



## GREEN SYNTHESIS OF NiO/TI-PCH VIA HYDROTHERMAL METHOD FOR ENHANCED CATALYTIC EFFICIENCY

Amri Yahya\*, Lany Nurhayati, Setty Utami

<sup>1</sup>Program Studi Kimia, Fakultas MIPA, Universitas Nusa Bangsa, Jl. K.H. Sholeh Iskandar KM 4, Tanah Sereal, Bogor, 16166, Indonesia

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 24 Oct2024,

Revised 23 Feb 2025,

Accepted 26 Feb 2025,

Available online 26 Mar 2025

#### Keywords:

- ✓ nickel dispersed,
- ✓ titanium-pillared montmorillonite,
- ✓ heterogeneous catalysis,
- ✓ catalytic activity,
- ✓ physicochemical catalyst.

\*corresponding author:

[amriyahya017@gmail.com](mailto:amriyahya017@gmail.com)

Phone: +6282251346933

[https://doi.org/10.31938/jsn.v](https://doi.org/10.31938/jsn.v15i2.765)

[15i2.765](https://doi.org/10.31938/jsn.v15i2.765)

### ABSTRACT

*Heterogeneous catalysis is a vital field in chemical engineering, offering improved efficiency and selectivity in various catalytic processes. This study focuses on the dispersion of nickel into titanium-pillared montmorillonite (NiO/Ti-PCH) to enhance its catalytic properties. The primary objective is to synthesize and characterize the catalyst to evaluate its potential in catalytic applications, particularly in reactions requiring high surface area and stability. The synthesis of NiO/Ti-PCH was achieved through the intercalation of titanium and nickel into montmorillonite, followed by a series of characterizations using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Gas Sorption Analyzer (GSA), and Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX). FTIR analysis was utilized to confirm the successful formation of Ti-O-Ni bonds, indicating the effective dispersion of nickel and titanium on the catalyst surface. GSA provided insights into the surface area and porosity of the synthesized material, while SEM-EDX offered information on the morphology and elemental composition. The results indicated a significant increase in the surface area of NiO/Ti-PCH due to the formation of titanium and nickel pillars, enhancing the accessibility of active sites for reactions. The FTIR spectra confirmed the presence of Ti-O-Ni bonds, which play a crucial role in improving catalytic activity. Additionally, the catalyst exhibited excellent thermal stability, making it suitable for high-temperature applications. In conclusion, the synthesized NiO/Ti-PCH demonstrates enhanced catalytic activity and thermal stability, positioning it as a promising candidate for various industrial applications. The findings underscore the importance of utilizing pillared clays in the development of efficient heterogeneous catalysts for sustainable chemical processes.*

### Green Synthesis NiO/Ti-PCH melalui Metode Hidrotermal untuk Meningkatkan Efisiensi Katalitik

#### ABSTRAK

Katalisis heterogen dalam teknik kimia yang menawarkan efisiensi dan selektivitas yang lebih baik dalam berbagai proses. Penelitian ini berfokus pada nikel yang terdispersi ke dalam montmorilonit berpilar titanium (NiO/Ti-PCH) untuk meningkatkan sifat katalitik. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk menyintesis dan mengkarakterisasi katalis guna mengevaluasi potensi katalitik, khususnya dalam reaksi yang memerlukan luas permukaan tinggi dan stabilitas. Sintesis NiO/Ti-PCH dilakukan melalui interkalasi titanium dan nikel ke dalam montmorilonit, dikarakterisasi menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), *Gas Sorption Analyser* (GSA), dan *Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray* (SEM-EDX). Analisis FTIR digunakan untuk mengkonfirmasi pembentukan ikatan Ti-O-Ni menunjukkan dispersi nikel dan titanium yang efektif pada permukaan katalis. GSA memberikan luas permukaan dan porositas material yang disintesis, SEM-EDX memberikan informasi mengenai morfologi dan komposisi unsur. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan signifikan pada luas permukaan NiO/Ti-PCH akibat pembentukan pilar titanium dan nikel, yang meningkatkan aksesibilitas situs aktif untuk reaksi. Spektrum FTIR mengkonfirmasi keberadaan ikatan Ti-O-Ni, yang berperan penting dalam meningkatkan aktivitas katalitik, katalis menunjukkan stabilitas termal yang sangat baik, cocok untuk aplikasi pada suhu tinggi. NiO/Ti-PCH yang disintesis menjanjikan untuk berbagai aplikasi industri sebagai katalis heterogen yang efisien untuk proses kimia yang berkelanjutan.

Kata kunci: dispersi nikel, montmorilonit berpilar titanium, katalisis heterogen, aktivitas katalitik, katalis fisikokimia.



## PENDAHULUAN

Pengembangan katalis heterogen merupakan tantangan utama dalam bidang material dalam mendukung keberlanjutan industri kimia. Katalis berperan dalam proses reaksi industri. Katalis fase padat (heterogen) dalam sistem reaksi, menarik perhatian karena kemampuannya untuk digunakan kembali dan keunggulannya dalam pemisahan yang lebih sederhana dibandingkan dengan katalis homogen (Neethu et al., 2021).

