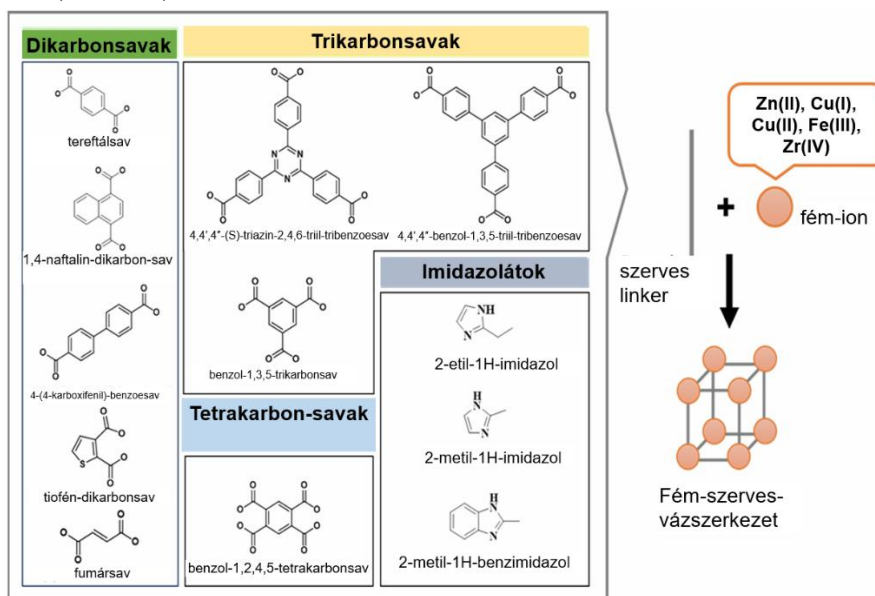


15. ábra: A MOF-okat tartalmazó cikkek száma 1999-től (Scifinder®)



16. ábra: A Cambridge-i Szerkezeti Adatbázisban található MOF szerkezetek

A CSD-ben található szerkezetek száma (szürke), új szerkezetek (kék), és a CSD-ben MOF-ként azonosított szerkezetek százalékos aránya (sárga) éves bontásban (16. ábra).



17. a ábra: A MOF-hoz felhasznált „alkatrészek”
(Singh 2024, Yusuf 2022)

A 17. a ábrán láthatjuk, hogy a fém–szerves vázszerkezetek (MOF-ok) előállítása tudatosan választott szerves építőegységek és átmenetifém-ionok kombinációján alapul, azaz a MOF-ok moduláris rendszerek. Szerves linkerként elsősorban többfunkciós karbonsavakat alkalmaztak, ideértve a di-, tri- és tetrakarbon-savakat. Ezek mellett jelentős szerepet kapnak a szerves foszforvegyületek, a szulfonsavak sói, nitrogéntartalmú heterociklusos ligandumok, különösen az imidazol-származékok. Ezek a merev, több koordinációs hellyel rendelkező szerves

