

**Sintesis dan Karakterisasi *Zeolitic Imidazolate Framework-4 (ZIF-4)* serta
Aplikasinya sebagai Katalis Reaksi Esterifikasi**

SKRIPSI

Diajukan Untuk Memenuhi Sebagian Dari Persyaratan Memperoleh Gelar Sarjana Sains Program
Studi Kimia



Oleh

Ahmad Chandra M.

1504472

**PROGRAM STUDI KIMIA
DEPARTEMEN PENDIDIKAN KIMIA
FAKULTAS PENDIDIKAN MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS PENDIDIKAN INDONESIA
BANDUNG
2020**

Ahmad Chandra Maulana, 2020

*SINTESIS DAN KARAKTERISASI ZEOLITIC IMIDAZOLATE FRAMEWORK-4 (ZIF-4) SERTA APLIKASINYA SEBAGAI
KATALIS REAKSI ESTERIFIKASI*

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

Lembar Hak Cipta

Sintesis dan Karakterisasi *Zeolitic Imidazolate Framework-4* (ZIF-4) serta Aplikasinya sebagai Katalis Reaksi Esterifikasi

Oleh
Ahmad Chandra M.

Skripsi yang Diajukan untuk Memenuhi Sebagian dari Persyaratan Mendapatkan
Gelar Sarjana Sains Program Studi Kimia

©2020
Universitas Pendidikan Indonesia
Januari 2020

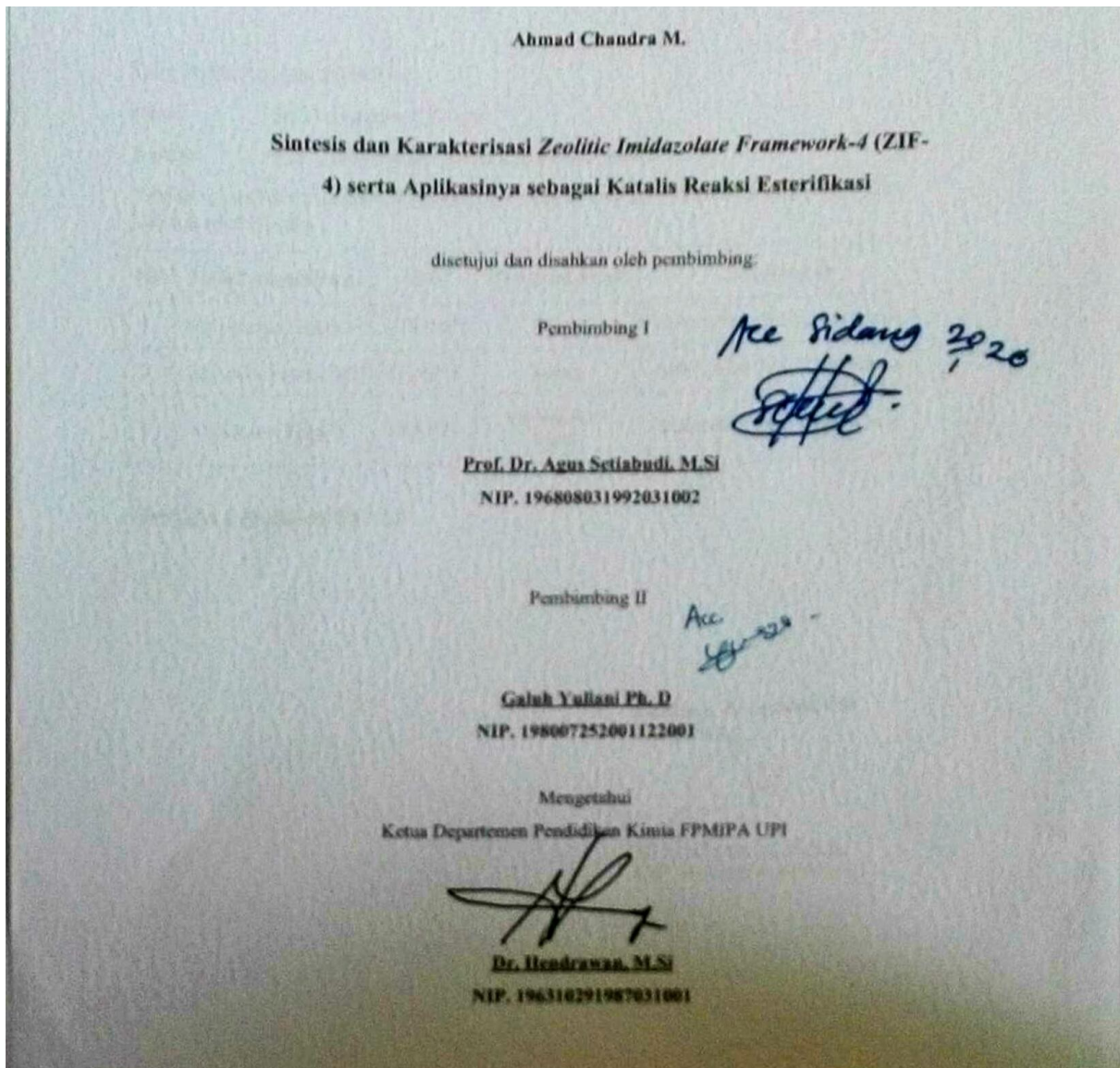
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Skripsi ini tidak boleh diperbanyak seluruhnya atau sebagian dengan dicetak ulang, difotokopi, atau cara lainnya tanpa izin dari penulis.