Salah satu material alami dalam pengembangan katalis heterogen adalah lempung montmorilonit. Material ini memiliki ketersediaan melimpah, sifat fisikokimia unggul, serta kemampuan untuk dimodifikasi, untuk aplikasi katalis pada berbagai reaksi kimia. Struktur berlapis montmorilonit memungkinkan impregnasi oksida logam, yang dapat meningkatkan aktivitas katalitik dan stabilitas material. Penggunaan katalis heterogen berbasis lempung merupakan alternatif dalam proses katalitik. Keasaman padatan dan luas permukaan dari katalis berbasis lempung dapat mengurangi hasil samping dan mempercepat reaksi (Cecilia et al., 2018; Chmielarz et al., 2018).

Titania dalam penelitian ini akan diimpregnasi ke dalam lempung untuk meningkatkan luas permukaan, kestabilan, dan keasaman padatan pada katalis (Belver et al., 2015). Katalis heterogen berperan penting dalam sintesis organik karena sifatnya yang dapat diregenerasi dan dapat digunakan kembali.

Lempung montmorilonit dalam penelitian ini akan dimodifikasi menjadi *Porous Clay Heterostructure* (PCH) dengan mendistribusikan oksida logam untuk meningkatkan aktivitas katalitik. Menurut Agustian et al. (2018); Wróblewska et al. (2021) keberadaan oksida logam pada permukaan lempung dapat meningkatkan efisiensi reaksi isomerisasi eugenol menjadi isoeugenol dan oksidasi isoeugenol menjadi vanilin. Aktivitas katalitik dapat ditingkatkan dengan memodifikasi kerangka silika-alumina menggunakan unsur seperti Ti-Zr, Ni-Zr, dan W-Ti, pada struktur berpilar (Fatimah et al., 2015, 2023). Berdasarkan temuan tersebut, dilakukan pengembangan katalis heterogen berbasis lempung yang terpilar titania (Ti-PCH) dengan mendispersikan nikel oksida (NiO) pada permukaannya. Tujuannya adalah mengkaji sifat fisikokimia material lempung yang dimodifikasi, hubungan dengan kinerja katalitik. Pemilihan NiO yaitu dapat meningkatkan keasaman padatan dan keefektifan reaksi redoks (Haneda & Hamada,

2022; Jinesh et al., 2009; Suresh et al., 2024). Ti-PCH memiliki luas permukaan dan kemampuan adsorpsi yang tinggi (Vasu et al., 2022). Kombinasi kedua material ini, dengan montmorilonit sebagai media pendukung, diharapkan dapat menghasilkan katalis dengan aktivitas dan stabilitas termal tinggi, serta ramah lingkungan.

Metode sintesis yang akan diterapkan dalam penelitian ini adalah metode hidrotermal, karena lebih ramah lingkungan, menggunakan suhu dan tekanan tinggi, serta tidak memerlukan bahan kimia berbahaya (Araujo et al., 2021). Karakterisasi material menggunakan metode *Gas Sorption Analysis* (GSA) untuk menentukan luas permukaan spesifik dan distribusi pori, *Scanning Electron Microscopy* (SEM-EDX) untuk mempelajari morfologi dan komposisi katalis, analisis *Fourier Transform Infrared* (FTIR) untuk mengidentifikasi gugus fungsi pada material yang telah disintesis.

Penelitian diharapkan menghasilkan katalis dengan performa katalitik yang unggul, memenuhi prinsip-prinsip *green chemistry* yaitu: efisiensi, non-toksik, dan dampak minimum terhadap lingkungan. Katalis NiO/Ti-PCH dapat diaplikasikan dalam reaksi isomerisasi dengan efisiensi waktu dan konsentrasi optimum sehingga mempermudah reaksi.

## BAHAN DAN METODE

### Bahan dan Alat

Bahan sampel yang digunakan adalah monmorilonit dari Bogor, Jawa Barat, Indonesia. Bahan kimia yang digunakan meliputi: titanium isopropoksida (TTIP), tetraetil ortosilikat (TEOS), NiCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O, etanol p.a., isopropanol, cetil trimetil ammonium bromida (CTAB), dan sodium dodesil sulfat (SDS).

### Metode

#### Sintesis NiO/Ti-PCH

Sintesis NiO/Ti-PCH dimulai dengan preparasi Ti-PCH berdasarkan metode yang dilaporkan oleh (Fatimah et al., 2023) sebagai berikut: monmorilonit 2,5 gram dicampurkan dengan CTAB 9 gram dalam isopropanol 100 mL, diaduk selama 24 jam agar terbentuk suspensi monmorilonit. Larutan ditambahkan dodesilamina ke dalam suspensi sebagai ko-surfaktan, diaduk selama 24 jam. Campuran 4,7 gram TTIP dan 5 mL TEOS dengan rasio molar Ti:Si 2:1 disiapkan dalam 30 mL isopropanol

sebagai prekursor. Larutan prekursor ditambahkan ke dalam suspensi montmorilonit dengan kadar Ti 15% dalam Ti-PCH dan diaduk selama 2 jam. Selanjutnya, larutan tersebut diberi perlakuan hidrotermal pada prekursor dengan menuangkan campuran ke dalam *autoclave* yang dilapisi oleh Teflon pada suhu 150°C selama semalam. Endapan yang diperoleh, dicuci menggunakan air deionisasi, dan dikeringkan dalam oven pada suhu 80°C untuk menghasilkan Ti-PCH.

