

# STRUKTURA, VLASTNOSTI A POTENCIÁL MOF

BRYCHTOVÁ M.<sup>1</sup>, DOLEŽEL P.<sup>2</sup>

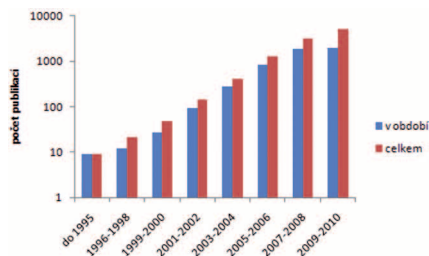
1. Univerzita Pardubice, Fakulta chemicko-technologická, Kat. fyzikální chemie, marie.brychtova@gmail.com

2. Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Kat. řízení procesů, petr.dolezel@upce.cz

*MOFy, neboli Metal Organic Frameworks, jsou hybridní porézní sloučeniny skládající se z anorganických částí (kovový iont či klastr) propojených organickými linkery. Jejich výjimečnost tkví ve dvou ohledech, a to jednak ve flexibilní struktuře, kterou lze navrhnout na míru žadaného využití a dále mají výborné adsorpční vlastnosti, zvláště velký specifický povrch. Potenciál MOFů je tedy převážně v jejich využití jako adsorbentů v mnoha směrech, od nakládání s plyny v rámci ochrany životního prostředí po transport látek v lidském těle v oblasti medicínských aplikací.*

Velký rozvoj výzkumu MOFů, jako odvětví výzkumu nanomateriálů, začal v polovině devadesátých let dvacátého století a navázal na výzkum koordinačních polymerů (CP). V literatuře se nacházejí rozpory v terminologii [1,2] co se týče názvů MOF a CP. V některých zdrojích se oba pojmy ztotožňují, většinou se však MOFy vydělují jako podmnožina porézních krystalických koordinačních polymerů s kovalentní vazbou mezi anorganickou částí a organickým linkerem a trojdimenzionálním prostorovým uspořádáním sítí. Někdy je také místo názvu MOF uváděn PCP (porézní koordinační polymer). Látky na bázi koordinačních polymerů jsou vyvíjeny již od šedesátých let minulého století, termín MOF vznikl až v letech devadesátých. Od té doby zaznamenal výzkum MOFů i s perspektivou jejich aplikací do průmyslu významný rozvoj, což dokládá i nárůst počtu publikací na toto téma viz obr. 1.

Obr. 1 – Počet odkazů na výraz "Metal-Organic Framework" dle databáze SciFinder



## 1. Struktura

Základní stavební jednotky MOFů lze rozdělit na anorganické části tzv. SBU (sekundární stavební jednotky), a ty jsou pak spojeny pomocí organických linkerů.

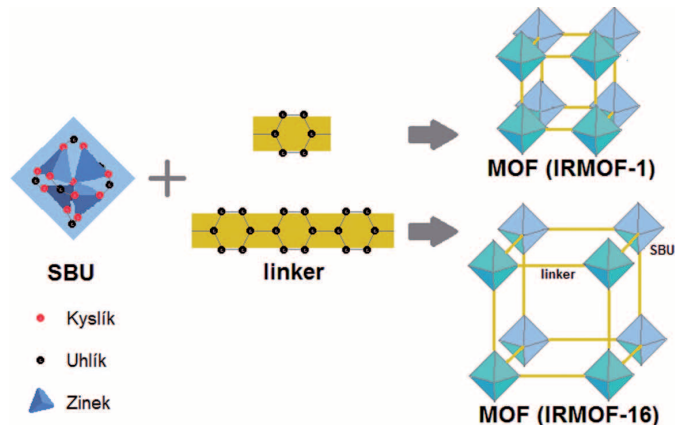
SBU jsou většinou tvořeny klastry skládajícími se z jednoho nebo více atomů kovu spojených nejčastěji oxidickými a karboxylátovými jednotkami tak, aby tvořily systém se stabilním koordinačním uspořádáním. K SBU jsou pak kovalentní vazbou připojeny linkery v předem známém směru, což ulehčuje syntézu sítí s žádanou topologií. Názvosloví pro známé struktury sítí je zveřejněno v databázi Reticular Chemistry Structure Resorce (RCSR). Sítě s totožnou strukturou se nazývají isoretikulární.

