

# Sintesa dan Karakterisasi Katalis CaO-MgO/KF untuk Konversi Trigliserida Menjadi Monogliserida dari Minyak Kelapa Sawit

Amira Zalwa Khairunisa, Selastia Yuliati, Mustain

Jurusan Teknik Kimia, Program Studi Teknologi Kimia Industri, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang

\*Koresponden email: amirazalwakhairunisa@gmail.com

Diterima: 8 November 2025

Disetujui: 19 November 2025

## Abstract

This study aims to synthesize and characterize CaO-MgO/KF catalyst derived from dolomite sourced from Gresik, East Java, for the conversion of triglycerides into monoglycerides via glycerolysis of palm oil. The dolomite was calcined at 800 °C to produce active CaO and MgO phases. The catalyst were impregnated with 2% and 3% potassium fluoride (KF) by weight, followed by recalcination at various temperatures of 400, 450, 500, 550, and 600 °C for 4 hours. Characterization included basic site quantification via acid-base titration and morphological and elemental analysis using SEM-EDS. The result showed that the catalyst with 3% KF and calcination at 550 °C exhibited the highest basic site density of 12,3 mmol/g, along with a rough, porous surface morphology conducive to catalytic activity. Glycerolysis testing demonstrated the highest monoglyceride yield of 56% under these optimum condition. The addition of KF enhanced the basic strength and efficiency of the catalyst. This study confirm that CaO-MgO/KF catalyst synthesized from dolomite are promising as efficient and environmentally friendly heterogenous catalyst for monoglyceride synthesis.

**Keywords:** *CaO-MgO/KF, dolomite, glycerolysis, monoglyceride, heterogenous catalyst*

## Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi katalis CaO-MgO/KF berbasis dolomit dari Gresik, Jawa Timur untuk konversi trigliserida menjadi monogliserida dari minyak kelapa sawit melalui reaksi gliserolisis. Dolomit dikalsinasi pada suhu 800 °C untuk menghasilkan senyawa aktif CaO dan MgO. Proses impregnasi dilakukan dengan penambahan kalium fluorida (KF) sebesar 2% dan 3% dari berat katalis, kemudian dikalsinasi ulang pada variasi suhu 400, 450, 500, 550, dan 600 °C selama 4 jam. Karakterisasi dilakukan terhadap jumlah situs basa melalui titrasi asam-basa serta morfologi dan komposisi menggunakan SEM-EDS. Hasil menunjukkan bahwa katalis dengan konsentrasi KF 3% dan suhu kalsinasi 550 °C memberikan jumlah situs tertinggi sebesar 12,3 mmol/g serta morfologi dengan permukaan kasar dan pori-pori kecil yang mendukung aktivitas katalitik. Pengujian reaksi gliserolisis menunjukkan *yield* monogliserida tertinggi sebesar 56% pada kondisi optimum tersebut. Penambahan KF terbukti meningkatkan kekuatan basa katalis dan efisiensi konversi. Penelitian ini membuktikan bahwa katalis CaO-MgO/KF dari dolomit memiliki potensi sebagai katalis heterogen yang efisien dan ramah lingkungan dalam sintesis monogliserida.

**Kata Kunci:** *CaO-MgO/KF, dolomit, gliserolisis, monogliserida, katalis heterogen*

## 1. Pendahuluan

Monogliserida (MG) adalah senyawa surfaktan yang banyak digunakan dalam industri makanan, kosmetik, farmasi, dan lainnya sebagai emulsifier. Monogliserida merupakan ester dari gliserol dan satu molekul asam lemak [1]. Salah satu metode yang efektif dan ramah lingkungan dalam sintesis monogliserida adalah reaksi gliserolisis antara minyak nabati dan gliserol dengan bantuan katalis basa heterogen [2]. Reaksi gliserolisis lebih sederhana dan lebih ekonomis karena tidak memerlukan proses menghidrolisis lemak menjadi asam lemak, pemisahan pemurnian asam lemak dan langkah esterifikasi selektif seperti pada metode enzimatik. Gliserolisis adalah reaksi penting antara gliserol dengan minyak atau lemak untuk menghasilkan Mono- dan Di-Acyl Gliserol [3]. Reaksi gliserolisis akan berjalan lambat tanpa menggunakan katalis. Adanya katalis akan membuat reaksi berjalan cepat dan dapat berlangsung pada tekanan dan suhu normal kondisi [4].

