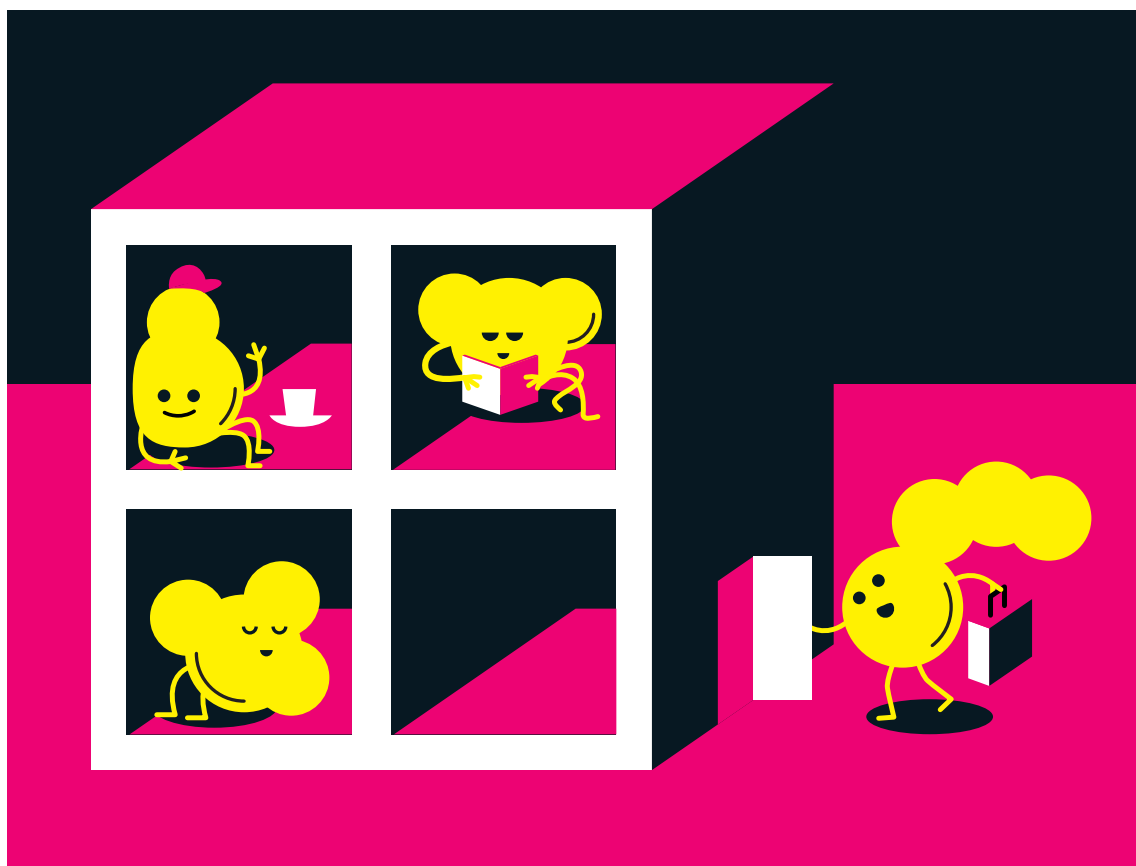


De har skapat nya rum för kemi

Susumu Kitagawa, Richard Robson och Omar M. Yaghi tilldelas 2025 års Nobelpris i kemi för att de har utvecklat en ny form av molekyllär arkitektur. Deras byggnadsverk – kallade metallorganiska ramverk – har stora hålrum, där molekyler kan flytta in och ut. Forskare har använt dem för att skörda vatten ur ökenluft, extrahera föroreningar från vatten, fånga in koldioxid och förvara vätgas.

En attraktiv och mycket spaciös etta, utformad för dig som är vattenmolekyl. Så skulle en mäklare kunna beskriva ett av alla de metallorganiska ramverk som de senaste årtiondena har vuxit fram på laboratorier runt om i världen. Andra av dessa molekyllära byggen är speciellt formgivna för att kunna fånga in koldioxid, separera PFAS från vatten, leverera läkemedel i kroppen eller hantera mycket giftiga gaser. Vissa kan också fånga in etylengas från frukt – så att den mognar långsammare – eller kapsla in enzymer som bryter ner rester av antibiotika i miljön.



