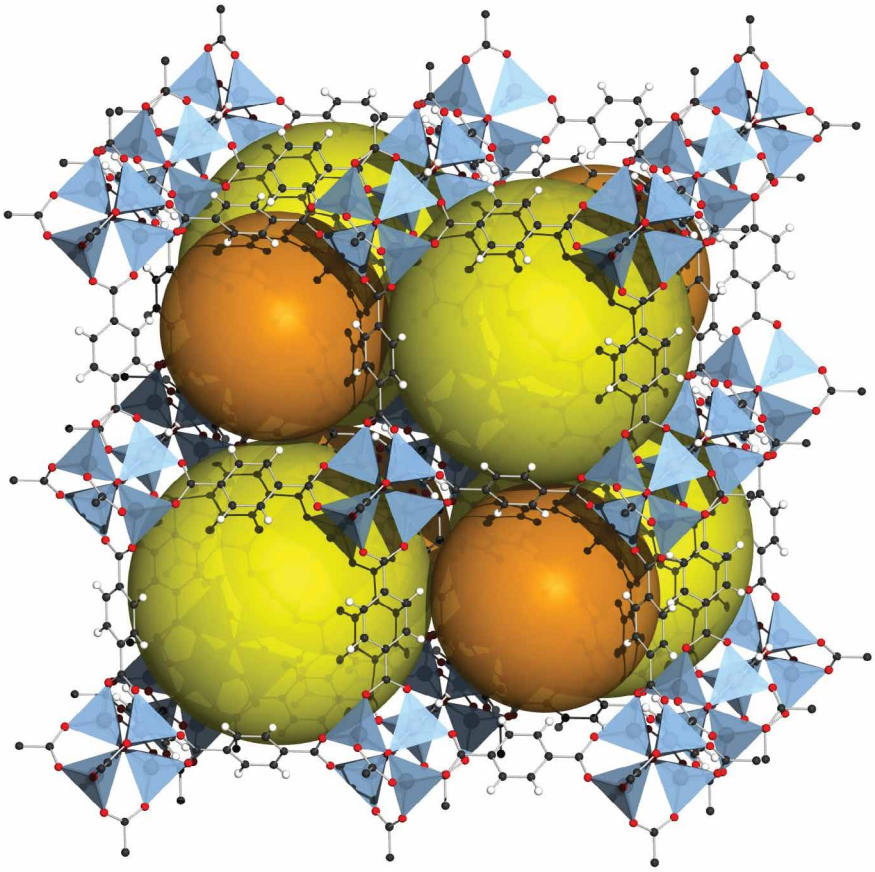


धातु-कार्बनिक ढाँचे : रासायनिक शोध में नए हरफ़नमौला

जॉएल कॉरनेलियो

धातु-कार्बनिक ढाँचे (एमओएफ़'स), ऐसे नए विकसित पदार्थ हैं जो बड़ी मात्रा में गैसों को कम दबाव पर थोड़े से आयतन में रख पाना सम्भव बनाते हैं। ये पदार्थ महत्त्वपूर्ण क्यों हैं? हम इनका इस्तेमाल कैसे करते हैं? इस लेख में एमओएफ की हमारी समझ के विकास के बारे में जानकारी दी गई है।

अप्रैल 2017 में कैलिफोर्निया यूनिवर्सिटी, बर्कले और मैसाचुसेट्स इंस्टीट्यूट ऑफ टेक्नॉलॉजी (एमआईटी) में काम कर रहे वैज्ञानिकों ने एक ऐसे उपकरण के प्रोटोटाइप के सफलतापूर्वक विकसित करने की सूचना दी जो सूरज की रोशनी का उपयोग करके हवा में से नमी को एकत्रित कर सकता था।[1] वर्ल्ड इक्नॉमिक फ़ोरम[2] ने इसे इस साल उभरती हुई शीर्ष दस प्रौद्योगिकियों में स्थान दिया। दरअसल यह प्रोटोटाइप एक नए वर्ग के डिज़ायनर क्रिस्टल (ऐसे पदार्थ जिनकी संरचना और गुण पूर्व-निर्धारित होते हैं), जिन्हें एमओएफ कहा जाता है, के कई उपयोगों में से एक है।

एमओएफ क्या होते हैं?