Metode impregnasi digunakan untuk melakukan dispersi NiO ke dalam Ti-PCH, larutan NiCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O dan bubuk Ti-PCH dicampur kemudian diaduk semalaman. Persentase Ni dalam komposit tersebut adalah 5% berat. Padatan tersebut dikeringkan dalam oven, diikuti dengan kalsinasi padatan pada suhu 200°C selama 2 jam untuk mendapatkan NiO/Ti-PCH.

**Karakterisasi Material**

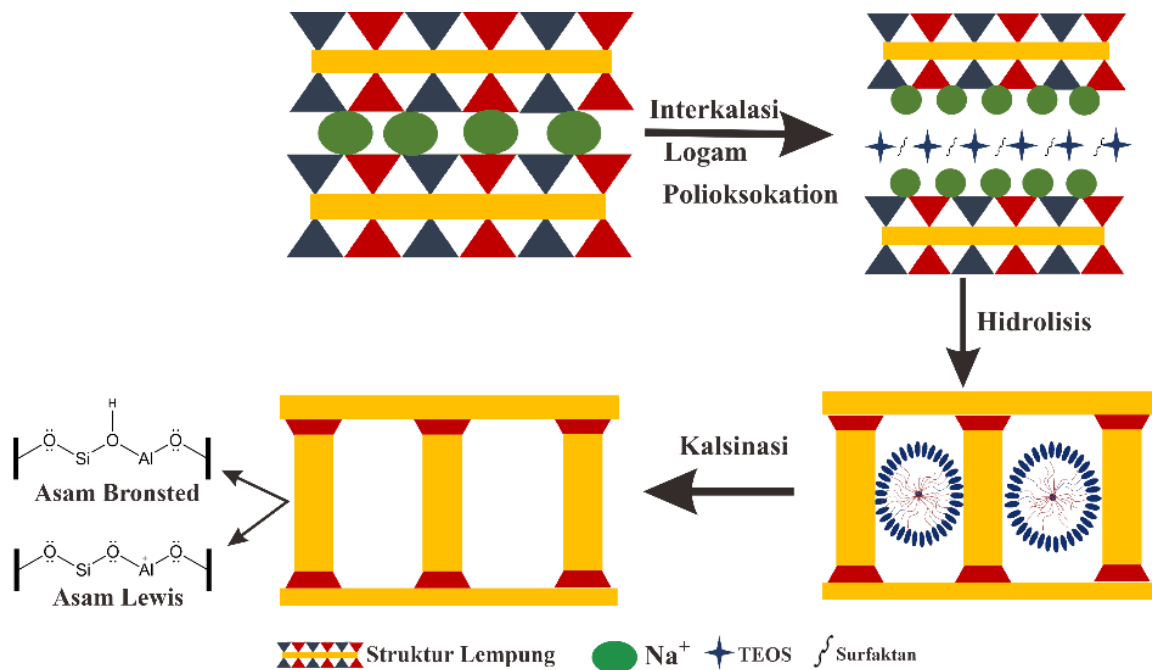
NiO/Ti-PCH yang disiapkan dan dikonfirmasi oleh beberapa instrumen yang terdiri dari analisis ukuran pori material, ditentukan menggunakan GSA dan analisis morfologi permukaan dan kandungan unsur bahan dianalisis menggunakan SEM-EDX. Selain itu, analisis FTIR juga dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi pada material yang disintesis.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Sintesis Katalis Ti-PCH**

Sintesis katalis Ti-PCH ditampilkan dalam Gambar 1, dimulai dengan interkalasi surfaktan *cetyltrimethylammonium bromide* (CTAB) dan ko-surfaktan dodesilamina (SDS) ke dalam lapisan montmorilonit. Proses ini dirancang untuk mendapatkan lingkungan yang lebih hidrofobik di dalam *interlayer* montmorilonit, membentuk misel yang memungkinkan masuknya polioksokation logam titanium. Tahap ini penting untuk menjauhkan jarak antar lapisan montmorilonit dan memudahkan pembentukan pori-pori selama proses kalsinasi. Penelitian (Lai et al., 2021) dalam proses sintesis HPW/XSiMt menggunakan CTAB sebagai surfaktan untuk mendapatkan lingkungan hidrofobik dalam *interlayer* montmorilonit.

Interkalasi titanium dilakukan menggunakan titanium isopropoksida (TTIP) dan *tetraethyl orthosilicate* (TEOS) sebagai agen pemilar. Selama proses kalsinasi pada 550°C, surfaktan terdekomposisi meninggalkan pilar oksida logam yang stabil, yaitu TiO<sub>2</sub> dan SiO<sub>2</sub>.