Kort sagt: Metallorganiska ramverk är exceptionellt användbara. Susumu Kitagawa, Richard Robson och Omar Yaghi belönas med 2025 års Nobelpris i kemi eftersom de skapade de första metallorganiska ramverken, även kallade MOF:ar, och visade på deras potential. Tack vare deras arbeten har kemister kunnat utforma tiotusentals olika MOF:ar, som möjliggör nya former av kemiska konststycken.

Som så ofta inom vetenskapen börjar historien om 2025 års Nobelpris i kemi med att någon tänker en annorlunda tanke. Denna gång föddes tanken under förberedelserna av en klassisk kemilektion, där studenterna skulle bygga molekyler av pinnar och kulor.

Enkel molekylmodell i trä ger en idé

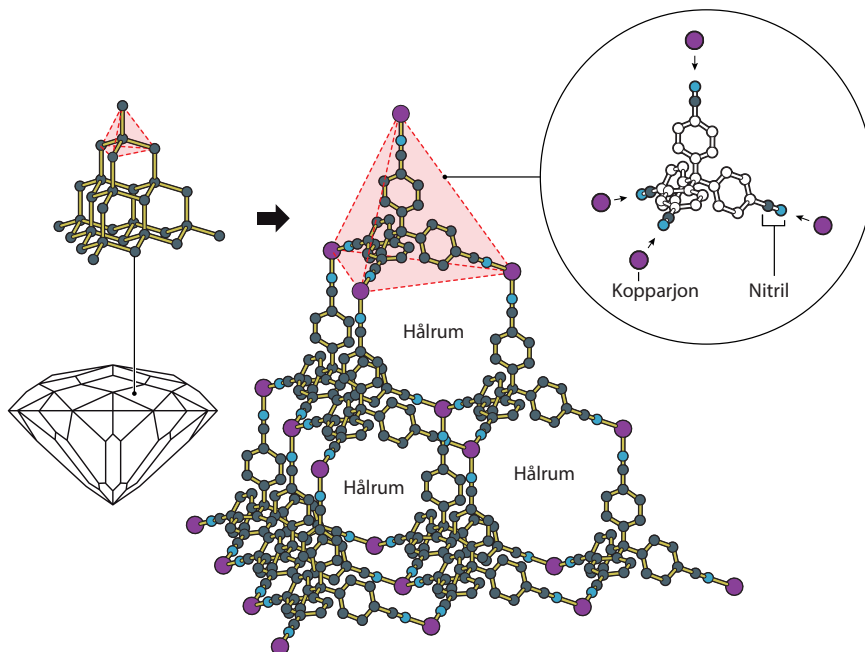
Året var 1974. Richard Robson, som undervisade vid universitetet i Melbourne, Australien, hade fått i uppdrag att omvandla träkulor till modeller av atomer, så att studenterna skulle ha något att bygga med. För att träkulorna skulle fungera behövde universitetets verkstad borra hål i dem, så att träpinnarna – de kemiska bindningarna – kunde fästa i atomerna. Hålen kunde dock inte sitta hur som helst. Varje atom – exempelvis kol, kväve eller klor – har sitt specifika sätt att forma kemiska bindningar på. Richard Robson behövde alltså noga märka ut var hålen skulle borras.

När träkulorna kom tillbaka från verkstaden, provade han att bygga ihop några molekyler. Det var då tanken slog honom: Det fanns otroligt mycket information inbakad i hålens placering. Molekylmodellerna fick automatiskt rätt form och struktur, eftersom hålen satt där de satt. Den insikten ledde honom vidare till nästa tanke: Vad skulle hända om han utnyttjade atomernas inneboende egenskaper för att länka samman olika slags molekyler i stället för enskilda atomer? Skulle han då kunna designa nya former av molekyllära byggen?

Robson bygger nydanande kemiskt alster

Varje år när Richard Robson tog fram trämodellerna för att undervisa nya studenter kom samma tanke till honom, men det dröjde över tio år innan han beslöt sig för att pröva sin idé. Han började då med en mycket enkel modell, inspirerad av materialet diamant. I diamanter är varje kolatom sammanbunden med fyra andra kolatomer, så att de tillsammans formar en minimal pyramid (figur 2). Richard Robsons mål var att bygga en liknande struktur, men han utgick från positivt laddade kopparjoner, Cu^+ , som likt kol gärna omger sig med fyra andra atomer.

