

Degradasi Residu Pestisida Klorpirifos pada Buncis Menggunakan Katalis TiO_2 /Zeolit secara Fotolisis

Zilfa^{a*}, Tio Putra Wendari^b, Rahmadhani Khairul Baryah^a

^a Laboratorium Analisis Terapan, Departemen Kimia, Universitas Andalas, Padang 25156, Indonesia

^b Laboratorium Elektrokimia dan Energi, Departemen Kimia, Universitas Andalas, Padang 25156, Indonesia

*Corresponding author: zilfa@sci.unand.ac.id

Abstract

Pesticide residues such as chlorpyrifos in agricultural products are toxic to both human health and the environment. Titanium dioxide (TiO_2) is a widely used photocatalyst for pollutant removal; however, its efficiency is limited due to its relatively low surface area. To enhance its photocatalytic performance, natural zeolit was employed to improve the effectiveness of TiO_2 . This study aims to degrade chlorpyrifos pesticide residue on green beans using TiO_2 supported by zeolit through a photolysis process. The results showed that the degradation percentage of chlorpyrifos under UV light reached 72.88% with TiO_2 and 30.17% with zeolit. The TiO_2 /zeolit composite exhibited a significant improvement in degradation efficiency, reaching 98.82%, indicating an effective synergy between photolysis and adsorption. In the absence of UV irradiation, degradation was only 44.45%, confirming the essential role of UV light in activating TiO_2 as a photocatalyst and enhancing the degradation of chlorpyrifos. The degradation of chlorpyrifos using TiO_2 /zeolit followed first-order kinetics, where the reaction rate is directly proportional to the remaining chlorpyrifos concentration. Furthermore, FTIR and XRD characterizations showed that the TiO_2 /zeolit catalyst maintained its structural stability after the degradation process, allowing for potential reuse. This study shows that TiO_2 /zeolit is effective for photocatalytic pesticide removal and may be applied in agricultural waste treatment.

Keywords

chlorpyrifos
degradation
green beans
photolysis
 TiO_2 /zeolit

Received: April 2026

Revised: April 2026

Accepted: May 2026

Available online: June 2026

1. Pendahuluan

Tanaman buncis merupakan salah satu komoditas pertanian yang banyak dibudidayakan di Indonesia karena memiliki nilai gizi tinggi dan permintaan pasar yang besar, baik untuk konsumsi dalam negeri maupun ekspor. Namun, tanaman buncis rentan terhadap serangan hama dan penyakit yang dapat menurunkan kualitas dan kuantitas hasil panen. Untuk mengendalikan serangan hama dan meningkatkan hasil pertanian tanaman buncis, para petani sering menggunakan berbagai jenis pestisida salah satunya adalah klorpirifos. Klorpirifos merupakan jenis insektisida organofosfat yang efektif dalam mengendalikan berbagai jenis serangga perusak, seperti kutu daun, belalang, dan trips^[1]. Penggunaan pestisida ini membantu petani menjaga hasil pertanian agar tetap optimal, serta mengurangi kerugian yang diakibatkan oleh hama. Salah satu komoditas pertanian yang banyak dibudidayakan adalah buncis yang memiliki nilai gizi tinggi dan permintaan pasar yang besar, baik untuk kon-

sumsi dalam negeri maupun ekspor. Namun, buncis juga rentan terhadap serangan hama dan penyakit yang dapat menurunkan kualitas dan hasil panen. Untuk mengendalikan serangan hama dan meningkatkan hasil pertanian, para petani sering menggunakan pestisida. Salah satu pestisida yang umum digunakan dalam pertanian, termasuk pada tanaman buncis adalah klorpirifos, sebuah insektisida organofosfat yang efektif dalam mengendalikan berbagai jenis serangga perusak, seperti kutu daun, belalang, dan trips. Penggunaan pestisida ini membantu petani menjaga hasil pertanian agar tetap optimal, serta mengurangi kerugian yang diakibatkan oleh hama.

Meskipun memiliki efektivitas yang tinggi untuk mengurangi hama, keberadaan residu klorpirifos pada bahan pangan dapat memicu berbagai risiko kesehatan, seperti neurotoksisitas^[2], gangguan endokrin^[3], kerusakan sistem imun^[4], hingga risiko kanker^[5]. Selain itu, residu pestisida yang tersisa pada sayuran segar dapat juga dapat menyebabkan terjadinya pencemaran

lingkungan dan akumulasi dalam rantai makanan. Berbagai metode telah digunakan untuk mengurangi residu pestisida, seperti pencucian, perebusan, pengupasan, oksidasi kimia, hingga penggunaan adsorben. Namun, metode konvensional tersebut masih memiliki efektivitas yang terbatas dan tidak mampu menurunkan residu secara signifikan, terutama untuk pestisida yang bersifat lipofilik dan kuat berikatan dengan permukaan tanaman^[6]. Oleh karena itu, pengembangan teknologi alternatif yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan aplikatif sangat dibutuhkan, khususnya untuk komoditas hortikultura yang dikonsumsi secara luas.

Metode fotodegradasi polutan organik dengan bantuan fotokatalisis berbasis TiO_2 merupakan salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan karena lebih ramah lingkungan, biaya operasi yang rendah, efisiensi tinggi, harga terjangkau, sifat nontoksik, dan tidak menghasilkan produk pencemar. Teknik ini memanfaatkan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) yang diproduksi oleh semikonduktor TiO_2 untuk memecah ikatan kimia pada senyawa polutan menjadi molekul yang lebih kecil dan tidak berbahaya^[7]. Semikonduktor TiO_2 dipilih karena memiliki sifat yang stabil, tidak beracun, dan mampu menghasilkan radikal oksidatif kuat ketika diaktifkan oleh sinar UV. Namun demikian, kinerja TiO_2 sering kali terbatas akibat luas permukaan spesifik yang rendah dan mudah mengalami agregasi sehingga interaksi awal antara molekul kontaminan dan permukaan aktif TiO_2 kurang optimal^[8]. Untuk mengatasi kekurangan tersebut, TiO_2 dapat dikombinasikan dengan material berpori seperti zeolit, yang memiliki luas permukaan tinggi, stabilitas struktur yang baik, serta kemampuan adsorpsi untuk mendukung proses fotodegradasi. Gabungan dari kedua material tersebut memungkinkan terjadinya peningkatan efisiensi penghilangan klorpirifos akibat kombinasi mekanisme adsorpsi oleh zeolit dan degradasi oleh TiO_2 .

Meskipun menunjukkan efektivitas degradasi yang tinggi terhadap berbagai senyawa organik, aplikasi komposit TiO_2 /zeolit untuk degradasi residu klorpirifos pada matriks buah buncis masih belum banyak dilaporkan. Padahal, keberadaan senyawa interferen dalam jaringan tanaman, sifat hidrofobis klorpirifos, serta potensi interaksi dengan komponen matriks dapat memengaruhi efisiensi fotokatalisis sehingga perlu penelitian lebih jauh mengenai hal tersebut. Selain itu, penelitian ini juga mengembangkan material fotokatalis berbasis zeolit alam lokal dari daerah Solok, Sumatera Barat yang tentunya dapat memberikan nilai tambah dari sisi

keberlanjutan dan kemandirian material dan dapat menunjukkan potensi pemanfaatan sumber daya mineral Indonesia dalam aplikasi fotokatalisis.

Berdasarkan uraian di atas, telah dilakukan penelitian mempelajari efektivitas TiO_2 /zeolit untuk aplikasi degradasi residu pestisida klorpirifos pada sampel buah buncis secara fotolisis. Penelitian ini tidak hanya membandingkan kinerja TiO_2 , zeolit, dan komposit TiO_2 /zeolit, tetapi juga mengevaluasi pengaruh waktu fotolisis dan dosis katalis terhadap efisiensi degradasi residu pestisida. Selain itu, penelitian ini juga melakukan karakterisasi FTIR dan XRD untuk menganalisis perubahan struktur katalis sebelum dan sesudah proses degradasi. Pengujian ini diperlukan untuk mempelajari stabilitas fotokatalis untuk penggunaan secara berulang.

2. Bahan dan Metode

2.1. Bahan Kimia

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah zeolit alam yang diambil dari Lubuk Selasih, Kabupaten Solok. TiO_2 (Merck), HCl (Merck), NaCl (Merck), AgNO_3 (Merck), NaOH (Merck), asetonitril, akuades, pestisida klorpirifos (fostin), serta sampel buncis yang diambil dari Jorong Lipek Pateh Salimpat, Kenagarian Sungai Nanam, Kecamatan Lembah Gumanti, Kabupaten Solok, Sumatera Barat.

