

# ***Metal Organic Framework (MOF): Sintesis Zeolitic Imidazolate Framework-8 (ZIF-8)***

**<sup>1</sup>Jofrishal, <sup>2</sup>Rahmatul Fajri**

<sup>1</sup>*Program Studi Pendidikan Kimia FKIP Universitas Samudra*

<sup>2</sup>*Program Studi Kimia FMIPA Universitas Samudra*

[jofrishal@unsam.ac.id](mailto:jofrishal@unsam.ac.id)

## **Abstrak**

*Zeolitic Imidazolate Framework-8 (ZIF-8)* merupakan salah satu bagian dari *Metal Organic Framework (MOF)*. ZIF-8 memiliki struktur molekul ( $\text{Zn}(\text{C}_4\text{H}_5\text{N}_2)_2$ ) dan memiliki kelebihan yang berbeda dibandingkan dengan jenis MOF yang lain yaitu, memiliki luas permukaan yang besar, volume pori besar dan stabilitas termal yang baik. ZIF-8 banyak digunakan dalam berbagai aplikasi antara lain, sebagai penyimpan gas, material pemisah, katalis heterogen dan sensor kimia. Sintesis ZIF-8 pada umumnya dapat dilakukan dengan metode solvotermal dan hidrotermal. Pada metode solvotermal pelarut yang digunakan adalah pelarut organik. Seperti, dimetilformamida (DMF), dietilformamida (DEF), metanol (MeOH) atau campuran DMF dan MeOH (Bustamate dkk., 2014). Sedangkan untuk metode hidrotermal menggunakan air sebagai pelarut.

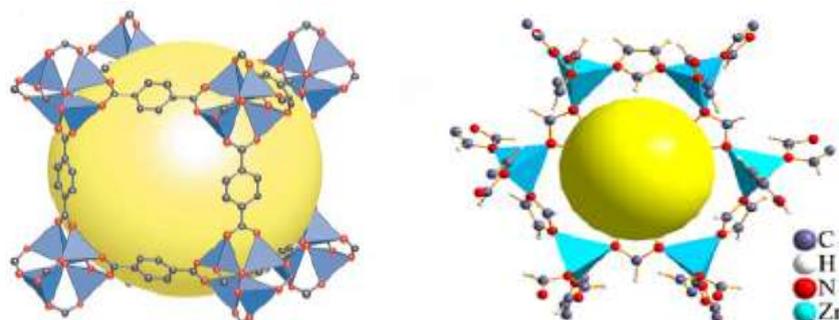
Kata kunci: *Metal Organic Framework (MOF)*, *Zeolitic Imidazole Framework (ZIF)*, Sintesis

## **PENDAHULUAN**

### **Tinjauan Umum tentang MOF**

Metal Organic Framework (MOF) merupakan suatu golongan material hibrida organik-anorganik yang dibangun dari kluster logam yang saling berhubungan melalui suatu ligan rantai organik (Choi dkk., 2008). Struktur MOF dipengaruhi oleh karakteristik dari ligan penyusunnya seperti sudut, panjang ligan, bulkiness, dan kiralitas. Beberapa sub kelas MOF yang banyak dilaporkan adalah ZIF (*Zeolitic Imidazolate Frameworks*), IRMOF (*Isoreticular Metal Organic Frameworks*), HKUST (*Hongkong University of Science and Technology*), dan MIL (*Material Institute Lavoisier*). Material ini mempunyai banyak variasi susunan struktur kerangka. Beberapa peneliti telah melaporkan

sintesis dari MOF-5 (IRMOF-1), IRMOF-20, HKUST-1, ZIF-8, ZIF-7 dan  $\text{Mn}(\text{HCO}_2)_2$  (Zhang dkk., 2011).



