

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia dikenal sebagai negara agraris yang mengandalkan sektor pertanian. Petani melakukan penyuburan tanaman dan penghilangan hama untuk meningkatkan hasil pertanian dengan cara pemberian pupuk. Pemberian pupuk yang berlebihan juga menimbulkan masalah. Penggunaan pupuk N, P, dan K meningkat seiring dengan perluasan lahan pertanian. Kelebihan pemberian pupuk N, baik dalam bentuk anorganik seperti urea maupun dari bahan organik seperti kotoran hewan, akan meningkatkan kandungan amoniak. Amoniak tersebut kemudian mengalami proses nitrifikasi menghasilkan nitrit dan nitrat, sehingga menyebabkan air mengandung senyawa anorganik berbahaya. Pemberian pupuk fosfor (P) secara berlebihan juga dapat meningkatkan kandungan fosfat yang mencemari lingkungan. Selain pupuk, pestisida juga menjadi input produksi penting lainnya yang digunakan untuk mengendalikan hama untuk meningkatkan hasil pertanian. Namun, penggunaan pestisida secara tidak terkendali dapat menyebabkan akumulasi residu limbahnya di perairan¹. Fenomena pencemaran ini juga ditemukan pada budidaya komoditas hortikultura, seperti buncis.

Salah satu komoditas pertanian yang banyak dibudidayakan adalah buncis yang memiliki nilai gizi tinggi dan permintaan pasar yang besar, baik untuk konsumsi 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.

Pestisida merupakan salah satu hasil teknologi modern yang mempunyai peranan penting dalam meningkatkan kesejahteraan rakyat. Penggunaan pestisida perlu dikelola sedemikian rupa sehingga manfaatnya dapat dioptimalkan dan efek samping yang membahayakan dapat ditekan sekecil mungkin². Mengingat pestisida merupakan zat yang beracun, penggunaan yang tidak bijaksana akan menimbulkan efek samping bagi kesejahteraan manusia, sumber daya hayati, dan lingkungan. Salah satu cara untuk menanggulangi hal tersebut adalah metode degradasi. Metode degradasi merupakan penguraian senyawa menjadi senyawa sederhana yang tidak berbahaya, seperti CO₂ dan H₂O³. Salah satu metode degradasi dapat dilakukan dengan cara fotolisis. Fotolisis adalah suatu proses transformasi kimia (fotokimia) yang berlangsung dengan bantuan radiasi lampu

UV. Untuk meningkatkan hasil degradasi, dapat digunakan katalis khusus yang disebut fotokatalis dengan prosesnya yang disebut fotokatalisis.

Fotokatalisis adalah gabungan proses fotokimia dan katalis, di mana cahaya berperan sebagai pemicu untuk mempercepat reaksi kimia. Aktivitas fotokatalisis dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti ukuran partikel semikonduktor. Partikel yang lebih kecil cenderung memiliki aktivitas fotokatalitik yang lebih baik karena memfasilitasi transfer muatan ke sisi aktif permukaan semikonduktor dengan lebih cepat⁴. Prinsip semikonduktor dan energi celah pita menjadi dasar fotokatalisis, di mana energi dari cahaya memicu transformasi kimia pada material semikonduktor, mengubah senyawa anorganik dan organik menjadi air dan karbon dioksida⁵.

Fotokatalis yang banyak diteliti salah satunya adalah titanium dioksida (TiO_2). Metode fotokatalisis menggunakan TiO_2 merupakan salah satu cara efektif untuk mengurangi konsentrasi sampel organik. Proses ini menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) sangat reaktif yang dapat memecah polutan menjadi molekul yang lebih kecil dan tidak berbahaya. Kelebihannya meliputi, biaya operasi yang rendah, sifat ramah lingkungan, efisiensi tinggi, harga terjangkau, sifat nontoksik, dan tidak menghasilkan produk pencemar. Namun, penggunaan TiO_2 dalam fotokatalisis memiliki beberapa keterbatasan, seperti laju rekombinasi yang cepat antara pasangan elektron dan lubang yang dihasilkan, panjang gelombang eksitasi yang pendek, rendahnya selektivitas, serta kesulitan dalam pemulihan kembali bahan fotokatalis. Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan kombinasi TiO_2 dengan material lain seperti zeolit⁶.