2.2. Peralatan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah peralatan gelas (gelas piala, labu ukur, elenmeyer, corong, *petridish*, batang pengaduk, pipet takar, pipet gondok), neraca analitik (KERN AJ 220-4M), ayakan (Fritsch, Germany), *magnetic stirrer*, sentrifus (Thermo Scientific), oven, *furnace*, spektrofotometer UV-Vis (SHIMADZU UV-1280), kotak iradiasi yang dilengkapi lampu UV (Luster BLB 10 W-TB), *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), dan *X-Ray Diffraction* (XRD).

2.3. Cara Kerja

2.3.1. Sintesis katalis TiO_2 /Zeolit

2.3.1.1. Aktivasi Zeolit

Zeolit dihaluskan dengan gerinda dan diayak dengan ayakan 170 mesh. Selanjutnya 300 g zeolit dimasukkan ke dalam gelas piala, zeolit diaktivasi dengan HCl 0,2 M. Kemudian, diaduk menggunakan stirrer selama 45 menit lalu diukur pH. Kemudian dibilas dengan air destilasi hingga pH netral. Setelah pH netral, zeolit disaring dan dimasukkan ke dalam oven selama 2 jam dengan suhu 105°C ^{[9], [10]}.

2.3.1.2. Penjenuhan Zeolit

Zeolit yang telah diaktivasi selanjutnya dijenuhkan dengan penambahan NaCl 0,01 M lalu diaduk selama 1 jam. Kemudian zeolit dipisahkan dari filtrat dengan proses penyaringan, filtrat dari zeolit diuji dengan AgNO₃ apabila masih terbentuk endapan putih maka zeolit dicuci dengan air destilasi hingga tidak terbentuk lagi endapan putih^[11].

2.3.1.3. Preparasi Katalis TiO₂/Zeolit

Sebanyak 75 g zeolit yang telah dijenuhkan dimasukkan ke dalam 100 mL air destilasi dan diaduk selama 6 jam, kemudian ditambahkan 3 gram TiO₂ secara perlahan dan bertahap sambil diaduk. Jumlah TiO₂ yang lebih rendah dibandingkan dengan zeolit bertujuan untuk meningkatkan dispersi TiO₂ pada matriks zeolit dan mengurangi aglomerasi partikel TiO₂. Setelah proses pengadukan selesai, campuran TiO₂/zeolit dengan pelarut dipisahkan dengan penyaringan vakum lalu dikeringkan dengan oven pada temperatur 105°C, lalu digerus sampai halus lalu diayak menggunakan pengayak 170 mesh. Setelah itu, hasil ayakan dikalsinasi pada temperatur 400°C selama 10 jam^[12].

2.3.2. Preparasi Sampel

Sampel diambil dari Kabupaten Solok, sampel bagian tanaman yang diambil yaitu buah tanaman buncis. Sampel yang diambil dibungkus dengan aluminium foil lalu dimasukkan ke dalam *container box* yang diisi dengan es batu agar sampel tetap segar dan konsentrasi pestisida tetap terjaga.

2.3.3. Pembuatan Larutan Standar Pestisida Klorpirifos

Larutan pestisida 100 mg/L diencerkan menjadi variasi konsentrasi 10; 20; 30; 40; 50 mg/L dengan cara memipet sebanyak 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5 mL ke dalam labu ukur 25 mL lalu ditambahkan asetonitril sampai tanda batas. Dicari panjang gelombang maksimum larutan standar pada rentang 200 - 400 nm. Masing-masing larutan diukur absorbannya dengan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

2.3.4. Penentuan Kadar Residu Pestisida Klorpirifos pada Sampel

Sampel buncis ditimbang 15,0000 g, dimasukkan ke gelas piala, kemudian dilakukan pencucian dengan penambahan 50 mL asetonitril untuk mengestrak residu pestisida yang ada pada permukaan buncis, lalu diaduk selama 1 menit, setelah itu disaring dan ditandai dengan

larutan pertama. Sampel buncis tersebut dicuci kembali dengan perlakuan yang sama hingga diperoleh larutan kedua, dan begitu juga untuk yang ketiga. Setelah itu, ketiga larutan tersebut dicampurkan dan diukur absorbannya dengan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang optimum. Kemudian ditentukan konsentrasi pestisida yang terdapat pada larutan sampel.

2.3.5. Penentuan Kondisi Optimum Degradasi

2.3.5.1. Pengaruh Waktu Fotolisis terhadap Persen Degradasi Pestisida Tanpa Katalis

Sebanyak 10 mL larutan sampel dimasukkan masing-masing ke dalam 5 *petridish*. Larutan difotolisis menggunakan lampu UV 10 watt ($\lambda = 365$ nm) pada variasi waktu 15, 30, 45, 60, dan 75 menit. Kemudian diukur absorbannya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang optimum, setelah itu didapatkan waktu optimum degradasi, dan dihitung persen degradasinya.

2.3.5.2. Pengaruh Penambahan Jumlah TiO₂/Zeolit terhadap Persen Degradasi Pestisida

Sebanyak 10 mL larutan buncis dimasukkan masing-masing ke dalam 5 *petridish*. Lalu, ditambahkan TiO₂/zeolit dengan variasi massa yaitu 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; dan 1,2 g ke masing-masing *petridish*. Setelah itu disiapkan blanko dengan cara memipet sebanyak 10 mL asetonitril lalu dimasukkan ke dalam 5 *petridish*. Kemudian, pada masing-masing *petridish* ditambahkan TiO₂/zeolit dengan variasi massa yaitu 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; dan 1,2 g. Masing-masing larutan diaduk menggunakan stirrer selama 1 menit. Lalu larutan difotolisis menggunakan lampu UV 10 watt ($\lambda = 365$ nm) selama waktu optimum. Kemudian dipisahkan menggunakan sentrifus selama 30 menit dengan kecepatan 3000 rpm dan diambil filtratnya. Absorban masing-masing larutan sampel dan blanko diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang optimum dan dihitung persen degradasinya.

2.3.5.3. Pengaruh Waktu Fotolisis terhadap Persen Degradasi pada Massa Optimum

Sebanyak 10 mL larutan sampel dimasukkan masing-masing ke dalam 5 *petridish*. Ditambahkan TiO₂/zeolit sebanyak massa optimum ke dalam 5 *petridish* tersebut. Setelah itu disiapkan blanko dengan cara memipet sebanyak 10 mL asetonitril lalu dimasukkan ke *petridish*. Kemudian, ditambahkan TiO₂/zeolit dengan massa optimum. Masing-masing larutan diaduk menggunakan stirrer selama 1 menit. Larutan tersebut difotolisis

menggunakan lampu UV 10 watt ($\lambda = 365$ nm) pada variasi waktu 15, 30, 45, 60, dan 75 menit. Setelah itu dipisahkan menggunakan sentrifus selama 30 menit dengan kecepatan 3000 rpm dan diambil filtratnya. Kemudian diukur absorbannya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang optimum dan dihitung persen degradasinya.

2.3.5.4. Pengaruh Waktu Fotolisis terhadap Persen Degradasi Pestisida Menggunakan TiO_2

Sebanyak 10 mL larutan sampel dimasukkan masing-masing ke dalam 5 *petridish*. Lalu ditambahkan TiO_2 sebanyak 1/26 dari massa optimum. Setelah itu disiapkan blanko dengan cara memipet sebanyak 10 mL asetonitril lalu dimasukkan ke *petridish*, Kemudian ditambahkan TiO_2 sebanyak 1/26 dari massa optimum. Masing-masing larutan diaduk menggunakan stirrer selama 1 menit. Larutan tersebut difotolisis menggunakan lampu UV 10 watt ($\lambda = 365$ nm) pada variasi waktu 15, 30, 45, 60, dan 75 menit. Setelah itu disentrifus selama 30 menit dengan kecepatan 3000 rpm dan diambil filtratnya. Kemudian diukur absorbannya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang optimum dan dihitung persen degradasinya.

2.3.5.5. Pengaruh Waktu Fotolisis terhadap Persen Degradasi Pestisida Menggunakan Zeolit

Sebanyak 10 mL larutan sampel dimasukkan masing-masing ke dalam 5 *petridish*. Lalu ditambahkan zeolit sebanyak 25/26 dari massa optimum. Setelah itu disiapkan blanko dengan cara memipet sebanyak 10 mL asetonitril lalu dimasukkan ke *petridish*. Kemudian, ditambahkan zeolit sebanyak 25/26 dari massa optimum. Masing-masing larutan diaduk menggunakan stirrer selama 1 menit. Larutan tersebut difotolisis menggunakan lampu UV 10 watt ($\lambda = 365$ nm) pada variasi waktu 15, 30, 45, 60, dan 75 menit. Setelah itu dipisahkan menggunakan sentrifus selama 30 menit dengan kecepatan 3000 rpm dan diambil filtratnya. Kemudian diukur absorbannya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang optimum dan dihitung persen degradasinya.