Gambar 1. Struktur MOF-5 (Yaghi dkk., 2003) dan ZIF-8 (Jian dkk., 2015)

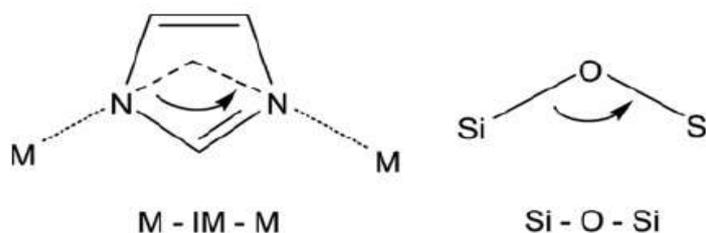
MOF salah satu material yang memiliki karakteristik menarik seperti volume besar, ukuran pori besar dan kristalinitas tinggi (Nordin dkk., 2014). Material MOF umumnya memiliki volume pori pada kisaran 0,2 hingga 0,8  $\text{cm}^3/\text{g}$ , namun pada beberapa MOF ukuran porinya dapat mencapai 1,1  $\text{cm}^3/\text{g}$  (Rowsell dkk., 2004). Disisi lain, MOF juga memiliki luas permukaan yang besar. Beberapa peneliti melaporkan luas permukaan (BET), seperti MOF-5 (300  $\text{m}^2/\text{g}$ ), Co-MOF-74 (1314  $\text{m}^2/\text{g}$ ), dan Mg-MOF-74 (1332  $\text{m}^2/\text{g}$ ). Apabila dibandingkan dengan zeolit maka luas permukaan MOF jauh lebih besar. Zeolit Y memiliki luas permukaan yang paling besar yaitu (900  $\text{m}^2/\text{g}$ ), zeolit beta (710  $\text{m}^2/\text{g}$ ), ZSM-5 (425  $\text{m}^2/\text{g}$ ) dan mordenit (500  $\text{m}^2/\text{g}$ ) (Nordin dkk., 2014). Oleh sebab itu MOF lebih unggul dibandingkan dengan material berpori lainnya seperti zeolit, karbon aktif dan lain-lain (Kuppler dkk., 2009). MOF biasanya stabil pada suhu 250 °C namun rekor terbaik menunjukkan bahwa kerangka MOF mampu mempertahankan diri sampai bahkan lebih tinggi dari 500 °C (Jiang dkk., 2013). Keunggulan tersebut menjadikan MOF dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang, seperti katalis, material penyimpan hidrogen, material pemisah dan penukar ion. MOF yang telah digunakan untuk penyimpanan hidrogen adalah MOF-5, MOF-74, MOF-177, HKUST-1, MIL-100, MIL-101, dan ZIF-95, IRMOF-8, dan MOF-C30 (Xiao dan Yuan 2009; Yang dkk., 2014). Material yang

diaplikasikan sebagai katalis diantaranya adalah  $\text{Cu}_3(\text{BTC})_2$ , MIL-101, dan PCN-100 (Xuan dkk., 2011).

Salah satu jenis MOF yang terus dikembangkan adalah *Zeolitic Imidazolate Frameworks* (ZIF). ZIF terbentuk dari kation logam divalent yang dihubungkan dengan anion imidazol membentuk struktur kerangka tetrahedral yang memiliki struktur mirip zeolit (Cravillon dkk., 2009).

### ***Zeolitic Imidazolate Framework (ZIF)***

*Zeolitic Imadazolate Framwork* (ZIF) adalah material kristalin yang berpori dengan struktur tiga dimensi dari ion logam dan ligan organik yang berbentuk tetrahedral dengan jembatan imidazol (Phan dkk., 2010). ZIF memiliki struktur kristal yang sama dengan zeolit, keduanya memiliki persamaan yaitu, pada ZIF jembatan dari fragmen logam-imidazol-logam (M-Im-M), sedangkan pada zeolit Si-O-Si yang memiliki sudut ikatan  $140^\circ$ , seperti ditunjukkan pada Gambar 2. (Choi dkk., 2014). ZIF dan zeolit juga memiliki sifat yang sama, yaitu memiliki kristalinitas yang baik, mikroporositas yang baik, luas permukaan yang besar, stabilitas kimia dan stabilitas termal yang baik (Venna dkk., 2010).



Gambar 2. Sudut ikatan dalam logam dengan Imidazol dan Zeolit

(Park dkk., 2006).

