

## Fotodegradasi Diazinon Menggunakan Material Fotokatalis CaO Dari Cangkang Telur Dengan Bantuan Paparan Sinar Matahari

Auliya Shofie<sup>1</sup>, Hilman Imadul Umam<sup>2\*</sup>, Teguh Pambudi<sup>1</sup>, Andini Nur Aisyah<sup>1</sup>, Keisya Ekya Larrisa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang  
Jl. HS.Ronggo Waluyo, Puseurjaya, Telukjambe Timur, Karawang, Jawa Barat 41361

<sup>2</sup> Program Studi Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang  
Jl. HS.Ronggo Waluyo, Puseurjaya, Telukjambe Timur, Karawang, Jawa Barat 41361

\*Email: [hilman.imadul@ft.unsika.ac.id](mailto:hilman.imadul@ft.unsika.ac.id)

### Abstrak

*Meningkatnya penggunaan pestisida di sektor pertanian berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan perairan, salah satunya diazinon yang bersifat toksik dan sulit terurai. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah fotodegradasi menggunakan katalis berbasis limbah. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis kalsium oksida (CaO) dari limbah cangkang telur serta mengevaluasi kinerjanya sebagai fotokatalis dalam degradasi diazinon menggunakan sinar matahari. Jenis penelitian ini adalah penelitian eksperimental dengan variasi dosis katalis, pH larutan, konsentrasi awal diazinon, dan waktu iradiasi sebagai variabel bebas, serta efisiensi degradasi sebagai variabel terikat. Sintesis CaO dilakukan melalui proses kalsinasi pada suhu 800°C dan aktivasi menggunakan KOH. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa CaO memiliki struktur permukaan berpori dengan distribusi ukuran partikel tidak seragam serta mengandung gugus Ca-O dan O-H. Analisis UV-Vis menunjukkan nilai celah pita energi sebesar 2,75 eV yang mengindikasikan kemampuan CaO untuk aktif di bawah sinar matahari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimum diperoleh pada dosis katalis 16 mg, pH 7, konsentrasi awal diazinon 50 ppm, dan waktu iradiasi 90 menit dengan efisiensi degradasi sebesar 26,41%. Analisis kinetika menunjukkan bahwa proses fotodegradasi mengikuti model pseudo-orde dua ( $k = 0,0181$ ;  $R^2 = 0,9977$ ). Berdasarkan hasil tersebut, CaO dari limbah cangkang telur berpotensi sebagai fotokatalis yang ramah lingkungan dan ekonomis untuk pengolahan limbah pestisida.*

**Kata kunci:** cangkang telur, degradasi pestisida, diazinon, fotokatalisis, kalsium oksida (CaO), sinar matahari.

### Abstract

*The increasing use of pesticides in agriculture contributes to water pollution, particularly from diazinon, a toxic and persistent compound. Photodegradation using waste-based catalysts offers a promising remediation approach. This study aims to synthesize calcium oxide (CaO) from eggshell waste and evaluate its photocatalytic performance for diazinon degradation under sunlight. An experimental method was employed, varying catalyst dosage, pH, initial diazinon concentration, and irradiation time, with degradation efficiency as the response variable. CaO was synthesized via calcination at 800°C, followed by KOH activation. Characterization revealed a porous surface structure with irregular particle distribution and the presence of Ca-O and O-H functional groups. UV-Vis analysis indicated a band gap of 2.75 eV, suggesting activity under solar irradiation. Optimal conditions were achieved at 16 mg catalyst dosage, pH 7, 50 ppm diazinon, and 90 minutes irradiation, yielding 26.41% degradation efficiency. Kinetic analysis followed a pseudo-second-order model ( $k = 0.0181$ ;  $R^2 = 0.9977$ ). These results demonstrate that eggshell-derived CaO is a low-cost, eco-friendly photocatalyst for pesticide wastewater treatment.*