Dalam proses sintesis monogliserida, katalis yang efisien dan ramah lingkungan terutama dalam industri kimia dan energi terbarukan. Katalisnya dapat berupa katalis heterogen (berada dalam fase yang berbeda dengan reaktan) atau katalis homogen (larut dalam fase yang sama dengan reaktan)

[5]. Salah satu katalis yang memiliki potensi besar adalah katalis heterogen CaO-MgO/KF, yang dapat digunakan dalam berbagai reaksi transesterifikasi dan pembentukan senyawa kimia lainnya. Campuran CaO-MgO menunjukkan peningkatan stabilitas termal dan ketahanan terhadap bahan kimia korosif, terutama bila digunakan sebagai bahan refraktori [6]. Katalis berbasis kalsium oksida (CaO) dan magnesium oksida (MgO), yang dapat diperoleh dari dolomit ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), sebuah sumber alami serta relatif murah dan melimpah yang mengandung kalsium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) dan magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) dalam bentuk karbonat [7]. Proses kalsinasi dolomit pada suhu tinggi menghasilkan oksida logam (CaO dan MgO) yang memiliki sifat basa kuat, cocok untuk reaksi transesterifikasi [8].

Proses kalsinasi dolomit dilakukan terlebih dahulu pada suhu sekitar 800 °C untuk mengubah kandungan kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) dan magnesium karbonat ( $\text{MgCO}_3$ ) menjadi oksida (CaO dan MgO). Suhu ini terbukti mampu menghasilkan luas permukaan dan porositas yang optimal, serta basa kuat yang sangat reaktif [9]. Setelah pembentukan CaO-MgO, tahap selanjutnya adalah impregnasi dengan kalium Fluorida (KF) sebagai basa heterogen. Proses ini dilanjutkan dengan kalsinasi ulang pada suhu bervariasi, yaitu 400, 450, 500, 550, hingga 600 °C, untuk mengaktivasi kembali katalis dan memperkuat pembentukan fasa aktif seperti  $\text{KCaF}_3$  dan  $\text{MgKF}_3$ .

Namun, kinerja katalis CaO-MgO sering kali terbatas oleh aglomerasi dan pelarutan katalis dalam media reaksi. Oleh karena itu, penambahan kalium fluorida (KF) pada katalis CaO-MgO bertujuan untuk meningkatkan kekuatan basa, kestabilan, dan ketahanan terhadap pelarutan [4]. Penelitian menunjukkan bahwa KF dapat memperbaiki kemampuan adsorpsi katalis serta meningkatkan aktivitas katalitiknya dalam reaksi transesterifikasi trigliserida menjadi monogliserida. Kombinasi CaO-MgO/KF ini diharapkan dapat memberikan performa yang lebih baik, meningkatkan konversi, dan memperpanjang umur pemakaian katalis dalam proses sintesis monogliserida yang lebih efisien dan berkelanjutan [10].

Dolomit mengandung kalsium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) dan magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) yang dapat diproses menjadi oksida kalsium (CaO) dan magnesium (MgO), yang memiliki aktivitas katalitik dalam berbagai reaksi organik [11], termasuk transesterifikasi untuk pembentukan monogliserida. Proses ini sangat relevan dalam industri pangan, khususnya dalam pembuatan produk seperti margarin dan produk minyak lainnya yang memerlukan monogliserida sebagai emulsifier [9].

Salah satu strategi untuk meningkatkan aktivitas katalis adalah dengan menambahkan KF (Kalium Fluorida) sebagai basa heterogen. KF dapat meningkatkan ketahanan dan stabilitas katalis, serta mempermudah pembentukan senyawa yang lebih stabil dan reaktif. Katalis CaO-MgO/KF yang disintesis dari dolomit tidak hanya menawarkan efisiensi yang lebih baik, tetapi juga merupakan alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan katalis berbasis logam berat [4].

## 2. Metode Penelitian

Bahan yang diperlukan dalam penelitian ini antara lain adalah dolomit Gresik merk "Super", kalium fluorida dari Merck, minyak kelapa sawit, gliserol dari Merck, dan aquades. Alat yang digunakan terdiri dari alat untuk preparasi katalis untuk proses kalsinasi dengan *grinder* dan *furnace*. Untuk impregnasi menggunakan *hotplate stirrer*. Untuk analisis kimia katalis menggunakan metode titrasi dengan alat buret, statif, dan klem untuk mengetahui kadar kebasaaan katalis.

