

## Montmorillonit K-10 yang Dimodifikasi Ni<sup>2+</sup>: Sifat Struktur dan Aktivitas Katalitik

Admi\*, Dewi Khofifatul Khoiriah, Syukri

Laboratorium Kimia Material, Departemen Kimia  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,  
Universitas Andalas Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163, Indonesia

### Info Artikel

#### Histori Artikel:

Diajukan: 4 Maret 2024  
Direvisi: 12 April 2024  
Diterima: 3 Mei 2024

#### Kata kunci:

Biodiesel  
Minyak Jelantah  
Montmorillonit K-10  
Pertukaran kation Ni<sup>2+</sup>  
Transesterifikasi

#### Keywords:

Biodiesel  
Waste Cooking Oil  
Montmorillonite K-10  
Ni<sup>2+</sup> cation-exchange  
Transesterification

#### Penulis Korespondensi:

Admi  
Email: [admi@sci.unand.ac.id](mailto:admi@sci.unand.ac.id)

### ABSTRAK

Fokus studi ini adalah mensintesis material berbasis montmorillonit K-10 yang dimodifikasi dengan spesies Ni<sup>2+</sup> melalui metoda hidrotermal. Pengaruh aktivasi termal terhadap *support* montmorillonit K-10 pada proses pertukaran kation untuk menghasilkan katalis heterogen dikarakterisasi dengan *X-ray diffraction (XRD)* dan *X-ray fluorescence (XRF)*. Analisis XRF sampel menunjukkan bahwa keberhasilan modifikasi montmorillonit K-10 dengan nikel melalui proses pertukaran kation dibuktikan oleh peningkatan kandungan nikel dan penurunan kandungan kalium dan kalsium pada semua sampel yang dimodifikasi. Analisis XRD terhadap struktur sampel yang dimodifikasi mengungkapkan bahwa struktur dasar *clay 2:1 (T:O:T)* tahan selama proses pertukaran kation. Kinerja katalis heterogen yang dihasilkan diuji pada reaksi transesterifikasi minyak jelantah dengan metanol untuk produksi *FAME (Fatty Acid Methyl Ester)* (biodiesel). Evaluasi uji katalitik menunjukkan bahwa montmorillonit K-10 yang dimodifikasi Ni<sup>2+</sup> memberikan peningkatan % rendemen *FAME* dari 1,45% *FAME* menjadi 4,49% *FAME*. Hal ini mengindikasikan bahwa material montmorillonit K-10 yang dimodifikasi Ni<sup>2+</sup> sebagai katalis heterogen berpotensi untuk produksi biodiesel.

*This study focused on synthesizing montmorillonite K-10 based material modified with Ni<sup>2+</sup> via hydrothermal method. The effect of the thermal activation of montmorillonite K-10 support of the modified montmorillonite K-10 catalysts on cation-exchanged processes to obtained heterogeneous catalyst were characterized by X-ray fluorescence (XRF) and X-ray diffraction (XRD). XRF analysis of the samples showed that the successful modification of montmorillonite K-10 with nickel by the cation-exchange process are seen to have increased in nickel content and decreased in potassium and calcium content in all modified samples. Structural analysis of all modified samples by XRD revealed that the basic structure of clay 2:1 (T:O:T) is retained during the cation-exchanged processes. The obtained heterogeneous catalyst were tested for the transesterification of waste cooking oil with methanol to produce FAME (biodiesel). Evaluation of the catalyst test showed that Ni<sup>2+</sup> modified montmorillonite K-10 gave an increase in % FAME yield from 1,45% FAME to 4,49% FAME. This indicates that Ni<sup>2+</sup> modified montmorillonite K-10 material can be a potential heterogeneous catalyst for biodiesel production.*