**Keywords:** eggshell, pesticide degradation, diazinon, photocatalysis, calcium oxide, sunlight

## 1. PENDAHULUAN

Peningkatan penggunaan pestisida di bidang pertanian menimbulkan pencemaran lingkungan dan risiko kesehatan manusia akibat akumulasi residu yang mencemari tanah dan perairan (Ahmad et al., 2024; Umam et al., 2025). Salah

satu pestisida yang banyak digunakan adalah diazinon termasuk insektisida organofosfat yang bersifat toksik, persisten, dan mudah terdistribusi ke lingkungan melalui limpasan serta infiltrasi tanah (Tang et al., 2021; Maleki et al., 2020). Paparan diazinon diketahui dapat

menyebabkan gangguan kesehatan, seperti iritasi mata, sakit kepala, kelemahan otot, dan gangguan sistem endokrin (Hailu et al., 2025; Liszewska et al., 2024). Oleh karena itu, diperlukan metode pengolahan yang efektif dan berkelanjutan untuk menurunkan konsentrasi diazinon di perairan.

Berbagai metode pengolahan seperti proses biologis, adsorpsi, dan elektrokimia telah dikembangkan, namun masih memiliki keterbatasan dari sisi efisiensi, biaya, dan potensi terbentuknya limbah sekunder (Yeganeh et al., 2022). Fotokatalisis menjadi alternatif yang menjanjikan karena mampu menghasilkan radikal oksidatif kuat untuk mendegradasi pestisida menjadi senyawa yang lebih aman dengan biaya operasional relatif rendah serta memanfaatkan energi cahaya (Maravilla et al., 2024; Umam, Prasetyowati, et al., 2025). Meskipun material fotokatalis konvensional seperti  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ , dan  $\text{CuO}$  telah banyak digunakan, keterbatasan terkait nilai *band gap* dan biaya sintesis mendorong pengembangan material alternatif. Secara kimia, cangkang telur terdiri dari sekitar 1,6% air dan 98,4% bahan kering.

Dari total bahan kering tersebut, 95,1% berupa mineral dan 3,3% berupa protein. Kandungan mineral utamanya didominasi oleh kalsium karbonat  $\text{CaCO}_3$  sebesar 98,43%, diikuti oleh magnesium karbonat ( $\text{MgCO}_3$ ) sebesar 0,84% dan kalsium fosfat ( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ) sebesar 0,75% (Rodríguez-Navarro et al., 2015) dan dapat dikonversi menjadi  $\text{CaO}$  berpotensi dimanfaatkan sebagai fotokatalis yang ekonomis dan ramah lingkungan dengan kemampuan aktivasi di bawah cahaya matahari (Mohamed et al., 2021; Zia et al., 2025). Penelitian sebelumnya melaporkan bahwa  $\text{CaO}$  yang berasal dari limbah cangkang kerang mampu berperan efektif sebagai fotokatalis dalam pengolahan limbah, di mana  $\text{CaO}$  nanopartikel yang disintesis dari cangkang tiram berhasil mendegradasi zat warna metil oranye dalam air dengan efisiensi hingga 98,5% (Maravilla et al., 2024). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi  $\text{CaO}$  berbasis limbah cangkang telur serta mengevaluasi kinerjanya dalam degradasi fotokatalitik diazinon.

## 2. METODOLOGI

### 2.1 Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan meliputi akuades,  $\text{CaO}$  berbasis cangkang telur, diazinon 600 g/L,

$\text{HCl}$  0,01 M,  $\text{NaOH}$  0,01 M, dan  $\text{KOH}$  20%. Peralatan yang digunakan antara lain gelas kimia, pH meter, *magnetic stirrer*, neraca digital, serta instrumen FTIR (Jasco FT/IR-4600), SEM-EDAX (Hitachi SU3500 dengan Octane Pro), dan spektrofotometer UV-Vis (Jasco V-730).