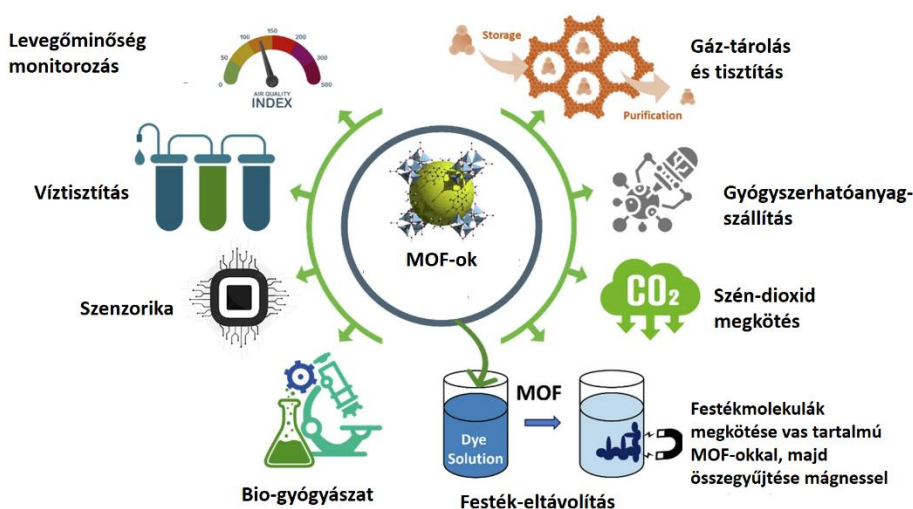
egységek teszik lehetővé a jól definiált, periodikus és pórusos vázszerkezet kialakulását. Több olyan ligandum is megfelel, ami polifunkciós, és többféle (O, N, S stb.) donoratomja révén kapcsolhatja össze a sarokpontokat. Ezeknek a linkereknek a tulajdonságai is nagymértékben befolyásolják a képződött vázszerkezeteket.

A szerves linkerek tipikusan cink(II), réz(I), réz(II), vas(III) és cirkónium(IV), alumínium(III) fémionokkal, vagy klasztereivel kapcsolják össze. Ezek stabil fémcsomópontokat (sarokköveket) képeznek, és alapvetően meghatározzák a MOF-ok szerkezeti topológiáját, kémiai és termikus stabilitását, valamint funkcionális tulajdonságait. Az ilyen fém–szerves ligandum kombinációk moduláris jellegűek, így a vázszerkezetek célzott tervezését teszik lehetővé.



17. b ábra: A MOF-ok előállítási módszerei
(Singh 2024, Yusuf 2022)

A MOF-okat változatos szintézismódszerekkel állítják elő. A leggyakoribbak a hidro-, vagy solvotermás eljárások, amelyek kontrollált kristálynövekedést biztosítanak. Emellett egyre nagyobb teret kapnak az alternatív (zöld) energia-közlő módszerek is, mint a szonokémiai, a mikrohullámú sugárzással kiváltott szintézis, valamint a mechanokémiai (oldószermentes szintézisek golyósmalomban) megközelítések is.



18. ábra: A MOF felhasználásának lehetőségei (Singh 2024, Yusuf, 2022)

A fém–szerves vázszerkezetek rendkívül sokoldalú anyagok, amelyek kiemelkedő szerepet töltenek be a gáztárolás és gázleválasztás területén. Nagy fajlagos felületük és szabályozható pórusszerkezetük alkalmassá teszi őket olyan gázok hatékony megkötésére, mint a hidrogén, a metán vagy a szén-dioxid, valamint különböző gázkeverékek – például CO_2/N_2 rendszerek – szelektív szétválasztására. Ezek a tulajdonságok különösen fontosak az energiatárolás és a környezetvédelem szempontjából, jól megtervezett pórusméretük miatt még az etilén gáz reverzibilis raktározásával a banán érését is „finomhangolni” lehet.

A MOF-ok jelentős lehetőségekkel rendelkeznek a katalízis területén is, ahol heterogén katalizátorként alkalmazhatók, vagy aktív fémkomplexek hordozására és rögzítésére szolgálhatnak.

Az energiatárolás és energiaátalakítás területén a MOF-ok szintén ígéretesek, például napelemekben vagy elektrokémiai rendszerekben, ahol szerkezetük hozzájárulhat a töltéshordozók hatékonyabb kezeléséhez. Ezzel párhuzamosan fontos szerepet töltenek be a szenzorika és adszorpció területén is: érzékelőanyagként alkalmazhatók különféle vegyi anyagok, gázok vagy akár biomolekulák detektálására, valamint szennyezőanyagok – például nehézfémek vagy szerves oldószerek – megkötésére és eltávolítására.