2.3.5.6. Pengaruh Waktu Fotolisis terhadap Persen Degradasi Pestisida Menggunakan TiO_2 /Zeolit tanpa dan dengan Disinari UV

Sebanyak 10 mL larutan sampel dimasukkan masing-masing ke dalam 10 *petridish*, ditambahkan TiO_2 /zeolit sebanyak massa optimum. Masing-masing larutan diaduk menggunakan stirrer selama 1 menit. Lima

petridish difotolisis di dalam kotak UV tanpa menggunakan lampu UV 10 watt ($\lambda = 365$ nm) pada variasi waktu 15, 30, 45, 60, dan 75 menit. Lalu, 5 *petridish* lainnya difotolisis di dalam kotak UV dengan menggunakan lampu UV 10 watt ($\lambda = 365$ nm) pada variasi waktu 15, 30, 45, 60, dan 75 menit. Setelah itu disiapkan blanko dengan cara memipet sebanyak 10 mL asetonitril lalu dimasukkan ke *petridish*. Kemudian, ditambahkan TiO_2 /zeolit dengan massa optimum. Masing-masing larutan diaduk menggunakan stirrer selama 1 menit. Lalu 5 *petridish* difotolisis di dalam kotak UV tanpa menggunakan lampu UV 10 watt ($\lambda = 365$ nm) dan 5 *petridish* yang lainnya difotolisis di dalam kotak UV dengan menggunakan lampu UV 10 watt ($\lambda = 365$ nm) pada variasi waktu 15, 30, 45, 60, dan 75 menit. Setelah itu, masing-masing larutan dipisahkan menggunakan sentrifus selama 30 menit dengan kecepatan 3000 rpm dan diambil filtratnya. Kemudian diukur absorbannya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang optimum dan dihitung persen degradasinya.

2.3.6. Karakterisasi Katalis Sebelum dan Setelah Degradasi menggunakan FTIR dan XRD

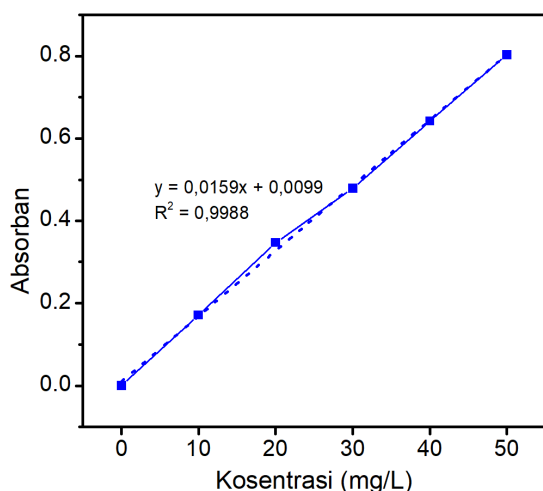
Disiapkan TiO_2 /zeolit sebelum dan setelah degradasi dalam kondisi kering. Selanjutnya dikarakterisasi dengan menggunakan peralatan FTIR untuk mengidentifikasi gugus fungsinya. Karakterisasi dengan menggunakan XRD dilakukan untuk mengetahui struktur kristalnya.

3. Hasil dan Diskusi

3.1. Kurva Kalibrasi Larutan Standar Klorpirifos

Pembuatan kurva kalibrasi larutan standar bertujuan untuk memastikan adanya hubungan linear yang valid antara konsentrasi analit dan respon detektor, sehingga data kuantitatif yang dihasilkan dapat diandalkan, serta untuk mengetahui hubungan antara konsentrasi dan nilai serapannya^[11]. Linearitas ditentukan melalui pembuatan kurva kalibrasi yang diperoleh dari pengukuran absorbansi serangkaian larutan standar pestisida menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Validasi linearitas ini merupakan tahap krusial dalam menjamin akurasi dan presisi hasil analisis. Pengukuran serapan pada larutan standar klorpirifos dilakukan pada panjang gelombang 289,1 nm yang merupakan panjang gelombang maksimum (λ_{maks}) dari klorpirifos dalam pelarut asetonitril berdasarkan hasil scanning spektrum UV-Vis pada rentang 200 - 400 nm. Hasil pengukuran absorbansi terhadap variasi konsentrasi larutan standar menunjukkan adanya hubungan linear antara konsentrasi dan nilai absorbansi.

Kurva kalibrasi yang diperoleh ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kurva kalibrasi larutan standar klorpirifos

Grafik menunjukkan regresi absorban larutan standar klorpirifos dengan variasi konsentrasi 10; 20; 30; 40; 50 mg/L dengan persamaan regresi yang dihasilkan $y = 0,0159x + 0,0099$ dengan nilai $R^2 = 0,9988$. Nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan bahwa kurva tersebut telah linear. Hal ini sesuai dengan Hukum Lambert Beer, di mana semakin besar konsentrasi larutan maka nilai absorban juga semakin besar^[13]. Pembuatan kurva kalibrasi ini bertujuan untuk menentukan konsentrasi residu pestisida klorpirifos pada buncis melalui persamaan regresi yang dihasilkan.

3.2. Penentuan Kadar Residu Pestisida Klorpirifos pada Buncis

Penentuan kadar residu pestisida klorpirifos pada buncis dilakukan untuk mengetahui konsentrasi awal pestisida sebelum perlakuan degradasi menggunakan fotokatalis $\text{TiO}_2/\text{zeolit}$. Proses ini bertujuan sebagai tolak ukur kuantitatif untuk menilai efektivitas degradasi yang akan dilakukan pada tahapan selanjutnya. Sampel buncis segar yang diperoleh dari Kabupaten Solok ditimbang sebanyak 15,0000 g, kemudian dilakukan proses ekstraksi menggunakan pelarut asetonitril sebanyak 50 mL sebanyak tiga kali berturut-turut. Setiap tahap ekstraksi dilakukan dengan pengadukan selama satu menit untuk memastikan pelarutan optimal residu klorpirifos yang menempel pada permukaan buncis. Filtrat dari ketiga ekstraksi tersebut kemudian digabungkan dan dijadikan sebagai larutan uji. Larutan hasil ekstraksi diukur nilai absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum klorpirifos, yaitu 289,1 nm. Nilai absorbansi yang diperoleh

dari larutan sampel adalah 0,696. Konsentrasi klorpirifos dalam larutan sampel kemudian dihitung dengan menggunakan persamaan regresi linear yang diperoleh dari kurva kalibrasi, yaitu:

$$y = 0,0159x + 0,0099$$

Dengan memasukkan nilai absorban ke dalam persamaan, diperoleh nilai konsentrasi klorpirifos sebagai berikut:

$$0,696 = 0,0159x + 0,0099 \rightarrow x = 43,15 \text{ mg/L}$$

Nilai tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi klorpirifos yang terkandung dalam larutan ekstrak hasil pencucian permukaan buncis adalah sebesar 43,15 mg/L. Konsentrasi ini menunjukkan kadar residu yang masih terdapat pada sampel buncis tanpa perlakuan degradasi, serta akan menjadi dasar dalam penghitungan efisiensi proses fotodegradasi pada tahap selanjutnya.

3.3. Penentuan Kondisi Optimum

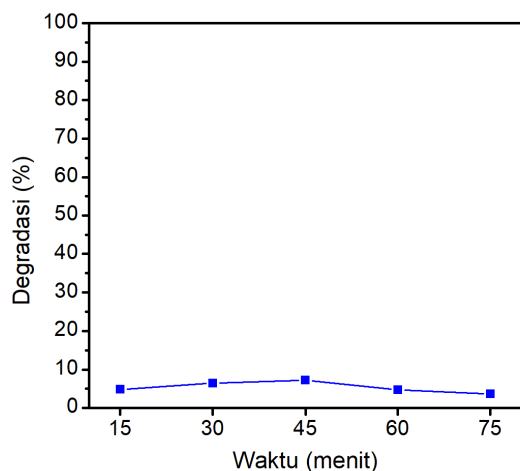
Penentuan kondisi optimum dalam proses degradasi klorpirifos dilakukan untuk mengetahui parameter paling efektif dalam meningkatkan efisiensi fotodegradasi menggunakan katalis $\text{TiO}_2/\text{zeolit}$. Parameter yang dikaji meliputi waktu fotolisis, jumlah katalis, serta keberadaan lampu UV dan fotokatalis.