Někdy mohou být v MOFu místo celých SBU jednotek přítomny pouze samostatné kationty kovu, které jsou vzájemně propojeny organickými linkery, např.  $\text{Cu}(\text{bpy})_2$  [3]. Většinou se však takovéto materiály označují pouze jako koordinační polymery.

Struktura sítí je závislá nejen na SBU, ale také na organickém linkeru spojujícím tyto jednotky. Vhodné je použití rigidních (neohebných) linkerů, které nejsou schopny tvořit žádné konformace. Použitím SBU a rigidních linkerů tak vzniká předem známá topologie, což velmi usnadňuje návrh nově hledaných materiálů. Zvolením vhodné délky lze ovlivnit velikost pórů materiálu (například IRMOF-1 má volný průměr póru 11 Å a volný objem 79 % z celkového objemu, IRMOF-16 pak 19 Å a 91 % [2] – viz obr. 2). Pokud je potřeba, aby linkery měly složitější stavbu a měly možnost konformace, či je třeba, aby obsahovaly určité funkční skupiny, často je nejprve provedena syntéza materiálu o žádané stavbě mřížky a poté teprve dochází k úpravě linkeru tím, že jsou na něj vázány další skupiny.

Použitím různých SBU nebo linkerů vzniká MOF o složitější struktuře, výsledná topologie je však dopředu hůře odhadnutelná.

Obr. 2 – Velikosti pórů MOFů v závislosti na délce linkeru



## 2. Syntéza

Při syntéze MOFů je velmi důležité řízení průběhu krystalizace. Je žádoucí, aby vznikaly monokrystaly vhodné k analýze jejich struktury pomocí XRD.

Pro syntézu MOFů jsou nejčastěji používány tzv. solvotermální techniky [4]. Prekurzor kovu (většinou ve formě soli) a organický ligand jsou naředěny ve vysokovroucím polárním rozpouštědle (voda, acetonitril,...) a zahřáty (teplota cca do 300 °C) v utěsněné nádobě, kde samovolně roste tlak. Nejdůležitější pro vznik žadáných struktur je průběh krystalizace. Parametry, které ji ovlivňují, jsou teplota, koncentrace kovu a ligandu, rozpustnost těchto látek v roztoku a pH roztoku. V poslední době se velmi rychle také rozvíjí postup použití mikrovlnného záření [5]. Toto záření ovlivňuje především nukleaci v procesu krystalizace. Další možností pro přípravu MOFů na mokré cestě je elektrochemická metoda [6], kdy zdrojem kovu je anoda ponořená v roztoku karboxylátů.

Velmi výhodná je také syntéza MOFů bez rozpouštědla [7,8]. Tu lze provádět jednak mechanicky – mletím, kdy prekurzor kovu a organického linkeru jsou mlety společně a vznikající vedlejší produkty jako voda či nízkomolekulární organické produkty jsou za zvýšené teploty odváděny. Nemechanické postupy jsou založeny např. na reakci plyn-pevná látka [9] či ko-sublimaci [10].

Po syntéze látky může následovat dále tzv. postsyntetická modifikace (PSM), kdy jsou prováděny úpravy organických linkerů.

## 3. Vlastnosti

MOFy jsou vysoce porézní krystalické materiály. Jsou výjimečné vysokými hodnotami specifického povrchu – uvádí se až 5000 m<sup>2</sup>/g [11]. Takto vysokého specifického povrchu mohou tyto materiály dosahovat díky nulovému mrtvému objemu. Průměr pórů se typicky pohybuje v rozmezí 0,4 až 3 nm.

Nevýhodou MOFů je jejich relativně nízká termická, chemická a mechanická stabilita oproti čistě anorganickým materiálům, jako jsou například zeolity. Díky přítomnosti organické části je většina MOFů stabilní maximálně do cca 400 °C.