A membrántechnológiában a MOF-alapú anyagok fejlett, szelektív membránokként használhatók folyadékok tisztítására, illetve ionok vagy molekulák hatékony és célzott szétválasztására. Szabályozható pórusméretük és kémiai funkcionalitásuk különösen előnyössé teszi őket elválasztás-technikai alkalmazásokban.

Végül, de nem utolsósorban, a MOF-ok a gyógyszeradagolás területén is nagy figyelmet kaptak. Potenciális hordozóanyagként alkalmasak gyógyszermolekulák vagy más bioaktív vegyületek befogadására és azok kontrollált, lassú leadására a szervezetben, ami új lehetőségeket nyit a célzott és hatékony terápiás megoldások fejlesztésében (Yusuf, 2022).

A COF-ok kiemelten alkalmazhatók ezekre a feladatokra.

Egy magyar HOF kristályosítása az űrben

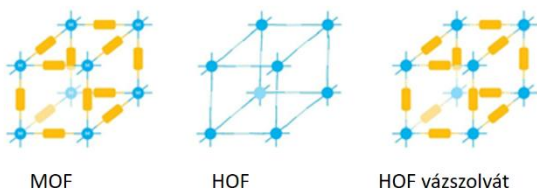
A HUN-REN Természettudományi Kutatóközpont kristálykémikusai Bombicz Petra vezetésével, a HUNOR űrprogram (Hungarian to Orbit) és a japán JAMSS vállalat együttműködésével egy új szerves vázszerkezet egykristályait növesztették a Nemzetközi Űrállomáson, a SpaceX CRS-32 küldetés keretében. A súlytalanság különösen rendezett kristályszerkezet kialakulását teszi lehetővé, amelyet a Földön nem lehet ilyen minőségben előállítani.



7. kép: Bombicz Petra

A kísérlet azért is jelentős, mert ez az első hidrogénhíd-kötésekre épülő vázszerkezet (HOF), amelyet valaha mikrogravitációban kristályosítottak. Ezelőtt még szerves anyagot sem kristályosítottak az űrben.

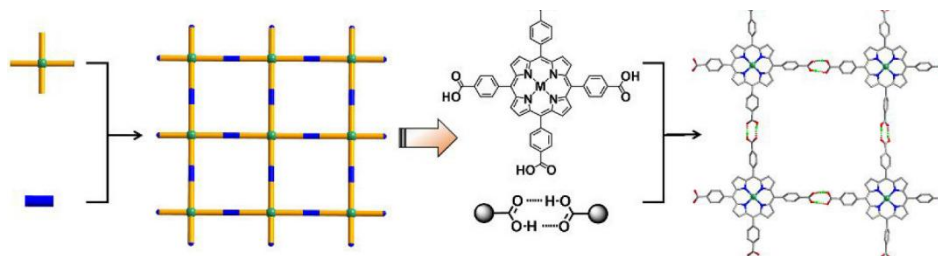
A csoport elsők között jellemzett HOF vegyületeket. A hidrogénkötéssel összekapcsolódó szerves vázak (HOF-ok) a porózus anyagok egy új osztályát képviselik. Ezek a szerves építőegységek önszerveződésével jönnek létre, és a molekulák közötti hidrogénkötések révén rendeződnek hálózattá (19-20.



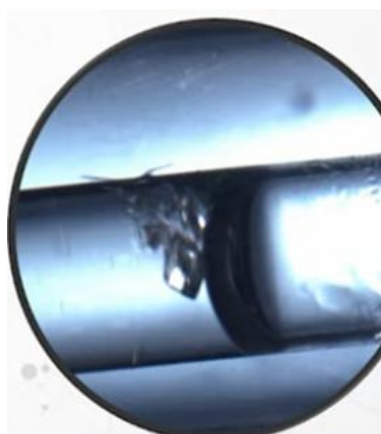
19. ábra: A MOF és HOF-ok felépítése

ábra).