Copyright © 2024 Author(s). All rights reserved

## I. PENDAHULUAN

Mineral *clay* merupakan material mesopori alam yang memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, porositas yang lebih besar, dan kapasitas pertukaran kation yang tinggi (Nasreen et al., 2017). Mineral *clay* dengan komposisi yang bervariasi dan ukuran partikel yang berbeda dapat digunakan sebagai katalis heterogen padat untuk mengkatalisis pembentukan metil ester (Saeed et al., 2020). Mineral-mineral *clay* telah banyak dimanfaatkan secara luas sebagai katalis heterogen didalam berbagai tipe sintesis organik dikarenakan memiliki beberapa keunggulan seperti biaya rendah, kestabilan termal, selektif, luas permukaan yang besar, mudah dipisahkan dan ramah lingkungan (Zatta et al., 2013). Katalis berbasis *clay* mampu mengkatalisis beberapa jenis reaksi organik seperti reaksi esterifikasi (Rangel-Porrás et al., 2023), transesterifikasi (Munir et al., 2021), oligomerisasi (Aid et al., 2017), adisi, isomerisasi, kondensasi, alkilasi, dan lain-lain (Yaghmaeiyan et al., 2022). *Site catalytic catalyst* dalam bentuk asam/basa Bronsted dan Lewis dapat ditingkatkan melalui teknik modifikasi sol-gel (Rangel-Porrás et al., 2023). Logam-logam seperti, besi, kromium, nikel, mangan, kobalt, seng, timbal, dan perak merupakan logam-logam yang bisa difungsionalisasikan ke *support* melalui metode *wet impregnation* (Ayoub et al., 2017).

Montmorillonit (MMT) merupakan salah satu jenis mineral *clay* alumino silikat lapis yang diklasifikasikan sebagai jenis smektit dioktahedral 2:1, dengan struktur kristal multi lapis dimana masing-masing lapis terdiri dari satu lapis oktahedral alumina yang di *sandwich* diantara dua lapis tetrahedral silika. Lapis *interlamellar water* mengandung kation-kation terlarut yang berada diantara lapis alminosilikat (Jha et al., 2013);(Tyagi et al., 2006). Kation yang berada diantarlapis *clay* dapat dipertukarkan oleh kation-kation yang lain. Hal ini menjadikan montmorillonit sebagai katalis heterogen dalam berbagai reaksi kimia (Aher et al., 2012);(Jha et al., 2013);(Joseph et al., 2005).

Montmorillonit yang tersedia sebagai mineral *clay* komersil dapat dimodifikasi untuk meningkatkan sifat-sifatnya. Metode-metode yang digunakan untuk memodifikasi montmorillonit, seperti metoda-metoda pertukaran ion, *pillaring*, dan aktivasi asam. Montmorillonit K-30 merupakan katalis basa heterogen yang tersedia secara komersil yang dapat diaplikasikan pada reaksi transesterifikasi minyak jelantah untuk produksi biodisel (Inayat et al., 2019). Montmorillonit yang dimodifikasi barium melalui pendekatan *incipient wetness impregnation* mengkatalisis reaksi transesterifikasi minyak jelantah (Sharma & Bhavani, 2021). Montmorillonit komersil K-10 (MMT K-10) merupakan katalis yang efisien dikarenakan dapat digunakan beberapa kali tanpa kehilangan aktivitas katalitiknya, selain itu juga memiliki peningkatan kekuatan *site* asam lewis (Aher et al., 2012). Montmorillonit K-10 yang dimodifikasi barium melalui metoda *pillaring* dengan cara menghidrolisis larutan logam (Ayoub et al., 2017);(Olutoye et al., 2016) membuat katalis dengan cara mengaduk Montmorillonit K-10 dalam larutan KOH selama 6 jam, kemudian disentrifus, dicuci, dikeringkan, dan dikalsinasi pada 450 °C selama 4 jam. Katalis Montmorillonit K-10 yang dimodifikasi kalium ini digunakan untuk konversi minyak palm menjadi biodisel (Ayoub et al., 2017).

Metoda pertukaran ion digunakan untuk preparasi katalis. Metoda pertukaran ion ini mirip dengan metoda impregnasi tetapi dalam metoda impregnasi larutan logam prekursor lebih besar daripada *support* katalis. Montmorillonit K-10 dimodifikasi dengan Fe<sup>3+</sup> melalui metoda pertukaran ion untuk diaplikasikan pada produksi biodisel dari minyak jelantah. Preparasi katalis dilakukan dengan cara montmorillonit K-10 di aduk dalam larutan FeCl<sub>3</sub> sampai terbentuk *slurry* yang berwarna putih. Kemudian *slurry* dibilas dengan air distilasi lalu dikeringkan pada temperatur 105 C° dan dikalsinasi pada temperatur 500°C selama 5 jam (Yahya et al., 2020).