Při popisu MOFů je občas zmiňována otevřená mřížka (open framework). To znamená, že v přesně definované mřížce se mohou pohybovat volné molekuly rozpouštědla, které lze odstranit zvýšením teploty či evakuací, aniž by to narušilo stabilitu mřížky.

Mřížka MOFů bývá typicky nenabitá. Lze však cíleně vytvořit třeba aniontový MOF, kde linkery budou mít záporný náboj a bude tedy možná výměna mimomřížkových kationtů, což umožňují například ZMOF [12] (zeolite-like MOF). Existují i kationtové MOFy, např. Cu(bpy)<sub>2</sub>, které umožňují výměnu aniontů [13].

U některých MOFů lze vytvořit nenasyčená kovová centra [14] (UMC), jejichž přítomnost může být výhodná při katalytických aplikacích či adsorpci. Tato nenasyčená centra vznikají při odtržení molekul koordinovaných ke kovu za použití vakua. Výsledkem je potom reaktivní centrum kovu s nenasyčenou koordinační sférou.

MOFy mohou mít i magnetické vlastnosti, pokud obsahují nosiče magnetického momentu, kterými jsou většinou paramagnetické kovy. Cílem výzkumu v této oblasti [15] je záměrně sestavit porézní materiál žádaných magnetických vlastností.

Zvláštní vlastností MOFů je schopnost dynamické odezvy mřížky na vnější podnět [16] – může dojít ke kontrakci mřížky při přijetí cizí molekuly a reversibilně pak k opětovné expanzi po odstranění cizí molekuly. Tato vlastnost se nazývá „breathing“ efekt [17]. Podobně reversibilní chování bylo pozorováno také v závislosti na teplotě [15].

## 4. Využití

Existuje mnoho možností využití MOFů. Tyto látky jsou však relativně novým předmětem výzkumu a proto se jejich hojně rozšíření do průmyslových aplikací teprve očekává. Mimo využití v nových technologiích se předpokládá, že v některých stávajících aplikacích MOFy nahradí zeolity, molekulová síta či aktivní uhlí.

### 4.1 Separace a čištění plynů

Při separaci plynů lze MOFy využít jako selektivní adsorbenty. Cílem ve výzkumu těchto látek je vytvořit materiál s vhodnou mírou interakce povrchu s adsorbovanou molekulou a zároveň s vhodnou velikostí pórů.

Čištění plynů napuše na stejných principech jako separace, rozdíl je jen v poměru množství čištěné a odstraňované složky. MOFy lze použít pro odstranění i stopových množství různých plynů. Díky chemisorpci polárních molekul na přístupných centrech kovu mohou být ze směsí plynů odstraňovány aminy, fosfíny, vodní pára, alkoholy či siričné plyny.

Konkrétní příklady separace a čištění plynů jsou např. separace CO<sub>2</sub>, CO a H<sub>2</sub> z parního reformování metanu, separace H<sub>2</sub> ze syntézního plynu, odstranění vlhkosti ze vzduchu a organických rozpouštědel, separace CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub> z bioplynu, desulfurizace zemního plynu, separace izotopů z plynu (H<sub>2</sub>/D<sub>2</sub>, <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He), separace He ze zemního plynu a ze vzduchu.

#### 4.1.1 Separace kyslíku ze směsi s dusíkem

Pro separaci kyslíku a dusíku, založené na selektivní adsorpci kyslíku na MOFech, je možné využít několik principů [14]. Je to jednak adsorpce založená na rigidní velikosti póru MOFů (např. PCN-13), případně na flexibilní velikosti pórů (velikost pórů se mění s teplotou či tlakem), kdy je pro separaci využit tzv. síťový efekt. Kyslík jako menší molekula vstupuje do pórů, dusík však nikoliv. Dále některé materiály využívají různé afinity kyslíku a dusíku k povrchu, např. Cu(bdt) obsahuje UMC (nenasyčená kovová centra) s vysokou afinitou ke kyslíku.