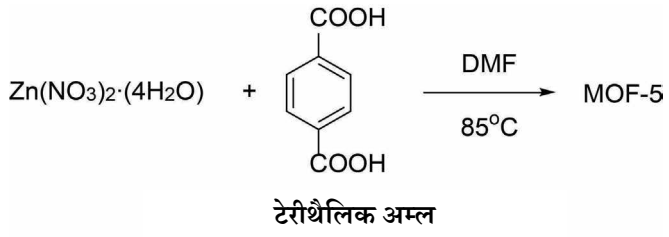
इंटर्नेशनल यूनियन फ़ॉर प्योर एंड एप्लाइड केमेस्ट्री (आईयूपीएसी) धातु-कार्बनिक ढाँचों को इस तरह परिभाषित करता है : 'कार्बनिक लिगैण्ड्स के उप-सहसंयोजी ताने-बाने जिनमें सम्भावित रिक्त स्थान हों।'[3] आसान शब्दों में कहें तो एमओएफ उस वर्ग के क्रिस्टलीय यौगिक हैं जिनमें असाधारण बड़े आकार के छिद्र होते हैं जो विभिन्न आकार और साइज़ के अणुओं और आयनों को बाँध सकते हैं।

सबसे पहले 1990 में रसायनशास्त्रियों बर्नर्ड हॉस्किन्स और रिचर्ड रोबसन ने इनकी सम्भावना का पूर्वानुमान किया था।[4,5] धातु-कार्बनिक ढाँचा नाम यूनिवर्सिटी ऑफ़ मिशीगन में कार्यरत एक जोर्डेनियन-अमरीकन रसायनशास्त्री ओमर यागी द्वारा 1995 में दिया गया। 1999 में ओमर यागी

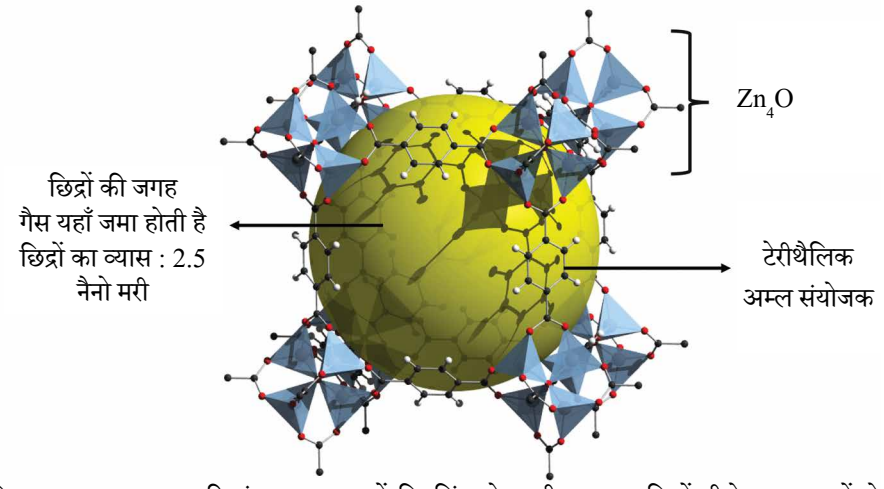
बॉक्स-1 अधिशोषण : किसी ठोस की आन्तरिक और बाहरी सतहों की अपने सम्पर्क में आने वाली गैसों, द्रवों या घुले हुए ठोस पदार्थों को बाँधकर रखने की क्षमता को कहते हैं। ऐसे ठोस को अधिशोषक और जिन गैसों या घोलों को वे बाँधते हैं उन्हें अधिशोष्य कहते हैं। जब एक गैस या तरल अधिशोषित होता है तो वह ठोस के अन्दर नहीं बैठता जैसे कि अवशोषण में होता है बल्कि वह एक परत की तरह ठोस की सतह पर जमा हो जाता है।

और इयान विलियम्स के नेतृत्व में काम कर रहे दो स्वतंत्र समूहों ने पहले एमओएफ के संश्लेषण की घोषणा की थी – इन्हें क्रमशः **HKUST-1** और **MOF-5** कहा गया था।[4,6]