Struktur kerangka ZIF terbentuk dari reaksi ligan imidazol dengan logam yang berbeda seperti Zn dan Co (Venna dkk., 2010). ZIF memiliki beberapa topologi struktur kerangka kristal. Topologi ini sesuai dengan koordinasi logam dan ligan yang membentuk struktur ZIF. Beberapa topologi struktur kerangka ZIF yaitu *Body Center Tetragonal* (BCT), *Davy Faraday Two* (DFT), *Sodalit* (SOD),

Rhombohedral (RHO) dan Merlioneite (MER) (Park dkk., 2006). Komposisi dan topologi dari beberapa jenis ZIF-8 ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi, topologi dan diameter ZIF (Park dkk., 2006)

ZIF-n	Komposisi	Topologi	Diameter (Å)
ZIF-1	Zn(IM) <sub>2</sub>	BCT	6,94
ZIF-2	Zn(IM) <sub>2</sub>	BCT	6,00
ZIF-3	Zn(IM) <sub>2</sub>	DFT	8,02
ZIF-4	Zn(IM) <sub>2</sub>	-	2,04
ZIF-5	In <sub>2</sub> Zn <sub>3</sub> (IM) <sub>12</sub>	-	3,03
ZIF-6	Zn(IM) <sub>2</sub>	GIS	8,80
ZIF-7	Zn(PhIM) <sub>2</sub>	SOD	4,31
ZIF-8	Zn(MeIM) <sub>2</sub>	SOD	11,60
ZIF-9	Co(PhIM) <sub>2</sub>	SOD	4,31
ZIF-10	Zn(IM) <sub>2</sub>	MER	12,12
ZIF-11	Zn(PhIM) <sub>2</sub>	RHO	14,64

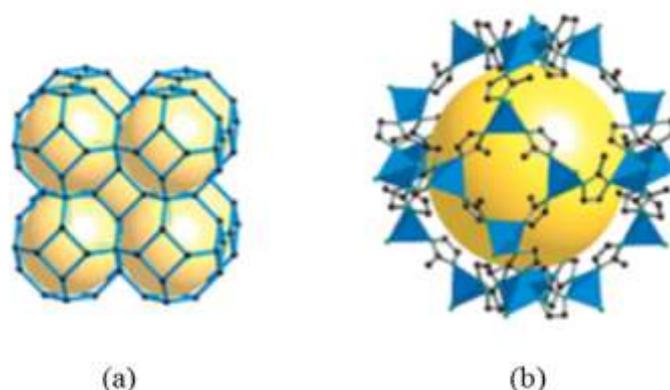
Keterangan:

- BCT : *Body-Centered Tetragonal*
- DFT : *Devy Faraday Two*
- GIS : *Gismondine*
- SOD : *Sodalit*
- MER : *Merlinoite*
- RHO : *Rhombohedral*

### ***Zeolitic Imidazolate Framework-8 (ZIF-8)***

*Zeolitic Imidazolate Framework-8* merupakan salah satu bagian dari MOF. ZIF-8 adalah jenis MOF yang banyak diteliti dan dipelajari oleh para peneliti. ZIF-8 memiliki struktur molekul (Zn(C<sub>4</sub>H<sub>5</sub>N<sub>2</sub>)<sub>2</sub>). ZIF-8 merupakan jenis ZIF yang mempunyai struktur kerangka berbentuk sodalit (SOD) yang dapat dilihat pada Gambar 3. Kerangka ZIF-8 terbentuk atas interaksi antara kation Zn<sup>2+</sup> dan ligan 2-metilimidazol yang terkoordinasi secara tetrahedral membentuk jaringan 3 dimensi, dan mempunyai ukuran pori-pori 3,4 Å. Topologi ZIF-8 dibentuk oleh cincin segi empat dan enam dari klaster ZnN<sub>4</sub> dengan rongga internal berdiameter