Gambar 1. Sintesis Katalis Lempung menjadi Lempung Terpillar

## Karakterisasi Material

### Fourier Transform Infrared (FTIR)

Hasil analisis FTIR menunjukkan karakteristik vibrasi gugus fungsi yang menunjukkan ikatan Ti-O-Si dan gugus hidroksil berperan penting dalam meningkatkan reaktivitas katalis. Gugus fungsi baru yang terbentuk pada material NiO/Ti-PCH dapat dilihat pada Gambar 2. Adanya gugus fungsi berkaitan erat antara struktur katalis dengan peningkatan aktivitas katalitik.

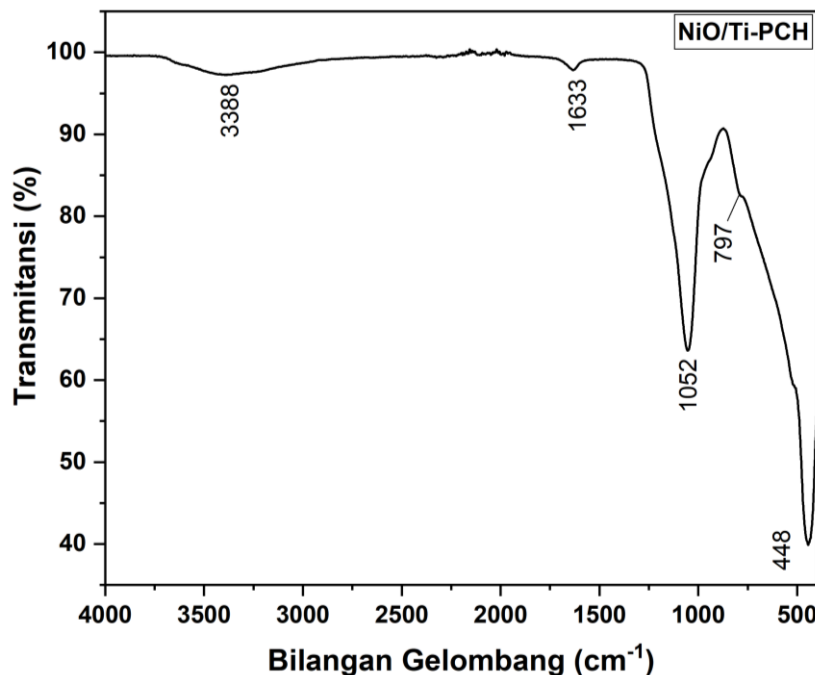
Spektrum FTIR mengonfirmasi keberadaan NiO dan TiO<sub>2</sub> dalam matriks PCH melalui pita serapan. Pita spektrum serapan utama diamati pada bilangan gelombang 3388 cm<sup>-1</sup>, yang terkait dengan vibrasi regangan gugus OH. Vibrasi ini umumnya berasal dari gugus hidroksil yang terkoordinasi dengan ion logam seperti Al dan Mg. Selain itu, pita serapan OH juga ditandai oleh puncak yang lebar, mengindikasikan interaksi kuat dengan gugus hidroksil.

Vibrasi pada bilangan gelombang 1633 cm<sup>-1</sup> menunjukkan pita serapan gugus Al-OH, pita serapan kompleks pada 1052 cm<sup>-1</sup> berkaitan dengan vibrasi regangan gugus Si-O, yang merupakan ciri khas dari struktur silikat (Danková et al., 2014; Mohammed et al., 2024). Serapan Ti