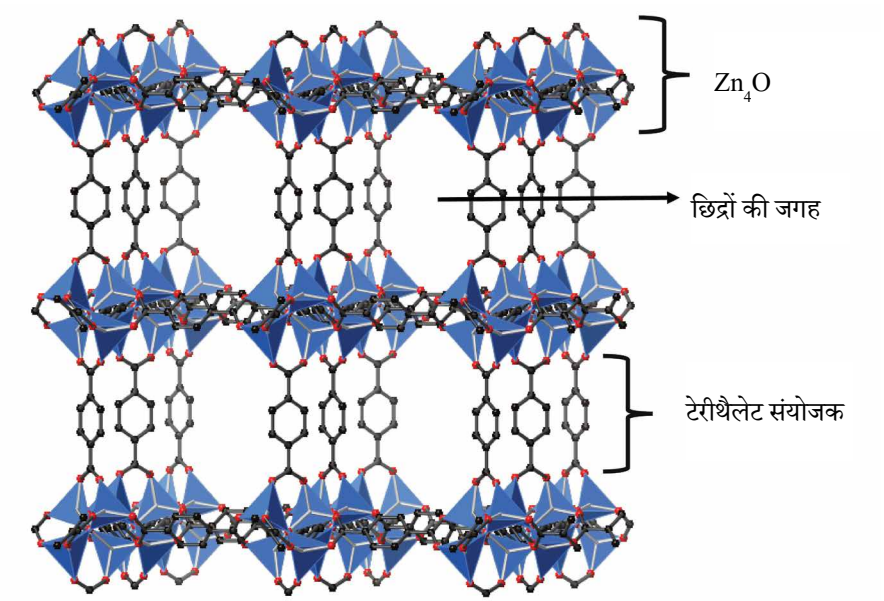
एमओएफ बनाने के लिए आपको धातु के एक लवण और कार्बनिक यौगिक (लिगैण्ड) की आवश्यकता होती है जो कि धातु के आयन के साथ एकाधिक सहसंयोजक बन्ध बना सके। लिगैण्ड और धातु के आयन की जमावट ऐसी संरचनाएँ बना सकती हैं जो छिद्रमय हों और अत्यधिक क्रिस्टलीय (क्रिस्टलाइन) हों। उदाहरण के लिए एमओएफ-5 (**देखें चित्र-1**) का संश्लेषण ज़िंक (जस्ता) नाइट्रेट (एक धात्विक लवण) और 1,4-बैन्ज़ीन डाईकार्बोक्सलिक अम्ल (टेरीथैलिक अम्ल) के संयोजन से होता है। अगर कोई संयोजक कई सारे सहसंयोजक बन्ध बना सकता है, तो इसका इस्तेमाल करके एमओएफ बनाया जा सकता है। पिछले दशक में हज़ारों नए एमओएफ बनाए जा चुके हैं। इसमें से सबसे प्रसिद्ध हैं – **HKUST-1**, जो कॉपर (ताँबे) का एक एमओएफ है, जिसका संश्लेषण हांगकांग यूनिवर्सिटी ऑफ़ साइंस एंड टेक्नॉलॉजी में किया गया था; **UiO-66**, जो यूनिवर्सिटी ऑफ़ ओसलो, नॉर्वे में बना ज़रकोनियम एमओएफ है, **MIL-101** क्रोमियम आधारित एमओएफ है जो इंस्टीट्यूट लेवॉज़िए, फ्रांस द्वारा बनाया गया और ज़िंक आधारित एमओएफ MOFs **ZIF-8** और **MOF-74** जिनका संश्लेषण ओमर यागी द्वारा किया गया है।[7] जल संवेदी **MOF-5** के विपरीत अधिकांश आधुनिक एमओएफ हवा, जल और कई आम विलायकों की उपस्थिति में काफ़ी स्थिर रहते हैं। परन्तु ये अम्लों और क्षारों (कुछ अपवादों के अलावा) के सम्पर्क में आने पर नष्ट हो जाते हैं। इसी तरह, ये उतने अधिक तापमान पर भी नष्ट हो जाते हैं जो इनके कार्बनिक लिगैण्ड को जलाकर CO_2 और पानी में बदलने के लिए काफ़ी हो।



चित्र-1क : MOF-5 कैसे बनाएँ
Credits: Joel Cornelio. License: CC-BY.



चित्र-1ख : MOF-5 की संरचना। ध्यान दें कि ज़िंक के सभी परमाणु (जिन्हें नीले चतुष्फलकों से दिखाया गया है) ऑक्सीजन के एक केन्द्रीय परमाणु (लाल रंग वाले) से जुड़कर Zn_4O संकुल बना रहे हैं। यह ज़िंक, ज़िंक नाइट्रेट से मिलता है। ज़िंक के परमाणु टेरीथैलिक अम्ल के परमाणु ऑक्सीजन परमाणुओं से भी जुड़े हुए हैं। टेरीथैलिक अम्ल का प्रत्येक अणु दो Zn_4O संकुलों से जुड़कर छिद्र बनाता है (पीले रंग से दिखाए गए हैं), जिनमें गैस क़ैद होती है।
Credits: Recreated by Joel Cornelio using Tony Boehle's template, Wikimedia Commons. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IRMOF-1_wiki.png. License: Public Domain.



चित्र-1ग : MOF-5 की विस्तारित क्रिस्टल संरचना
Credits: Joel Cornelio. License: CC-BY.

बॉक्स-2 उत्प्रेरण : किसी उत्प्रेरक की मदद से किसी रासायनिक क्रिया की गति को बढ़ाने को उत्प्रेरण कहते हैं। यह मुख्यतः दो तरह का होता है – समांगी उत्प्रेरण और विषमांगी उत्प्रेरण। समांगी उत्प्रेरण में अभिकर्मकों और उत्प्रेरक को एक ही विलायक में घोलते हैं। इसलिए क्रिया पूरी होने के बाद उत्प्रेरक और अभिक्रिया मिश्रण को अलग करने के लिए अन्य रसायन और ऊर्जा की ज़रूरत पड़ती है। विषमांगी उत्प्रेरण में अभिक्रिया के उत्प्रेरण के लिए अविलेय, अधिक पृष्ठीय क्षेत्रफल वाले पदार्थों का इस्तेमाल होता है, इसलिए उत्प्रेरक को अभिक्रिया मिश्रण से छानने की आसान विधियों द्वारा अलग किया जा सकता है। इसलिए रासायनिक संश्लेषण के लिए अधिकांश उद्योग विषमांगी उत्प्रेरण का इस्तेमाल करते हैं। उदाहरण के लिए सल्फ्यूरिक अम्ल के उत्पादन में प्लेटिनम के साथ वेनेडियम पेंटाऑक्साइड का और हैबर प्रक्रिया द्वारा अमोनिया के संश्लेषण में आयरन (लोहे) के बारीक चूरे का इस्तेमाल होता है।