3.3.1. Pengaruh Waktu Fotolisis terhadap Degradasi Tanpa Katalis

Penentuan waktu optimum dilakukan untuk mengetahui lama waktu penyinaran UV yang menghasilkan efisiensi degradasi tertinggi terhadap senyawa klorpirifos tanpa bantuan katalis. Sampel klorpirifos dipaparkan lampu UV pada panjang gelombang 289,1 nm dengan variasi waktu yaitu 15, 30, 45, 60, dan 75 menit. Persentase degradasi yang dihasilkan pada masing-masing interval waktu disajikan dalam Gambar 2.

Berdasarkan Gambar 2, terlihat bahwa persentase degradasi meningkat dari 4,81% (15 menit) menjadi 6,41% (30 menit) dan mencapai maksimum sebesar 7,14% pada waktu penyinaran 45 menit. Peningkatan degradasi pada awalnya terjadi karena proses penyinaran UV dapat menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) dari molekul air. Radikal ini bersifat sangat reaktif dan mampu menyerang senyawa organik, seperti klorpirifos sehingga menyebabkan degradasi senyawa tersebut. Semakin lama waktu penyinaran, semakin banyak pula radikal hidroksil yang terbentuk, sehingga persen degradasi yang dihasilkan juga meningkat^[14]. Namun, setelah melewati waktu penyinaran 45 menit, terlihat adanya penurunan persen degradasi. Hal ini disebabkan karena produksi radikal OH telah mencapai kondisi jenuh

atau konstan. Dalam kondisi tersebut, meskipun penyinaran UV tetap berlangsung, jumlah radikal baru yang terbentuk tidak lagi signifikan, sementara radikal yang sudah ada telah bereaksi dengan senyawa target^[15]. Kondisi ini menyebabkan jumlah radikal aktif yang tersedia untuk proses degradasi berkurang, sehingga persen degradasi menurun. Dengan demikian, waktu optimum untuk fotodegradasi klorpirifos tanpa katalis berada pada menit ke-45. Waktu ini akan dijadikan sebagai acuan dalam proses penentuan jumlah TiO_2 /zeolit optimum terhadap degradasi pada tahap selanjutnya.



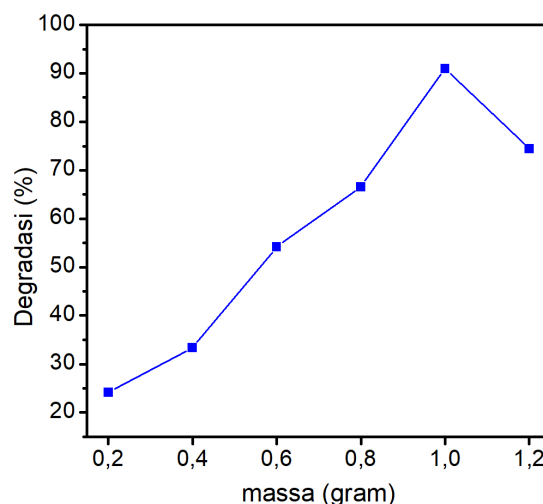
Gambar 2. Penentuan waktu optimum untuk degradasi senyawa klorpirifos tanpa katalis dengan penyinaran UV

3.3.2. Pengaruh Jumlah TiO_2 /zeolit terhadap Degradasi

Pengaruh variasi massa katalis terhadap efisiensi degradasi senyawa klorpirifos dipelajari dengan memvariasikan massa katalis sebesar 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; dan 1,2 gram. Proses degradasi dilakukan dengan UV selama 45 menit sebagai waktu optimum berdasarkan hasil pada bagian sebelumnya. Hasil degradasi ditampilkan pada Gambar 3.

Grafik menunjukkan bahwa persen degradasi meningkat seiring bertambahnya massa katalis dari 0,2 g hingga mencapai maksimum pada 1,0 g. Namun, ketika massa katalis dinaikkan menjadi 1,2 g, terjadi penurunan efisiensi degradasi. Peningkatan efisiensi degradasi seiring bertambahnya massa katalis hingga 1,0 g disebabkan oleh bertambahnya jumlah situs aktif dan luas permukaan katalis yang berperan dalam menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$). Namun, ketika massa katalis melebihi 1,0 g, dalam hal ini 1,2 g, efisiensi degradasi menurun. Hal ini disebabkan oleh jumlah katalis yang terlalu banyak, yang dapat menimbulkan efek penyaringan cahaya (*light screening effect*). Ketika partikel katalis terlalu banyak, sebagian besar cahaya UV tidak dapat menembus ke

seluruh volume larutan secara merata. Akibatnya, banyak permukaan katalis yang tidak terpapar cahaya, sehingga reaksi fotokatalitik tidak berjalan secara efisien. Hal ini menyebabkan luas permukaan efektif yang aktif terhadap cahaya menjadi berkurang, dan degradasi menurun^[16]. Dengan demikian, massa optimum katalis TiO_2 /zeolit yang digunakan dalam proses fotodegradasi klorpirifos adalah 1,0 gram, di mana efisiensi degradasi paling tinggi diperoleh karena sinergi antara jumlah situs aktif, penetrasi cahaya UV, dan ketersediaan radikal hidroksil yang cukup.



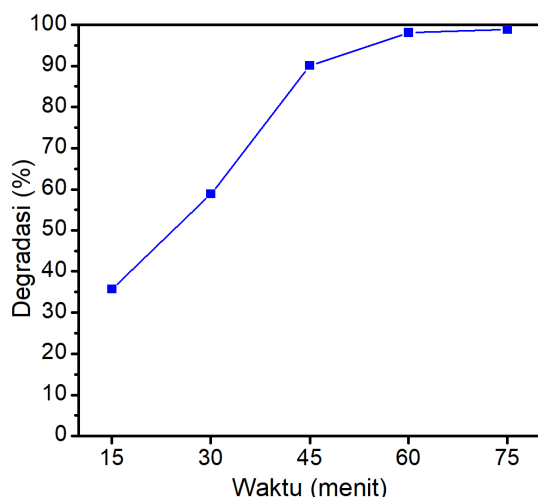
Gambar 3. Penentuan massa optimum katalis TiO_2 /Zeolit untuk degradasi senyawa klorpirifos dengan penyinaran UV selama 45 menit

3.3.3. Pengaruh Waktu Fotolisis terhadap Persen Degradasi pada Massa Optimum

Proses degradasi dilakukan dengan penambahan TiO_2 /zeolit dengan bantuan lampu UV. Aktivitas ini diharapkan proses degradasi pestisida menjadi lebih cepat dan optimum dikarenakan sifat fotokatalitik dari TiO_2 dalam katalis dan sifat zeolit sebagai adsorbennya sehingga menghasilkan degradasi yang lebih efisien.

Gambar 4 menunjukkan bahwa degradasi pestisida meningkat secara signifikan seiring meningkatnya waktu degradasi. Persentase degradasi mencapai 35,71% pada menit ke-15 dan naik menjadi 58,88% pada menit ke-30. Pada menit ke-45, degradasi meningkat tajam menjadi 88,03%, dan hampir mencapai degradasi maksimal pada menit ke-60 dan 75 dengan persen degradasi masing-masing sebesar 98,09% dan 98,82%. Hasil ini menunjukkan bahwa lampu UV mengaktifkan TiO_2 sebagai fotokatalis yang menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) yang mampu memecah molekul klorpirifos secara efektif^[17]. Zeolit berperan sebagai media adsorben yang memperbesar luas permukaan katalis sehingga meningkatkan

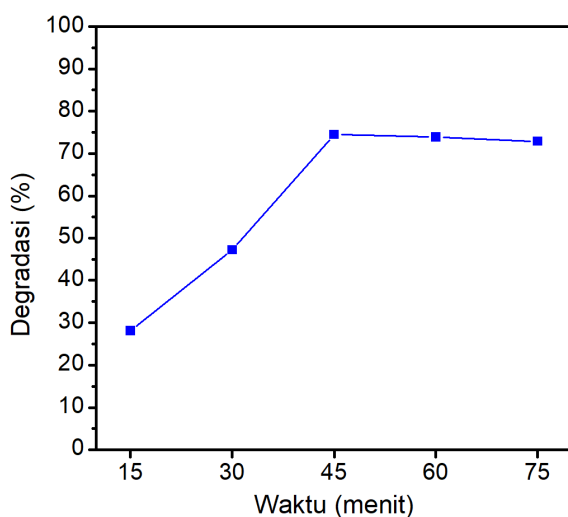
efisiensi interaksi antara pestisida dan situs aktif fotokatalis^[18].