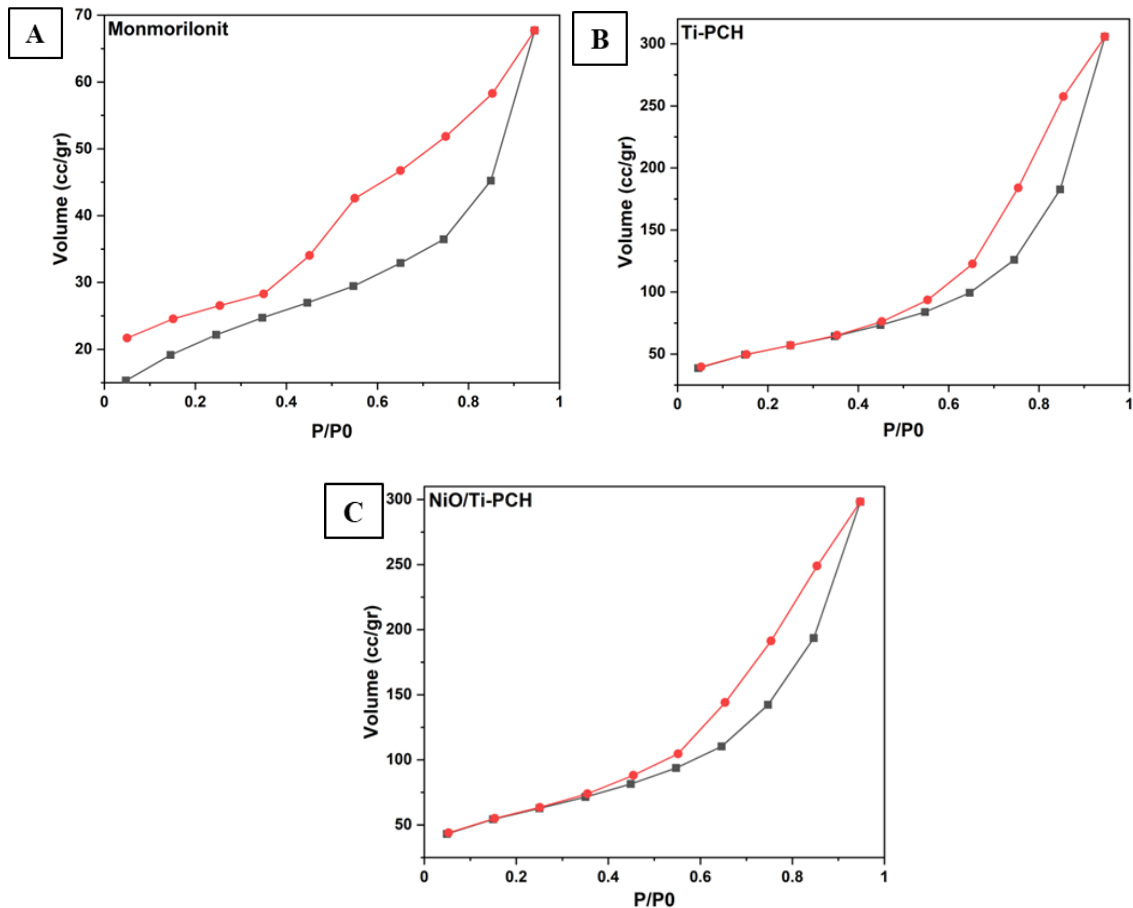
anatase teramati pada bilangan gelombang 797 cm<sup>-1</sup>, serapan yang berkaitan dengan Ti-O-Ni terdeteksi pada bilangan gelombang 448 cm<sup>-1</sup>. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Antoshkina et al. (2019) dan Guan et al. (2020) yang menunjukkan karakteristik material Ni-O-Al-O dengan pita serapan Ni-O pada rentang 400-500 cm<sup>-1</sup>, serta Harunrasjid et al. (2023) yang menunjukkan karakteristik material Ni dan Ti pada pita serapan 440 cm<sup>-1</sup> Ti-O-Ni.

### Gass Sorption Analyser (GSA)

Sifat fisika katalis, terutama luas permukaan spesifik, dianalisis melalui isotherm adsorpsi dan desorpsi nitrogen (N<sub>2</sub>), ditampilkan pada Gambar 3. Analisis ini dilakukan pada katalis yang diperoleh melalui proses impregnasi nikel oksida (NiO) dengan titania (TiO<sub>2</sub>) dalam matriks lempung. Metode ini memberikan informasi penting mengenai karakteristik porositas dan distribusi ukuran pori material katalis. Perubahan luas permukaan dan kapasitas adsorpsi setelah diimpregnasi menunjukkan keberhasilan modifikasi struktur lempung, berpengaruh langsung terhadap sifat katalitik dan efisiensi material dalam aplikasi reaksi kimia.



Gambar 2. Spektrum FTIR NiO/Ti-PCH.



Gambar 3. Grafik Isoterm (A) Montmorilonit, (B) Ti-PCH, (C) NiO/Ti-PCH

Volume dihitung dengan mengurangi volume mikropori dan mesopori dari total volume pori. Setelah dilakukan analisis terlihat peningkatan volume pori pada Gambar 3(C) karena penambahan logam Ti dan oksida. Hal ini menunjukkan adanya oksida logam membentuk sejumlah kecil mikropori selama proses sintesis, fenomena ini juga didapat dalam penelitian (Fatimah et al., 2023).

Hasil karakterisasi sifat permukaan dan porositas menunjukkan adanya peningkatan kapasitas adsorpsi dibandingkan dengan montmorilonit pada Gambar 3(A). Peningkatan ini ditunjukkan adanya loop histeresis yang semakin besar pada Gambar 3(B) dan 3(C) menunjukkan bertambahnya kapasitas pori material. Bentuk *loop* histeresis tersebut, disertai dengan pola isoterm yang dihasilkan, menegaskan bahwa pori-pori material memiliki karakteristik berbentuk celah dengan ukuran yang tidak seragam. Hal ini sejalan dengan penelitian (Arima et al., 2024; Zhang et al., 2023) yang menunjukkan korelasi antara morfologi pori-pori celah dan kapasitas adsorpsi material. Analisis ini menunjukkan bahwa modifikasi logam NiO yang

terimpregnasi dalam lempung terpillar Ti-PCH mampu meningkatkan adsorpsi dan porositas, sehingga NiO/Ti-PCH diharapkan lebih efektif dalam aplikasi katalitik.

Isoterm pada Gambar 3(C) merupakan hasil analisis GSA dengan tipe isoterm VI, yang menunjukkan karakteristik adsorpsi pada padatan bermesopori dengan ukuran pori 2-50 nm. Hal ini juga diperkuat dengan hasil penelitian (Hartanto et al., 2011; Petcu et al., 2023) yang juga memiliki isoterm tipe VI. Peningkatan volume teradsorpsi yang signifikan pada tekanan parsial tinggi mengindikasikan adanya mesopori yang lebih besar pada material (Darmawan et al., 2024; Shimizu & Matubayasi, 2024; Wróblewska et al., 2021). Hal ini sejalan dengan kenaikan porositas pada material Ti-PCH dan NiO/Ti-PCH menunjukkan modifikasi struktur material efektif meningkatkan volume dan ukuran pori. Selain itu, tingginya luas permukaan spesifik material katalis NiO/Ti-PCH meningkatkan sifat katalitik. Luas permukaan yang lebih besar memungkinkan lebih banyak interaksi antara situs aktif katalis dan molekul reaktan, sehingga meningkatkan efisiensi reaksi.