### 2.2 Preparasi kalsium Oksida ( $\text{CaO}$ ) dari Cangkang Telur

Kalsium oksida ( $\text{CaO}$ ) disintesis dari cangkang telur melalui tahapan pencucian, pengeringan ( $110^\circ\text{C}$ , 24 jam), penghalusan, dan pengayakan (60 mesh) untuk memperoleh ukuran partikel seragam. Serbuk kemudian dikalsinasi pada  $800^\circ\text{C}$  selama 4 jam untuk menguraikan  $\text{CaCO}_3$  menjadi  $\text{CaO}$ . Material hasil kalsinasi dikeringkan kembali dan diaktivasi menggunakan larutan  $\text{KOH}$  20% pada  $60^\circ\text{C}$  selama 24 jam untuk meningkatkan luas permukaan dan jumlah situs aktif. Setelah penyaringan dan pengeringan, dilakukan kalsinasi ulang pada  $450^\circ\text{C}$  selama 4 jam untuk menstabilkan struktur kristal. Proses ini menghasilkan  $\text{CaO}$  berpori dengan luas permukaan tinggi yang berpotensi sebagai katalis dalam aplikasi degradasi limbah (Agustina et al., 2020).

### 2.3 Uji Fotodegradasi Limbah Pestisida

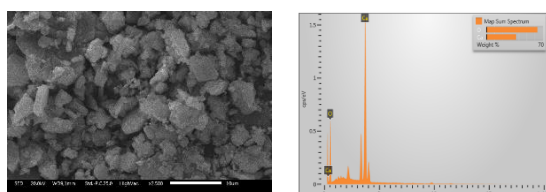
Uji fotodegradasi diazinon dilakukan di bawah iradiasi sinar matahari dengan variasi dosis katalis (4-32 mg), pH larutan (3-11), konsentrasi awal diazinon (30-130 ppm), dan waktu iradiasi (30-240 menit) pada volume larutan 30 mL. Setelah reaksi, katalis dipisahkan menggunakan kertas saring Whatman 0,45  $\mu\text{m}$ , dan konsentrasi sisa diazinon dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Percobaan fotolisis tanpa katalis dilakukan sebagai kontrol. Tidak dilakukan tahap adsorpsi secara terpisah, keberadaan situs aktif pada permukaan  $\text{CaO}$  memungkinkan terjadinya interaksi awal antara molekul diazinon dan katalis. Interaksi ini berperan penting dalam meningkatkan efektivitas proses fotokatalitik (Zhang & Jaroniec, 2020).

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Karakteristik $\text{CaO}$ menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscopy*)

Berdasarkan hasil pengamatan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM), morfologi permukaan  $\text{CaO}$  (kalsium oksida) menunjukkan perbedaan yang jelas pada setiap tingkat pembesaran. Pada pembesaran

2.500×, permukaan CaO tampak tidak rata dan membentuk agregat besar, yang menunjukkan bahwa partikel-partikel CaO saling menempel akibat proses kalsinasi suhu tinggi. Hal ini sejalan dengan temuan (Manovic et al., 2009) yang menjelaskan bahwa peningkatan suhu kalsinasi dapat menyebabkan penyatuan butiran (sintering) dan pembentukan gumpalan partikel pada CaO. Hasil SEM yang didapat disajikan pada Gambar 1A.



Gambar 1. A. Karakteristik SEM CaO, B. Element Analisis CaO

Tabel 1. Element Analysis CaO

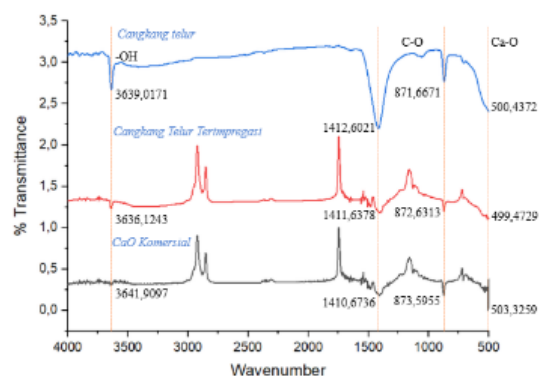
Element	Weight (%)	Atomic(%)
Oxygen (O)	63.21	81.15
Calcium (Ca)	36.79	18.85

Hasil analisis EDAX Gambar 1B dan Tabel 1 menunjukkan bahwa material didominasi oleh unsur kalsium dan oksigen dengan komposisi berat masing-masing sebesar 36,79% dan 63,21%, yang mengonfirmasi terbentuknya fase utama CaO. Tingginya kandungan oksigen berkaitan dengan sifat CaO yang mudah bereaksi dengan udara setelah kalsinasi, sehingga berpotensi membentuk Ca(OH)<sub>2</sub> atau menyisakan CaCO<sub>3</sub> yang belum terdekomposisi sempurna. Karakteristik morfologi dan komposisi unsur tersebut menunjukkan bahwa CaO berbasis cangkang telur berpotensi digunakan sebagai material fotokatalis yang aktif dan ramah lingkungan (Maravilla et al., 2024).