Penelitian ini terdiri dari empat tahap, yaitu: yang pertama preparasi CaO-MgO melalui proses kalsinasi dengan tempertaur 800 °C. Yang kedua impregnasi KF dengan variasi berat 2% dan 3%. Yang ketiga pengujian jumlah situs basa katalis CaO-MgO/KF dengan metode titrasi asam basa dan pengujian, dari sepuluh sampel katalis CaO-MgO/KF yang telah diuji situs basanya diambil satu sampel untuk dianalisa XRD (*X-Ray Diffraction*) dan analisa morfologi SEM-EDS (*Scanning Electron Microscopy-Energy Disperse X-Ray Spectroscopy*). Terakhir konversi trigliserida menjadi monogliserida dengan metode gliserolisis minyak kelapa sawit.

Preparasi katalis CaO-MgO/KF dilakukan dengan menggunakan dolomit Gresik merk "Super" yang terlebih dahulu dibersihkan dari kotoran, kemudian dihaluskan menggunakan grinder dan diayak dengan ukuran 200 mesh. Serbuk dolomit yang telah diperoleh ditimbang sebanyak 500 gram dan selanjutnya dikalsinasi pada suhu 800 °C selama 3 jam menggunakan *furnace*. Hasil kalsinasi kemudian disimpan di dalam desikator untuk mencegah penyerapan uap air sebelum digunakan pada tahap berikutnya.

Proses impregnasi dilakukan dengan menimbang 50 gram katalis CaO-MgO, kemudian ditambahkan kalium fluorida (KF) dengan variasi 2% dan 3% dari berat katalis. Kalium Fluorida dilarutkan ke dalam 50 ml aquades, lalu serbuk CaO-MgO ditambahkan sedikit demi sedikit ke dalam larutan tersebut sambil terus diaduk selama 1 jam hingga tercampur homogen. Campuran yang terbentuk disaring, kemudian dikeringkan pada suhu 140 °C selama 6 jam untuk menghilangkan kadar air. Padatan hasil pengeringan selanjutnya dikalsinasi ulang pada variasi suhu 400, 450, 500, 550, dan 600 °C selama 4 jam.

Pengujian jumlah situs basa dilakukan dengan sejumlah katalis dan dilarutkan dengan larutan HCl 0,1N lalu dilakukan pengadukan selama 1 jam. Kemudian filtrat disaring dan ditambahkan indikator fenolftalein. Titrasi filtrat dengan larutan NaOH 0,1N hingga terjadi perubahan warna.

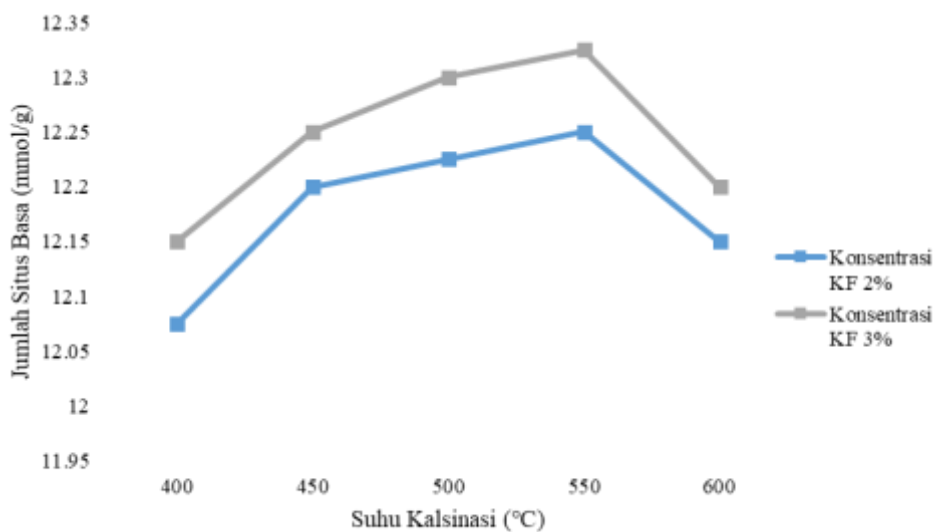
Katalis dengan jumlah situs basa tertinggi dari hasil uji sebelumnya dipilih untuk dilakukan karakterisasi lebih lanjut. Analisis morfologi permukaan dan komposisi kimia katalis dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (SEM-EDS) dan *X-Ray Diffraction* (XRD)