Kopparjonerna blandade han med en molekyl som hade fyra armar: 4',4'',4''',4''''-tetracyanotetrafenylmetan. Du kan glömma det krångliga namnet, men viktigt är att molekylen längst ut i varje arm hade en kemisk grupp, *nitril*, som drogs till de positivt laddade kopparjonerna (figur 2).



Figur 2. Richard Robson inspirerades av strukturen hos diamant, där varje kolatom sitter ihop med fyra andra kolatomer i en pyramidliknande form. I stället för kol, använde Robson kopparjoner och en molekyl med fyra armar, som längst ut hade en nitril. Det är en kemisk grupp som dras till kopparjoner. När ämnena blandades formade de en regelbunden och mycket luftig kristall.

De flesta kemister skulle vid den här tiden ha antagit att Robsons blandning av kopparjoner och fyrarmede molekyler skulle leda till en smärre röra, där joner och molekyler skulle ligga lite huller om buller. Men jonerna och molekylerna gick Robsons väg. Som han hade förutspått, spelade deras inboende attraktion till varandra roll. De ordnade upp sig i ett stort molekyllärt bygge. Precis som kولاتomerna i en diamant formade de en strukturerad kristall. Men till skillnad från diamant – som är ett kompakt material – innehöll kristallen stora och många hålrum (figur 2).

År 1989 presenterade Richard Robson sitt nydanande kemiska alster i den vetenskapliga tidskriften *Journal of the American Chemical Society*. I artikeln spekulerar han om framtiden. Han föreslår att detta kan bli ett nytt sätt att bygga material på. Dessa material, menar han, kan få aldrig tidigare skådade egenskaper, som möjligtvis också kan vara användbara.

I detta skulle han bli sannspådd.

Robson orsakar en kemisk nybyggaranda

Redan året efter sitt pionjärbete presenterade Richard Robson flera nya former av molekyllära byggen, med hålrum fyllda med kemiska ämnen. Ett av dessa byggen använde han för att flytta om joner. Han sänkte ner bygget, som var fyllt av joner, i en vätska som innehöll en annan sorts joner. Det ledde till att jonerna bytte plats, vilket visade att olika ämnen kunde flytta in och ut ur bygget.

Genom sitt experiment demonstrerade Richard Robson att det på ett rationellt vis går att formge rymliga kristaller och i dem skapa en miljö som är optimerad för vissa kemiska ämnen. Han föreslog att denna nya form av molekyllära konstruktioner – om man designade dem korrekt – till exempel skulle kunna användas för att driva kemiska reaktioner.

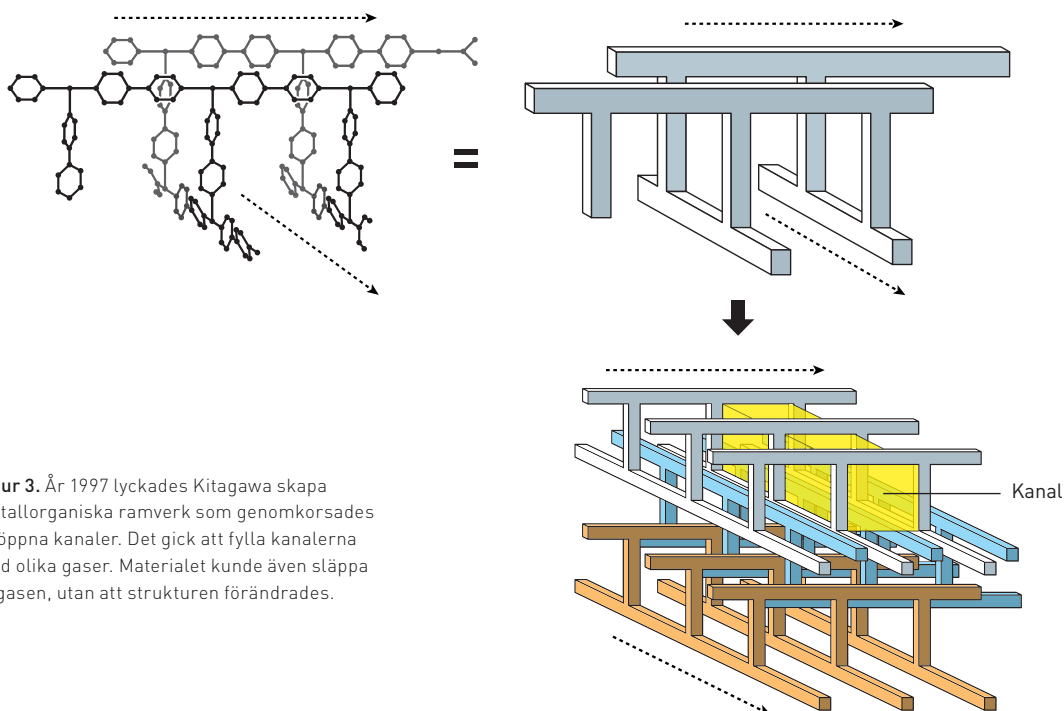
Robsons molekyllära byggen var dock skrangliga och föll lätt ihop. Många kemister såg därför inte poängen med dem, men vissa förstod att han var något på spåren. Hos dem väckte hans framtidsvisioner en nybyggaranda. De som skulle komma att lägga en stabil grund för visionerna var Susumu Kitagawa och Omar Yaghi. Mellan 1992 och 2003 gjorde de – var för sig – en rad banbrytande upptäckter. Vi börjar med Susumu Kitagawa, som i början av 1990-talet arbetade vid Kindai University i Japan.