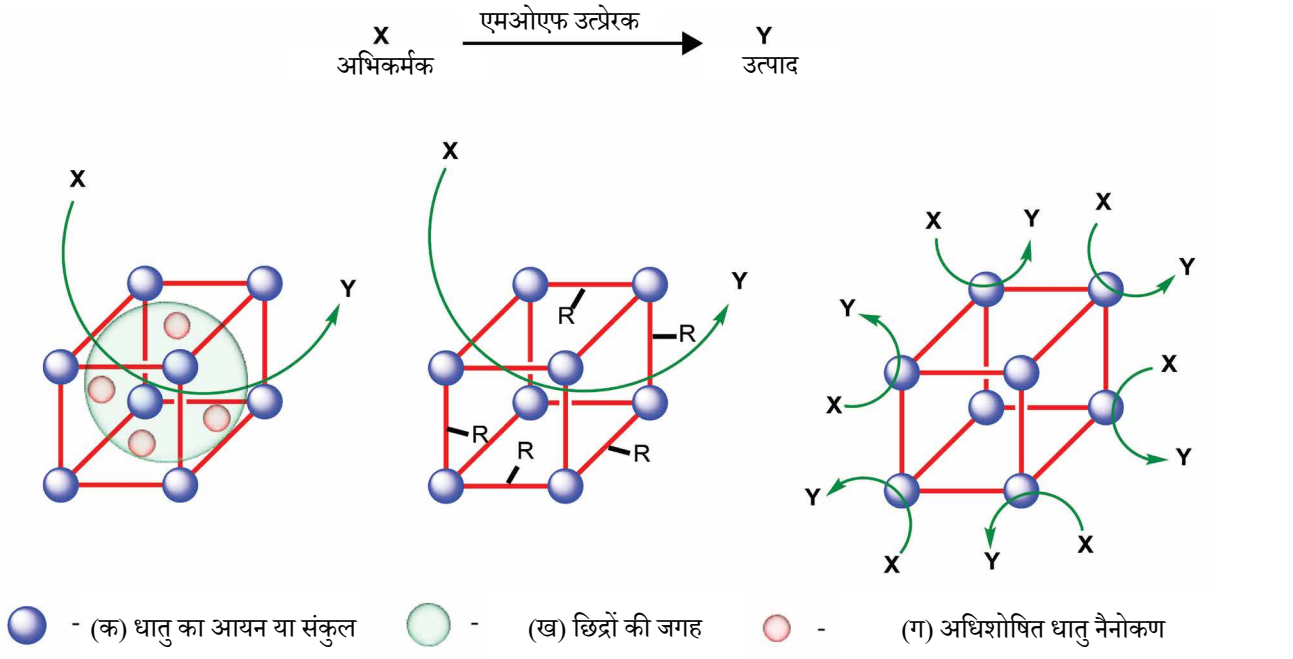
एमओएफ के उपयोग

(क) गैसों को सोखना

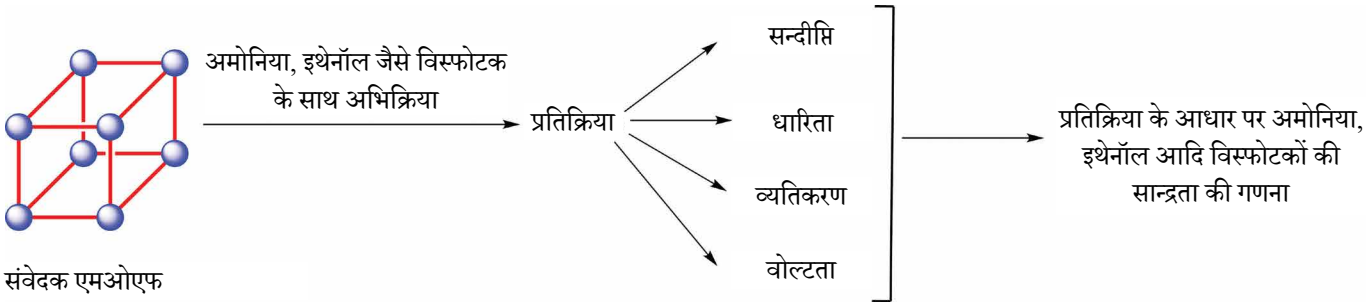
एमओएफ गैसों को सोखने की अपनी अत्यधिक क्षमता के लिए जाने जाते हैं। गैसों के अणुओं के बीच कमज़ोर अन्तरआण्विक बल होते हैं। इसलिए गैसों की बहुत अधिक मात्रा को थोड़े से आयतन में केवल उच्च दबाव पर ही रखा जा सकता है। इस प्रक्रिया में बहुत अधिक ऊर्जा लगती है। एमओएफ के इस्तेमाल से इस समस्या से बचा जा सकता है – सक्रियकृत चारकोल की तरह, एमओएफ भी गैसों के अणुओं को अधिशोषण द्वारा बाँध लेते हैं (**देखें बॉक्स-1**)। परन्तु सक्रियकृत चारकोल के विपरीत एमओएफ में काफ़ी विविधता सम्भव है – विभिन्न तत्वों और तरीक़ों के इस्तेमाल से विविध एमओएफ बनाए जा सकते हैं।