Ahmad Chandra Maulana, 2020
SINTESIS DAN KARAKTERISASI ZEOLITIC IMIDAZOLATE FRAMEWORK-4 (ZIF-4) SERTA APLIKASINYA SEBAGAI KATALIS REAKSI ESTERIFIKASI

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

Halaman Pengesahan



Ahmad Chandra Maulana, 2020
**SINTESIS DAN KARAKTERISASI ZEOLITIC IMIDAZOLATE FRAMEWORK-4 (ZIF-4) SERTA
APLIKASINYA SEBAGAI KATALIS REAKSI ESTERIFIKASI**

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

Kata Pengantar

Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT, Tuhan semesta alam yang telah memberikan kesempurnaan akal bagi manusia sehingga mampu mendapatkan ilmu pengetahuan sebagai cahaya penerang jalan dalam kehidupan.

Alhamdulillah atas segala kemudahan dan petunjuk yang diberikan Allah SWT. Penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini. Skripsi yang berjudul "**Sintesis dan Karakterisasi Zeolitic Imidazolate Framework-4 (ZIF-4) serta Aplikasinya sebagai Katalis Reaksi Esterifikasi**". Skripsi ini disusun dengan tujuan untuk menyelesaikan studi S1 pada program studi Kimia Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung.

Penulis sangat menyadari bahwa hasil tulisan ini masih terdapat banyak kekurangan dan kesalahan, baik dalam segi penulisan maupun dalam penjelasan yang jauh dari kata sempurna. Penulis sangat terbuka dan sangat mengharapkan adanya kritik maupun masukan untuk kebaikan tulisan ini. Penulis juga berharap hasil karya tulis ini bermanfaat bagi Ilmu pengetahuan sekaligus pembaca.

Bandung, Januari 2020

Penulis

Ahmad Chandra M.

1504472

Ahmad Chandra Maulana, 2020

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI ZEOLITIC IMIDAZOLATE FRAMEWORK-4 (ZIF-4) SERTA
APLIKASINYA SEBAGAI KATALIS REAKSI ESTERIFIKASI**

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

Sintesis dan Karakterisasi *Zeolitic Imidazolate Framework-4* (ZIF-4) serta Aplikasinya sebagai Katalis Reaksi Esterifikasi