Fokus studi ini adalah proses modifikasi *clay* berbasis montmorillonit K-10 dengan nikel melalui metode hidrotermal untuk mensintesis katalis heterogen. Pengaruh aktivasi termal pada *support* montmorillonit K-10 (MMT K-10) dalam proses modifikasi dianalisis terhadap komposisi kimia dan sifat struktur katalis heterogen yang dihasilkan. Kontribusi katalisis katalis pada kapabilitas katalitik diuji pada reaksi transesterifikasi minyak jelantah dengan metanol untuk produksi biodiesel.

## II. METODE

### 2.1 Preparasi Minyak Jelantah

Sampel minyak jelantah dikumpulkan dari beberapa kafetaria di sekitar Pasar Baru, Limau Manis, Padang. Sampel minyak disaring untuk menghilangkan pengotor kemudian dipanaskan pada temperatur 105 °C sampai tidak lagi mengandung air.

## 2.2 Sintesis Katalis

*Support* montmorillonit K-10 (MMT K-10) sebanyak 2 gram ditambahkan kedalam 50 mL larutan 0,5 M garam Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O. Campuran dimasukkan ke dalam autoklaf, selanjutnya dilakukan proses hidrotermal pada suhu 90°C selama 12 jam. Kemudian, campuran didinginkan, disaring, dan dicuci lima kali dengan air destilasi. Sampel dikeringkan pada temperatur ruang (27 °C), selanjutnya pengeringan sampel dilanjutkan pada temperatur 80 °C selama 12 jam di dalam oven. Sampel katalis heterogen MMT K-10 yang dimodifikasi Ni<sup>2+</sup> dikalsinasi pada temperatur 300 °C selama 5 jam hingga terbentuk material Ni<sup>2+</sup>/MMT K-10. *Support* MMT K-10 yang diaktivasi termal pada temperatur 110°C dan 300°C dimodifikasi Ni<sup>2+</sup> disintesis dengan cara yang sama. Material katalis heterogen yang terbentuk adalah Ni<sup>2+</sup>/MMT K-10 (110°C) dan Ni<sup>2+</sup>/MMT K-10 (300°C).

## 2.3 Uji Aktivitas Katalitik

Aktivitas katalitik sampel katalis diukur pada reaksi transesterifikasi minyak jelantah (*Waste Cooking Oil*) dengan metanol melalui metoda refluks. Parameter reaksi yang diujikan adalah rasio molar minyak: metanol = 1 : 10 dan jumlah katalis yang digunakan 3% (b/b) terhadap trigliserida. Metanol dan katalis dimasukkan ke dalam labu leher tiga, campuran diaduk hingga temperatur 50 °C, kemudian ditambahkan 30 mL minyak jelantah (yang bebas air dengan temperatur 50°C). Reaksi berlangsung selama 3 jam pada temperatur 90 °C dengan kecepatan pengadukkan 600 rpm. Campuran produk yang sudah didinginkan pada temperatur ruang disaring untuk memisahkan katalis.

Selanjutnya, campuran produk dipanaskan pada temperatur 80°C untuk menguapkan sisa metanol, kemudian didiamkan selama 12 jam di dalam corong pisah hingga terbentuk 2 lapisan yakni lapisan *FAME* (biodisel) di bagian atas dan lapisan gliserol di bagian bawah. Lapisan *FAME* dicuci dengan akuades panas (50°C) (rasio volume 1:1) diaduk selama 5 menit. Lapisan *FAME* (yang sudah dipisahkan dari lapisan air) dipanaskan pada temperatur 105°C, Produk *FAME* yang dihasilkan dianalisis dengan GC-MS. Rendemen biodisel dihitung dengan persamaan 2.1.

$$\text{rendemen}(\%) = \frac{\text{massaFAME}(\text{biodisel}) \times \text{FAME}}{\text{massaminyak}} \times 100\% \quad (1)$$

## 2.4 Karakterisasi Katalis

Pola *X-ray diffraction* (XRD) diperoleh dengan menggunakan diffractometer. Anoda Cu – K $\alpha$  ( $\lambda=1,5406\text{\AA}$ ) pada 40 kv dan 30 mA. Scan axis : 2 Theta pada rentang 5° - 99,99°, *step* 0,02°. Komposisi kimia sampel katalis diukur dengan instrumen *X-ray fluresence* (XRF) *PAN analytical Epsilon 3*.