Kitagawas ledstjärna: Även det värdelösa kan bli värdefullt

Under sin karriär som forskare har Susumu Kitagawa följt en viktig princip: att försöka se ”det värdefulla i det värdelösa”. Som ung student läste han en bok av Nobelpristagaren Hideki Yukawa. I den nämner pristagaren en forntida kinesisk filosof, Zhuang Zi, som menar att vi behöver ifrågasätta vad vi ser som nyttigt. Även om något inte har en omedelbar nytta kan det visa sig vara värdefullt.

När Susumu Kitagawa började utforska möjligheterna med att skapa ihåliga molekyllära strukturer, ansåg han alltså inte att de måste ha ett direkt syfte. Det första molekyllära bygget som han presenterade 1992 – ett tvådimensionellt material som formade hålrum där acetonmolekyler kunde gömma sig – var heller inte särskilt användbart. Men hans konstruktion var ett resultat av ett nytt sätt att tänka inom den molekyllära byggnadskonsten. Precis som Robson, använde han hörnstenar av kopparjoner som länkades samman med större molekyler.

Susumu Kitagawa ville fortsätta experimentera med denna nya form av byggteknik, men när han sökte anslag för detta såg forskningsfinansiärerna ingen större mening med hans ambitioner. Materialen han skapade var instabila och saknade funktion. Många av Kitagawas ansökningar fick därför avslag.



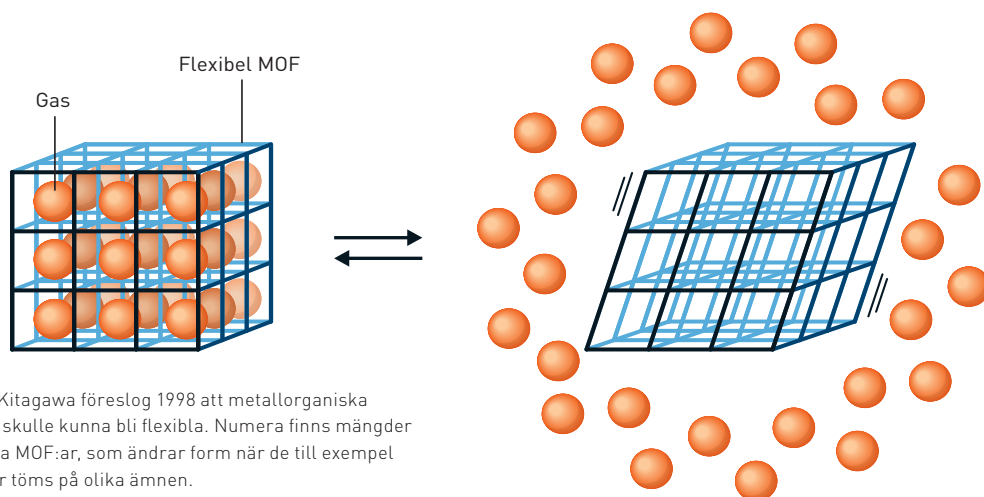
Figur 3. År 1997 lyckades Kitagawa skapa metallorganiska ramverk som genomkorsades av öppna kanaler. Det gick att fylla kanalerna med olika gaser. Materialet kunde även släppa ut gasen, utan att strukturen förändrades.