किसी एमओएफ की गैसों को क़ैद करने की क्षमता का आधार उनका बड़ा पृष्ठीय क्षेत्रफल होता है – 2500 से 5000 मी^{2}/ग्रा तक। कुछ एमओएफ जैसे **NU-109E** का पृष्ठीय क्षेत्रफल 7000 मी^{2}/ग्रा तक होता है। इसका अन्दाज़ इस तरह लगाएँ कि एक ग्राम **NU-109E** का आकार चीनी के एक क्रिस्टल के बराबर होगा परन्तु उसका आन्तरिक पृष्ठीय क्षेत्रफल 27 टैनिस मैदानों के बराबर होगा![8] और चूँकि इस आन्तरिक पृष्ठीय क्षेत्रफल का हर छोटा अंश गैस के अणुओं का अधिशोषण कर सकता है इसलिए एमओएफ का इस्तेमाल छोटे-से आयतन में बड़ी मात्रा में गैस इकट्ठा करने के लिए किया जा सकता है। किसी भी

बॉक्स-3 ऐल्डोल अभिक्रिया : इसमें दो कार्बोनिल (ऐसे योगिक जिनमें कार्बन-ऑक्सीजन द्वी-आबन्ध होता है) यौगिकों के संयोजन से ऐल्डोल नाम का उत्पाद बनता है।



चित्र-2 : एमओएफ आधारित उत्प्रेरण के तरीक़े। X और Y क्रमशः अभिकर्मक और उत्पाद दर्शा रहे हैं। एमओएफ को घनों के रूप में दिखाया गया है। कार्बनिक संयोजकों को लाल लाइनों से दर्शाया गया है जोकि इन घनों के किनारे के रूप में दिख रहे हैं और नीले गोलक धातु के आयन या संकुल दर्शा रहे हैं। **(क)** एमओएफ की छिद्रों की जगह का धातु के नैनो कणों के लिए उत्प्रेरक के सहारे के रूप में इस्तेमाल **(ख)** कार्बनिक संयोजकों को उत्प्रेरकों के क्रियात्मक समूह बना देना (R से दर्शाया गया है) **(ग)** धातु के आयनों या संकुलों को उत्प्रेरण के लिए इस्तेमाल करना।
Credits: Joel Cornelio. License: CC-BY.



चित्र-3 : एमओएफ का एक रासायनिक संवेदक की तरह इस्तेमाल करने की एक आम योजना।
Credits: Joel Cornelio. License: CC-BY.

बॉक्स-4 : माइकल एडिशन – तब होता है जब एक C-C असन्तृप्त कार्बोनिल यौगिक किसी न्यूक्लियोफाइल (ऐसा यौगिक जो इलेक्ट्रॉन जोड़ी दे सकता है) से अभिक्रिया करता है। C-C असन्तृप्ति, कार्बोनिल कार्बन के पास के कार्बन के अणुओं के बीच होनी चाहिए।

एमओएफ को कई बार इस्तेमाल किया जा सकता है – इसके लिए बस उसे गर्म करके या चूषण द्वारा अधिशोषित गैस को उस पर से हटाना होता है।