### 3.2 Karakteristik CaO menggunakan FTIR

Karakteristik CaO hasil sintesis dianalisis menggunakan spektroskopi Fourier Transform Infrared (FTIR), dan spektrum serapan yang ditampilkan pada Gambar 2. Hasil FT-IR menunjukkan bahwa adanya perubahan gugs fungsi setelah proses kalsinasi, dimana CaCO<sub>3</sub> pada cangkang telur terdekomposisi menjadi CaO melalui kalsinasi, menghasilkan aktivitas katalitik yang lebih tinggi. Keberadaan kelompok hidroksil (-OH) masih terlihat pada 3636,1243 cm<sup>-1</sup>, namun intensitasnya menurun,

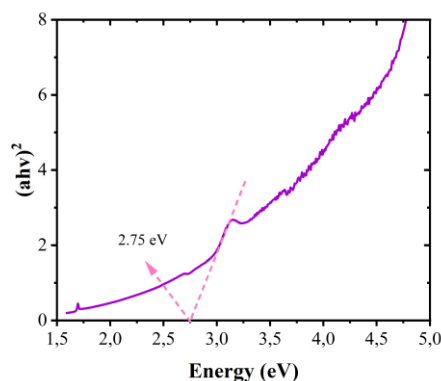
yang menunjukkan pengurangan kadar air atau kelompok yang teradsorpsi karena proses kalsinasi. Spektrum CaO terimpregnasi menunjukkan penurunan signifikan puncak karbonat pada 1411,6378, dan 499,4729 cm<sup>-1</sup> dibandingkan cangkang telur sebelum kalsinasi, menandakan sebagian besar CaCO<sub>3</sub> telah berubah menjadi CaO (Shaveisi & Sharifnia, 2018). Keseragaman puncak tersebut mengonfirmasi kestabilan struktural CaO hasil sintesis yang sebanding dengan CaO komersial dan layak digunakan sebagai fotokatalis (Zia et al., 2025).



Gambar 2. Karakteristik FTIR CaO

### 3.3 Karakteristik CaO menggunakan UV-VIS

Karakteristik optik CaO hasil sintesis dievaluasi menggunakan spektrofotometri UV-Vis ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Band Gap Energy

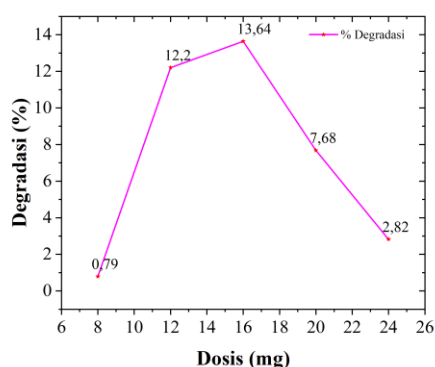
Energi *band gap* menentukan kemampuan CaO dalam mengeksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi sehingga memungkinkan pembentukan radikal aktif dalam proses degradasi diazinon (Maravilla et al., 2024). Hasil analisis UV-Vis dan Tauc plot menunjukkan bahwa CaO menyerap radiasi pada

wilayah ultraviolet dan sebagian cahaya matahari dengan nilai energi *band gap* sebesar 2,75 eV.

Nilai ini berada dalam rentang CaO berbasis *biomineral* (2,6-3,0 eV) yang dilaporkan sebelumnya sehingga menunjukkan potensi aktivasi di bawah paparan sinar matahari (Qu et al., 2022; Zia et al., 2025). Perbedaan nilai *band gap* dipengaruhi oleh variasi prekursor, metode sintesis, dan kondisi kalsinasi yang digunakan (Eddy et al., 2024; Zia et al., 2025).