Abstrak

Perbaikan metode sintesis *Zeolitic Imidazolate Framework-4* (ZIF-4) saat ini masih menjadi perhatian peneliti, demikian halnya dengan aplikasinya sebagai katalis. ZIF-4 memiliki kerapatan logam Zinc per volume (T/V) yang relatif tinggi. Dengan demikian berpotensi menjadi katalis reaksi asam basa, khususnya reaksi esterifikasi. Sehingga, dalam studi ini, ZIF-4 disintesis menggunakan metode solvothermal Zinc Asetat dihidrat (logam) dan Imidazole (*linker*). Sintesis menggunakan perbandingan logam dan *linker* sebesar 1:4 dengan pelarut dimetil formamide (DMF) dalam *oil bath* pada suhu 130°C dengan variasi waktu 24—48 jam. ZIF-4 hasil sintesis juga dikarakterisasi menggunakan teknik difraksi sinar-x (XRD), spektroskopi *fourier transform infrared* (FT-IR), mikroskop elektron (SEM), analisa thermal (TG-DTA), dan pengukuran luas permukaan menggunakan gas nitrogen. Berdasarkan hasil karakterisasi XRD, terkonfirmasi bahwa senyawa ZIF-4 telah terbentuk dengan solvothermal. Analisis terhadap spektra vibrasi infra merah menunjukkan hilangnya serapan vibrasi N-H dari imidazol yang mendukung terbentuknya ZIF-4. Stabilitas thermal ditunjukkan oleh hasil analisis TG-DTA yang menunjukkan bahwa ZIF-4 stabil sampai dengan suhu 400°C. Selain itu, analisis luas permukaan menunjukkan bahwa ZIF-4 memiliki luas permukaan spesifik BET sebesar 68.571 m²/g dan luas permukaan spesifik Langmuir sebesar 106.171 m²/g dengan radius pori rata-rata sebesar 4.8498nm dan total volume pori sebesar 0.166 cc/g. Namun, ZIF-4 mengalami *framework collapse* saat proses katalisis heterogen reaksi esterifikasi asam oleat. Studi lanjut masih perlu dilakukan untuk mengevaluasi aplikasi yang lebih tepat bagi ZIF-4, misalnya pada reaksi katalis heterogen pada fasa gas.

Kata kunci: *Metal-Organic Framework*, MOF, *Zeolitic Imidazolate Framework*, ZIF-4, sintesis, katalisis heterogen

Ahmad Chandra Maulana, 2020

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI ZEOLITIC IMIDAZOLATE FRAMEWORK-4 (ZIF-4) SERTA
APLIKASINYA SEBAGAI KATALIS REAKSI ESTERIFIKASI**

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

Synthesis and Characterization of Zeolitic Imidazolate Framework-4(ZIF-4) and application on esterification reaction catalysis

Abstract

This study aims to enhance the synthesis method of ZIF-4 and its application as a heterogeneous catalyst. ZIF-4 had relatively high metal per volume (T/V) density, hence may potentially be used as an acid-base catalyst, especially in esterification reaction. In this study, ZIF-4 was synthesized via solvothermal method using Zinc acetate as a metal source and Imidazole as a linker with the ratio of 1 to 4. The synthesis was carried out using oil bath at 130°C with synthesis time varied between 24 to 48 h using dimethyl formamide (DMF) as a solvent. The synthesized product was also characterized using X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy, scanning electron microscopy (SEM), thermal analysis (TG-DTA) and surface area analysis. From XRD pattern, the product was confirmed to be ZIF-4. The FTIR spectra also supported the result from the disappearing of the N-H peaks in the spectra compared to those of imidazole. High thermal stability was confirmed from TG-DTA analysis, showing that ZIF-4 was thermally stable at over 400°C. Moreover, the surface area analysis also indicated that ZIF-4 had BET surface area of 68.571 m²/g and Langmuir surface area of 106.171 m²/g with average pore radius of 4.8498nm and pore volume total of 0.166 cc/g. Upon its application as catalyst in the esterification reaction of oleic acid, ZIF-4 was suspected to underwent a framework collapse. Further study is needed to evaluate the application of ZIF-4 as a catalyst, possibly for gas-phase reaction catalysis.

Keywords: *Metal-Organic Framework*, MOF, *Zeolitic Imidazolate Framework*, ZIF-4, synthesis, heterogeneous catalyst

Ahmad Chandra Maulana, 2020
**SINTESIS DAN KARAKTERISASI ZEOLITIC IMIDAZOLATE FRAMEWORK-4 (ZIF-4) SERTA
APLIKASINYA SEBAGAI KATALIS REAKSI ESTERIFIKASI**