Han gav sig dock inte, och år 1997 kom det första stora genombrottet. Med hjälp av joner av kobolt, nickel eller zink och en molekyl kallad *4,4'-bipyridin*, skapade hans forskargrupp tredimensionella metallorganiska ramverk som genomkorsades av öppna kanaler (figur 3). När de torkade ett av byggena – så att det tömdes på vatten – var det stabilt. Dessutom gick det att fylla tomrummen med gaser. Materialet kunde suga upp och släppa ut metan, kväve och syre, utan att det förändrades.

Kitagawa ser det unika i sina skapelser

Kitagawas bygge var alltså både stabilt och hade en funktion, men forskningsfinansiärerna såg fortfarande inte tjusningen i dem. En orsak var att kemister redan hade tillgång till stabila och ihåliga material, *zeoliter*, som de kunde bygga från kiseldioxid. Dessa material kan absorbera gaser. Så varför skulle man utveckla ett liknande material, som fungerade sämre?

Susumu Kitagawa förstod att om han skulle få några större forskningsanslag, behövde han definiera varför de metallorganiska ramverken är unika. År 1998 målade han därför upp sin vision i det japanska kemisällskapets tidskrift. Han såg flera fördelar med MOF:ar. De kan till exempel skapas från enormt många olika molekyler, så det finns stora möjligheter att bygga in olika funktioner i dem.



Figur 4. Kitagawa föreslog 1998 att metallorganiska ramverk skulle kunna bli flexibla. Numera finns mängder av flexibla MOF:ar, som ändrar form när de till exempel fylls eller töms på olika ämnen.

Dessutom – och detta är viktigt – insåg han att MOF:ar kan forma mjuka material. Till skillnad från zeoliter, som vanligtvis är hårda material, innehåller MOF:ar flexibla molekyllära byggstenar (figur 4) som kan skapa rörlighet i materialet.

Efter dessa spekulationer var det upp till bevis. Susumu Kitagawa – och flera andra forskare – satsade på att utveckla flexibla MOF:ar. Medan de sysslar med det, ska vi förflytta oss till USA, där Omar Yaghi också håller på att ta den molekyllära arkitekturen till nya nivåer.

Ett hemligt besök i biblioteket öppnar Yaghis ögon för kemin

Att bli kemist var ingen självklarhet för Omar Yaghi. Tillsammans med en stor syskonskara växte han upp utan el och vatten i en enrumsbostad i Amman, Jordanien. I skolan hittade han en fristad från den annars tuffa vardagen. En dag när han var tio år smög han sig in i skolans bibliotek, som annars brukade vara låst. Från en av hyllorna plockade han slumpmässigt ner en bok. När han slog upp den, föll hans blick på några obegripliga men fängslande bilder. Det var hans första kontakt med kemiska molekyler.

Vid 15 års ålder – på pappans bestämda inrådan – flyttade Omar Yaghi till USA för att studera. Han drogs till kemin och så småningom konsten att forma nya material. Men han tyckte att det traditionella sättet att bygga molekyler på var för oförutsägbart. Normalt blandar kemister ämnen som ska reagera med varandra i ett kärl. För att starta den kemiska reaktionen värmer de sedan kärlet. Då bildas den önskade molekylen, men också ofta en hel rad förorenande sidoprodukter.