A MOF-okkal ellentétben, amelyek erős koordinatív kötésekkel kapcsolódnak össze, a HOF-okban jelen lévő hidrogénkötések sokkal gyengébbek. A hidrogénkötések gyengesége miatt a HOF-ok stabilitása és tervezése jelentős kihívást jelent, de egyúttal nagy lehetőségeket teremt a szerkezeti változatosság és a rugalmas viselkedés kialakítására.



20. ábra: Egy HOF kialakítása és szerkezete



21. ábra: A mikrogravitációban növesztett HOF-kristály

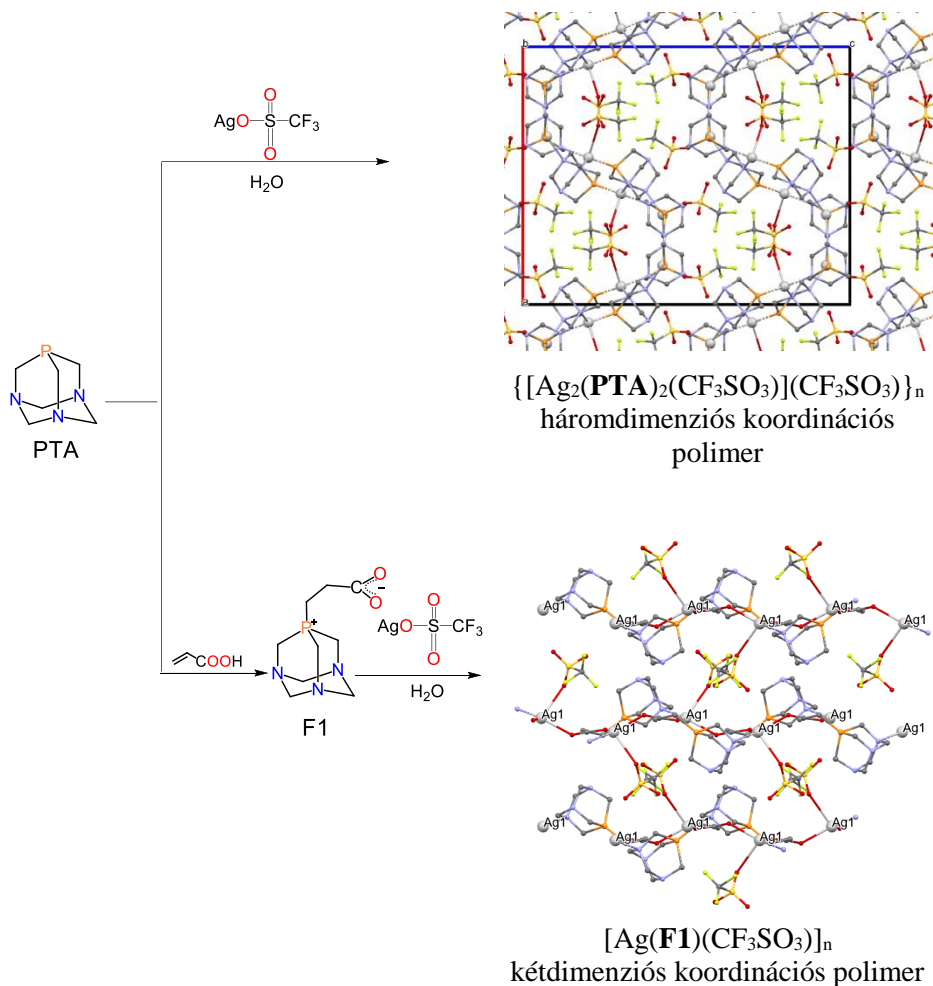
Az űrállomáson történő kristályosításhoz a budapesti kutatóknak szükségük volt egy új, gőzabszorpciós kristályosítási módszer kifejlesztésére is.