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

Daftar Isi

Lembar Hak Cipta.....	I
Halaman Pengesahan.....	II
Lembar Pernyataan.....	III
Ucapan Terimakasih.....	IV
Kata Pengantar.....	VI
Abstrak.....	VII
Abstract.....	VIII
Daftar Isi.....	IX
Daftar Gambar.....	X
Daftar Tabel.....	XII
Bab I Pendahuluan.....	1
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan.....	4
Bab II Tinjauan Pustaka.....	5
2.1 Metal-organic Frameworks (MOF).....	5
2.2 Zeolitic-Imidazolate Frameworks (ZIF).....	7
2.3 Katalisis.....	9
2.4 Esterifikasi dan Produksi Biodiesel.....	12
2.5 Karakterisasi MOF.....	12
2.5.1 Difraksi Sinar-X.....	12
2.5.2 Thermo Gravimetric-Differential Thermal Analysis (TG-DTA).....	14
2.5.3 Scanning Electron Microscopy(SEM).....	16
2.5.4 Fourier Transform Infrared (FT-IR).....	18
2.5.5 Isotherm BET.....	20
BAB III Metodologi Penelitian.....	25
3.1 Gambaran Umum Penelitian.....	25
3.2 Alat dan Bahan.....	27
3.3 Prosedur Penelitian.....	27
3.3.1 Percobaan Sintesis ZIF-4.....	27
3.3.1.1 Percobaan Sintesis dengan waktu 3 x 8 jam (ZIF 1:4 DMF I).....	29
3.3.1.2 Percobaan Sintesis ZIF-4 Pada autoklaf (ZIF 1:4 DMF III).....	29
3.3.1.3 Percobaan Sintesis ZIF-4 dengan Dalam Botol Schott(ZIF 1:4 DMF IV, ZIF 1:4 DMF V).....	29
3.3.1.4 Sintesis Zn(Im) ₂ Hidrothermal dengan pemanasan (ZIF 1:4 H ₂ O II).....	30
3.3.1.5 Sintesis Zn(Im) ₂ H ₂ O (ZIF 1:4 H ₂ O III).....	30
3.3.2 Karakterisasi ZIF Zn.....	31

Ahmad Chandra Maulana, 2020

SINTESIS DAN KARAKTERISASI ZEOLITIC IMIDAZOLATE FRAMEWORK-4 (ZIF-4) SERTA APLIKASINYA SEBAGAI KATALIS REAKSI ESTERIFIKASI

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

3.3.2.1 Karakterisasi PXRD.....	31
3.3.2.2 Karakterisasi TG-DTA.....	31
3.3.2.4 Karakterisasi SEM.....	31
3.3.2.4 Karakterisasi Luas Permukaan.....	32
3.3.3 Uji Katalitik Reaksi Esterifikasi ZIF-4.....	32
3.4 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	32
BAB IV Hasil dan Pembahasan.....	34
4.1 Hasil Sintesis dan Karakterisasi MOF.....	34
4.2 Pola Difraksi Sinar-X ZIF Sintesis dengan DMF.....	34
4.3 Pola Difraksi Sinar-X ZIF dengan Metode Hidrothermal.....	38
4.4 Hasil Karakterisasi FTIR ZIF.....	40
4.4 Hasil Karakterisasi SEM.....	43
4.5 Hasil Karakterisasi Luas Permukaan.....	44
4.6 Hasil Karakterisasi Sifat Thermal ZIF-4.....	45
4.7 Pengujian aktivitas ZIF-4 sebagai Katalis pada Reaksi Esterifikasi.....	47
BAB V Kesimpulan dan Saran.....	51
5.1 Kesimpulan.....	51
5.2 Saran.....	51
Daftar Pustaka.....	53
Lampiran.....	57
Lampiran I data dan Perhitungan.....	57
Sintesis ZIF 1:4 DMF I.....	57
Sintesis ZIF 1:4 H ₂ O II.....	57
Sintesis ZIF 1:4 DMF III.....	57
Sintesis ZIF 1:4 DMF IV.....	57
Sintesis ZIF 1:4 DMF V.....	58
Sintesis ZIF 1:4 H ₂ O III.....	58
Katalisis Esterifikasi asam oleat dengan ZIF-4.....	58
Uji aktivitas katalitik Esterifikasi asam oleat dengan ZIF-4 dengan GC-MS	58
Lampiran II Dokumentasi.....	59
Lampiran III Hasil Karakterisasi.....	61
Riwayat Hidup.....	76

Daftar Gambar

Gambar 2.1 Sub Building Unit(SBU) MOF (Furukawa, et al (2013).....	6
Gambar 2.2 Beberapa Organic Linker MOF (Furukawa, et al. 2013).....	6
Gambar 2.3 a. Organic Linker ZIF. b. Sudut L-M-L pada ZIF yang mirip dengan Zeolit (Phan, et al. (2010)).....	8
Image2.....	12