1,16 nm yang dihubungkan dengan jendela 0,34 nm (Cho dkk., 2013). Pan dkk. (2011) telah menjelaskan bahwa ZIF-8 mempunyai kelebihan dibanding zeolit. Kerangka hibrida dalam beberapa strukturnya dapat dikembangkan dan dimodifikasi pada daerah permukaan sehingga mempunyai bentuk dan sifat permukaan yang rasional. Selain itu, jika dibandingkan dengan jenis MOF yang lain, ZIF-8 mempunyai kestabilan termal dan kimia yang lebih baik. ZIF-8 memiliki stabilitas termal 550 °C dalam N<sub>2</sub> dan luas permukaan BET sebesar 1947 m<sup>2</sup>/g serta volume pori sebesar 0,663 cm<sup>3</sup>/g. Sedangkan kestabilan termal jenis ZIF dan MOF lain seperti ZIF-11 mencapai 250 °C (Park dkk., 2006), ZIF-67 mencapai 380 °C (Shi dkk., 2011), MOF-5 mencapai 450 °C (Li dkk., 2009) dan UiO-66 sebesar 400 °C (Kandiah dkk., 2010). Hal tersebut merupakan keunggulan ZIF-8 jika dibandingkan dengan jenis ZIF yang lainnya (Park dkk., 2006).



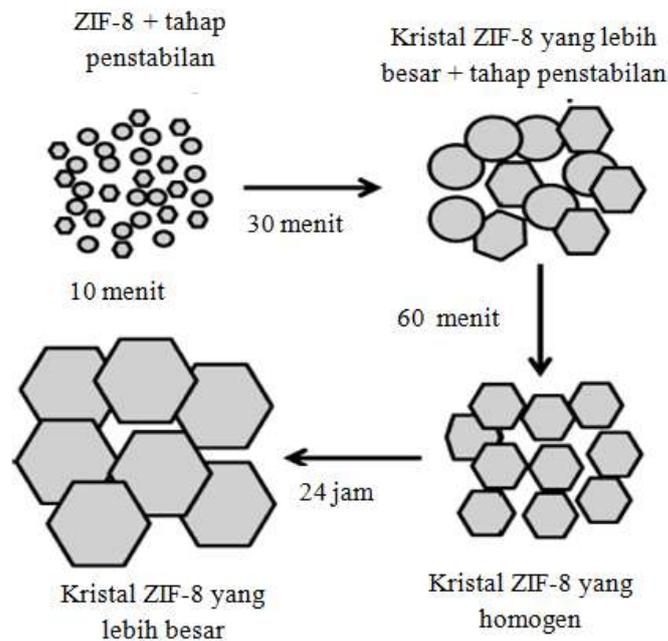
Gambar 3. (a) Kerangka Sodalit ZIF-8 (SOD) dan (b) Unit Satuan ZIF-8 (Park dkk., 2006).

### **Sintesis Zeolitic Imidazolate Framework-8**

Sintesis ZIF-8 pada umumnya dilakukan dengan menggunakan metode solvotermal dan hidrotermal. Pada metode solvotermal pelarut yang digunakan adalah pelarut organik. Seperti, dimetilformamida (DMF), dietilformamida (DEF), metanol (MeOH) atau campuran DMF dan MeOH (Bustamate dkk., 2014). Sedangkan untuk metode hidrotermal menggunakan air sebagai pelarut. Zhang dkk. 2011 telah melaporkan hasil sintesis ZIF-8 dengan menggunakan solvotermal dalam pelarut DMF. Sintesis yang dilakukan dalam waktu 24 jam dan

perbandingan rasio molar yang digunakan adalah 1:1 untuk  $Zn^{2+}$ /metilimidazol. ZIF-8 yang dihasilkan memiliki luas permukaan BET sebesar  $1025 \text{ m}^2/\text{g}$ , volume pori  $0,45 \text{ cm}^3/\text{g}$ , dan volume total pori adalah  $0,54 \text{ cm}^3/\text{g}$ . Sebelumnya juga telah dilakukan penelitian oleh Park dkk (2006), Seng nitrat dan metilimidazol direaksikan pada media pelarut yang dipanaskan hingga suhu  $140 \text{ }^\circ\text{C}$  selama 24 jam. Kemudian, campuran dibiarkan pada suhu kamar dan larutan induk dipisahkan dari padatan ZIF-8 dengan proses dekantasi. Pelarut yang tersisa pada ZIF-8 kemudian dihilangkan dengan penambahan kloroform. Selanjutnya, padatan dicuci dengan DMF dan dikeringkan pada udara terbuka selama 5 menit. ZIF-8 dari sintesis tersebut memiliki diameter pori  $11,6 \text{ \AA}$ , volume pori  $0,663 \text{ cm}^3/\text{g}$  dan luas permukaan  $1,947 \text{ m}^2/\text{g}$ .