#### 4.1.2 Separace propylenu

Výroba propylenu je v dnešní době velmi důležitou součástí petrochemického průmyslu. Při jeho výrobě je velmi obtížné oddělit jej od směsi s propanem vzhledem k podobným fyzikálně-chemickým vlastnostem. Rozvíjející se způsob separace těchto látek je adsorpce

na vhodném materiálu, kdy MOFy (např. CuBTC [18]) jsou v popředí zájmu.

### 4.2 Skladování plynů

Jedním z důležitých aspektů ochrany životního prostředí je otázka bezpečného, bezetrátového a ekonomicky efektivního skladování či přepravy plynné látky. Použitím adsorbentu pro skladování plynu odpadají bezpečnostní problémy s vysokotlakými plynovými nádobami. MOFy se díky svým výborným adsorpčním vlastnostem (především velkému specifickému povrchu) dostaly do popředí výzkumu v tomto odvětví. Největší důraz je momentálně kladen na vývoj MOFů vhodných pro adsorpci vodíku, oxidu uhličitého a metanu.

#### 4.2.1 Skladování vodíku

Vodík se již dlouhou dobu jeví jako ideální zdroj energie. Jednak je to díky vysoké palivové efektivitě a dále díky šetrnosti k životnímu prostředí, protože produktem spalování vodíku je pouze voda. Hlavním problémem využití vodíku jako paliva je dosažení dostatečně vysokého poměru množství vodíku k objemu skladovacího zařízení, které by mohlo být použito například v automobilové dopravě a to vše se zárukou bezpečnosti. Cíle vytyčené pro automobilovou dopravu ve Spojených státech v Department of Energy [19] (DOE) pro rok 2010 jsou následující: nádrž na vodík by měla obsahovat asi 5 kg vodíku (dojezd asi 480 km), maximální tlak, v nádrži 100 barů, skladovací kapacita 6 hmotnostních % vodíku (včetně hmotnosti nádrže a příslušenství) a 45g vodíku/l.

Adsorpce vodíku na různých MOFech dosahuje při teplotě kapalného dusíku uspokojivých výsledků. Problém však nastává při běžných teplotách, takže se hledají způsoby, jak zvýšit interakci vodíku s mřížkou MOFu. Možnosti jsou různé, například použití pórů vhodné velikosti (experimentální výsledky naznačují, že by to mohlo být kolem 6 Å [20]), využití vyšší interakce vodíku s nenasyčeným kovovým centrem (UMC) [21], použití polyedrálních stavebních jednotek tvořících klec, kde by mohly být molekuly vodíku zachyceny a kineticky uvězněny nebo třeba využití ZMOF [12] (zeolite-like MOF), kde je díky nabitě mřížce vyšší intenzita interakce s vodíkem než v mřížce bez náboje.

#### 4.2.2 Skladování oxidu uhličitého

V rámci ochrany životního prostředí se vědci stále snaží najít nejlepší způsob omezení emisí CO<sub>2</sub> coby skleníkového plynu do ovzduší. Prvním krokem je separace CO<sub>2</sub> ze směsi plynů, k čemuž existuje několik různých postupů, jedním z nich může být i selektivní adsorpce CO<sub>2</sub> na MOFech. Poté je nutno zachycené CO<sub>2</sub> dále zpracovat. Jednou z možností je skladovat CO<sub>2</sub> na pevném adsorbentu, se kterým se pak dá lehce manipulovat. V souvislosti se skladováním a separací CO<sub>2</sub> zaznamenávala z počátku nejvíce pozornosti skupina materiálů IRMOF [2], v současné době však již existuje mnoho MOFů, které vykazují větší adsorpční kapacitu či selektivitu pro CO<sub>2</sub> (MOF-177 [22], Mg\DOBD [23], ZIF-69 [24]). Například na ZIF-69 o objemu 1 litr lze za pokojové teploty a normálního tlaku naadsorbovat 83 litrů CO<sub>2</sub>.