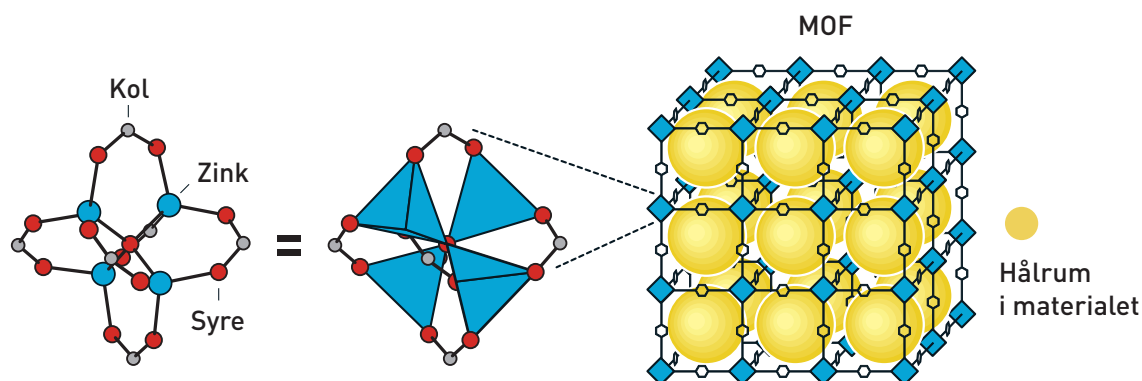
När Omar Yaghi fick sin första tjänst som forskningsledare 1992 vid Arizona State University, ville han hitta mer kontrollerade sätt att skapa material på. Hans mål var att på ett rationellt vis förmå olika kemiska byggstenar att foga ihop sig, ungefär som legobitar, till stora kristaller. Det var besvärligt, men när forskargruppen började blanda metalljoner med organiska molekyler kom framgångarna. År 1995 kunde Yaghi publicera strukturen av två olika tvådimensionella material, som var nätformade och hölls ihop av koppar respektive kobolt. Det senare kunde i sina hålrum hysa gästande molekyler och om hålrummet var fyllt var det så stabilt att det kunde värmas till 350 °C utan att falla ihop. Detta material berättar Yaghi om i tidskriften *Nature*. I den artikeln myntar han begreppet ”metallorganiskt ramverk”. Numera används det begreppet för att beskriva regelbundna molekyllära strukturer som innehåller potentiella hålrum, och byggs av metaller och organiska (kolbaserade) molekyler.

I några gram av Yaghis bygge rymmer en fotbollsplan

Nästa avgörande milstolpe i de metallorganiska ramverkens utveckling stod Yaghi för år 1999. Då kunde han visa upp MOF-5 för världen, ett material som har blivit en klassiker inom området. Det är ett exceptionellt luftigt, men ändå stabilt molekyllbygge. Även om materialet töms på allt sitt innehåll kan det värmas till 300 °C utan att falla samman.

Det som fick många forskare att höja på ögonbrynen var dock den enorma yta som döljer sig inuti materialets kubiska hålrum. I ett par gram av MOF-5 rymmer en yta stor som en fotbollsplan. Det innebär att materialet kan absorbera mycket mer gas än vad zeoliter kan (figur 5).

Apropå skillnader mellan zeoliter och MOF:ar – bara några år efter att Susumu Kitagawa hade börjat drömma om mjuka MOF:ar, lyckades forskare få fram sådana. En av de som kunde presentera ett flexibelt material var Susumu Kitagawa själv. När materialet fylldes med vatten eller metan, ändrade det form. Om det sedan tömdes på innehåll, gick det tillbaka till den tidigare formen. Materialet betedde sig ungefär som en lunga som kan andas in och ut gas – det var föränderligt men stabilt.