Ahmad Chandra Maulana, 2020

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI ZEOLITIC IMIDAZOLATE FRAMEWORK-4 (ZIF-4) SERTA
APLIKASINYA SEBAGAI KATALIS REAKSI ESTERIFIKASI**

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

Gambar 2.4 Komponen utama XRD Sumber: Setiabudi, et al. 2012.....	13
Gambar 2.5 Hasil XRD ZIF-4 Sumber: (K. S. Park et al., 2006).....	14
Gambar 2.6 Hasil XRD ZIF-zni Sumber: (Zhou, 2018).....	14
Gambar 2.7 Skema Peralatan TGA (Setibudi, et al 2012).....	15
Gambar 2.8 Thermograf ZIF-4 dalam kondisi Nitrogen (Dai et al., 2017).....	16
Gambar 2.9 Skema alat SEM sumber: Setiabudi, et al. 2012.....	18
Gambar 2.10 Skema alat FT-IR Sumber: Setiabudi, et al. 2012.....	19
Gambar 2.11 Spektra FTIR ZIF-4 (Dai et al., 2017).....	20
Gambar 2.12 Klasifikasi model fisisorpsi. Sumber: Thommes et, al. 2015.....	21
Gambar 2.13 Kuva Isotherm N2 sumber :(Worrall et al., 2016).....	23
Gambar 2.14 Kurva Isotherm ZIF-4 (Bennett et al., 2011).....	24
Gambar 3.1 Tahapan dan Alur Penelitian.....	25
Gambar 4.1 Hasil PXRD ZIF 1:4 DMF I.....	35
Gambar 4.2 Perbandingan Hasil PXRD ZIF 1:4 DMF pada botol Schott dengan referensi.....	36
Gambar 4.3 Perbandingan PXRD Simulasi dengan Hasil Sintesis ZIF menggunakan autoklaf.....	37
Gambar 4.4 Perbandingan Pola PXRD ZIF Sintesis dengan Metode Hydrothermal dengan Referensi.....	39
Gambar 4.5 Hasil FT-IR ZIF-4 dan Imidazol.....	41
Gambar 4.6 Hasil FT-IR ZIF sintesis hydrothermal dan reaktor autoklaf.....	42
Gambar 4.7 Hasil Mikrograf SEM ZIF 1:4 DMF IV.....	43
Gambar 4.8 Isotherm N2 dengan ZIF-4.....	44
Gambar 4.9 Thermograf ZIF-4 (ZIF 1:4 DMF I).....	46
Gambar 4.10 Hasil reaksi FAME.....	47
Gambar 4.11 Hasil Kromatogram GC-MS reaksi esterifikasi FAME.....	48
Gambar 4.12 Hasil ekspos ZIF-4 pada asam oleat.....	50
Hasil PXRD ZIF 1:4 DMF I.....	61
Hasil PXRD ZIF 1:4 Hydrothermal II.....	61
Hasil PXRD ZIF 1:4 DMF III.....	61
Hasil Karakterisasi PXRD ZIF 1:4 DMF III Ac.....	62
Hasil Karakterisasi PXRD ZIF 1:4 DMF IV.....	62
Hasil Karakterisasi PXRD ZIF 1:4 DMF IV Ac.....	63
Hasil Karakterisasi PXRD ZIF 1:4 DMF V.....	63
Hasil Karakterisasi PXRD ZIF 1:4 DMF V Ac.....	63
Hasil Karakterisasi PXRD ZIF 1:4 H2O III.....	64
Hasil Isotherm ZIF 1:4 DMF IV.....	65
Hasil multi-plot BET.....	66
Hasil Analisis Luas permukaan Langmuir.....	67
Hasil Ukuran Pori rata-rata dan Total Volume Pori.....	68
Hasil Ukuran Pori rata-rata.....	68
Hasil FT-IR ZIF 1:4 DMF I.....	69
Hasil FT-IR ZIF 1:4 DMF III.....	69

Ahmad Chandra Maulana, 2020

SINTESIS DAN KARAKTERISASI ZEOLITIC IMIDAZOLATE FRAMEWORK-4 (ZIF-4) SERTA APLIKASINYA SEBAGAI KATALIS REAKSI ESTERIFIKASI