Az űrből sikeresen visszahozott kristály (21. ábra) diffrakciós adatait az angliai Diamond Light Source nagyintenzitású sugárforrásával gyűjtötték a kutatók. Bár a hidrogénkötések miatt gyengébbek és érzékenyebbek a kristályok, de a kutatók szerint az ilyen vegyületeket a MOF-okhoz hasonló területeken fogják alkalmazni, még hozzá nagyobb hatékonysággal. Aki a témában mélyebben el szeretne merülni, annak ajánlom a „*HUNOR Suli: Harmadik óra – A világűr és a kémia*” című előadást (Bombicz, 2025) a legnépszerűbb vide-

omegosztón.

Koordinációs hálózatok a Debreceni Egyetemen

A Debreceni Egyetem Fizikai Kémiai Tanszékén működő Homogén Katalízis Kutatócsoportban Papp Gábor egyetemi docens vezetésével több koordinációs molekulahálózatot állítottunk elő. Sarokpontnak a változatos koordinációs kémiával rendelkező ezüst(I)-iont választottuk, és „többkarú” vagyis polifunkciós ligandumként a vízőldható 1,3,5-triaza-7-foszfadamentánt (PTA) és származékait alkalmaztuk (22. ábra).



22. ábra: A PTA tartalmú koordinációs polimerek

Az általunk vizsgált vízben előállított ezüst(I)-tartalmú molekulahálózatok szerkezetét egykristály-röntgendiffrakciós módszerrel határoztuk meg (Udvardy, 2021). A vegyületekből nem sikerült üreggel rendelkező MOF-okat előállítani, azonban ezek antimikrobiális szerek lehetnek.

Kitekintés a jövőre

A MOF-ok kémiaja az egyik legaktívabb és legígéretesebb terület a modern kémiában, nemcsak az akadémiai, hanem az ipari kutatások területén is. A 2025-ös kémiai Nobel-díjat bemutató írásomat László Krisztina gondolatai messzemenően összefoglalják: „Az elmúlt közel 30 év a tudóstársadalomnak lehetőséget adott a

széleskörű vizsgálatokra és számos lehetséges alkalmazás kipróbálására. Úgy gondolom, hogy az eddig elérteken túl is még számos lehetőség maradt.”

Köszönetnyilvánítás: Köszönöm Seprényi Kingának a közlemény átnézését és hasznos tanácsait.