Pada proses konversi dilakukan dengan mencampurkan minyak kelapa sawit dan gliserol dalam perbandingan 1 : 3, kemudian ditambahkan katalis CaO-MgO/KF dengan variasi konsentrasi 0,1%; 0,15%; 0,2%; 0,25%; dan 0,3% dari total berat campuran. Lalu direaksikan selama 2,5 jam sambil dipanaskan pada suhu 200 °C, setelah itu monogliserida dipisahkan dan dimurnikan.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Analisa Jumlah Situs Basa Katalis CaO-MgO/KF

Berdasarkan dari hasil penelitian yang telah dilakukan didapat hasil analisa jumlah situs basa pada katalis CaO-MgO/KF yang dapat dilihat dari grafik dibawah ini.



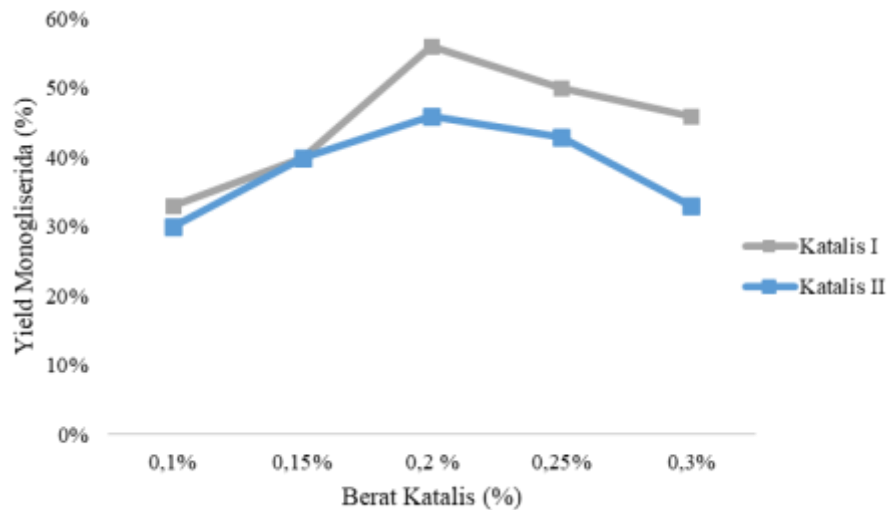
**Gambar 1.** Grafik Jumlah Situs Basa Katalis CaO-MgO/KF

Dari grafik terlihat bahwa jumlah situs basa meningkat seiring kenaikan suhu kalsinasi 400-500 °C pada konsentrasi 2% dan 3% KF. Puncak tertinggi dicapai pada katalis CaO-MgO/KF 3% pada 550 °C sebesar 12,3 mmol/g. Peningkatan ini diduga akibat perbaikan difusi dan interaksi antar komponen aktif sehingga terbentuk situs basa kuat. Namun, pada suhu 600 °C jumlah situs basa menurun signifikan akibat kerusakan struktur katalis, sintering, dan berkurangnya luas permukaan aktif [12].

Perbedaan konsentrasi menunjukkan bahwa penambahan KF 3% menghasilkan lebih banyak situs basa dibanding 2%, karena terbentuknya fase aktif baru seperti  $KCaF_3$  atau  $MgKF$  [4]. Meski demikian, pola grafik keduanya serupa, sehingga dapat disimpulkan bahwa peningkatan konsentrasi KF hanya menambah jumlah situs basa tanpa mengubah karakter katalis terhadap suhu kalsinasi.

#### 3.2. Pengaruh Katalis CaO-MgO/KF terhadap Persentase persen *Yield* Monogliserida

Pengaruh katalis CaO-MgO/KF terhadap persentase % *yield* monogliserida pada **Gambar 2**. Dalam penelitian ini, reaksi gliserolisis menggunakan katalis CaO-MgO/KF 3% pada suhu kalsinasi 500 °C dan suhu 550 °C. Hasil menunjukkan bahwa suhu sangat berpengaruh terhadap %*yield* monogliserida, dengan hasil tertinggi 56% pada suhu 550 °C. Pemilihan suhu ini didasarkan pada jumlah situs basa tinggi yang memperkuat kemampuan katalis memecah trigliserida [13].