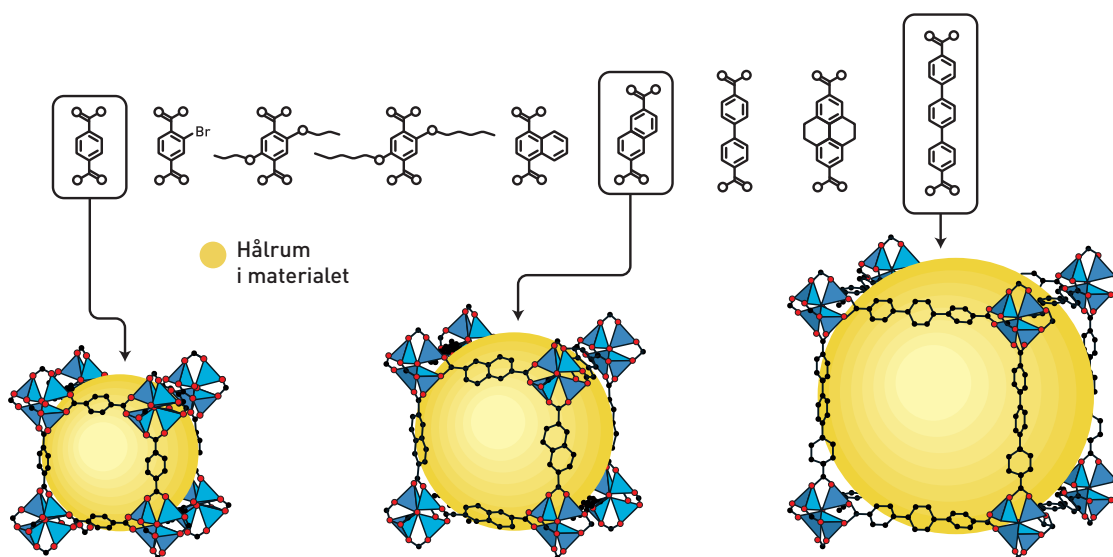


Figur 5. År 1999 konstruerade Yaghi ett väldigt stabilt material, MOF-5, som hade kubiska hålrums. I ett par gram av materialet ryms en yta stor som en fotbollsplan.

Yaghis forskargrupp skördar dricksvatten i öknen

Den sista stenen i grunden för de metallorganiska ramverken lade Omar Yaghi år 2002 och 2003. I två publikationer i *Science* och *Nature* visar han att det på ett rationellt vis går att modifiera och förändra MOF:ar, så att de får olika egenskaper. Bland annat tog han fram 16 varianter av MOF-5, som hade både större och mindre hålrums än det ursprungliga materialet (figur 6). En av dessa varianter visade sig kunna lagra stora mängder av gasen metan, vilket Yaghi föreslog skulle kunna användas i gasdrivna fordon.

Efter detta har de metallorganiska ramverken tagit världen med storm. Forskare har utvecklat en molekylär byggsats med en rad olika bitar som de kan utgå från när de skapar nya MOF:ar. Bitarna har olika form och karaktär, vilket ger otroliga möjligheter att på ett rationellt vis – eller med hjälp av AI – ta fram MOF:ar för olika syften. I figur 7 finns en rad exempel på hur MOF:ar kan användas. Till exempel har Omar Yaghis forskargrupp skapat ett MOF-material som kan skörda vatten ur ökenluft. Med hjälp av materialet fångade de nattetid in vattenånga från luften. När sedan dagen grydde och solen värmde materialet, kunde de samla in vattnet.