एमओएफ की गैसों को अधिशोषित करने की क्षमता के कई दिलचस्प उपयोग हैं। इसका एक उदाहरण परिवहन उद्योग में मिलता है। जर्मनी की एक रसायन कम्पनी बीएएसएफ (बैडिशे एनिलिन एंड सोडा फैबरिक) ने वाहनों मॉडल फोर्ड एफ-550 जैसे ट्रक में सीएनजी (कंप्रैस्ड नेचुरल गैस) के संग्रह के लिए जो सिलेण्डर बनाए हैं उनमें एमओएफ हैं।[9] चूँकि एमओएफ सीएनजी के संग्रह को आम सिलेण्डरों की तुलना में तीन-चार गुना बढ़ा देते हैं इसलिए उनसे सिलेण्डर को उतनी जल्दी-जल्दी भरवाने की ज़रूरत नहीं पड़ती है। हालाँकि यह एक महत्त्वपूर्ण फ़ायदा है परन्तु एमओएफ वाले वाहन बिक्री के लिए अभी तक उपलब्ध नहीं हुए हैं। 2014 में अन्तर्राष्ट्रीय बाज़ार में कच्चे तेल की कीमतों में अचानक गिरावट आने के कारण सीएनजी काफ़ी सस्ता हो गया था और इससे इस तरह के वाहनों के व्यवसायीकरण के लिए आर्थिक दिलचस्पी कम हो गई।[10] एक और उदाहरण है, न्यूमैट टैक्नॉलॉजीस जैसी कम्पनियों ने ज़हरीली गैसों जैसे आरसीन (AsH_3), फॉसफ़ीन (PH_3), बोरोन ट्राईफ्लोराइड (BF_3), के संग्रहण के लिए एमओएफ युक्त सिलेण्डर बनाए हैं (जिन्हें ION-X7 कहा जाता है)। अर्धचालक (सेमीकंडक्टर) उद्योग में ये गैसें बहुत अधिक उपयोगी हैं परन्तु ये बहुत ही ज़हरीली हैं और अगर साँस के साथ अन्दर ले लिया जाए तो इनसे गम्भीर नुक़सान हो सकता है। एमओएफ युक्त सिलेण्डरों में इन्हें वायुमण्डलीय दबाव से कम दबाव पर संग्रहित किया जा सकता है। चूँकि गैसों में अधिक दबाव से कम दबाव की ओर जाने की प्रवृत्ति होती है, इसलिए कम दबाव पर संग्रहण से ठीक से सील नहीं हुए सिलेण्डरों में से भी इनके रिसने की सम्भावना कम हो जाती है।

बॉक्स-5 सन्दीप्ति : यह किसी पदार्थ द्वारा प्रकाश का उत्सर्जन है जब उसे किसी तरह की ऊर्जा (ऊष्मा के अलावा) दी जाए। यह ऊर्जा कई तरह की हो सकती है : आपतित (इंसीडेंट) फोटॉन के रूप में हो सकती है (फोटो सन्दीप्ति), यांत्रिक बल के रूप में (यांत्रिकी सन्दीप्ति), विद्युत के रूप में (विद्युतीय सन्दीप्ति) या ध्वनि के रूप में (ध्वनि सन्दीप्ति)। एक सन्दीप्तिशील पदार्थ इस ऊर्जा को अवशोषित करके कम ऊर्जा के प्रकाश का उत्सर्जन करता है। कुछ उदाहरण हैं चमकदार छड़ी, अँधेरे में चमकने वाले घड़ी के डायल या फिर सड़क पर लगे संकेत आदि।

बॉक्स-6 : रासायनिक संवेदक – वे अणु हैं जो दूसरे अणुओं से अभिक्रिया करके सन्दीप्ति, धारिता, वोल्टता या अन्य भौतिक गुणों में मापन-योग्य बदलाव पैदा करते हैं। कई तरह के उपकरणों में इनकी उपयोगिता है जैसे ग्लूकोज़ मीटर (ख़ून में ग्लूकोज़ का स्तर नापने के लिए), श्वास परीक्षक यंत्र (साँस में अल्कोहल का स्तर नापने के लिए)।

(ख) उत्प्रेरण

गैसों का शोषण करना एमओएफ की एकमात्र विशेषता नहीं है। उनका विशाल पृष्ठीय क्षेत्रफल इन्हें रासायनिक अभिक्रियाओं में उत्प्रेरण के लिए भी उपयोगी बनाता है (**देखें बॉक्स-2**)।

एमओएफ आधारित उत्प्रेरण में तीन युक्तियों का इस्तेमाल हो सकता है। पहले तरीक़े में धातु के नैनो-कणों को एमओएफ के छिद्रों में अधिशोषित किया जाता है। एमओएफ के छिद्रों में विसरित हो रहे अभिकर्मक अधिशोषित नैनो कणों के साथ जुड़ते हैं और इस तरह से उत्प्रेरण हो पाता है (**देखें चित्र-2 क**)। इसका इस्तेमाल अल्कीन्स के हाइड्रोजनीकरण में और एपॉक्साइड्स, हाइड्रोजन परऑक्साइड व मिथेनॉल के संश्लेषण में किया जाता है (**देखें चित्र-2 ख**)। एक अन्य युक्ति में उत्प्रेरण क्रिया वाले क्रियात्मक समूहों (जैसे ग्वानिडीन, फिनाइलएनालीन, प्रोलीन, इमिडेज़ोल आदि) को कार्बनिक लिगैण्ड वाले एमओएफ के साथ जोड़ दिया जाता है।