**Gambar 2.** Grafik Pengaruh Katalis CaO-MgO/KF terhadap %yield Monogliserida

Selain suhu, berat katalis juga berpengaruh hal ini terbukti dengan meningkatnya *yield* pada berat 0,1% - 0,2% karena ketersediaan situs basa mencukupi. Namun, pada 0,25% *yield* menurun akibat campuran terlalu kental, penurunan kelarutan gliserol, atau reaksi samping seperti saponifikasi [11]. Suhu reaksi dijaga 200 °C agar laju reaksi tetap tinggi tanpa menurunkan kualitas produk, terutama warna dan bau.

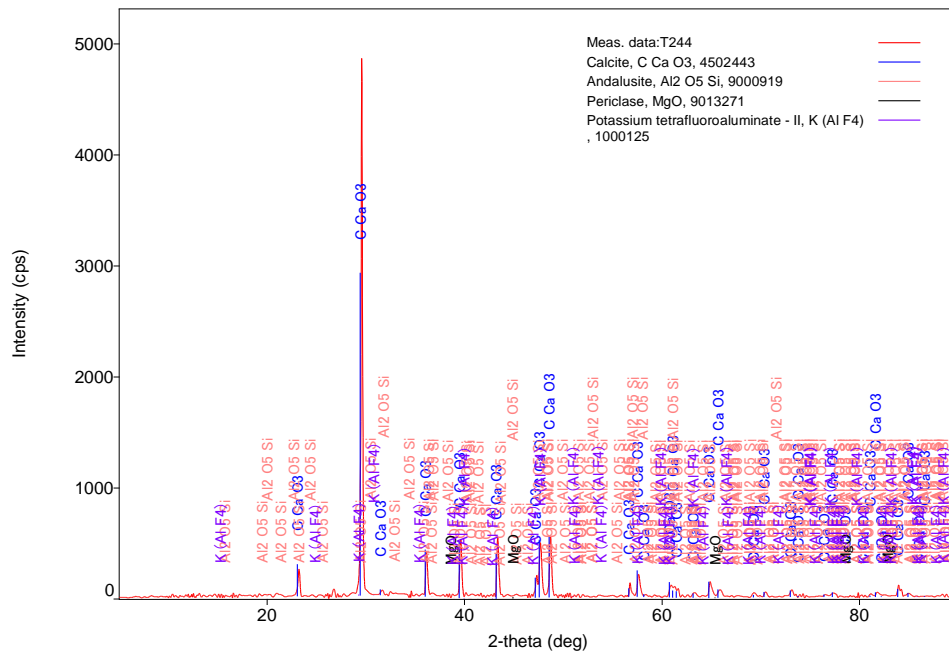
### 3.3 Analisa XRD (X-Ray Diffraction) Katalis CaO-MgO/KF Variasi Suhu 550 °C dan Konsentrasi KF 3%

Hasil analisa XRD (X-Ray Diffraction) terhadap sampel katalis CaO-MgO/KF variasi suhu 550 °C dan Konsentrasi KF 3% menunjukkan keberadaan beberapa fasa kristalin utama, yaitu calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), periclase (MgO), andalusite ( $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ), dan potassium tetrafluoroaluminate ( $\text{KAlF}_4$ ). Dari analisa kuantitatif menggunakan metode Reference Intensity Ratio (RIR), diketahui bahwa fase calcite merupakan komponen dominan dalam sampel ini dengan persentase sekitar 79%. Keberadaan fase calcite ini menunjukkan bahwa proses kalsinasi yang dilakukan belum sepenuhnya efektif dalam mendekomposisi senyawa karbonat menjadi oksida, khususnya dalam mengubah  $\text{CaCO}_3$  menjadi CaO.

Menurut studi dari [14], dekomposisi  $\text{CaCO}_3$  dari dolomit pada tekanan atmosfer terjadi pada suhu aktual antara 825-920 °C, dengan suhu optimal sekitar 800 °C untuk menghasilkan CaO sebagai situs basa aktif. Di sisi lain,  $\text{MgCO}_3$  mengalami dekomposisi pada suhu yang lebih rendah (350-545 °C), menghasilkan MgO terlebih dahulu dan memperluas porositas struktur sampel.