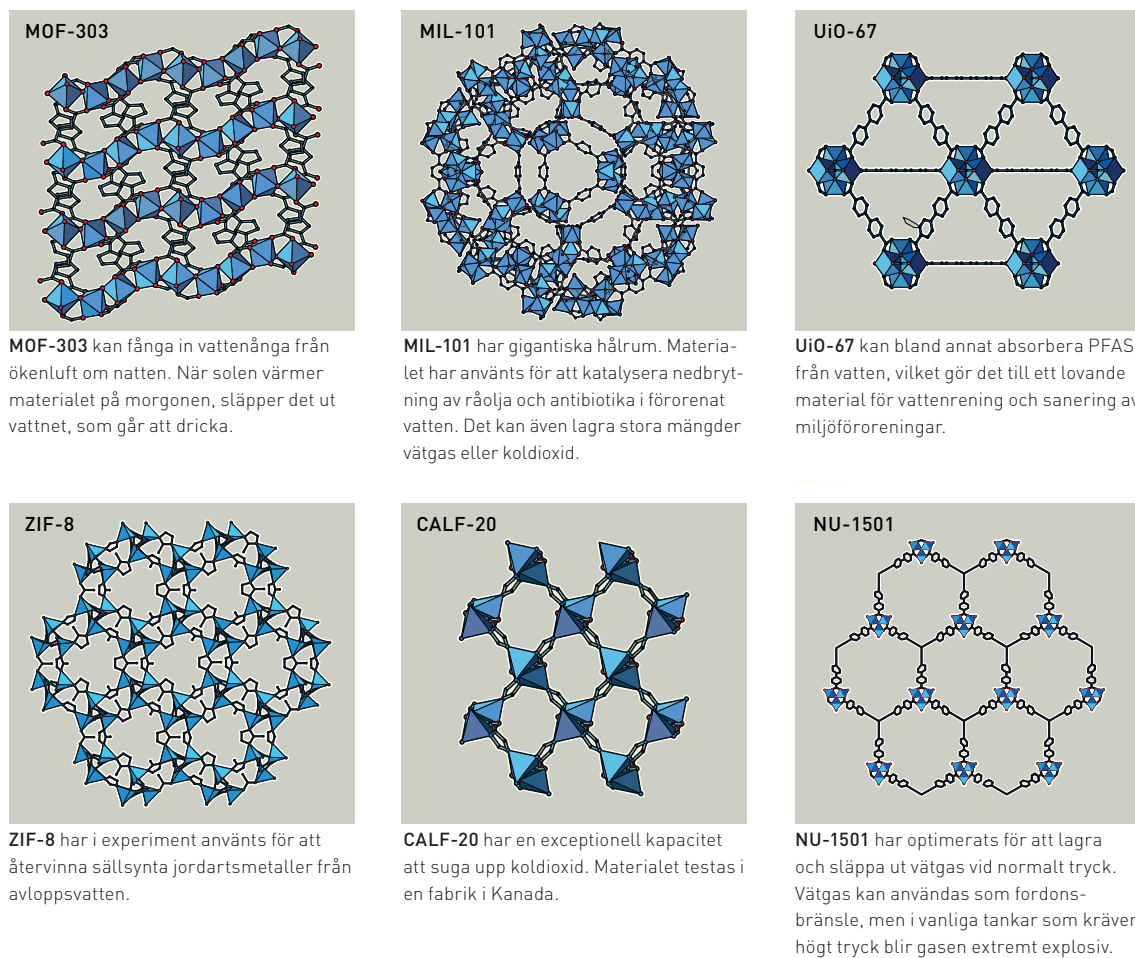


Figur 6. Yaghi visade i början av 2000-talet att det går att tillverka hela familjer av MOF-material. När han varierade de molekylära länkarna fick han fram material med olika egenskaper, bland annat tillverkade han 16 varianter av MOF-5 som hade olika stora hålrums.

MOF-material som fångar in koldioxid och giftiga gaser

Forskare har alltså skapat mängder av olika funktionella MOF:ar. I de flesta fall har materialen dock endast använts i liten skala. För att MOF-material ska komma mänskligheten till nytta, satsar nu många företag på att kunna massproducera och kommersialisera dem. Några av dessa företag har lyckats. Till exempel kan elektronikindustrin numera använda MOF-material för att hantera vissa giftiga gaser som krävs i tillverkning av halvledare. En annan MOF kan bryta ner giftiga gaser, bland annat gaser som kan användas i kemisk krigsföring. En rad företag testar också material som kan fånga in koldioxid från kraftverk och fabriker, för att minska utsläppen av växthusgaser.

Figur 7.



Vissa forskare menar att de metallorganiska ramverken har så stor potential att 2000-talet kommer att bli deras århundrade. Framtiden får utvisa hur det blir med det, men genom utvecklingen av de metallorganiska ramverken har Susumu Kitagawa, Richard Robson och Omar Yaghi gett kemister nya förutsättningar att lösa en del av mänsklighetens utmaningar. Därmed har de – som det står i Alfred Nobels testamente – gjort mänskligheten den största nytta.

LÄS MER

Mer information om årets priser, bland annat en vetenskaplig bakgrundsartikel på engelska, finns på Kungl. Vetenskapsakademiens webbplats, www.kva.se, och på www.nobelprize.org. Där kan man också titta på presskonferenser, Nobelföreläsningar och annat videomaterial. Mer information om utställningar och aktiviteter kring Nobelprisen och Ekonomipriset finns på www.nobelprizemuseum.se.

Kungl. Vetenskapsakademien har beslutat utdela Nobelpriset i kemi 2025 till

SUSUMU KITAGAWA

Född 1951 (74 år) i Kyoto, Japan. Fil.dr 1979 vid Kyoto University, Japan. Professor vid Kyoto University, Japan.

RICHARD ROBSON

Född 1937 (88 år) i Glusburn, Storbritannien. Fil.dr 1962 vid University of Oxford, Storbritannien. Professor vid University of Melbourne, Australien.

OMAR M. YAGHI

Född 1965 (60 år) i Amman, Jordanien. Fil.dr 1990 vid University of Illinois Urbana-Champaign, USA. Professor vid University of California, Berkeley, USA.

”för utveckling av metallorganiska ramverk”