### 3.4 Pengaruh Dosis katalis CaO terhadap Persentase Degradasi

Pengaruh variasi dosis katalis CaO terhadap persentase degradasi diazinon ditunjukkan pada Gambar 4. Pada proses fotokatalitik, CaO berperan menyediakan situs aktif untuk adsorpsi diazinon dan menyerap foton untuk membentuk pasangan *electron-hole* ( $e^-/h^+$ ) yang menghasilkan radikal  $\bullet\text{OH}$  dan  $\text{O}_2\bullet^-$  sebagai zat reaktif utama dalam proses degradasi (Mohammadi et al., 2020; Ikram et al., 2022).

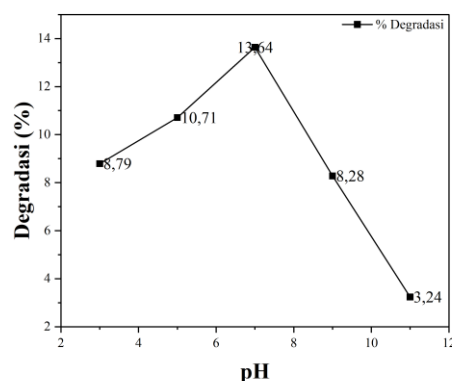


Gambar 4. Variasi Dosis

Pada dosis rendah (8-12 mg), efisiensi degradasi masih rendah karena keterbatasan jumlah situs aktif dan rendahnya jumlah foton yang terserap. Peningkatan dosis hingga 16 mg menghasilkan degradasi optimum (13,64%) berkaitan dengan meningkatnya luas permukaan efektif, adsorpsi diazinon, dan pembentukan zat oksidatif reaktif yang lebih banyak (Yeganeh et al., 2022). Namun, pada dosis yang lebih tinggi (20-24 mg), efisiensi menurun akibat meningkatnya kekeruhan larutan, aglomerasi partikel, dan rekombinasi *electron-hole* yang menghambat penetrasi cahaya dan pembentukan radikal aktif (Shaveisi & Sharifnia, 2018; Mohammadi et al., 2020).

### 3.5 Pengaruh pH terhadap Persentase Degradasi

pH memiliki peran penting dalam proses fotodegradasi diazinon menggunakan CaO karena memengaruhi muatan permukaan katalis dan tingkat adsorpsi. Pengaruh variasi pH terhadap persentase degradasi diazinon ditunjukkan pada Gambar 5. Efisiensi degradasi meningkat dari pH asam hingga netral dan mencapai nilai optimum 13,64% pada pH 7, kemudian menurun pada kondisi basa (Mohammadi et al., 2020).

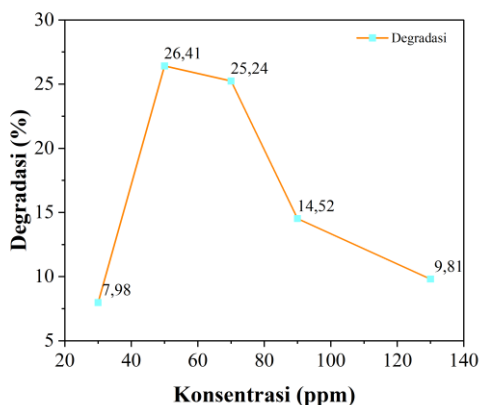


Gambar 5. Variasi pH

Hal ini berkaitan dengan  $\text{pH}_{\text{pzc}}$  CaO (6,8-7,7), di mana permukaan CaO bermuatan positif pada  $\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$  dan bermuatan negatif pada  $\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc}}$ , sementara diazinon ( $\text{pK}_a$  2,6) bermuatan negatif pada seluruh rentang pH (Ikram et al., 2022). Interaksi elektrostatis yang kuat pada pH netral meningkatkan adsorpsi dan pembentukan radikal oksidatif, sedangkan pada pH basa terjadi tolak-menolak dan kelebihan ion  $\text{OH}^-$  dapat menurunkan efisiensi fotokatalitik (Shaveisi & Sharifnia, 2018).