Gambar 4. Persentase degradasi klorpirifos terhadap peningkatan waktu fotolisis pada massa optimum TiO_2 /zeolit 1 gram

3.3.4. Pengaruh Waktu Fotolisis terhadap Persen Degradasi Pestisida Menggunakan TiO_2

Proses degradasi selanjutnya dilakukan pengujian pengaruh waktu fotolisis terhadap persen degradasi pestisida menggunakan TiO_2 sebagai fotokatalis. Tujuan dari tahap ini adalah untuk mengetahui durasi optimum penyinaran UV yang memberikan efisiensi degradasi tertinggi, sehingga dapat mendukung efektivitas aktivasi fotokatalitik melalui pembentukan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) yang reaktif. Penambahan TiO_2 sebanyak 1/26 dari massa optimum katalis TiO_2 /zeolit yang diperoleh pada percobaan sebelumnya yaitu 0,0385 gram.



Gambar 5. Persen degradasi klorpirifos terhadap peningkatan waktu fotolisis dengan penambahan TiO_2

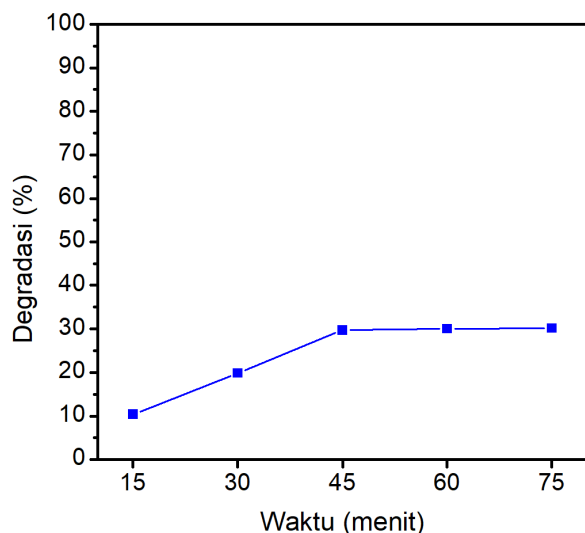
Gambar 5 menunjukkan bahwa degradasi pestisida klorpirifos dengan menggunakan fotokatalis TiO_2 dan bantuan lampu UV mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya waktu. Pada menit ke-15, degradasi tercatat sebesar 28,13 %, dan meningkat menjadi 47,22 % pada menit ke-30. Degradasi terus meningkat hingga mencapai 74,48 % pada menit ke-45. Namun, setelah menit ke-45, tingkat degradasi mulai melambat. Hal ini menunjukkan proses degradasi dengan TiO_2 mulai mencapai titik jenuh. Setelah waktu tersebut, meskipun waktu fotolisis diperpanjang, peningkatan degradasi tidak signifikan. Ini mengindikasikan bahwa TiO_2 telah menguraikan sebagian besar pestisida yang tersedia, dan proses fotokatalisis mendekati kapasitas maksimalnya. Peningkatan degradasi disebabkan ketika TiO_2 terpapar lampu UV, elektron dari pita valensi akan tereksitasi ke pita konduksi, meninggalkan hole di pita valensi. Pasangan elektron *hole* (e^-/h^+) ini kemudian bereaksi dengan molekul air dan oksigen yang ada di permukaan katalis, menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) dan radikal superoksida ($\bullet\text{O}_2^-$) yang sangat reaktif. Radikal ini menyerang ikatan-ikatan kimia utama seperti gugus fosfat, cincin aromatik, dan ikatan C-Cl. Selain itu, sifat TiO_2 yang memiliki luas permukaan tinggi memungkinkan terjadinya adsorpsi yang terdapat pada klorpirifos secara efektif di permukaan katalis, sehingga meningkatkan efisiensi interaksi antara polutan dan radikal oksidatif^[19].

3.3.5. Pengaruh Waktu Fotolisis terhadap Persen Degradasi Pestisida Menggunakan Zeolit

Pengaruh waktu proses fotolisis terhadap penurunan konsentrasi klorpirifos menggunakan zeolit dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan zeolit sebagai katalis tunggal dalam menurunkan konsentrasi pestisida. Penambahan zeolit sebanyak 25/26 dari massa optimum katalis TiO_2 /zeolit yang diperoleh pada percobaan sebelumnya yaitu 0,9615 gram.

Berdasarkan data pada Gambar 6, terlihat bahwa degradasi klorpirifos menggunakan zeolit menunjukkan peningkatan yang sangat terbatas seiring bertambahnya waktu penyinaran. Pada menit ke-15, persentase degradasi tercatat sekitar 10%, yang kemudian meningkat menjadi 30% pada menit ke-45. Namun, setelah itu, tidak ada perubahan signifikan pada persen degradasi, yang menunjukkan bahwa proses degradasi cenderung stagnan setelah waktu tertentu. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun zeolit memiliki kemampuan adsorpsi yang baik, proses degradasi klorpirifos melalui mekanisme adsorpsi saja tidak cukup efektif tanpa

adanya bantuan fotokatalis seperti TiO_2 . Zeolit berfungsi lebih sebagai media untuk memperbesar luas permukaan katalis, namun tanpa fotokatalis TiO_2 , proses degradasi tidak berjalan secara optimal. Oleh karena itu, efisiensi degradasi yang lebih tinggi akan tercapai jika zeolit dikombinasikan dengan TiO_2 , yang mampu mengaktivasi reaksi fotokatalitik dan mempercepat degradasi klorpirifos^[20].



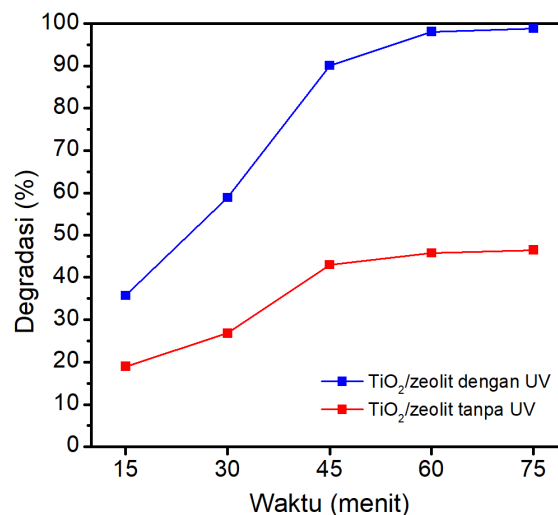
Gambar 6. Persen degradasi klorpirifos terhadap peningkatan waktu fotolisis dengan penambahan zeolite

3.3.6. Pengaruh Waktu Fotolisis terhadap Persen Degradasi Klorpirifos Menggunakan TiO_2 /Zeolit tanpa dan dengan UV

Pengujian ini dilakukan untuk melihat peran lampu UV dalam mendegradasi pestisida klorpirifos. Sebanyak 1 gram katalis TiO_2 /zeolit ditambahkan ke dalam 10 mL sampel pestisida dan proses fotolisis dilakukan dalam kondisi gelap dan dengan pencahayaan UV. Hasil degradasi dalam bentuk persen degradasi terhadap waktu fotolisis ditunjukkan pada Gambar 7.

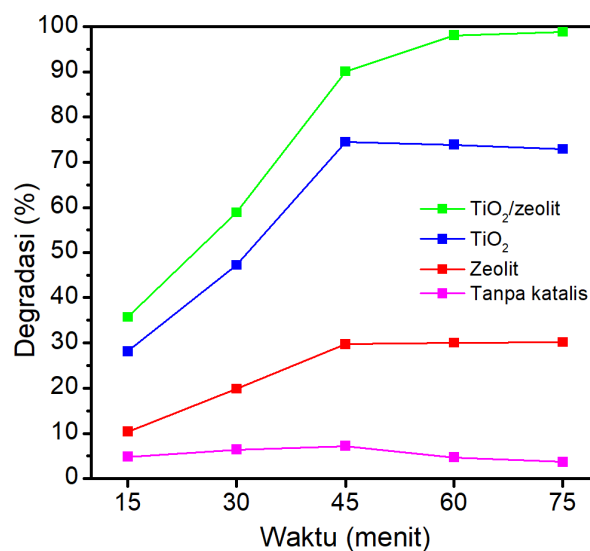
Berdasarkan Gambar 7, pada kondisi dengan lampu UV, degradasi pestisida memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan pada kondisi tanpa lampu UV. Pada menit ke-15, degradasi yang tercatat dengan lampu UV adalah 35,71%, sedangkan pada kondisi tanpa UV hanya mencapai 18,95%. Seiring waktu, perbedaan ini semakin signifikan, dimana pada menit ke-75, degradasi dengan lampu UV mencapai 98,82%, sementara tanpa UV hanya mencapai 44,45%. Peningkatan signifikan pada kondisi dengan lampu UV menunjukkan bahwa lampu UV mengaktifkan TiO_2 sebagai fotokatalis yang menghasilkan radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$) yang sangat reaktif sehingga mempercepat proses degradasi. Di sisi lain, meskipun pada kondisi tanpa UV, sistem TiO_2 /zeolit masih dapat mengurangi konsentrasi klorpirifos,

mekanisme degradasi terjadi lebih lambat dan terbatas pada adsorpsi oleh zeolit dan reaksi permukaan TiO_2 yang tidak difasilitasi oleh lampu UV menyebabkan tidak aktifnya fotokatalisis TiO_2 ^[21]. Hal ini menegaskan bahwa peran lampu UV sangat penting dalam meningkatkan efisiensi degradasi pestisida klorpirifos, menjadikan sistem TiO_2 /zeolit dengan UV sebagai metode yang lebih efektif untuk degradasi pestisida.