## III. HASIL DAN DISKUSI

### 3.1 Komposisi Kimia Katalis

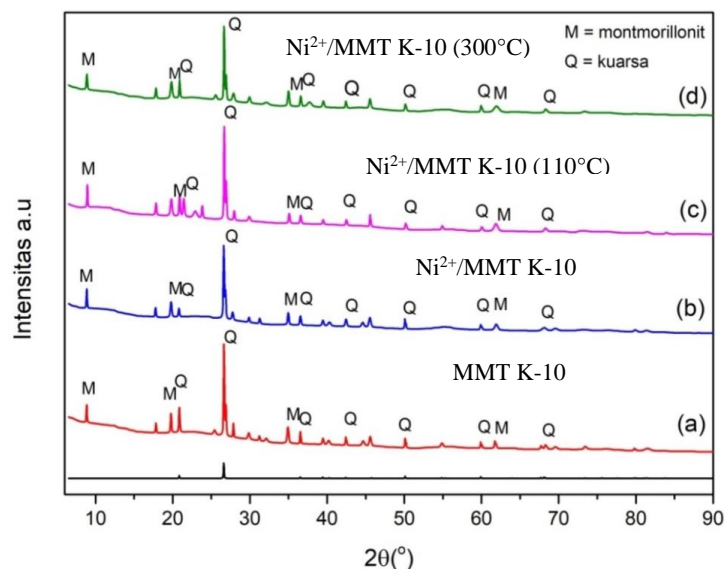
Komposisi kimia sampel katalis diperlihatkan pada Tabel 1. MMT K-10 mengandung Si<sup>4+</sup> dilapis tetrahedral. Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, dan Mg<sup>2+</sup> sebagai kation pada lapis oktahedral dan H<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, dan Ca<sup>2+</sup> sebagai kation antarlapis yang dapat mengalami proses *cation-exchange* (pertukaran kation) (Wang et al., 2015). Proses pertukaran kation yang terjadi pada *support* MMT K-10 oleh ion Ni<sup>2+</sup> mereduksi persentase kandungan elemen kalium dan kalsium dan meningkatkan persentase kandungan nikel pada sampel MMT K-10 yang dimodifikasi. Rasio molar Si/Al yang mengalami sedikit perubahan merupakan indikasi ion Ni<sup>2+</sup> ion menggantikan H<sup>+</sup> dan ion logam yang dapat dipertukarkan yang berada pada antarlapis MMT K-10. Persentase nikel meningkat dari MMT K-10 (0,006% Ni) menjadi Ni<sup>2+</sup>/MMT K-10 (6,023 % Ni), Ni<sup>2+</sup>/MMT K-10 (110°C) (7,665 % Ni), dan Ni<sup>2+</sup>/MMT K-10 (300°C) (5,831 % Ni). Hasil ini menunjukkan bahwa MMT K-10 memiliki kemampuan pertukaran kation yang tinggi (Aid et al., 2017).

**Tabel 2** Komposisi unsur-unsur MMT K-10, Ni<sup>2+</sup>/MMT K-10, Ni<sup>2+</sup>/MMT K-10 (110°C), dan Ni<sup>2+</sup>/MMT K-10 (300°C)

Komposisi (%)	MMT K-10	Ni <sup>2+</sup> /MMT K-10	Ni <sup>2+</sup> /MMT K-10 (110°C)	Ni <sup>2+</sup> /MMT K-10 (300°C)
Si	65,155	64,542	62,757	63,672
Al	9,831	9,726	11,135	10,145
K	6,320	5,986	5,057	5,807
Fe	9,765	6,496	7,255	7,360
Ni	0,006	6,023	7,665	5,831
Ca	2,439	1,369	1,109	1,406
Ti	1,667	1,443	1,272	1,424
P	3,652	3,354	2,621	3,282
Mn	0,030	0,018	0,016	0,018
RasioMol Si/Al	6,36:1	6,43:1	5,41:1	6,03:1

### 3.2 Difraksi Sinar-X

Gambar 1 menunjukkan pola *X-ray diffraction* (XRD) sampel MMT K-10 sebelum dan sesudah dimodifikasi. Pola XRD mengungkapkan bahwa sampel MMT K-10 yang dimodifikasi memiliki karakteristik struktur yang hampir identik dengan MMT K-10 yang tidak dimodifikasi.