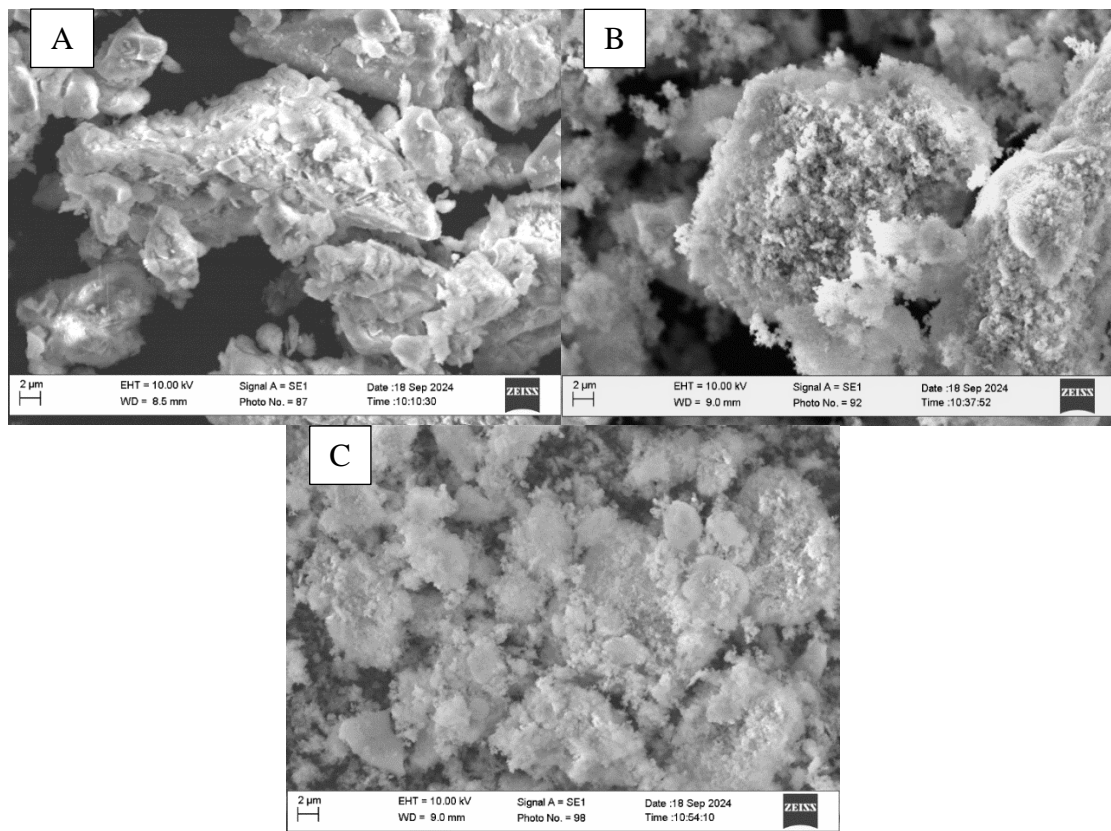
## SEM-EDX

Hasil analisis SEM-EDX menunjukkan bahwa katalis NiO/Ti-PCH memiliki morfologi partikel dengan distribusi yang seragam dan menunjukkan adanya unsur Ni, Ti, Si, dan O yang tersebar merata di seluruh material. Citra SEM yang ditampilkan pada Gambar 4(A) menampilkan morfologi permukaan montmorilonit dengan ciri khas serpihan berbentuk pipih yang mendominasi struktur material. Morfologi ini mencerminkan sifat alami montmorilonit sebagai material berlapis dengan struktur lamelar. Gambar 4(B) menunjukkan perubahan signifikan pada morfologi setelah montmorilonit dimodifikasi menjadi katalis Ti-PCH. Pada citra tersebut, serpihan-serpihan terlihat menutupi permukaan lempung, yang mengindikasikan bahwa titanium terdispersi di seluruh permukaan material. Dispersi yang merata merupakan indikator keberhasilan modifikasi, memengaruhi morfologi, berpotensi meningkatkan sifat katalitik melalui peningkatan jumlah situs aktif pada permukaan katalis.

Gambar 4(C) menggambarkan morfologi permukaan katalis berbentuk serpihan dengan ukuran partikel bervariasi akibat adanya aglomerasi partikel (Meng et al., 2020; Natsir et

al., 2021). Aglomerasi ini berperan penting dalam menentukan struktur dan sifat permukaan katalis, karena dapat memengaruhi luas permukaan spesifik yang berhubungan langsung dengan efisiensi katalitik. Struktur seperti ini menunjukkan potensi yang tinggi untuk aplikasi katalitik, meskipun perlu diperhatikan optimasi distribusi ukuran partikel untuk memaksimalkan luas permukaan aktifnya.