Gambar 7. Perbandingan persen degradasi senyawa klorpirifos menggunakan katalis TiO_2 /zeolit pada kondisi dengan dan tanpa penyinaran UV

3.3.7. Gabungan Pengaruh Waktu terhadap Degradasi Klorpirifos dengan Berbagai Perlakuan

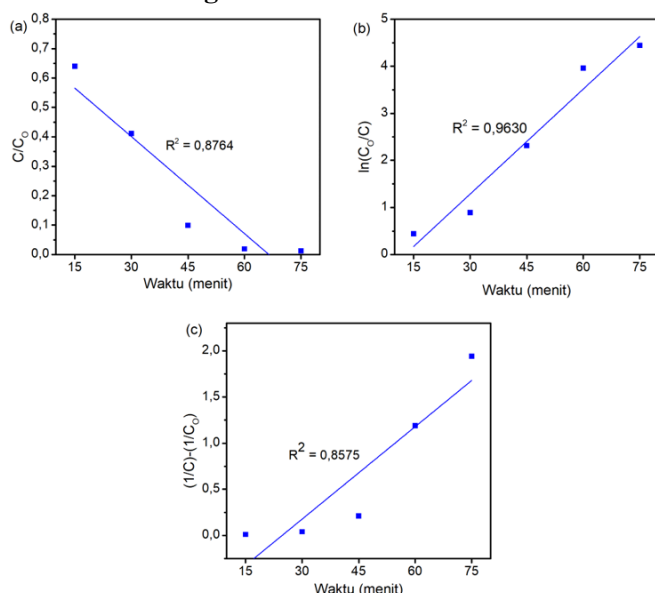


Gambar 8. Perbandingan persen degradasi senyawa klorpirifos pada berbagai perlakuan katalis dengan penyinaran UV

Gambar 8 menunjukkan perbandingan pengaruh waktu penyinaran UV terhadap degradasi klorpirifos dengan berbagai perlakuan katalis, yaitu TiO_2 /zeolit, TiO_2 , zeolit, dan tanpa katalis. Pada kondisi tanpa katalis,

degradasi klorpirifos sangat terbatas, hanya mencapai sekitar 7,14% setelah 45 menit. Zeolit saja menunjukkan peningkatan degradasi yang lebih baik dari tanpa katalis, namun hanya mencapai sekitar 29,73%. TiO_2 sendiri mampu meningkatkan degradasi hingga 74,48%, namun tidak seefektif kombinasi TiO_2 /zeolit. Pada perlakuan TiO_2 /zeolit, degradasi mencapai lebih dari 90% pada menit ke-45, menunjukkan bahwa kombinasi ini memberikan kinerja degradasi terbaik. Hal ini menegaskan bahwa sinergi antara fotokatalisis TiO_2 dan adsorpsi zeolit sangat efektif dalam mempercepat degradasi klorpirifos, dengan lampu UV berperan penting dalam meningkatkan efisiensi fotokatalisis.

3.4. Kinetika Degradasi Fotokatalitik



Gambar 9. Kinetika degradasi pestisida klorpirifos menggunakan TiO_2 /zeolit pada berbagai orde reaksi: (a) orde 0, (b) orde 1, dan (c) orde 2

Kinetika degradasi pada Gambar 9 bertujuan untuk mengevaluasi kinetika degradasi pestisida klorpirifos menggunakan katalis TiO_2 /zeolit di bawah kondisi fotolisis dengan lampu UV. Tiga model orde reaksi diuji: orde 0, orde 1, dan orde 2. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa model orde 1 paling sesuai untuk menggambarkan proses degradasi klorpirifos.

Pada model orde 0, meskipun laju reaksi menunjukkan penurunan cepat pada awal reaksi, terdapat penyimpangan pada titik data yang lebih tinggi, dengan nilai R^2 sebesar 0,8764 dan $k = 0,0114 \text{ mg/L.menit}$. Hal ini menunjukkan ketidaksesuaian dengan data eksperimen, mengindikasikan bahwa faktor lain, selain konsentrasi klorpirifos, juga berperan. Model orde 1 menunjukkan hubungan linear yang sangat baik antara $\ln(C_0/C)$ dan waktu reaksi, dengan nilai R^2 sebesar 0,963

dan $k = 0,0743 \text{ menit}^{-1}$ sehingga paling tepat dalam menggambarkan degradasi. Degradasi klorpirifos terjadi lebih cepat pada awal reaksi dan semakin melambat seiring berjalannya waktu, yang menunjukkan efektivitas TiO_2 /zeolit sebagai katalisator dalam fotolisis UV. Model orde 2, meskipun menunjukkan pola linear, memiliki nilai R^2 yang lebih rendah yaitu 0,8575 dengan nilai $k = 0,0334 \text{ L/mg.menit}$ sehingga menunjukkan kecocokan yang lebih rendah dibandingkan dengan orde 1. Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa proses degradasi klorpirifos mengikuti model kinetika orde 1, di mana laju reaksi berbanding lurus dengan konsentrasi klorpirifos yang tersisa. Penggunaan TiO_2 /zeolit dalam kondisi fotolisis UV berperan signifikan dalam mempercepat degradasi pestisida, dan hasil ini memberikan wawasan penting dalam pengembangan penggunaan katalis dalam pengolahan limbah pestisida^[22].

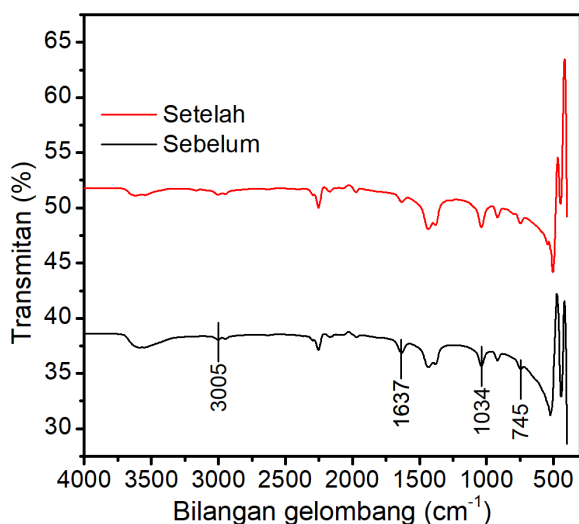
Secara keseluruhan, kecocokan model orde 1 pada penelitian ini sejalan dengan temuan studi sebelumnya. Penelitian oleh Ding *et al.*, (2024) melaporkan bahwa degradasi residu klorpirifos pada tanah mengikuti model orde pertama dengan nilai $R^2 > 0,85$, serta nilai DT_{50} berkisar antara $11,0 \pm 1,44$ hingga $14,8 \pm 0,26$ hari pada konsentrasi aplikasi $6 - 12 \text{ mg.kg}^{-1}$. Meskipun kondisi matriks berbeda, kesamaan pola kinetika menunjukkan bahwa pemecahan klorpirifos cenderung bergantung pada konsentrasi senyawa tersisa, bukan pada faktor eksternal lainnya.

3.5. Analisis Senyawa Klorpirifos Menggunakan FTIR

Gambar 10 menunjukkan spektrum FTIR dari sampel yang mengandung klorpirifos sebelum dan setelah proses degradasi. Perbedaan paling mencolok terlihat pada peningkatan nilai transmitansi setelah degradasi yang mengindikasikan penurunan jumlah klorpirifos dalam larutan. Semakin tinggi transmitansi berarti semakin sedikit radiasi IR yang diserap, menandakan bahwa sejumlah besar molekul klorpirifos telah terdegradasi dan gugus aktif dalam molekul klorpirifos telah terputus.