ऐसे एमओएफ का इस्तेमाल कुछ बुनियादी कार्बनिक रूपान्तरणों के लिए किया जा सकता है – जैसे ऐल्डोल अभिक्रिया (**देखें बॉक्स-3**), माइकल एडिशन (**देखें बॉक्स-4**) आदि। तीसरी युक्ति में एमओएफ के धातु संकुलों के ऊपर ही उत्प्रेरण होता है (**देखें चित्र-2 ग**)। उदाहरण के लिए प्रसिद्ध ज़ीगलर नाटा अभिक्रिया (एथीलीन के बहुलीकरण द्वारा पॉलीएथीलीन बनाना) के लिए टाइटेनियम आधारित एमओएफ का इस्तेमाल किया गया है। उत्कृष्ट धातुओं (जैसे रोडियम, प्लेटिनम, रूथेनियम या पैलेडियम) के संकुलों वाले एमओएफ हाइड्रोजनीकरण अभिक्रियाओं के उत्प्रेरकों के रूप में उपयोगी साबित हुए हैं। आज ऐसे अधिक गुणकारी और स्थिर एमओएफ बनाने के लिए शोध हो रहे हैं जो कि एक से अधिक तरह की अभिक्रियाओं के लिए उत्प्रेरक का काम कर सकें।[11]

(ग) सन्दीप्ति

अगर एमओएफ को बनाने के लिए सन्दीप्तिशील पदार्थों जैसे लैन्थेनाइड तत्व (यूरोपियम, डिसप्रोसियम आदि) का इस्तेमाल किया जाए तो वे भी सन्दीप्तिशील हो सकते हैं[12,13] (**देखें बॉक्स-5**)। एमओएफ का एक और फ़ायदा यह है कि वे किसी भी मनचाहे रंग की सन्दीप्ति दे सकते हैं। उदाहरण के लिए एमओएफ की शुद्ध सफ़ेद प्रकाश उत्पन्न करने की क्षमता के प्रकाश उद्योग में महत्त्वपूर्ण उपयोग हैं।[14]

(घ) रासायनिक संवेदक

सबसे आम वर्ग के एमओएफ संवेदक सन्दीप्ति में मापन-योग्य बदलाव पैदा करने की अपनी क्षमता पर आधारित हैं। उदाहरण के लिए टेट्राफिनायल लिगैण्ड या लैन्थेनाइडस वाले एमओएफ विस्फोटकों या भारी धातुओं को सेंस करने (पकड़ने) लिए इस्तेमाल हो रहे हैं। विस्फोटक के नाइट्रो (NO_2), समूह और एमओएफ के लिगैण्ड के बीच हाइड्रोजन बन्ध बनने से सन्दीप्ति में बदलाव होता है। एक और वर्ग के एमओएफ संवेदक धारिता में बदलाव ला पाने की अपनी क्षमता के आधार पर काम करते हैं। उदाहरण के लिए इनमें से कुछ के लिए रिपोर्ट किया गया है कि वे अमोनिया की 25पीपीबी (पार्ट पर बिलियन, एक अरब में से एक) से भी कम मात्रा को पकड़ सकते हैं।[15] एक तीसरे वर्ग के एमओएफ संवेदक इथेनॉल, प्रोपेन और पानी के व्यतिकरण में मापन-योग्य बदलाव को पकड़ पाते हैं (**देखें चित्र-3**)।[16]

रासायनिक संवदेकों में रूप में एमओएफ के इस्तेमाल के लिए मौजूदा शोध का उद्देश्य अधिक विशिष्टता वाले सरल उपकरण बनाना है। ऐसे एमओएफ का निर्माण जो विशेष रूप से केवल एक विश्लेष्य पदार्थ को पकड़े काफ़ी मुश्किल साबित हुआ है और यह शोध का एक सक्रिय क्षेत्र है।

अन्त में

पिछले दो दशकों में एमओएफ रसायनशास्त्र के क्षेत्र में काफ़ी विस्तार हुआ है। 1999 में पहले कुछ एमओएफ के संश्लेषण के बाद से आज कम-से-कम 6000 नए एमओएफ की संरचना हर साल प्रकाशित होती हैं। शोध ने कई क्षेत्रों में उनकी उपयोगिता को और तराशने में मदद की है – गैसों के शोषण और उत्प्रेरण से लेकर सन्दीप्ति और रासायनिक संवेदकों तक। शोध से इनके नए उपयोग भी उजागर हुए हैं – इमारतों को ठण्डा या गर्म करने के लिए एमओएफ का इस्तेमाल और स्वास्थ्य सम्बन्धी उत्पादों के लिए रोगाणुरोधी आवरण का उत्पादन, हवा में से नमी निकालना और बिजली संयंत्रों के उत्सर्जन में से कार्बन डाईऑक्साइड निकालना आदि।[10] इस प्रगति ने नई तरह के छिद्रित पदार्थों के संश्लेषण को बल दिया है – जिन्हें कोवेलेंट ऑरगेनिक फ्रेमवर्कस[17] (सीओएफ़) और हाईब्रिड अल्ट्रापोरस मैटीरिअल[18] (एचयूएम) कहा जाता है। एमओएफ के संश्लेषण के लिए आज जो सबसे बड़ी चुनौती है वह है उनकी उच्च उत्पादन लागत, जो कि उनमें लगने वाले कार्बनिक लिगैण्ड्स के निर्माण के लिए इस्तेमाल होने वाले ख़ास तरीक़ों और कौशल के कारण होती है। अब जबकि 2016 में पहले कुछ एमओएफ आधारित उत्पाद बाज़ार में उतरे हैं[10] तो ऐसा लगता है कि अधिक लागत ज़्यादा समय तक एक चुनौती नहीं रहेगी।