Zeolit merupakan padatan kristal mikropori yang tersusun secara tetrahedral AlO_4 dan SiO_4 membentuk kerangka struktur. Zeolit mempunyai kemampuan melakukan pertukaran ion (*ion exchange*), adsorpsi (*adsorption*) dan berperan sebagai katalis (*catalyst*). Bentuk kristal zeolit yang teratur dengan rongga yang saling berhubungan ke segala arah menyebabkan luas permukaan zeolit sangat besar sehingga bisa digunakan sebagai adsorben⁷.

Indonesia memiliki deposit zeolit alam cukup besar dengan kemurnian cukup tinggi. Zeolit alam juga sangat ramah lingkungan dan harganya tidak mahal. Sifat-sifat tersebut menunjukkan potensi yang bagus bagi zeolit alam dalam penanganan masalah limbah. Menurut Dinas Pertambangan dan Energi Sumatera Barat, zeolit terdapat di beberapa daerah, salah satunya di daerah Solok. Zeolit yang terbentuk secara alami merupakan mineral aluminosilikat. Rumus umum zeolit adalah $\text{M}_{x/n}(\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}_{2(x+y)}) \cdot z\text{H}_2\text{O}$ dengan M sebagai kation logam bermuatan n. Semua zeolit yang ditemukan di alam selalu mengandung air. Air merupakan molekul polar yang mudah teradsorpsi di permukaan zeolit. Air memiliki ukuran molekul yang kecil sehingga air akan mengisi seluruh saluran dan rongga-rongga dalam kristal zeolit⁸. Zilfa (2011) telah melakukan penelitian tentang zeolit alam yang berasal dari Kabupaten Solok Sumatera Barat. Zeolit alam tersebut merupakan jenis zeolit klinoptilolit.

Zeolit alam Kabupaten Solok ini belum banyak dipelajari dan dimanfaatkan, khususnya untuk fotodegradasi limbah pestisida. Hal ini menjadi peluang untuk mengoptimalkan sumber daya lokal dalam aplikasi teknologi ramah lingkungan².

Berdasarkan uraian di atas, penulis melakukan penelitian mengenai pengaruh penggunaan TiO_2 /zeolit terhadap penurunan kadar residu pestisida klorpirifos secara fotolisis. Analisis dilakukan dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis, serta melakukan karakterisasi pada TiO_2 /zeolit sebelum dan setelah proses degradasi menggunakan FTIR dan XRD. Penelitian ini dilakukan sebagai upaya untuk meningkatkan potensi dan pemanfaatan zeolit alam Indonesia dalam pengolahan limbah pestisida serta penanggulangan pencemaran lingkungan pertanian.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa kadar residu pestisida yang terdapat pada buncis?
2. Bagaimana pengaruh penggunaan katalis TiO_2 /zeolit terhadap degradasi residu pestisida pada buncis?
3. Bagaimana pengaruh penggunaan katalis TiO_2 /zeolit terhadap degradasi residu pestisida pada buncis dengan dan tanpa fotolisis?

1.3 Tujuan Penelitian

Dari rumusan masalah tersebut, maka penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menentukan kadar residu pestisida yang terdapat pada buncis.
2. Menentukan pengaruh penggunaan katalis TiO_2 /zeolit pada degradasi residu pestisida pada buncis.
3. Menentukan pengaruh penggunaan katalis TiO_2 /zeolit pada degradasi residu pestisida pada buncis dengan dan tanpa fotolisis.