Keberadaan fase *periclase* (MgO) sebesar 12% mendukung bahwa sebagian dari dolomit telah berhasil mengalami dekarbonasi (proses pengurangan emisi  $\text{CO}_2$ ), khususnya bagian magnesium karbonatnya. Hal ini mengindikasikan bahwa suhu kalsinasi yang digunakan sudah mencukupi untuk memecah  $\text{MgCO}_3$  menjadi MgO, namun belum cukup atau belum diberikan waktu yang memadai untuk sepenuhnya mendekomposisi  $\text{CaCO}_3$ . Sementara itu, munculnya fase *andalusite* (8%) dan *potassium tetrafluoroaluminate* (1,2%) diduga berasal dari bahan impregnasi yang digunakan dalam proses preparasi katalis,

Secara keseluruhan, hasil XRD ini menunjukkan bahwa proses aktivasi termal terhadap dolomit belum berlangsung secara optimal, khususnya dalam konversi  $\text{CaCO}_3$  menjadi CaO. Keberhasilan pembentukan fase MgO merupakan indikator positif bahwa proses dekomposisi parsial telah terjadi, namun untuk mendapatkan katalis basa padat yang aktif, dibutuhkan suhu kalsinasi yang lebih tinggi lagi.



**Gambar 3.** Hasil Analisa XRD Katalis CaO-MgO/KF variasi suhu 550 °C dan konsentrasi KF 3%.

Derajat pengembangan (*degree of swelling*) yang rendah menyebabkan kemampuan penetrasi berdifusi dalam membran sangat bergantung pada ukuran molekul penetrasi tersebut. Ukuran molekul air (2,8 Å), lebih kecil dibandingkan dengan etanol (4,5 Å) sehingga molekul air lebih mudah berdifusi ke dalam membran yang menyebabkan selektivitas membran meningkat.

### 3.4 Analisa Morfologi SEM-EDS (*Scanning Electron Microscopy-Energy Disperse X-Ray Spectroscopy*) Katalis CaO-MgO/KF Variasi Suhu 550 °C dan Konsentrasi KF 3%

Berdasarkan hasil analisis gambar morfologi SEM-EDS terhadap katalis CaO-MgO pada perbesaran 2000x, diperoleh gambaran morfologi permukaan yang menunjukkan struktur tidak rata dengan distribusi partikel berukuran mikrometer. Terlihat adanya aglomerasi atau penggumpalan partikel yang relatif kasar dengan adanya rongga dan pori-pori kecil, yang mengindikasikan bahwa distribusi ukuran partikel cukup bervariasi dan cenderung heterogen. Struktur permukaan katalis yang bertekstur kasar dan berpori kecil, yang menandakan sifat porositas meskipun tidak terlalu merata. Porositas ini berperan penting dalam meningkatkan luas permukaan aktif katalis sehingga dapat menunjang proses reaksi kimia, seperti konversi trigliserida menjadi monogliserida pada reaksi gliserolisis.