Note: Credits for the image used in the background of the article title: MOF-5. Tony Boehle, Wikimedia Commons. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MOF-5.png. License: CC-BY-SA.

References

1. Nelson J. D & Carbeck J. (2017). "Off-Grid Devices Draw Drinking Water from Dry Air". Scientific American. URL: https://www.scientificamerican.com/article/harvesting-clean-water-from-air/
2. World Economic Forum. Top 10 Emerging Technologies 2017. URL: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Top_10_Emerging_Technologies_report_2017.pdf.
3. Batten R.S et al. (2013). Terminology of Metal–Organic Frameworks and Coordination Polymers (IUPAC Recommendations 2013). Pure and Applied Chemistry 85, 8 (2013): 1715.
4. Vaughan O. (1999) Porous artificial crystals. Nature Milestones Crystallography. URL: https://www.nature.com/milestones/milecrystal/full/milecrystal22.html.

5. Hoskins B. F. & Robson R. (1990). Design and Construction of a New Class of Scaffolding-Like Materials Comprising Infinite Polymeric Frameworks of 3D-Linked Molecular Rods. Journal of the American Chemical Society 112, 4: 1546-54.
6. Li H. et al. (1999). Design and Synthesis of an Exceptionally Stable and Highly Porous Metal-Organic Framework. Nature 402, 6759: 276-79.
7. Furukawa, H. et al. (2013). The Chemistry and Applications of Metal-Organic Frameworks. Science 341, 6149: 1230444.
8. Farha O. K. et al. (2012). Metal–Organic Framework Materials with Ultrahigh Surface Areas: Is the Sky the Limit? Journal of the American Chemical Society 134, 36: 15016-21.
9. Zeintl C. (2014). New Technology Makes Natural Gas Marketable. BASF SE URL: http://www.automotive.basf.com/mof_technology_natural_gas/.
10. Notman N. (2017). MOFs Find a Use. The Royal Society of Chemistry. URL: https://www.chemistryworld.com/feature/mofs-find-a-use/2500508.article.
11. Gascon J. et al. (2013). Metal Organic Framework Catalysis: *Quo Vadis?* ACS Catalysis 4, 2: 361-78.
12. Wen Y. et al. (2017). Introduction of Red-Green-Blue Fluorescent Dyes into a Metal–Organic Framework for Tunable White Light Emission. Advanced Materials 29, 37: 1700778.
13. Wang X. et al. (2017). Highly Efficient White-Light Emission and UV–Visible/NIR Luminescence Sensing of Lanthanide Metal–Organic Frameworks. Crystal Growth & Design 17, 4: 2178-85.
14. Sava D. F. et al. (2012). Intrinsic Broad-Band White-Light Emission by a Tuned, Corrugated Metal–Organic Framework. Journal of the American Chemical Society 134, 9: 3983-86.
15. Shustova N. B. et al. (2013). Selective Turn-on Ammonia Sensing Enabled by High-Temperature Fluorescence in Metal-Organic Frameworks with Open Metal Sites. Journal of the American Chemical Society 135, 36: 13326-9.
16. Kreno, L. E. et al. (2012). Metal-Organic Framework Materials as Chemical Sensors. Chemical Reviews 112, 2: 1105-25.
17. Côté A. P. et al. (2005). Porous, Crystalline, Covalent Organic Frameworks. Science 310, 5751: 1166-70.
18. Kumar A. et al. (2017). Hybrid Ultramicroporous Materials (HUMs) with Enhanced Stability and Trace Carbon Capture Performance. Chemical Communications 53, 44: 5946-49.

जॉएल कॉरनेलियो मंगलोर से हैं। वे सेंट एलोसियस कॉलेज (स्वायत्तशासी) मंगलोर में असिस्टेंट प्रोफ़ेसर (2013-2015) और टाटा इंस्टीट्यूट ऑफ़ फंडामेंटल रिसर्च (टीआईएफआर) मुम्बई में जूनियर रिसर्च फ़ेलो के रूप में काम कर चुके हैं। इस समय वे मैसे यूनिवर्सिटी, पामेरस्टन नॉर्थ, न्यूज़ीलैण्ड में पीएचडी कर रहे हैं।

अनुवाद : शशि सक्सेना **पुनरीक्षण :** सुशील जोशी **कॉपी एडिटर :** अनुज उपाध्याय