Irodalom

- Abrahams, Brendan F. et al. (1994) Infinite square-grid $[\text{Cd}(\text{CN})_2]_n$ sheets linked together by either pyrazine bridges or polymerisable 1,4-bis(4-pyridyl)butadiyne bridges arranged in an unusual criss-cross fashion. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications* 1994, 1049–1050. <https://doi.org/10.1039/C39940001049>
- Batten, S. Robert et al. (2013). "Terminology of metal-organic frameworks and coordination polymers (IUPAC Recommendations 2013)." *Pure and Applied Chemistry*, 85(8), 1715–1724. <https://doi.org/10.1351/PAC-REC-12-11-20>
- Gomollón-Bel, Fernando. (2019) "Ten Chemical Innovations That Will Change Our World: IUPAC identifies emerging technologies in Chemistry with potential to make our planet more sustainable" *Chemistry International*, 41(2), 12–17. <https://doi.org/10.1515/ci-2019-0203>
- Bombicz Petra (2025), <https://www.youtube.com/watch?v=q82ygPwINiU&t=13s> (letöltés: 2026. 01. 03.)
- Büttner, Herma G. et al. (1994). „Structure of the Hofmann Clathrates $\text{Ni}(\text{NH}_3)_2\text{Ni}(\text{CN})_4 \cdot 2\text{C}_6\text{D}_6$ and $\text{Zn}(\text{NH}_3)_2\text{Ni}(\text{CN})_4 \cdot 2\text{C}_6\text{H}_6$ ”. *Acta Crystallographica Section B-Structural Science* 50(4), 431–435. <https://doi.org/10.1107/S0108768193013539>
- Côté, Adrien P. et al. (2005) „Porous, Crystalline, Covalent Organic Frameworks” *Science*, 310, 1166–1170 <https://doi.org/10.1126/science.1120411>
- Fathieh, Farhad et al. (2018) „Practical water production from desert air.” *Science Advances* 4, eaat3198. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat3198>
- IUPAC (1995) PAC, 1995, 67, 1307 (Glossary of class names of organic compounds and reactivity intermediates based on structure (IUPAC Recommendations 1995)) on page 1353. <https://doi.org/10.1351/goldbook.O04328>
- Horike, Satoshi et al. (2009) „Soft porous crystals.” *Nature Chemistry* 1, 695–704. <https://doi.org/10.1038/nchem.444>
- Hoskins, Bernard F. – Robson, Richard (1989). „Infinite polymeric frameworks consisting of three dimensionally linked rod-like segments” *Journal of the American Chemical Society* 111(15), 5962–5964. <https://doi.org/10.1021/ja00197a079>
- Joó Ferenc – Kathó Ágnes – Udvardy Antal (2023). Kémiai Nobel-díj 2021. *Debreceni Szemle*, 30(1), 72–82. <https://doi.org/10.59424/debreceniszemle/2022/30/1/72-82>
- Kitagawa, Susumu et al. (1992). „Synthesis of the novel infinite-sheet and -chain copper(I) complex polymers $\{[\text{Cu}(\text{C}_4\text{H}_4\text{N}_2)_{3/2}(\text{CH}_3\text{CN})]-(\text{PF}_6)\cdot 0.5\text{C}_3\text{H}_6\text{O}\}_n$.infin. and $\{[\text{Cu}_2(\text{C}_8\text{H}_{12}\text{N}_2)_3](\text{ClO}_4)_2\}_n$.infin. and their x-ray crystal structures” *Inorganic Chemistry* 31(9), 1714–1717. <https://doi.org/10.1021/ic00035a036>
- Kondo, Mitsuru et al. (1997) „Three-Dimensional Framework with Channeling Cavities for Small Molecules: $\{[\text{M}_2(4, 4'\text{-bpy})_3(\text{NO}_3)_4] \cdot x\text{H}_2\text{O}\}_n$ (M=Co, Ni, Zn)” *Angewandte*