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

Hasil FT-IR ZIF 1:4 DMF III Ac.....	70
Hasil FT-IR ZIF 1:4 DMF IV.....	70
Hasil FT-IR ZIF 1:4 DMF IV Ac.....	71
Hasil FT-IR ZIF 1:4 DMF V.....	71
Hasil FT-IR ZIF 1:4 DMF V Ac.....	72
Hasil FT-IR ZIF 1:4 H ₂ O II.....	73
Hasil FT-IR ZIF 1:4 H ₂ O III.....	73
Hasil GC-MS FAME Katalis.....	74
Hasil GC-MS FAME Blanko.....	75

Daftar Tabel

Tabel 3.1 Parameter sintesis percobaan ZIF-4.....	26
Tabel 3.2 kondisi dan parameter sintesis.....	28
Tabel 4.1 Area Kromatogram GC-MS.....	49

Ahmad Chandra Maulana, 2020

*SINTESIS DAN KARAKTERISASI ZEOLITIC IMIDAZOLATE FRAMEWORK-4 (ZIF-4) SERTA
APLIKASINYA SEBAGAI KATALIS REAKSI ESTERIFIKASI*

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

Daftar Pustaka

- Beldon, P. J., Fábrián, L., Stein, R. S., Thirumurugan, A., Cheetham, A. K., & Frišćić, T. (2010). Rapid Room-Temperature Synthesis of Zeolitic Imidazolate Frameworks by Using Mechanochemistry. *Angewandte Chemie International Edition*, 49(50), 9640–9643. <https://doi.org/10.1002/anie.201005547>
- Bennett, T. D., Cao, S., Tan, J. C., Keen, D. A., Bithell, E. G., Beldon, P. J., Friscic, T., & Cheetham, A. K. (2011). Facile Mechanochemistry of Amorphous Zeolitic Imidazolate Frameworks. *Journal of the American Chemical Society*, 133(37), 14546–14549. <https://doi.org/10.1021/ja206082s>
- Chizallet, C., Lazare, S., Bazer-Bachi, D., Bonnier, F., Lecocq, V., Soyer, E., Quoineaud, A. A., & Bats, N. (2010). Catalysis of Transesterification by a Nonfunctionalized Metal-Organic Framework: Acido-Basicity at the External Surface of ZIF-8 Probed by FTIR and ab Initio Calculations. *Journal of the American Chemical Society*, 132, 12365–12377. <https://doi.org/10.1021/ja103365s>
- Chui, S. S.-Y., Lo, S. M.-F., Charmant, J. P. H., Orpen, A. G., & Williams, I. D. (1999). A Chemically Functionalizable Nanoporous Material [Cu₃(TMA)₂(H₂O)₃]_n. *Science*, 283(5405), 1148–1150. <https://doi.org/10.1126/science.283.5405.1148>
- Dai, M., Shen, J., Zhang, J., & Li, G. (2017). A novel separator material consisting of Zeolitic Imidazolate Framework-4 (ZIF-4) and its electrochemical performance for lithium-ions battery. *Journal of Power Sources*, 369, 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.09.058>
- Deutschmann, O., Knözinger, H., Kochloefl, K., & Turek, T. (2009). Heterogeneous Catalysis and Solid Catalysts. In Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (Ed.), *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. https://doi.org/10.1002/14356007.a05_313.pub2
- Furukawa, H., Cordova, K. E., O'Keeffe, M., & Yaghi, O. M. (2013). The Chemistry and Applications of Metal-Organic Frameworks. *Science*, 341(6149), 1230444–1230444. <https://doi.org/10.1126/science.1230444>
- Hovestadt, M., Friebe, S., Helmich, L., Lange, M., Möllmer, J., Gläser, R., Mundstock, A., & Hartmann, M. (2018). Continuous Separation of Light Olefin/Paraffin Mixtures on ZIF-4 by Pressure Swing Adsorption and Membrane Permeation. *Molecules*, 23(4), 889. <https://doi.org/10.3390/molecules23040889>
- Jim Clark. (n.d.). *esterification—Alcohols and carboxylic acids*. Retrieved June 18, 2019, from <https://www.chemguide.co.uk/organicprops/alcohols/esterification.html>
- Kitagawa, S., Kitaura, R., & Noro, S. (2004). Functional Porous Coordination Polymers. *Angewandte Chemie International Edition*, 43(18), 2334–2375. <https://doi.org/10.1002/anie.200300610>