Sebelum degradasi, spektrum klorpirifos menunjukkan puncak pada 3005 cm^{-1} , 1637 cm^{-1} , 1034 cm^{-1} , dan 745 cm^{-1} yang merupakan karakteristik dari vibrasi C-H, vibrasi C=C, vibrasi P-O-C, dan vibrasi C-Cl. Puncak-puncak ini mencerminkan keberadaan gugus metil (C-H), cincin aromatik (C=C), gugus fosfat ester (P-O-C), serta gugus kloroaromatik (C-Cl) pada struktur klorpirifos. Setelah degradasi, spektrum FTIR menunjukkan penurunan intensitas yang paling jelas

terlihat pada puncak 1639 cm^{-1} , yang berhubungan dengan C=C pada cincin aromatik klorpirifos.



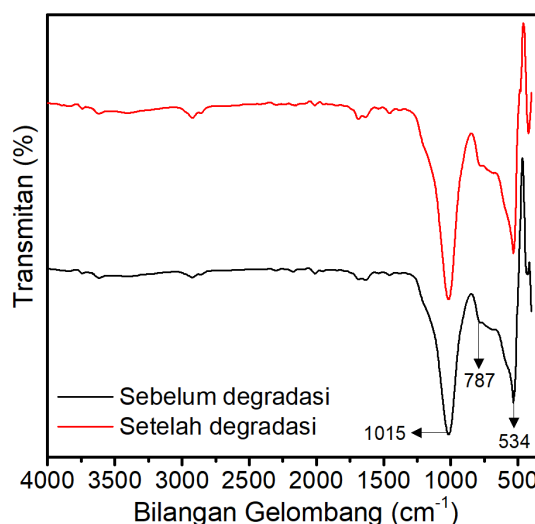
Gambar 10. Spektrum FTIR senyawa klorpirifos sebelum dan setelah degradasi

Hal ini menunjukkan bahwa cincin aromatik telah terdegradasi, mengurangi keberadaan ikatan C=C dalam struktur klorpirifos. Namun, puncak lainnya, seperti 3005 cm^{-1} , 1034 cm^{-1} , dan 745 cm^{-1} tidak mengalami penurunan intensitas, yang mengindikasikan bahwa gugus metil, fosfat ester, dan kloroaromatik tetap ada dalam produk degradasi dalam fragmen-fragmen yang terbentuk. Dengan demikian, meskipun terjadi degradasi pada bagian aromatik, gugus-gugus fungsional utama masih ada dan terdeteksi dalam produk yang lebih kecil setelah proses degradasi.

3.6. Karakterisasi Katalis $\text{TiO}_2/\text{Zeolit}$ Sebelum dan Setelah fotolisis menggunakan FTIR

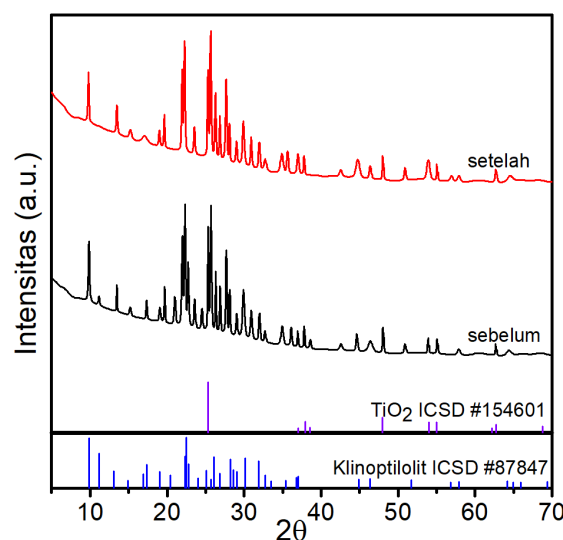
Analisis karakterisasi katalis $\text{TiO}_2/\text{zeolit}$ sebelum dan setelah proses degradasi pestisida dilakukan untuk memantau perubahan struktur dan gugus fungsi selama reaksi. Spektrum FTIR yang ditunjukkan pada Gambar 11 memperlihatkan bahwa tidak terdapat perubahan signifikan pada puncak-puncak karakteristik katalis sebelum dan setelah degradasi. Puncak pada bilangan gelombang 1015 cm^{-1} terkait dengan vibrasi gugus T-O-T (di mana T adalah Si atau Al) dan vibrasi peregangan Ti-O-Si sebagai akibat dari pembentukan komposit, puncak sekitar 787 cm^{-1} menunjukkan vibrasi O-T-O, dan pita pada 534 cm^{-1} mewakili vibrasi Ti-O-Ti pada TiO_2 . Ketiga pita ini tetap terlihat dengan intensitas yang relatif stabil. Hal ini mengindikasikan kestabilan struktur katalis $\text{TiO}_2/\text{zeolit}$ selama proses degradasi pestisida berlangsung. Stabilitas gugus fungsi dan kerangka katalis sangat penting untuk menjaga efektivitas fotokatalitik

dan memungkinkan penggunaan katalis secara berulang^[23]. Selain itu, tidak adanya perubahan spektrum yang berarti juga menunjukkan bahwa produk degradasi pestisida tidak menimbulkan residu yang menempel secara permanen pada permukaan katalis sehingga katalis mempertahankan performa dan kemurniannya. Dengan demikian, $\text{TiO}_2/\text{zeolit}$ memiliki potensi yang kuat sebagai katalis stabil dan efektif dalam aplikasi degradasi pestisida secara fotokatalitik.



Gambar 11. Spektrum FTIR katalis $\text{TiO}_2/\text{zeolit}$ sebelum dan setelah degradasi

3.7. Karakterisasi Katalis $\text{TiO}_2/\text{Zeolit}$ Sebelum dan Setelah Degradasi dengan UV Menggunakan XRD



Gambar 12. Pola XRD katalis $\text{TiO}_2/\text{zeolit}$ sebelum dan setelah degradasi

Analisis XRD pada $\text{TiO}_2/\text{zeolit}$ dilakukan untuk menganalisis jenis zeolit, impregnasi TiO_2 , dan membandingkan puncak difraksi $\text{TiO}_2/\text{zeolit}$ sebelum dan setelah degradasi. Gambar 12 menunjukkan pola difraksi $\text{TiO}_2/\text{zeolit}$ sebelum dan setelah degradasi. Pola

difraksi TiO₂/zeolit dibandingkan dengan pola difraksi standar zeolit jenis klinoptilolit (ICSD #87847) dan TiO₂ anatase (ICSD #154601). Pola difraksi XRD menunjukkan adanya kesesuaian antara TiO₂/zeolit dengan puncak difraksi klinoptilolit yang menandakan bahwa zeolit yang digunakan pada penelitian ini berjenis klinoptilolit. Lebih lanjut, impregnasi TiO₂ berhasil dilakukan pada zeolit yang ditandai munculnya puncak difraksi TiO₂ pada TiO₂/zeolit. Pada difraktogram XRD setelah degradasi tetap menunjukkan puncak TiO₂ dengan jelas, sementara puncak yang berkaitan dengan zeolit tidak mengalami perubahan yang signifikan yang menandakan bahwa struktur zeolit tetap stabil dan berpotensi digunakan secara berulang.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai degradasi pestisida klorpirifos menggunakan fotokatalis TiO₂/zeolit, dapat disimpulkan bahwa proses fotodegradasi ini berlangsung efektif dan efisien pada kondisi optimum. Kurva kalibrasi menunjukkan hubungan linear antara konsentrasi dan absorbansi klorpirifos dengan persamaan regresi $y = 0,0159x + 0,0099$ dan nilai R² sebesar 0,9988. Konsentrasi awal klorpirifos dalam sampel adalah 43,15 mg/L. Degradasi klorpirifos tanpa katalis menunjukkan efisiensi yang sangat terbatas dengan degradasi hanya mencapai 7,14%. Penggunaan TiO₂ saja memperlihatkan degradasi 72,88%, sedangkan zeolit saja hanya menghasilkan degradasi 30,17%. Peningkatan efisiensi degradasi juga terlihat ketika TiO₂/zeolit digunakan tanpa UV dengan degradasi mencapai 44,45%. Ketika katalis TiO₂/zeolit digunakan, efisiensi degradasi meningkat secara signifikan mencapai 98,82% dengan lampu UV, sinergi antara fotokatalisis TiO₂ dan adsorpsi zeolit. Hasil dari persen degradasi menunjukkan dibawah batas maksimum standar menurut SNI 7313: 2008 yaitu sebesar 0,51 mg/L. Analisis sampel menggunakan FTIR menunjukkan degradasi berhasil mengurangi kadar senyawa klorpirifos, terlihat dari penurunan intensitas puncak karakteristik. Karakterisasi FTIR dan XRD menunjukkan bahwa TiO₂/zeolit tetap stabil setelah digunakan dan berpotensi untuk digunakan secara berulang. Degradasi mengikuti model kinetika orde 1, di mana laju reaksi berbanding lurus dengan konsentrasi klorpirifos yang tersisa. Secara keseluruhan, kombinasi TiO₂ dan zeolit efektif menurunkan residu klorpirifos pada buncis dengan lampu UV meningkatkan efisiensi degradasi.