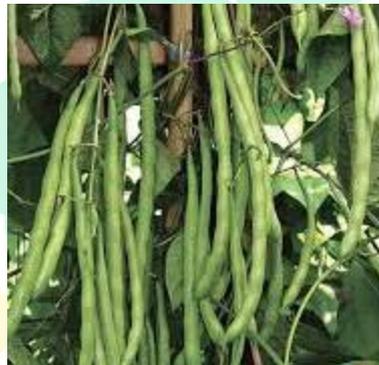
1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bermanfaat untuk mengetahui metode degradasi limbah residu pestisida klorpirifos pada buncis menggunakan katalis TiO_2 /zeolit, baik dengan maupun tanpa proses fotolisis dan diharapkan dapat menjadi solusi dalam mengatasi pencemaran lingkungan akibat residu pestisida serta mendukung upaya pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan di masyarakat, khususnya dalam bidang pertanian yang ramah lingkungan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Buncis

Buncis termasuk ke dalam keluarga tanaman legume atau kacang-kacangan yang digemari masyarakat karena mengandung nutrisi penting untuk kesehatan, seperti sumber protein tumbuhan, vitamin A, B, dan C, karbohidrat dalam jumlah banyak, serta serat tinggi. Buncis memiliki potensi untuk dikembangkan karena adanya peluang pasar yang baik. Kebutuhan buncis di Indonesia setiap tahunnya terus meningkat, hal ini disebabkan oleh pertumbuhan jumlah penduduk. Produksi buncis mengalami perubahan selama beberapa tahun dari tahun 2015 hingga 2021. Buncis (*Phaseolus vulgaris L.*) adalah salah satu sayuran yang bermanfaat bagi kesehatan, sehingga banyak dikonsumsi oleh masyarakat Indonesia. Setiap 100 gram buncis mengandung 2,4 gram protein, 0,2 gram lemak, 7,7 gram karbohidrat, 0,80 mg vitamin A, dan 19 mg vitamin C. Tanaman buncis tumbuh sebagai tanaman semak atau perdu, dengan bentuk merambat yang bisa mencapai tinggi sekitar 2 meter⁹.



Gambar 2.1 Buncis

2.2 Pestisida

2.2.1 Definisi dan Klasifikasi Pestisida

Pestisida adalah hasil dari teknologi modern yang penting untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat. Pestisida dapat digunakan untuk mencegah serangan hama pada buah-buahan dan sayuran. Namun, penggunaannya harus dikelola dengan baik agar manfaatnya maksimal dan dampak negatifnya seminimal mungkin. Pestisida bersifat beracun sehingga penggunaan yang tidak tepat bisa merusak kesehatan manusia, lingkungan, dan sumber daya alam¹⁰.

Pestisida yang digunakan dalam pertanian biasanya dibagi ke dalam beberapa jenis berdasarkan organisme yang ditargetkan. Pestisida ini antara lain berupa insektisida untuk mengusir serangga, fungisida untuk mencegah jamur, herbisida untuk mengendalikan gulma, nematosida untuk melawan nematoda, rodentisida untuk mengusir tikus, molusida untuk mengatasi siput, dan virusida untuk menyerang virus. Dilihat dari sifat kimianya, pestisida dibagi menjadi dua kategori yaitu pestisida anorganik dan organik. Pestisida anorganik seperti Na-arsenat, tembaga arsenat basa, timbal arsenat, sulfur, bubuk *bordeaux*, dan senyawa Hg-organik sering digunakan sebagai insektisida dan fungisida. Sedangkan sebagai herbisida, contohnya adalah ferisulfat, ammonium sulfamat, boraks, dan K-sianat. Kebanyakan pestisida

Residu klorpirifos yang ada di produk pertanian bisa berdampak buruk pada kesehatan jika dikonsumsi dalam jumlah yang terlalu banyak atau terus-menerus. Dampak tersebut bisa menyebabkan gangguan pada sistem saraf pusat, seperti merasa bingung, susah tidur, sedih, atau kesulitan berbicara. Selain itu, jika residu ini menumpuk dalam lemak tubuh, bisa mengganggu fungsi organ dan meningkatkan risiko terkena kanker. Maka dari itu, penting untuk memproses bahan makanan secara tepat sebelum dikonsumsi¹³.