### 4.3 Katalýza

MOFy mají coby katalyzátory velký potenciál díky tomu, že lze relativně snadno navrhnout MOF potřebných vlastností. V heterogenní katalýze je lze uplatnit coby pouhé nosiče aktivní komponenty (např. Cu na MOF-5 při syntéze metanolu ze syntézního plynu [25]) nebo jako katalyzátory samotné, kdy je katalytická aktivita lokalizována přímo v mřížce MOFu. Tyto látky se uplatňují coby katalyzátory acidobazické, redoxní, fotokatalyzátory či enantioselektivní katalyzátory. Vzhledem k nižší teplotní stabilitě, než mají běžné anorganické katalyzátory, jsou MOFy vhodné spíše pro syntézu chemických specialit, kde podmínky reakce bývají mírnější než u velkotonážních výrob.

Některé MOFy jsou přirovnávány k enzymům a to díky možnosti dynamické odezvy na "host-guest" interakci, specifické konstrukci

*Dokončení na další straně*

aktivního centra a architekturu umožňující těmto materiálům pracovat jako multi-katalyzátory.

#### 4.4 Biomedicínské aplikace

Uplatnění MOFů v medicíně se dá rozdělit dvou hlavních skupin, a to jednak jejich využití jako nosičů účinných látek na místo určení v těle, či mohou samy sloužit přímo jako aktivní látka.

Oproti stávajícím nosičům léčiv mají MOFy několik výhod. Lze vytvořit cíleně materiál (i netoxický) s vhodnou velikostí pórů pro danou účinnou látku, který je schopen pojmout velké množství této látky, takže lze dosáhnout mnohem vyššího poměru množství léčiva ku množství nosiče než doposud. Jako nosiče se uplatňují např. při transportu biologicky aktivního oxidu dusnatého [26], který má antibakteriální a antitrombotické účinky. Pro léčbu rakoviny jsou momentálně vyvíjeny nanonosiče, tzv. nanoscale metal-organic frameworks (NMOFs), které umožňují účinný a kontrolovaný transport léčiva v těle, např. cis-platiny [27].

Dále je možné MOFy využít jako kontrastní činidlo při magnetické rezonanci [28].

MOFy, které lze použít jako enantioselektivní katalyzátory, by se měly uplatnit také při výrobě léčiv chirálního charakteru.

#### 4.5 Senzory

MOFy se zdají být potenciálně zajímavé materiály pro plynové senzory [29]. Jejich vhodné vlastnosti pro toto využití jsou schopnost reversibilní sorpce, změna dielektrických vlastností způsobená adsorpcí a desorpcí, velká sorpční kapacita a možnost cílené syntézy materiálu s potřebnou strukturou. Mělo by být tedy možno selektivně detekovat i malá množství plynů měřením elektrického odporu. Nevýhodou většiny MOFů je však jejich nízká teplotní stabilita (cca do 400 °C), což omezuje použití takovýchto senzorů.

#### 4.6 Ukládání dat

Jednou z aplikací budoucnosti je využití některých krystalů MOFů ve výpočetní technice pro ukládání dat [30]. Je známo několik těchto látek, které mají při ochlazení tzv. multiferoické vlastnosti (jsou současně ferroelektrické, ferromagnetické a ferroelastické), což není příliš běžné. Pomocí těchto látek by tak mělo být možné dosáhnout větší kapacity pro skladování dat.

### Závěr

MOFy jsou materiály s velkým potenciálem pro využití v mnoha oblastech. Oproti jiným krystalickým látkám jsou výjimečné díky jejich variabilitě. Pomocí vhodných SBU a organických linkerů lze navrhnout a sestavit materiál o nejrůznějších žádaných vlastnostech, od velikosti a tvaru pórů po elektrické a magnetické vlastnosti mřížky. Stále probíhá intenzivní vývoj nových MOFů, zlepšování postupů pro jejich syntézu, vznikají nové postupy pro modelování výsledných vlastností MOFů na základě použitých SBU a linkerů. Veškerá tato snaha by měla v brzké době vést k jejich průmyslovému využití. Je pravděpodobné, že prvními významnou aplikací MOFů bude jejich použití pro separaci a skladování plynů (především CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>). V současné době již lze zakoupit i několik komerčně vyráběných MOFů.