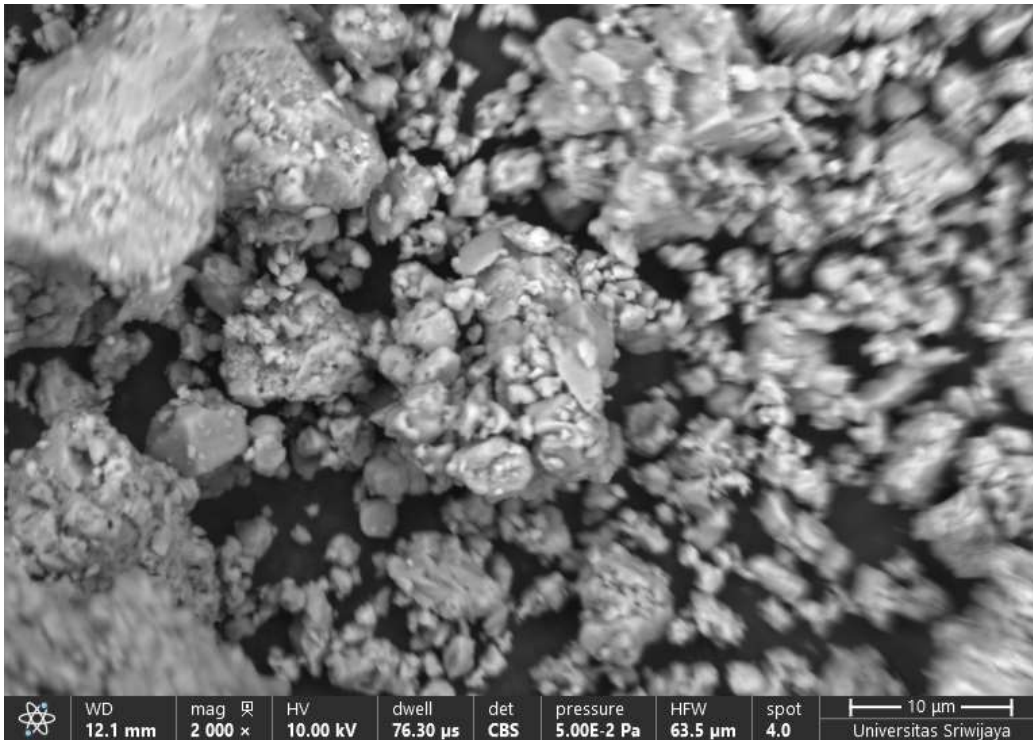
Tidak tampak adanya retakan besar, namun morfologi yang kasar dan tak seragam menunjukkan kemungkinan terbentuknya fase campuran antara CaO dan MgO yang tidak terdistribusi secara merata. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh [4], yang menyatakan bahwa katalis berbasis logam alkali tanah seperti CaO dan MgO cenderung membentuk morfologi permukaan yang berpori dan tidak homogen, namun tetap efektif dalam meningkatkan aktivitas katalitik. Secara keseluruhan, struktur katalis yang diamati melalui SEM-EDS ini menunjukkan karakteristik khas katalis padat berbasis logam alkali tanah, yang masih memiliki potensi untuk ditingkatkan melalui optimasi sintesis guna memperoleh permukaan yang lebih aktif dan efisien dalam reaksi.

Ukuran pori yang terukur berada pada kisaran  $\pm 0,030 \mu\text{m}$  atau 30 nm. Berdasarkan klasifikasi pori oleh *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC), ukuran tersebut termasuk kedalam kategori mesopori (2-50nm). Jenis pori ini sangat ideal untuk aplikasi katalis karena memungkinkan difusi molekul reaktan ke dalam situs aktif.

Selanjutnya, hasil analisa EDS ini menunjukkan adanya persebaran unsur Kalium Fluorida (KF) yang ditambahkan dalam proses preparasi untuk meningkatkan kekuatan basa katalis. Distribusi K yang homogen menunjukkan bahwa proses impregnasi KF berjalan efektif, sehingga meningkatkan jumlah situs basa yang berperan dalam reaksi kimia.

Untuk dapat dikategorikan sebagai katalis heterogen yang layak, material ini harus memenuhi beberapa kriteria, antara lain aktivitas tinggi dalam mempercepat reaksi, selektivitas terhadap produk yang diinginkan, stabilitas termal dan kimia, serta kemampuan untuk digunakan kembali (*reusabilitas*) tanpa

kehilangan performa signifikan [15]. Selain itu, sifat fisik seperti luas permukaan yang besar dan ukuran pori yang sesuai juga menjadi aspek penting. Dalam hal ini, katalis CaO-MgO/KF yang diteliti menunjukkan karakteristik yang mendukung kelayakan tersebut.



**Gambar 4.** Hasil Analisa SEM-EDS Katalis CaO-MgO/KF, Konsentrasi 3% KF dan Suhu Kalsinasi 550 °C

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa katalis CaO–MgO/KF yang paling optimal untuk konversi trigliserida menjadi monogliserida diperoleh pada kondisi kalsinasi 550 °C dengan konsentrasi KF 3%. Kondisi ini menghasilkan aktivitas katalitik tertinggi dengan jumlah situs basa mencapai 12,3 mmol/g serta morfologi permukaan yang mendukung meskipun masih kasar dan heterogen. Penambahan KF hingga 3% terbukti meningkatkan jumlah situs basa melalui pembentukan senyawa aktif yang memperkuat sifat basa katalis. Pada kondisi tersebut pula diperoleh yield monogliserida tertinggi sekitar 56%, yang menunjukkan adanya korelasi positif antara jumlah situs basa dan aktivitas katalitik dalam reaksi gliserolisis trigliserida.