### 3.6 Pengaruh Konsentrasi terhadap Persentase Degradasi

Pengaruh variasi pH terhadap persentase degradasi diazinon ditunjukkan pada Gambar 6. Efisiensi degradasi diazinon oleh CaO meningkat dari 7,98% (30 ppm) hingga optimum 26,41% pada 50 ppm, kemudian menurun pada konsentrasi lebih tinggi, yaitu 25,24% (70 ppm), 14,52% (90 ppm), dan 9,81% (130 ppm) (Mohammadi et al., 2020). Pada konsentrasi rendah-menengah, adsorpsi diazinon pada permukaan CaO berlangsung efektif sehingga reaksi dengan radikal  $\bullet\text{OH}$  dan  $h^+$  optimal.

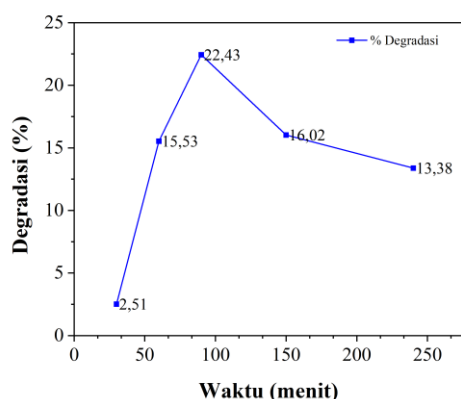


Gambar 6. Variasi Konsentrasi

Sebaliknya, konsentrasi tinggi menyebabkan kejenuhan situs aktif, kompetisi adsorpsi, serta efek penyaringan cahaya yang menurunkan pembentukan pasangan  $e^-/h^+$  dan radikal oksidatif (Maleki et al., 2020). Oleh karena itu, 50 ppm merupakan konsentrasi paling optimum karena terjadi keseimbangan antara jumlah polutan dan aktivitas fotokatalitik CaO.

### 3.7 Pengaruh Waktu terhadap Persentase Degradasi

Pengaruh variasi pH terhadap persentase degradasi diazinon ditunjukkan pada Gambar 7. Efisiensi fotokatalisis CaO terhadap diazinon meningkat seiring waktu iradiasi dan mencapai nilai optimum 22,43% pada 90 menit akibat pembentukan pasangan *electron-hole* serta radikal  $\bullet OH$  dan  $O_2^{\bullet -}$  yang intensif (Mohammadi et al., 2020).



Gambar 7. Variasi Waktu

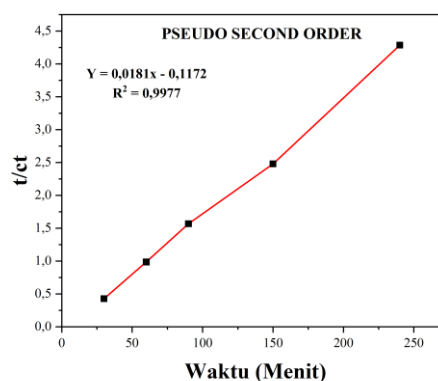
Setelah titik optimum tercapai, efisiensi menurun menjadi 16,02% (120 menit) dan 13,38% (240 menit) karena berkurangnya konsentrasi diazinon, penutupan situs aktif oleh

produk antara, dan meningkatnya rekombinasi *electron-hole* (Shaveisi & Sharifnia, 2018).

Sesuai dengan penelitian sebelumnya bahwa aktivitas fotokatalitik umumnya maksimum pada 60-90 menit sebelum menurun akibat saturasi permukaan katalis dan rekombinasi dominan serta didukung oleh penurunan absorbansi UV-Vis hingga titik optimum (Maleki et al., 2020).

### 3.8 Studi Kinetika

Studi kinetika dilakukan untuk mengetahui mekanisme laju degradasi diazinon selama proses fotokatalitik menggunakan CaO berbasis cangkang telur ditunjukkan pada gambar 8. Kajian kinetika degradasi fotokatalitik diazinon dilakukan pada kondisi optimum (dosis CaO 16 mg, pH 7, konsentrasi awal 50 ppm, dengan waktu reaksi selama 30-240 menit). Evaluasi didasarkan pada hubungan antara  $C_0$ ,  $C_t$ , konstanta laju reaksi ( $k$ ), dan waktu ( $t$ ).