Selanjutnya Venna dkk. (2010) melakukan sintesis ZIF-8 dengan menggunakan metanol sebagai pelarut. Waktu sintesis yang diperlukan yaitu 5 jam dengan suhu  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Perbandingan molar  $Zn^{2+}$ /metilimidazol sebesar 1:8. Material ZIF-8 dari hasil sintesis tersebut memiliki luas permukaan sebesar  $1072 \text{ m}^2/\text{g}$  dan ukuran partikel  $\sim 45 \text{ nm}$ . Dalam hal ini Venna dkk. (2010) menunjukkan perubahan struktur ZIF-8 yang terus meningkat dengan peningkatan waktu, dapat dilihat pada Gambar 4. ZIF-8 yang disintesis dengan metode solvotermal menghasilkan stabilitas termal yang lebih baik yaitu dapat terdekomposisi pada suhu  $450 - 550 \text{ }^\circ\text{C}$  (Park dkk., 2006; Nguyen dkk., 2012 dan Zhou dkk., 2009).



Gambar 4. Tahap pembentukan kristal ZIF-8 sebagai fungsi waktu dengan pelarut metanol (Venna dkk., 2010)

Sintesis ZIF-8 dengan pelarut ammonia telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Chen dkk. (2014) melakukan sintesis dengan pelarut ammonia pada keadaan suhu kamar selama 24 jam. Pada penelitian tersebut variasi rasio molar yang digunakan adalah  $\text{Zn}^{2+}$ /metilimidazol/ $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  sebesar 1:2. Hasil sintesis menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi ammonia maka ukuran kristal ZIF-8 yang dihasilkan semakin kecil, yaitu dari 10 ke 2  $\mu\text{m}$ . Namun hal tersebut berbanding lurus dengan luas permukaan. Luas permukaan ZIF-8 yang dihasilkan meningkat 60%, dari 1000 menjadi 1600  $\text{m}^2/\text{g}$ .

Keberhasilan dalam mensintesis ZIF-8 terus dikembangkan. Beberapa peneliti telah mensintesis ZIF-8 menggunakan air sebagai pelarut. Pan dkk. (2011) melaporkan hasil sintesis ZIF-8 dalam pelarut air. Sintesis dilakukan pada keadaan suhu kamar dengan pengadukan selama 5 menit. Material ZIF-8 yang dihasilkan memiliki *yield* 80%, ukuran kristal ~ 85 nm, luas permukaan 1079  $\text{m}^2/\text{g}$  dan stabil hingga suhu 400 °C. Perbandingan logam dan ligan yang digunakan dalam sintesis ini adalah sebesar 1:70:1288 ( $\text{Zn}^{2+}$ /metilimidazol/air). Kemudian, Kida dkk. (2013) melakukan sintesis dalam pelarut air. Rasio molar yang

digunakan dalam penelitian tersebut cenderung lebih kecil, yaitu 1:40 ( $Zn^{2+}$ /metilimidazol). Kondisi operasional yang telah dikembangkan dalam upaya sintesis ZIF-8 ditampilkan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Kondisi Operasional dalam sintesis ZIF-8