Ahmad Chandra Maulana, 2020

SINTESIS DAN KARAKTERISASI ZEOLITIC IMIDAZOLATE FRAMEWORK-4 (ZIF-4) SERTA

APLIKASINYA SEBAGAI KATALIS REAKSI ESTERIFIKASI

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

- Kubarev, A. V., & Roeffaers, M. B. J. (2017). Surface acid–base catalytic activity of ZIF-8 revealed by super-resolution fluorescence microscopy. *CrystEngComm*, 19(29), 4162–4165. <https://doi.org/10.1039/C7CE00074J>
- Lee, Y.-R., Kim, J., & Ahn, W.-S. (2013). Synthesis of metal-organic frameworks: A mini review. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 30(9), 1667–1680. <https://doi.org/10.1007/s11814-013-0140-6>
- Lehnert, R., & Seel, F. (1980). CSD Entry:IMIDZB. <https://www.ccdc.cam.ac.uk/structures/Search?Ccdcid=1180194&DatabaseToSearch=Published>
- Li, H., Eddaoudi, M., O’Keeffe, M., & Yaghi, O. M. (1999). Design and synthesis of an exceptionally stable and highly porous metal-organic framework. *Nature*, 402(6759), 276–279. <https://doi.org/10.1038/46248>
- Linder-Patton, O. M., de Prinse, T. J., Furukawa, S., Bell, S. G., Sumida, K., Doonan, C. J., & Sumbly, C. J. (2018). Influence of nanoscale structuralisation on the catalytic performance of ZIF-8: A cautionary surface catalysis study. *CrystEngComm*, 20(34), 4926–4934. <https://doi.org/10.1039/C8CE00746B>
- Liu, J., He, J., Wang, L., Li, R., Chen, P., Rao, X., Deng, L., Rong, L., & Lei, J. (2016). NiO-PTA supported on ZIF-8 as a highly effective catalyst for hydrocracking of Jatropha oil. *Scientific Reports*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/srep23667>
- Mahata, P., & Natarajan, S. (2014). *Diversity in Porous Metal-Organic Framework Materials*. 94, 16.
- McGuire, C. V., & Forgan, R. S. (2015). The surface chemistry of metal–organic frameworks. *Chemical Communications*, 51(25), 5199–5217. <https://doi.org/10.1039/C4CC04458D>
- Miao, Y.-N., Wang, Y., Pan, D.-H., Song, X.-H., Xu, S.-Q., Gao, L.-J., & Xiao, G.-M. (2019). Zn-Co@N-Doped Carbon Derived from ZIFs for High-Efficiency Synthesis of Ethyl Methyl Carbonate: The Formation of ZnO and the Interaction between Co and Zn. *Catalysts*, 9(1), 94. <https://doi.org/10.3390/catal9010094>
- Momma, K., & Izumi, F. (2011). VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data. *Journal of Applied Crystallography*, 44(6), 1272–1276. <https://doi.org/10.1107/S0021889811038970>
- Otera, J., & Nishikido, J. (2010). Industrial Uses. In *Esterification: Methods, Reactions, and Applications, Second Edition* (pp. 293–322). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9783527627622.ch8>
- Park, K. S., Ni, Z., Cote, A. P., Choi, J. Y., Huang, R., Uribe-Romo, F. J., Chae, H. K., O’Keeffe, M., & Yaghi, O. M. (2006). Exceptional chemical and thermal stability of zeolitic imidazolate frameworks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(27), 10186–10191. <https://doi.org/10.1073/pnas.0602439103>
- Park, Kyo Sung, Ni, Z., Cote, A. P., Choi, J. Y., Huang, R., Uribe-Romo, F. J., Chae, H. K., O’Keeffe, M., & Yaghi, O. M. (2006). *CCDC 602538: Experimental*

Ahmad Chandra Maulana, 2020

SINTESIS DAN KARAKTERISASI ZEOLITIC IMIDAZOLATE FRAMEWORK-4 (ZIF-4) SERTA

APLIKASINYA SEBAGAI KATALIS REAKSI ESTERIFIKASI

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

Crystal Structure Determination [Data set]. Cambridge Crystallographic Data Centre. <https://doi.org/10.5517/ccn6zqj>