Ucapan Terima Kasih

Terimakasih penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah membantu memberikan bimbingan, kritik, beserta saran sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini.

Kontribusi Penulis

Konseptualisasi: Z.Z

Kurasi Data: Z.Z, R.K.B

Analisis Formal: R.K.B, Z.Z, T.P.W

Investigasi: Z.Z, R.K.B

Metodologi: Z.Z, T.P.W

Supervisi: Z.Z, R.K.B

Penulisan – draf asli: Z.Z, R.K.B

Penulisan – peninjauan & penyuntingan: Z.Z.

Konflik Kepentingan

Tidak ada konflik kepentingan dalam pengerjaan dan penulisan manuskrip.

Daftar Pustaka

- [1] J. Perry, J. Cotton, M.. Rahman, S. Brumby, Organophosphate Exposure and the Chronic Effects on Farmers: A Narrative Review, *Rural. Remote Heal.* 20 (2020) 4508.
<https://doi.org/10.22605/RRH4508>.
- [2] S.A. Maggio, P.K. Janney, J.J. Jenkins, Neurotoxicity of chlorpyrifos and chlorpyrifos-oxon to *Daphnia magna*, *Chemosphere.* 276 (2021).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130120>.
- [3] H.U. ur Rahman, W. Asghar, W. Nazir, M.A. Sandhu, A. Ahmed, N. Khalid, A comprehensive review on chlorpyrifos toxicity with special reference to endocrine disruption: Evidence of mechanisms, exposures and mitigation strategies, *Sci. Total Environ.* 755 (2021).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142649>.
- [4] N.K. Nandi, A. Vyas, M.J. Akhtar, B. Kumar, The growing concern of chlorpyrifos exposures on human and environmental health, *Pestic. Biochem. Physiol.* 185 (2022).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2022.105138>.
- [5] M. Lasagna, M. Mardirosian, D. Zappia, L. Enriquez, N. Miret, L. Dahir, E. Zotta, A. Randi, M. Núñez, C. Cocca, Chlorpyrifos induces lung metastases and modulation of cancer stem cell

- markers in triple negative breast cancer model, *Toxicology*. 511 (2025).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tox.2025.154059>.
- [6] R. Kurti, T. Tasić, V. Milanković, V.J. Aničijević, L. Rakočević, Selective Removal of Chlorpyrifos from Contaminated Water Using Young Walnut-Derived Carbon Material as a Sustainable Adsorbent, *Processes*. 13 (2025) 1–20.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/pr13103357>.
- [7] S. Rastegarzadeh, F. Hashemi, A surface plasmon resonance sensing method for determining captopril based on in situ formation of silver nanoparticles using ascorbic acid, *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* 122 (2014) 536–541.
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2013.11.074>.
- [8] F. Pellegrino, L. Pellutì, F. Sordello, C. Minero, E. Ortel, V.-D.H.V. Maurino, Influence of agglomeration and aggregation on the photocatalytic activity of TiO₂ nanoparticles, *Appl. Catal. B Environ.* 216 (2017) 80–87.
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.05.046>.
- [9] Z. Zilfa, S. Safni, F. Rahmi, Penggunaan ZnO/zeolit sebagai katalis dalam degradasi tartrazin secara ozonolisis, *J. Ris. Kim.* 12 (2021) 53–64.
<https://doi.org/10.25077/jrk.v12i1.387>.
- [10] Zilfa, Rahmayeni, D.V. Wellia, Y. Yusuf, P.J. Ardica, S. Zahara, M.H. Reza, Penggunaan TiO₂/Zeolit untuk Mengurangi Konsetrasi Nitrat, Nitrit, Amoniak, Fosfat, Bod, Cod, Dan pH Air Limbah Pertanian Secara Fotolisis, *J. Katalisator*. 7 (2022) 277–297.
<https://doi.org/http://doi.org/10.22216/jk.v5i2.5717>
- [11] Zilfa, Y. Yusuf, S.N. Fadhilah, R. Zein, DEGRADASI FENOL MENGGUNAKAN TiO₂/ZEOLIT SECARA FOTOLISIS DAN APLIKASINYA PADA AIR LIMBAH KARET, *J. Res. Educ. Chem.* 6 (2024) 18.
[https://doi.org/10.25299/jrec.2024.vol6\(1\).17258](https://doi.org/10.25299/jrec.2024.vol6(1).17258).
- [12] Y. Yusuf, W. Rahmi, Pemanfaatan TiO₂/Zeolit Alam Sebagai Pendegradasi Pestisida (Permetrin) Secara Ozonolisis, *Pros. Semirata FMIPA Univ. Lampung*. (2013) 477–482.
- [13] T. Lesnussa, N. Hattu, Y.H. Dulanlebit, ANALISIS KADAR KALSIMUM (Ca) DAN FOSFOR (P) PADA DAUN KECIPUR (Psophocarpus tetragonolobus L) DI PULAU AMBON DAN SERAM BAGIAN BARAT, *Molluca J. Chem. Educ.* 9 (2019) 46–54.
<https://doi.org/10.30598/mjocevol9iss1pp46-54>.
- [14] A. Fadaei, M. Kargar, Photocatalytic degradation of chlorpyrifos in water using titanium dioxide and zinc oxide, *Fresenius Environ. Bull.* 22 (2013) 2442–2447.
- [15] Z. Aufa, Pemanfaatan CuO/Zeolit untuk degradasi air gambut menggunakan metode ozonolisis dan pengaruh terhadap kadar besi, nitrat, nitrit, COD, BOD, dan TSS, *Andalas*, 2024.
- [16] M.N. Chong, B. Jin, C.W.K. Chow, C. Saint, Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review, *Water Res.* 44 (2010) 2997–3027.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.039>.
- [17] X. Hao, G. Wang, S. Chen, H. Yu, X. Quan, Enhanced activation of peroxydisulfate by CNT-TiO₂ under UV-light assistance for efficient degradation of organic pollutants, *Front. Environ. Sci. Eng.* 13 (2019) 1–11.
<https://doi.org/10.1007/s11783-019-1161-0>.
- [18] Y. Guo, B. Zu, Zeolite-based Photocatalysts: A Promising Strategy for Efficient Photocatalysis, *J. Thermodyn. Catal.* 4 (2012).
<https://doi.org/10.4172/2157-7544.1000e120>.
- [19] M.S. Ummah, Degradation processes of organic compounds over UV-irradiated TiO₂. Effect of ozone, *Sustain.* 11 (2019) 1–14.
- [20] C. De Smedt, F. Ferrer, K. Leus, P. Spanoghe, Removal of pesticides from aqueous solutions by adsorption on zeolites as solid adsorbents, *Adsorpt. Sci. Technol.* 33 (2015) 457–485.
<https://doi.org/10.1260/0263-6174.33.5.457>.
- [21] H. Faghihian, A. Bahrani, Application of TiO₂-zeolite as photocatalyst for photodegradation of some organic pollutants, *Iran. J. Catal.* 1 (2011) 45–50.
- [22] S. Boudiaf, N. Nasrallah, M. Mellal, B. Belhamdi, C. Belabed, M.A. Djilali, M. Trari, Kinetic studies of Congo Red Photodegradation on the hetero-system CoAl₂O₄/ZnO with a stirred reactor under solar light, *J. Environ. Chem. Eng.* 9 (2021) 105572.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105572>.
- [23] Z. Zilfa, Y. Yusuf, A.S. Putri, Penanggulangan Limbah Ubi Kayu dengan Menggunakan Katalis TiO₂/Zeolit Alam Clinoptilolit-Ca secara Sinergi Fotokatalis dan Adsorpsi, *J. Kim. Unand.* 13 (2024) 14–21.
<https://doi.org/10.25077/jku.13.1.14-21.2024>.