Sumber	Reaktan	Kondisi		Pelarut	Hasil
		Mol	Suhu		
Park dkk., (2006)	$Zn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ + 2-MeIm	-	140 °C	DMF	Volume pori 0,663 $cm^3/g$ , luas permukaan 1,947 $m^2/g$
Cravillon dkk., (2009)	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ +Hmim	1:8	Suhu kamar	metanol	Ukuran partikel 50 nm, dan yield 50%.
Venna dkk., (2010)	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ + 2-MeIm	1:8	150 °C	metanol	Luas permukaan 1072 $m^2/g$ , ukuran partikel ~45 nm.
Pan dkk., (2011)	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ + 2-MeIm	1:70	Suhu kamar	air	Yield 80%, ukuran kristal ~85 nm, luas permukaan 1079 $m^2/g$ , stabil hingga suhu 400 °C.
Gross dkk., (2012)	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ + 2-MeIm	1:4	Suhu kamar	air	Luas permukaan 528 $m^2/g$ , volume pori 0,21 $m^3/g$
Bao dkk., (2013)	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ + Hmim	5:2	MI	air	Luas permukaan 1075 dan 1416 $m^2/g$ , dan ukuran partikel 350 dan 190 nm.
Kida dkk., (2013)	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ + 2-MeIm	1:40	Air	air	
Bustamate dkk., (2014)	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ + 2-MeIm	1:8	Suhu kamar	DMF, metanol, air	Dalam metanol kristalinitasnya tinggi.
Nordin dkk., (2014)	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ + 2-MeIm	1:6	Suhu kamar	air	Yield 90%, ukuran partikel 133,69±41,21 nm, luas permukaan 418, 44 $m^2/g$ .

## Kesimpulan

ZIF-8 merupakan bagian dari MOF yang dapat disintesis dengan beberapa metode, yaitu dengan metode solvotermal dan hidrotermal. Pada metode

solvothermal pelarut yang digunakan adalah pelarut organik. Seperti, dimetilformamida (DMF), dietilformamida (DEF), metanol (MeOH) atau campuran DMF dan MeOH (Bustamate dkk., 2014). Sedangkan untuk metode hidrotermal menggunakan air sebagai pelarut. Keberhasilan sintesis ZIF-8 juga sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain adalah waktu yang digunakan selama proses sintesis, rasio perbandingan molar yang digunakan serta suhu yang digunakan.

### Daftar Rujukan

- Bao, Q., lou, Y., Xiang, T., Chen, J. (2013), Rapid Synthesis of Zeolitic Imidazolate Framework-8 (ZIF-8) in Aqueous Solution Via Microwave Irradiation. *Inorganic Chemistry Communication* **37**, 170-173.
- Bustamate, E. L., Frenández, J. L., Zamaro, J. M. (2014), Influence of The Solvent in The Synthesis of Zeolitic Imidazolate Framework-8 (ZIF-8), Nanocrystals at Room Temperature. *Journal of Colloid and Interface Science* **424**, 37-43.
- Chen, B., Bai, F., Zhu, Y., Xia, Y. (2014), A Cost-effective Method for the Synthesis of Zeolitic Imidazolate Framework-8 Materials from Stoichiometric Precursors via Aqueous Ammonia Modulation at Room Temperature. *Microporous and Mesoporous Material* **193**, 7-14.
- Cho, H. Y., Kim, J., Kim, S. N., Ahn, W. S. (2013), High Yield 1-L Scale Synthesis of ZIF-8 Via a Sonochemical Route. *Microporous and Mesoporous Materials* **169**, 180-184.
- Choi, J. S., Son, W. J., Ahn, W. S. (2008), Metal–Organic Framework MOF-5 Prepared by Microwave Heating: Factors to be Considered. *Microporous and Mesoporous Material* **116**, 727-731.
- Cravillon, J., Münzer, S., Lohmeier, S. J., Feldhoff, A., Huber, J., Wiebcke, M. (2009), Rapid Room-Temperature Synthesis and Characterization of Nanocrystals of a Prototypical Zeolitic Imidazolate Framework. *America Chemistry Society* **21**, 1410-1412.
- Gross, A. F., Sherma, E., Vajo, J. J. (2012), Aqueous Room Temperature Synthesis of Cobalt and Zinc Sodalite Zeolitic Imidizolate Frameworks. *The Royal Society of Chemistry* **41**, 5458-5460.