Gambar 8. Studi Kinetika

Hasil menunjukkan bahwa degradasi diazinon sesuai mengikuti model *pseudo second-order* ( $k = 0,0181$ ;  $R^2 = 0,9977$ ). Sehingga, mekanisme degradasi didominasi oleh proses *chemisorption*, di mana laju reaksi bergantung pada interaksi kuat antara diazinon dan situs aktif permukaan CaO (Ghodsi et al., 2020). Model ini lebih representatif untuk sistem fotokatalitik karena mempertimbangkan peran adsorpsi polutan pada permukaan katalis sebelum terjadinya reaksi degradasi.

## 4. KESIMPULAN DAN SARAN

CaO berbasis limbah cangkang telur menunjukkan struktur berpori, gugus fungsi khas CaO, dan nilai *band gap* 2,75 eV yang mendukung aktivitas fotokatalitik di bawah sinar

matahari. Fotodegradasi diazinon mencapai kondisi optimum pada dosis katalis 16 mg, pH 7, konsentrasi awal 50 ppm, dan waktu iradiasi 90 menit, dengan kinetika mengikuti model *pseudo second-order* ( $k = 0,0181$ ;  $R^2 = 0,9977$ ) yang mengindikasikan mekanisme *chemisorption* pada permukaan CaO. Untuk pengembangan lebih lanjut, diperlukan optimasi kondisi iradiasi, modifikasi katalis untuk meningkatkan efisiensi, serta analisis produk degradasi menggunakan LC-MS atau GC-MS untuk memastikan keamanan hasil reaksi.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, T. E., Melwita, E., Bahrin, D., Gayatri, R., & Purwaningtyas, I. F. (2020). Synthesis of nano-photocatalyst ZnO-natural zeolite to degrade procion red. *International Journal of Technology*, *11*(3), 472–481. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v11i3.3800>
- Ahmad, M. F., Ahmad, F. A., Alsayegh, A. A., Zeyauallah, M., Alshahrani, A. M., Muzammil, K., Saati, A. A., Wahab, S., Elbendary, E. Y., Kambal, N., Abdelrahman, M. H., & Hussain, S. (2024). Pesticides impacts on human health and the environment with their mechanisms of action and possible countermeasures. In *Heliyon* (Vol. 10, Number 7). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29128>
- Eddy, N. O., Oladede, J., Eze, I. S., Garg, R., Garg, R., & Paktin, H. (2024). Synthesis and characterization of CaO nanoparticles from periwinkle shells for the treatment of tetracycline-contaminated water by adsorption and photocatalyzed degradation. *Results in Engineering*, *24*. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103374>
- Ghodsi, S., Esrafil, A., Kalantary, R. R., Gholami, M., & Sobhi, H. R. (2020). Synthesis and evaluation of the performance of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Ag photocatalyst for the efficient removal of diazinon: Kinetic studies. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, *389*. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.112279>
- Hailu, A., Tucho, G. T., Gure, A., & Mekonen, S. (2025). Pesticide exposure and acute health problems among pesticide processing industry workers in Ethiopia. *Toxicology Reports*, *14*. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2025.101997>
- Ikram, M., Khalid, A., Shahzadi, A., Haider, A., Naz, S., Naz, M., Shahzadi, I., Ul-Hamid, A., Haider, J., Nabgan, W., & Butt, A. R. (2022). Enhanced Photocatalytic Degradation with Sustainable CaO Nanorods Doped with Ce and Cellulose Nanocrystals: In Silico Molecular Docking Studies. *ACS Omega*, *7*(31), 27503–27515. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02732>
- Liszewska, M., Czaja, K., Korcz, W., Lewiński, R., & Struciński, P. (2024). Endocrine-disrupting chemicals – pesticide regulatory issues from the EU perspective. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, *154*. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2024.105735>
- Maleki, A., Moradi, F., Shahmoradi, B., Rezaee, R., & Lee, S. M. (2020). The photocatalytic removal of diazinon from aqueous solutions using tungsten oxide doped zinc oxide nanoparticles immobilized on glass substrate. *Journal of Molecular Liquids*, *297*. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111918>
- Manovic, V., Charland, J. P., Blamey, J., Fennell, P. S., Lu, D. Y., & Anthony, E. J. (2009). Influence of calcination conditions on carrying capacity of CaO-based sorbent in CO<sub>2</sub> looping cycles. *Fuel*, *88*(10), 1893–