Phan, A., Doonan, C. J., Uribe-Romo, F. J., Knobler, 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(1), 58–67. <https://doi.org/10.1021/ar900116g>

Ramirez, J. R., Yang, H., Kane, C. M., Ley, A. N., & Holman, K. T. (2016). Reproducible Synthesis and High Porosity of mer-Zn(Im)₂ (ZIF-10): Exploitation of an Apparent Double-Eight Ring Template. *Journal of the American Chemical Society*, 138(37), 12017–12020. <https://doi.org/10.1021/jacs.6b06375>

Rubio-Martinez, M., Avci-Camur, C., Thornton, A. W., Imaz, I., MasPOCH, D., & Hill, M. R. (2017). New synthetic routes towards MOF production at scale. *Chemical Society Reviews*, 46(11), 3453–3480. <https://doi.org/10.1039/C7CS00109F>

Setiabudi, A., Hardian, R., & Muzakir, A. (2012). *Prinsip dan Aplikasinya dalam Penelitian Kimia*. Bandung: UPI Press

Sing, K. (1985). Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984). *Pure and Applied Chemistry*, 57, 603. <https://doi.org/10.1351/pac198557040603>

Sing, K. (2001). The use of nitrogen adsorption for the characterisation of porous materials. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 187–188, 3–9. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(01\)00612-4](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(01)00612-4)

Sophister, J. (n.d.). *Developments in Metal Organic Frameworks for Utilisation in Catalysis*. 14.

T. L. M Maesen, & Marcus, B. (2001). *Introduction to Zeolite Science and Practice* (H. van Bekkum, E. M. Flanigen, P. A. Jacobs, & J. C. Jansen, Eds.). Elsevier.

Tella, A. C., & Aaron, I. Y. (2012). *SYNTHESES AND APPLICATIONS OF METAL-ORGANIC FRAMEWORKS MATERIALS : A REVIEW*. 7.

Tesser, R., Di Serio, M., Guida, M., Nastasi, M., & Santacesaria, E. (2005). Kinetics of Oleic Acid Esterification with Methanol in the Presence of Triglycerides. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(21), 7978–7982. <https://doi.org/10.1021/ie050588o>

Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9–10), 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>

Tian, Y.-Q., Cai, C.-X., Ren, X.-M., Duan, C.-Y., Xu, Y., Gao, S., & You, X.-Z. (2004). *CCDC 212357: Experimental Crystal Structure Determination* [Data set]. Cambridge Crystallographic Data Centre. <https://doi.org/10.5517/cc73z7j>

Ahmad Chandra Maulana, 2020

SINTESIS DAN KARAKTERISASI ZEOLITIC IMIDAZOLATE FRAMEWORK-4 (ZIF-4) SERTA

APLIKASINYA SEBAGAI KATALIS REAKSI ESTERIFIKASI

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

- Van Gerpen, J., Shanks, B., Pruszko, R., Clements, D., & Knothe, G. (2004). *Biodiesel Analytical Methods: August 2002--January 2004* (NREL/SR-510-36240, 15008800). <https://doi.org/10.2172/15008800>
- Worrall, S. D., Mann, H., Rogers, A., Bissett, M. A., Attfield, M. P., & Dryfe, R. A. W. (2016). Electrochemical deposition of zeolitic imidazolate framework electrode coatings for supercapacitor electrodes. *Electrochimica Acta*, *197*, 228–240. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.02.145>
- Xamena, F. X. L. i, Abad, A., Corma, A., & Garcia, H. (2007). MOFs as catalysts: Activity, reusability and shape-selectivity of a Pd-containing MOF. *Journal of Catalysis*, *250*(2), 294–298. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2007.06.004>
- Zhou, C. (2018). *Amorphization and Glass Formation of Metal-Organic Frameworks* [Data set]. Aalborg University Press. <https://doi.org/10.5278/vbn.phd.eng.00070>
- Zhou, K. (2017). Metal-Organic Framework as Catalyst in Esterification of Oleic Acid for Biodiesel Production. *International Journal of Environmental Science and Development*, *8*(4), 251–254. <https://doi.org/10.18178/ijesd.2017.8.4.957>