- Jiang, H. L., Feng, D., Wang, K., Gu, Z. Y., Wei, Z., Chen, Y. P., Zhou, H. C. (2013), An Exceptionally Stable, Porphyrinic Zr Metal–Organic Framework Exhibiting pH-Dependent Fluorescence. *American Chemical Society* **135**, 13934-13938.
- Kida, K., Okita, M., Fujita, K., Tanaka, S., Miyake, Y. (2013), Formation of High Crystalline ZIF-8 in an Aqueous Solution. *Crystal Engineering Communication* **15**, 1794-1801.
- Kuppler, R. J., Timmons, D. J., Fang, Q. R., Li, J. R., Makal, T. A., Young, M. D., Yuan, D., Zhao, D., Zhuang, W., Zhou, H. C. (2009), Potential Applications of Metal-Organic Frameworks. *Coordination Chemistry Reviews* **253**, 3042-3066.
- Nguyen, L. T. L., Le, K. K. A., Phan, N. T. S. (2012), A Zeolitic Imidazolate Framework ZIF-8 Catalyst for Friedel-Craftscacylation. *Chienese Journal of Catalysis* **33(4)**, 688-698.
- Nordin, N. A. H. M., Ismail, A. F., Mustafa, A., Goh, P. S., Rana, D., Matsuura, T. (2014), Aqueous Room Temperature Synthesis of Zeolitic Imidazole Framework 8 (ZIF-8) with Various Concentrations of Triethylamine. *The Royal Society of Chemistry* **4**, 33292-33300.
- Pan, Y., Liu, Y., Zeng, G., Zhao, L., Lai, Z. (2011), Rapid Synthesis of Zeolitic Imidazolate Framework-8 (ZIF-8) Nanocrystals in an Aqueous System. *The Royal Society of Chemistry* **47**, 2017-2073.
- Park, K. S., Ni, Z., Côté, A. P., Choi, J. Y., Huang, R., Uribe-Romo, F. U., Chae, H. K., O’Keeffe, M., Yaghi, O. M. (2006), Exceptional Chemical and Thermal Stability of Zeolitic Imidazolate Frameworks. *PNAS* **103**, 10187-10191.
- Phan, A., Doonan, C. J., Uribe-Romo, F. J., Knöbber, C. B., O’Keeffe, M., Yaghi, O. M. (2010), Synthesis, Structure, and Carbon Dioxide Capture Properties of Zeolitic Imidazolate Frameworks. *Accounts of Chemical Research* **43**, 58-67.
- Shi, Q., Chen, Z., Song, Z., Li, J., Dong, J. (2011), Synthesis of ZIF-8 and ZIF-67 by Steam-Assisted Conversion and an Investigation of Their Tribological Behaviors. *Angewandte Chemie* **50**, 672-675.
- Venna, S. R., Jasinski, J. B., Carreon, M. A. (2010), Structural Evolution of Zeolitic Imidazolate Framework-8. *Journal of American Chemistry Society* **132**, 18030-18033.
- Xiao, B dan Yuan, Q. (2009), Nanoporous Metal Organic Framework Material for Hydrogen Storage. **7**, 129-140.

- Xuan, W., Zhu, C., Liu, Y., Cui, Y. (2011), Mesoporous Metal Organic Framework Material. *Chemical Society Review* **41**, 1677-1695.
- Yaghi, O. M., O'Keeffe, M., Ockwig, H., Eddaoudi, M., Kim, J. (2003), Reticular Synthesis and the Design of New Materials. *Nature Publishing Group* **423**, 705-714.
- Yang, H., He, X. W., Wang, F., Kang, F., Zhang, J. (2012), Doping Copper into ZIF-67 for Enhancing Gas Uptake Capacity and Visible-Light-Driven Photocatalytic Degradation of Organic Dye. *Journal of Materials Chemistry*. **22**. 21849-21851.
- Zhang, Z., Xian, S., Xi, H., Wang, H., Li, Z. (2011), Improvement of CO<sub>2</sub> Adsorption on ZIF-8 Crystals Modified by Enhancing Basicity of Surface. *Chemical Engineering Science* **66**, 4878-4888.
- Zhou, M., Wang, Q., Zhang, L., Liu, Y. C., Kang, Y. (2009), Adsorption Sites of Hydrogen in Zeolitic Imidazolate Frameworks. *Physical Chemistry* **113**, 11049-11053.