### Literatura

- [1] BIRADHA, K.; RAMANAN, A.; VITTAL, J. J. *Coordination Polymers Versus Metal–Organic Frameworks*. *Crystal Growth & Design*. 2009, vol.9, is. 7, s. 2969–2970.
- [2] LOW, J.; SNURR, R.; YAGHI, O. *The Design of Metal Organic Frameworks for the Separation of Carbon Dioxide From Flue Gas and Gasification Streams*. In *Proceedings of the Fourth Annual Conference on Carbon Capture & Sequestration* [online]. 2005. Dostupné z WWW: <<http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/05/carbon-seq/Poster%20234.pdf>>.
- [3] YANG, P., et al. *THE CHEMISTRY OF NANOSTRUCTURED MATERIALS*. New Jersey : World Scientific Publishing, 2003. 386 s.
- [4] ROWSELL, J.; YAGHI, O. *Metal–organic frameworks: a new class of porous materials*. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2004, vol. 73, is. 1–2, s. 3–14.
- [5] KHAN, N.; HAQUE, E.; JHUNG, S. *Rapid syntheses of a metal-organic framework material Cu<sub>3</sub>(BTC)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>3</sub> under microwave: a quantitative analysis of accelerated syntheses*. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2010, vol. 12, no. 11, s. 2625–2631.
- [6] MUELLER, U., et al. *Metal–organic frameworks—prospective industrial applications*. *Journal of Materials Chemistry*. 2006, vol. 16, is. 7, s. 626–636.
- [7] PICHON, A.; LAZUEN-GARAY, A.; JAMES, S. *Solvent-free synthesis of a microporous metal–organic framework*. *CrystEngComm*. 2006, vol. 8, s. 211–214.
- [8] PICHON, A.; LAZUEN-GARAY, A.; JAMES, S. *Solvent-free synthesis of metal complexes*. *Chemical Society Review*. 2007, vol. 36, s. 846–855.
- [9] ALBRECHT, M., et al. *Organoplatinum crystals for gas-triggered switches*. *Nature*. 2000, no. 406, s. 970–974.
- [10] PETRUKHINA, M., et al. *Paracyclophanes as Versatile  $\pi$ -Donor Ligands Directing Formation of Extended Organometallic Networks*. *Organometallics*. 2006, vol. 25, is. 9, s. 2135–2142.
- [11] DÜREN, T.; BAE, Y.; SNURR, R. *Using molecular simulation to characterise metal–organic frameworks for adsorption applications*. *Chemical Society Review*. 2009, vol. 38, is. 5, s. 1237–1247.
- [12] NOUAR, F., et al. *Zeolite-like Metal–Organic Frameworks (ZMOFs) as Hydrogen Storage Platform: Lithium and Magnesium Ion-Exchange and H<sub>2</sub>( $\rho$ -ZMOF)*. *Journal of the American Chemical Society*. 2009, vol. 131, is. 8, s. 2864–2870.
- [13] HALPER, S., et al. *Topological Control in Heterometallic Metal–Organic Frameworks by Anion Templating and Metalloligand Design*. *Journal of the American Chemical Society*. 2006, vol. 128, is. 47, s. 15255–15268.
- [14] KUPPLER, R., et al. *Potential applications of metal-organic frameworks*. *Coordination Chemistry Reviews*. 2009, vol. 253, is. 23–24, s. 3042–3066.
- [15] KURMOO, M. *Magnetic metal–organic frameworks*. *Chemical Society Review*. 2009, vol. 38, is. 5, s. 1353–1379.
- [16] SERRE, C., et al. *Very Large Breathing Effect in the First Nanoporous Chromium(III)-Based Solids: MIL-53 or CrIII(O-H)•{O<sub>2</sub>C–C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>–CO<sub>2</sub>}•{HO<sub>2</sub>C–C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>–CO<sub>2</sub>H}<sub>x</sub>•H<sub>2</sub>O<sub>y</sub>*. *Journal of the American Chemical Society*. 2002, vol. 124, is. 45, s. 13519 - 13526.
- [17] DYBTSEV, D.; CHUN, H.; KIM, K. *Rigid and Flexible: A Highly Porous Metal-Organic Framework with Unusual Guest-Dependent Dynamic Behavior*. *Angewandte Chemie*. 2004, vol. 43, is. 38, s. 5033–5036.
- [18] LAMIA, N., et al. *Adsorption of propane, propylene and isobutane on a metal–organic framework: Molecular simulation and experiment*. *Chemical Engineering Science*. 2009, vol. 64, is. 14, s. 3246–3259.
- [19] U.S. Department of Energy : *Hydrogen Program* [online]. 2010 [cit. 2010-05-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.hydrogen.energy.gov/>>.
- [20] WANG, Q.; JOHNSON, J. *Molecular simulation of hydrogen adsorption in single-walled carbon nanotubes and idealized carbon slit pores*. *Journal of Chemical Physics*. 1999, vol. 110, s. 577.
- [21] DINCA, M.; LONG, J. *Hydrogen Storage in Microporous Metal-Organic Frameworks with Exposed Metal Sites*. *Angewandte Chemie*. 2008, vol. 47, is. 36, s. 6766–6779.
- [22] MILLWARD, A.; YAGHI, O. *Metal–Organic Frameworks with Exceptionally High Capacity for Storage of Carbon Dioxide at Room Temperature*. *Journal of the American Chemical Society*. 2005, vol. 127, is. 51, s. 17998–17999.