Berdasarkan hasil analisis EDX, kandungan titanium (Ti) pada permukaan katalis Ti-PCH dan NiO/Ti-PCH masing-masing terhitung sebesar 19,70% dan 17,47%. Penurunan kandungan Ti pada NiO/Ti-PCH dibandingkan dengan Ti-PCH dapat dihubungkan dengan adanya proses impregnasi NiO. Namun, kandungan NiO pada permukaan katalis NiO/Ti-PCH tidak terdeteksi dalam analisis ini. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh konsentrasi NiO yang sangat rendah, sehingga respon yang dihasilkan terlalu lemah untuk terdeteksi oleh alat EDX (Wang et al., 2021). Ketidakterdeteksian ini menunjukkan bahwa meskipun NiO telah terimpregnasi, namun distribusi atau konsentrasi di permukaan katalis memerlukan optimasi lebih lanjut untuk memastikan keberadaan dan kontribusinya terhadap aktivitas katalitik.



Gambar 4. Mikrograf SEM (A) Montmorilonit, (B) Ti-PCH, (C) NiO/Ti-PCH

## KESIMPULAN

Imobilisasi nikel ke dalam montmorilonit berpilar titanium telah berhasil disintesis dan dikarakterisasi menggunakan FTIR, GSA, dan SEM-EDX. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa pembentukan pilar titanium dan nikel berkontribusi pada peningkatan luas permukaan katalis. Dispersi nikel dan titanium pada permukaan katalis dikonfirmasi melalui spektrum FTIR dengan adanya ikatan Ti-O-Ni menunjukkan material NiO/Ti-PCH berpotensi meningkatkan aktivitas katalitik serta stabilitas termal yang lebih tinggi.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi atas dukungan finansial melalui Penelitian Dosen Pemula Perguruan Tinggi (Nomor 106/E5/PG.02.00.PL/2024).

## DAFTAR PUSTAKA

- Agustian, E., Rinaldi, N., Adillina, I. B., Sulaswatty, A., & Kusuma, D. A. (2018). Preparation of aluminium and cobalt pillared bentonite using ultrasonic treatment for vanillin catalyst. *AIP Conference Proceedings*, 2024(2000), 1–6. <https://doi.org/10.1063/1.5064330>
- Antoshkina, E., Rakova, O., & Efremov, A. (2019). Investigation of NiO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> properties via xrd, ftir techniques and thermal analysis. *Materials Science Forum*, 946 MSF, 134–138. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.134>
- Araujo, R. O., Santos, V. O., Ribeiro, F. C. P., Chaar, J. da S., Falcão, N. P. S., & de Souza, L. K. C. (2021). One-step synthesis of a heterogeneous catalyst by the hydrothermal carbonization of acai seed. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 134(1), 199–220. <https://doi.org/10.1007/s11144-021-02059-9>
- Arima, H., Hiraide, S., & Watanabe, S. (2024). Elucidating the particle size-dependent guest-induced structural transition of flexible metal-organic frameworks by exploring cooperative nature. *Journal of Materials Chemistry A*, 12(35), 23647–23657. <https://doi.org/10.1039/d4ta04222k>
- Belver, C., Bedia, J., & Rodriguez, J. J. (2015). Titania-clay heterostructures with solar photocatalytic applications. *Applied Catalysis B: Environmental*, 176–177, 278–287. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.04.004>
- Danková, Z., Mockovčíaková, A., & Dolinská, S. (2014). Influence of ultrasound irradiation on cadmium cations adsorption by montmorillonite. *Desalination and Water Treatment*, 52(28–30), 5462–5469. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.814006>
- Darmawan, A., Sulaksono, S., Arifin, M. S., Muhtar, H., & Sriyanti, S. (2024). Highly efficient TiO<sub>2</sub>-pillared smectite clay with Ni and Co doping for Rhodamine B removal: kinetics of adsorption and photodegradation. *Clays and Clay Minerals*, 72, 1–11. <https://doi.org/10.1017/cmn.2024.12>
- Fatimah, I., Rubiyanto, D., & Huda, T. (2015). Preparation and characterization of Ni/Zr-Saponite as catalyst in catalytic hydrogen transfer reaction of isopulegol. *Materials Science Forum*, 827, 311–316. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.827.311>
- Fatimah, I., Yahya, A., Purwiandono, G., & Sagadevan, S. (2023). WO<sub>3</sub> dispersed on a titanium porous clay heterostructure as a highly efficient visible light-active photocatalyst. *Inorganic Chemistry Communications*, 158(P1), 111548. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111548>
- Guan, B., Yu, J., Guo, S., Yu, S., & Han, S. (2020). Porous nickel doped titanium dioxide nanoparticles with improved visible light photocatalytic activity. *Nanoscale Advances*, 2(3), 1352–1357. <https://doi.org/10.1039/c9na00760a>
- Haneda, M., & Hamada, H. (2022). Nickel oxide-based catalysts for ethane oxidative dehydrogenation: a review. *Comptes Rendus - Chimie*, 15, 1–12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crci.2015.07.016>