**Gambar 1** Difraktogram sampel sebelum dimodifikasi (a) MMT K-10, setelah dimodifikasi (b) Ni<sup>2+</sup>/MMT K-10, (c) Ni<sup>2+</sup>/MMT K-10 (110°C), (d) Ni<sup>2+</sup>/MMT K-10 (300 °C)

Semua sampel dengan sudut difraksi pada puncak  $2\theta \approx 8,8^\circ$  memiliki *basal spacing*  $d_{(001)} \approx 10 \text{ \AA}$ . Hal ini membuktikan bahwa struktur 2:1 (T:O:T) tidak mengalami kerusakan (*disorder*) dan tahan selama proses pertukaran kation (*cation-exchange*) pada antarlapis *clay* MMT K-10 (Dharne & Bokade, 2011);(Harun et al., 2018). Difraktogram semua sampel katalis yang sangat mirip mengungkapkan bahwa modifikasi MMT K-10 dengan Ni<sup>2+</sup> tidak mempengaruhi struktur kristal. Struktur kristal yang tidak berubah menjadikan material katalis memiliki kestabilan termal yang penting untuk proses katalitik.

### 3.3 Aktivitas Katalitik

Sampel MMT K-10 yang tidak dimodifikasi dan yang dimodifikasi di uji aktivitas katalitiknya pada reaksi transesterifikasi minyak jelantah dengan metanol untuk produksi *fatty acid methyl ester* (FAME). Semua sampel katalis dievaluasi pada kondisi reaksi dengan parameter yang identik yakni: rasio molar minyak : metanol = 1 : 10, temperatur reaksi 90°C, waktu reaksi 3 jam dan jumlah katalis 3% (b/b) dengan menggunakan sistem refluks.

Aktivitas katalitik sampel MMT K-10 dan Ni<sup>2+</sup>/MMT K-10 menghasilkan peningkatan rendemen dari 1,45% FAME menjadi 4,49% FAME. Peningkatan rendemen FAME yang dihasilkan

menunjukkan kontribusi spesies Ni<sup>2+</sup> untuk meningkatkan aktivitas katalitik dari sampel katalis heterogen Ni<sup>2+</sup>/MMT K-10. Sampel katalis Ni<sup>2+</sup>/MMT K-10 (110°C) dan Ni<sup>2+</sup>/MMT K-10 (300°C) tidak menunjukkan kinerja katalitik karena kondisi reaksi yang diaplikasikan tidak selektif bagi kedua katalis dalam menghasilkan metil ester. Metil ester juga tidak terbentuk pada reaksi yang tidak menggunakan katalis (sebagai kontrol).

#### IV. KESIMPULAN

Modifikasi MMT K-10 dengan Ni<sup>2+</sup> untuk menghasilkan katalis heterogen disintesis dengan metoda hidrotermal dan dikarakterisasi dengan XRD dan XRF. Karakterisasi sampel katalis menunjukkan struktur MMT K-10 tidak dipengaruhi oleh reaksi pertukaran kation dengan Ni<sup>2+</sup>. Uji aktivitas katalitik membuktikan bahwa MMT K-10 yang dimodifikasi Ni<sup>2+</sup> berpotensi sebagai katalis heterogen untuk produksi *FAME* (biodisel) dari minyak jelantah (*WCO*).