- [23] YAZAYDIN, O., et al. *Screening of Metal–Organic Frameworks for Carbon Dioxide Capture from Flue Gas Using a Combined Experimental and Modeling Approach*. Journal of the American Chemical Society. 2009, vol. 131, is. 51, s. 18198–18199.
- [24] BANERJEE, R., et al. *High-Throughput Synthesis of Zeolitic Imidazolate Frameworks and Application to CO<sub>2</sub> Capture*. Science. 2009, vol. 319, no. 5865, s. 939–943.
- [25] CZAJA, A.; TRUKHAN, N.; MÜLLER, U. *Industrial applications of metal–organic frameworks*. Chemical Society Review. 2009, vol. 38, is. 5, s. 1284–1293.
- [26] HINKS, N., et al. *Metal organic frameworks as NO delivery materials for biological applications*. Microporous and Mesoporous Materials. 2010, vol. 129, is. 3, s. 330–334.
- [27] LIN, W. *Metal-Organic Frameworks as Potential Drug Carriers*. SciTopics [online]. 2010 [cit. 2010-05-27]. Dostupný z WWW: <[http://www.scitopics.com/Metal\\_Organic\\_Frameworks\\_as\\_Potential\\_Drug\\_Carriers.html](http://www.scitopics.com/Metal_Organic_Frameworks_as_Potential_Drug_Carriers.html)>.
- [28] TAYLOR, K.; RIETER, W.; LIN, W. *Manganese-Based Nanoscale Metal–Organic Frameworks for Magnetic Resonance Imaging*. Journal of the American Chemical Society. 2008, vol. 130, is. 44, s. 14358–14359.
- [29] ACHMANN, S., et al. *Metal-Organic Frameworks for Sensing Applications in the Gas Phase*. Sensors. 2009, vol.9, is. 3, s. 1574–1589.
- [30] PIPER, K. *Crystals Could Offer High-Tech Data Storage Solutions*. The Epoch Times [online]. Feb 20, 2010, no. [cit. 2010-05-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.theepochtimes.com/>>.

## Abstract

### STRUCTURE, PROPERTIES AND APPLICATION OF MOFS

**Summary:** There is described comprehensive foundation to Metal-Organic Frameworks (MOFs) in this paper. After some introduction, there is described their structure, properties, ways of synthesis and possibilities of usage.

**Key words:** Metal-Organic Framework, nanomaterials, gas adsorption