- Hartanto, D., Purbaningtyas, T. E., Fansuri, H., & Prasetyoko, D. (2011). Karakterisasi Struktur Pori dan Morfologi ZSM-2 Mesopori yang Disintesis dengan Variasi Waktu Aging. *Jurnal Ilmu Dasar*, *12*(1), 80–90.
- Harunrasjid, M. C., Aritonang, A. B., Wibowo, M. A., Ardiningsih, P., & Adhitiyawarman, A. (2023). Synthesis of Ni doped-TiO<sub>2</sub> Thin Film Photocatalysts on Glass Surfaces. *IJCA (Indonesian Journal of Chemical Analysis)*, *6*(1), 85–96. <https://doi.org/10.20885/ijca.vol6.iss1.art9>
- Jinesh, C. M., Antonyraj, C. A., & Kannan, S. (2009). Isomerization of eugenol and alkenyl aromatics of perfumery interest over Ni-containing layered double hydroxides as solid base catalysts. *Catalysis Today*, *141*(1–2), 176–181. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2008.03.023>
- Lai, F., Yan, F., Wang, Y., Li, C., Cai, J., & Zhang, Z. (2021). Tungstophosphoric acid supported on metal/Si-pillared montmorillonite for conversion of biomass-derived carbohydrates into methyl levulinate. *Journal of Cleaner Production*, *314*(June), 128072. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128072>
- Meng, X., Wang, X., Zhang, D., Luo, H., Xu, C., & Liu, S. (2020). Electrodeposition of Ni-Mo/TiO<sub>2</sub> nanocomposite coatings on low-carbon steels for improving corrosion resistance. *International Journal of Electrochemical Science*, *15*(7), 6198–6206. <https://doi.org/10.20964/2020.07.35>
- Mohammed, K. S., Atlabachew, M., Aragaw, B. A., & Asmare, Z. G. (2024). Synthesis of Kaolin-Supported Nickel Oxide Composites for the Catalytic Oxidative Degradation of Methylene Blue Dye. *ACS Omega*, *9*(4), 4287–4299. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c05126>
- Natsir, M., Putri, Y. I., Wibowo, D., Maulidiyah, M., Salim, L. O. A., Azis, T., Bijang, C. M., Mustapa, F., Irwan, I., Arham, Z., & Nurdin, M. (2021). Effects of Ni–TiO<sub>2</sub> Pillared Clay–Montmorillonite Composites for Photocatalytic Enhancement Against Reactive Orange Under Visible Light. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, *31*(8), 3378–3388. <https://doi.org/10.1007/s10904-021-01980-9>
- Neethu, P. P., Sreenavya, A., & Sakthivel, A. (2021). Molybdate Stabilized Magnesium-Iron Hydroxalcalite Materials: Potential Catalysts for Isoeugenol to Vanillin and Olefin Epoxidation. *Applied Catalysis A: General*, *623*(April), 118292. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2021.118292>
- Petcu, G., Papa, F., Atkinson, I., Baran, A., Apostol, N. G., Petrescu, S., Richaudeau, L., Blin, J. L., & Parvulescu, V. (2023). Co- and Ni-Doped TiO<sub>2</sub> Nanoparticles Supported on Zeolite Y with Photocatalytic Properties. *Nanomaterials*, *13*(15). <https://doi.org/10.3390/nano13152200>
- Shimizu, S., & Matubayasi, N. (2024). Sorption Hysteresis: A Statistical Thermodynamic Fluctuation Theory. *Langmuir*, *40*(22), 11504–11515. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c00606>
- Suresh, L., Snega, R., Geetha Sravanthy, P., & Saravanan, M. (2024). Phytosynthesis of Nickel Oxide Nanoparticles and Their Antioxidant and Antibacterial Efficacy Studies. *Cureus*, *16*(4), 1–13. <https://doi.org/10.7759/cureus.58064>
- Vasu, D., Karthi Keyan, A., Sakthnathan, S., & Chiu, T. W. (2022). Investigation of electrocatalytic and photocatalytic ability of Cu/Ni/TiO<sub>2</sub>/MWCNTs Nanocomposites for detection and degradation of antibiotic drug Furaltadone. *Scientific Reports*, *12*(1), 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-04890-z>
- Wang, H., Cao, M., Huang, R., Tao, C., Pan, W., Hao, H., Yao, Z., & Liu, H. (2021). Preparation of BaTiO<sub>3</sub>@NiO core-shell nanoparticles with antiferroelectric-like characteristic and high energy storage capability. *Journal of the European Ceramic Society*, *41*(7), 4129–4137. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.02.042>
- Wróblewska, A., Makuch, E., Retajczyk, M., Sreńscek-Nazzal, J., Koren, Z. C., & Michalkiewicz, B. (2021). Synthesis, characterization and application of the SBA-16 catalyst modified with titanium(IV)

chloride in the eugenol isomerization.  
*Microporous and Mesoporous Materials*,  
311(July 2020).  
<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110685>

Zhang, Y., Wang, Z., Si, S., & Yue, J. (2023).  
Study on the Effect of Pore Structure on  
Desorption Hysteresis of Deep Coking Coal  
under High-Temperature and High-Pressure  
Conditions. *ACS Omega*.  
<https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07528>