#### 5. Singkatan

CaO	: Kalsium Oksida
KF	: Kalium Fluorida
MG	: Monogliserida
MgO	: Magnesium Oksida

#### 6. Referensi

- [1] Dimakopoulou-papazoglou, D., Zampouni, K., & Moschakis, T. (2025). Food Hydrocolloids Novel plant-based bigels formulated with sunflower wax , monoglycerides , agar and  $\kappa$  -carrageenan. *Food Hydrocolloids*, 166(March), 111341. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111341>
- [2] Nitbani, F. O., Tjitda, P. J. P., Nurohmah, B. A., & Wogo, H. E. (2020). Preparation of fatty acid and monoglyceride from vegetable oil. *Journal of Oleo Science*, 69(4), 277–295. <https://doi.org/10.5650/jos.ess19168>
- [3] Affandi, A. R. (2011). *Studi Sintesis Mono-Diasilgliserol (MDAG) dengan Metode Gliserolisis Skala Pilot Plant* (Doctoral dissertation, IPB (Bogor Agricultural University)).
- [4] Anggoro, D. D., Buchori, L., Sumantri, I., & Oktavianty, H. (2019). Preparation and characterization of KF/CaO-MgO catalyst for monoglycerides synthesis. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 15(5), 640–643. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v15n5.1243>

- [5] Ramadhanti, Y. (2023). Peran Katalis Dalam Reaksi Kimia: Mekanisme Dan Aplikasi. *Hexatech: Jurnal Ilmiah Teknik*, 2(2), 74–78. <https://doi.org/10.55904/hexatech.v2i2.915>
- [6] Gong, K., Özçelik, V. O., Yang, K., & White, C. E. (2021). Density functional modeling and total scattering analysis of the atomic structure of a quaternary CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> (CMAS) glass: Uncovering the local environment of calcium and magnesium. *Physical Review Materials*, 5(1). <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.5.015603>
- [7] Iskandar, N., Widayat, W., Sulardjaka, S., Syaiful, S., Fuadi, F., & Handayani, F. (2023). Effect of Temperature and Tapioca Flour Concentration on Manufacture of CaO-SiO<sub>2</sub> Heterogeneous Catalyst Pellets Made from Brick Burning Ash for Biodiesel Synthesis. *Catalysts*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/catal13060945>
- [8] Mansir, N., Teo, S. H., Rashid, U., & Taufiq-Yap, Y. H. (2018). Efficient waste Gallus domesticus shell derived calcium-based catalyst for biodiesel production. *Fuel*, 211(July 2017), 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.014>
- [9] Widayat, W., Arman, M. A. P., Syarif, E., Buchori, L., & Sulardjaka, S. (2024). Sintesis, Karakterisasi dan Pengujian Katalis CaO-MgO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dari Dolomit dan Pasir Besi untuk Pembuatan Biodiesel dari Minyak Goreng Bekas. *Teknik*, 45(1), 91–100. <https://doi.org/10.14710/teknik.v45i1.56423>
- [10] Boey, P. L., Maniam, G. P., & Hamid, S. A. (2011). Performance of calcium oxide as a heterogeneous catalyst in biodiesel production: A review. *Chemical Engineering Journal*, 168(1), 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.01.009>
- [11] Sulistiyono, Eko., Suharyanto, A. (2024). Kajian Teknologi Pengolahan Mineral Dolomit Indonesia Dan Aplikasi Pemanfaatannya. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi 2024, April*, 1–10.
- [12] Basumatary, S. F., Brahma, S., Hoque, M., Das, B. K., Selvaraj, M., Brahma, S., & Basumatary, S. (2023). Advances in CaO-based catalysts for sustainable biodiesel synthesis. *Green Energy and Resources*, 1(3), 100032. <https://doi.org/10.1016/j.gerr.2023.100032>
- [13] Buchori, L., Anggoro, D. D., Sumantri, I., & Putra, R. R. (2019). Optimization of monoglycerides production using KF/CaO-MgO heterogeneous catalysis. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*, 14(3), 689–696. <https://doi.org/10.9767/bcrec.14.3.4251.689-696>
- [14] Makarevičienė, V., Gaidė, I., Sendžikienė, E., & Gumbytė, M. (2025). The Potential of Dolomite as a Heterogeneous Catalyst in Biodiesel Synthesis: A Review. *Energies*, 18(11). <https://doi.org/10.3390/en18112920>
- [15] Dianti, Y. (2017). Katalis Dalam Industri Kimia. In *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952. [http://repo.iain-tulungagung.ac.id/5510/5/BAB 2.pdf](http://repo.iain-tulungagung.ac.id/5510/5/BAB%202.pdf)