- Chemie International Edition* 36(16), 1725–1727.
<https://doi.org/10.1002/anie.199717251>
- Kübel, Frank – Strähle, Joachim (1982) "Polymere Dimethyl-und Diphenylglyoximato-komplexe des Cobalts und Eisens mit 4,4'-Bipyridin als Brückenligand. Die Kristallstruktur des Bis(dimethylglyoximato)4,4'-bipyridincobalt(II)* / Polymeric Dimethyl-and Diphenylglyoximato Complexes of Cobalt and Iron with 4,4'-Bipyridine as a Bridging Ligand. The Crystal Structure of Bis(dimethylglyoximato)4,4'-bipyridine Cobalt(II)" *Zeitschrift für Naturforschung B*, 37(3), 272–275.
<https://doi.org/10.1515/znb-1982-0303>
- Herren, Fritz. et al. (1980) „Neutron diffraction study of Prussian blue, Fe₄[Fe(CN)₆]₃·xH₂O. „Location of water molecules and long-range magnetic order.” *Inorganic Chemistry* 19(4), 956–959. <https://doi.org/10.1021/ic50206a032>
- László Krisztina (2026). „Kémiai Nobel-díj, 2025” *Magyar Kémikusok Lapja* 2, 34–37.
<https://doi.org/10.24364/MKL.2026.02>
- Li, Hailian et al. (1998) „Establishing Microporosity in Open Metal–Organic Frameworks: Gas Sorption Isotherms for Zn(BDC) (BDC = 1,4-Benzenedicarboxylate)” *Journal of the American Chemical Society* 120(33), 8571–8572.
<https://doi.org/10.1021/ja981669x>
- Li, Hailian et al. (1999) „Design and synthesis of an exceptionally stable and highly porous metal-organic framework.” *Nature* 402, 276–279.
<https://doi.org/10.1038/46248>
- Perczel András (2025) https://infostart.hu/tudomany/2025/10/08/molekulaketrecert-jart-a-kemiai-nobel-ez-forradalmasithatja-a-kornyezetvedelmet-es-a-kozlekedest-is?utm_source=chatgpt.com (letöltés 2026. 04. 08.)
- Sápi András – Kónya Zoltán (2026) Molekuláris építőkövek forradalma: kémiai Nobel-díj a fémorganikus vázszerkezetekért *Magyar Tudomány* 187/1, 20–26
<https://doi.org/10.1556/2065.187.2026.1.4>
- Singh, Simranjeet et al. (2024) „Metal organic frameworks for wastewater treatment, renewable energy and circular economy contributions.” *npj Clean Water* 7, 124.
<https://doi.org/10.1038/s41545-024-00408-4>
- Song, Woochul et al. (2023) „MOF water harvester produces water from Death Valley desert air in ambient sunlight.” *Nature Water* 1, 626–634.
<https://doi.org/10.1038/s44221-023-00103-7>
- Yaghi (2019), „Harvesting water from desert air” <https://www.youtube.com/watch?v=KOOVBKWRLxk> (letöltés: 2026. 01. 03.)
- Yaghi 2022, 2020 <https://www.youtube.com/watch?v=SO18satzFC4&t=21s> (letöltés: 2026. 04. 08.)
- Xu, Wentao – Yaghi, Omar M. (2020) Metal–Organic Frameworks for Water Harvesting from Air, Anywhere, Anytime *ACS Central Science* 6(8), 1348–1354
<https://10.1021/acscentsci.0c00678>
- Yusuf, Vadia Foziya et al. (2022). „Review on Metal–Organic Framework Classification, Synthetic Approaches, and Influencing Factors: Applications in Energy, Drug Delivery, and Wastewater Treatment” *ACS Omega* 7(49), 44507–44531.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05310>

Udvardy, Antal et al, (2021) Water-soluble Ag(I)-based coordination polymers obtained by anion-directed self-assembly of various AgX salts and a phosphobetaine derived from 1,3,5-triaza-7-phosphaadamantane *Inorganica Chimica Acta*, 520, 120299
<https://doi.org/10.1016/j.ica.2021.120299>

Udvardy Antal (2026) „A kémia építészeti remekei, kémiai Nobel-díj a fém–szerves váz-szerkezetekért (MOF)” *Természet Világa* 127(11), 482–485.

A tanulmányban bemutatott képek forrásai:

1. kép: <https://featured.japan-forward.com/japan2earth/2025/10/10372/> (letöltés: 2026. 04. 08.) ©Sankei by Junpei Teraguchi
2. kép: <https://english.news.cn/20251009/12b21051e5f8422e9a11acd4c7a7ba98/c.html> (letöltés: 2026. 04. 08.) University of Melbourne
3. kép: <https://www.facebook.com/nobelprize/posts/the-day-after-this-years-nobel-prize-in-chemistry-was-announced-richard-robson-s/1221210176707476/> (letöltés: 2026. 04. 08.) Mireille Stahle/University of Melbourne
4. kép: <https://iupac.org/omar-m-yaghi-receives-the-2025-iupac-soong-prize/> (letöltés: 2026. 04. 08.) fotó:Christopher Michel
5. kép: <https://featured.japan-forward.com/japan2earth/2025/10/10372/> Professzor Kitagawa gyűjteményéből
6. kép: <https://www.arc.gov.au/news-and-publications/media/arc-funded-researcher-wins-2025-nobel-prize-chemistry> , Paul Burston/University of Melbourne
7. kép: (Bombicz 2025) előadásból