#### DAFTAR PUSTAKA

- Aher, R. D., Gade, M. H., Reddy, R. S., & Sudalai, A. (2012). Cu II-exchanged montmorillonite K10 clay-catalyzed direct carboxylation of terminal alkynes with carbon dioxide. *Indian Journal of Chemistry - Section A Inorganic, Physical, Theoretical and Analytical Chemistry*, 51(9–10), 1325–1329.
- Aid, A., Andrei, R. D., Amokrane, S., Cammarano, C., Nibou, D., & Hulea, V. (2017). Ni-exchanged cationic clays as novel heterogeneous catalysts for selective ethylene oligomerization. *Applied Clay Science*, 146(December 2016), 432–438. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.06.034>
- Ayoub, M., Hussain Bhat, A., Ullah, S., Ahmad, M., & Uemura, Y. (2017). Optimization of Biodiesel Production over Alkaline Modified Clay Catalyst. *Journal of the Japan Institute of Energy*, 96(10), 456–462. <https://doi.org/10.3775/jie.96.456>
- Dharne, S., & Bokade, V. V. (2011). Esterification of levulinic acid to n-butyl levulinate over heteropolyacid supported on acid-treated clay. *Journal of Natural Gas Chemistry*, 20(1), 18–24. [https://doi.org/10.1016/S1003-9953\(10\)60147-8](https://doi.org/10.1016/S1003-9953(10)60147-8)
- Harun, F. W., Jihadi, N. I. M., Ramli, S., Hassan, N. R. A., & Zubir, N. A. M. (2018). Esterification of oleic acid with alcohols over Cu-MMT K10 and Fe-MMT K10 as acid catalysts. *AIP Conference Proceedings*, 1972. <https://doi.org/10.1063/1.5041246>
- Inayat, A., Nassef, A. M., Rezk, H., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., & Olabi, A. G. (2019). Fuzzy modeling and parameters optimization for the enhancement of biodiesel production from waste frying oil over montmorillonite clay K-30. *Science of the Total Environment*, 666, 821–827. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.321>
- Jha, A., Garade, A. C., Shirai, M., & Rode, C. V. (2013). Metal cation-exchanged montmorillonite clay as catalysts for hydroxyalkylation reaction. *Applied Clay Science*, 74, 141–146. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.10.005>
- Joseph, T., Shanbhag, G. V., & Halligudi, S. B. (2005). Copper(II) ion-exchanged montmorillonite as catalyst for the direct addition of NH bond to CC triple bond. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 236(1–2), 139–144. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2005.04.022>
- Munir, M., Ahmad, M., Rehan, M., Saeed, M., Lam, S. S., Nizami, A. S., Waseem, A., Sultana, S., & Zafar, M. (2021). Production of high quality biodiesel from novel non-edible *Raphanus raphanistrum* L. seed oil using copper modified montmorillonite clay catalyst. *Environmental Research*, 193, 110398. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110398>
- Nasreen, S., Nafees, M., Jaffar, M. M., Qurashi, L. A., Tabraiz, S., & Khan, R. (2017). Comparison and effect of Cinder supported with Manganese and Lanthanum oxide for biodiesel production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(29), 18389–18396. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.157>
- Olutoye, M. A., Wong, S. W., Chin, L. H., Amani, H., Asif, M., & Hameed, B. H. (2016). Synthesis of fatty acid methyl esters via the transesterification of waste cooking oil by methanol with a barium-modified montmorillonite K10 catalyst. *Renewable Energy*, 86, 392–398. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.016>

- Rangel-Porras, G., Quiroga-Almaguer, A., Ramírez-Hernández, A., Bachiller-Baeza, B., Pfeiffer-Perea, H., & Rangel-Rivera, P. (2023). Effects of the Inclusion of Ce and Ni Species on Ti for Modification of K10-Clay by Sol-Gel and their Use as Catalysts in the Liquid-Phase Esterification Systems. *Clays and Clay Minerals*, 71(2).
- Saeed, M., Munir, M., Nafees, M., Shah, S. S. A., Ullah, H., & Waseem, A. (2020). Synthesis, characterization and applications of silylation based grafted bentonites for the removal of Sudan dyes: Isothermal, kinetic and thermodynamic studies. *Microporous and Mesoporous Materials*, 291(July 2019), 109697. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.109697>
- Sharma, P., & Bhavani, A. G. (2021). Green, cost effective barium loaded montmorillonite catalyst for biodiesel synthesis from waste cooking oil. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4544–4549. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1202>
- Tyagi, B., Chudasama, C. D., & Jasra, R. V. (2006). Determination of structural modification in acid activated montmorillonite clay by FT-IR spectroscopy. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 64(2), 273–278.
- Wang, F. F., Liu, J., Li, H., Liu, C. L., Yang, R. Z., & Dong, W. S. (2015). Conversion of cellulose to lactic acid catalyzed by erbium-exchanged montmorillonite K10. *Green Chemistry*, 17(4), 2455–2463. <https://doi.org/10.1039/c4gc02131b>
- Yaghmaeiyan, N., Mirzaei, M., & Delghavi, R. (2022). Montmorillonite clay: Introduction and evaluation of its applications in different organic syntheses as catalyst: A review. *Results in Chemistry*, 4(October), 100549. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100549>
- Yahya, S., Muhamad Wahab, S. K., & Harun, F. W. (2020). Optimization of biodiesel production from waste cooking oil using Fe-Montmorillonite K10 by response surface methodology. *Renewable Energy*, 157, 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.149>
- Zatta, L., Ramos, L. P., & Wypych, F. (2013). Acid-activated montmorillonites as heterogeneous catalysts for the esterification of lauric acid acid with methanol. *Applied Clay Science*, 80–81, 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.04.009>