1900.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.04.012>
- Maravilla, B. G., Gan, N. M. C., Guinanao, D. Y. B., Pandan, M. A. T., & Parohinog, K. J. (2024). Photocatalytic degradation of methyl orange in water using oyster shell-derived calcium oxide nanoparticles. *Bioresource Technology Reports*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101813>
- Mohamed, F., Shaban, M., Aljohani, G., & Ahmed, A. M. (2021). Synthesis of novel eco-friendly CaO/C photocatalyst from coffee and eggshell wastes for dye degradation. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 3140–3149. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.055>
- Mohammadi, M., Maleki, A., Zandi, S., Mohammadi, E., Ghahremani, E., Yang, J. K., & Lee, S. M. (2020). Photocatalytic decomposition of aqueous diazinon using reduced graphene/ ZnO nanocomposite doped with manganese. *Desalination and Water Treatment*, 184, 315–325. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25392>
- Qu, T., Yao, X., Owens, G., Gao, L., & Zhang, H. (2022). A sustainable natural clam shell derived photocatalyst for the effective adsorption and photodegradation of organic dyes. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06981-3>
- Rodríguez-Navarro, A. B., Marie, P., Nys, Y., Hincke, M. T., & Gautron, J. (2015). Amorphous calcium carbonate controls avian eggshell mineralization: A new paradigm for understanding rapid eggshell calcification. *Journal of Structural Biology*, 190(3), 291–303. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2015.04.014>
- Shaveisi, Y., & Sharifnia, S. (2018). Deriving Ag<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-CaO composite as a stable and solar light photocatalyst for efficient ammonia degradation from wastewater. *Journal of Energy Chemistry*, 27(1), 290–299. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2017.06.012>
- Tang, J., Wang, W., Jiang, Y., & Chu, W. (2021). Diazinon exposure produces histological damage, oxidative stress, immune disorders and gut microbiota dysbiosis in crucian carp (*Carassius auratus gibelio*). *Environmental Pollution*, 269. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116129>
- Umam, H. I., Pambudi, T., Widiyanto, E., Yuliasari, F., Putri, F. A. R., Nandira, R. S., & Utami, M. R. (2025). Photocatalytic Degradation of Diazinon in Aqueous Solutions Using ZnO Under Visible Light Irradiation: An Advanced Oxidation Process Approach. *Indonesian Journal of Environmental Management and Sustainability*, 9(3), 105–114. <https://doi.org/10.26554/ijems.2025.9.3.105-114>
- Umam, H. I., Prasetyowati, R., Yuliasari, F., Pambudi, T., Hakim, M. F., Kardiman, Ekariyani, N. Y., Shobih, & Widiyanto, E. (2025). Synergistic effects in ZnO/zeolite composites for enhanced visible-light photocatalytic degradation of organophosphates diazinon. *Emergent Materials*, 8(7), 5719–5734. <https://doi.org/10.1007/s42247-025-01154-0>
- Yeganeh, M., Charkhloo, E., Sobhi, H. R., Esrafil, A., & Gholami, M. (2022). Photocatalytic processes associated with degradation of pesticides in aqueous solutions: Systematic review and meta-analysis. In *Chemical Engineering Journal* (Vol. 428). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130081>
- Zhang, L., & Jaroniec, M. (2020). Fundamentals of adsorption for photocatalysis. In *Interface Science and Technology* (Vol. 31, pp. 39–62). Elsevier B.V.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102890-2.00002-6>

Zia, J., Shringi, A. K., & Riaz, U. (2025). Calcium oxide nanoparticles from eggshell waste: A green nanotechnological strategy for microwave-assisted environmental clean up. *Cleaner Chemical Engineering*, *11*, 100182. <https://doi.org/10.1016/j.clce.2025.100182>