2.2.3 Dampak Pestisida terhadap Lingkungan

Penggunaan pestisida dalam pertanian membantu meningkatkan produksi pangan secara signifikan, tetapi dampak buruknya terhadap lingkungan juga terasa. Salah satu dampak besar adalah polusi tanah dan air. Pestisida yang digunakan bisa meresap ke dalam tanah, mengganggu bakteri dan jamur kecil yang penting untuk menjaga kesuburan tanah. Selain itu, pestisida bisa merusak struktur tanah, membuat tanah lebih rentan erosi dan kurang mampu menahan air¹⁴. Pestisida bisa membuat air tercemar melalui aliran di permukaan dan perkolasi ke air tanah, sehingga berbahaya bagi kesehatan manusia serta tumbuhan dan hewan di perairan. Di dalam ekosistem air, pestisida yang terbawa aliran bisa beracun bagi ikan dan makhluk hidup lain yang bukan target, menyebabkan penurunan jumlah spesies dan mengacaukan keseimbangan ekosistem¹⁵.

Dampak terhadap keanekaragaman hayati juga menjadi masalah yang serius. Pestisida tidak hanya membunuh hama yang menjadi target, tetapi juga organisme yang berguna seperti serangga penyerbuk, burung, dan hewan liar lainnya. Ini bisa menyebabkan penurunan jumlah spesies penting dan mengganggu rantai makanan. Selain itu, penggunaan pestisida terlalu banyak bisa membuat hama tidak peka lagi, sehingga perlu dosis yang lebih besar atau jenis pestisida baru yang pada akhirnya membuat tekanan terhadap lingkungan semakin berat¹⁴.

Untuk mengurangi dampak negatifnya, diperlukan cara mengatasi hama yang lengkap, dengan fokus pada metode alami dan biologis. Penggunaan bahan kimia harus dibatasi hanya jika benar-benar perlu. Selain itu, memberi pengetahuan kepada petani tentang cara menggunakan pestisida secara bijak dan ramah lingkungan juga sangat penting untuk menjaga keseimbangan lingkungan dan keadaan lingkungan secara keseluruhan¹⁵.

2.2.4 Metode Degradasi Pestisida

Pengolahan limbah pestisida secara tradisional menggunakan karbon aktif, lumpur, atau *sludge* lalu dibakar, tetapi cara ini kurang efektif karena struktur molekul dalam limbah mengandung satu atau lebih cincin benzen. Proses pembakaran *sludge* menghasilkan senyawa kloro oksida dan karbon dioksida yang bisa menciptakan racun baru. Untuk mendeteksi sisa pestisida dalam sayuran, metode HPLC telah digunakan¹⁶.

Alternatif lain untuk mengatasi limbah pestisida yang telah diteliti melalui proses degradasi sonolisis, dan hasilnya mencapai 70%. Namun, metode ini tidak cocok digunakan di lahan pertanian, melainkan hanya bisa diterapkan pada limbah pabrik yang menggunakan

pestisida. Sementara itu, untuk mengatasi limbah pertanian, diperkirakan ada metode lain yang bisa digunakan, yaitu metode fotolisis. Fotolisis adalah bagian dari proses oksidasi lanjut (*Advanced Oxidation Process, AOPs*). Selain itu, fotokatalisis adalah proses yang memerlukan cahaya dan bahan katalis. Dengan cahaya ultraviolet, sebagian besar polutan organik dapat diubah menjadi CO_2 dan H_2O ¹⁷.

2.2.5 Faktor yang Memengaruhi Efisiensi Degradasi

Degradasi pada material komposit TiO_2 /zeolit dipengaruhi oleh berbagai faktor baik dari dalam maupun luar yang bekerja bersama-sama dalam menentukan seberapa efektif fotokatalitiknya. Dari sisi dalam, struktur kristal dan ukuran partikel TiO_2 merupakan hal yang penting. Fase anatase dikenal lebih aktif secara fotokatalitik dibandingkan jenis lainnya, dan ukuran partikel yang kecil dapat meningkatkan luas permukaan, sehingga mempercepat proses penguraian polutan. Selain itu, luas permukaan spesifik dari komposit TiO_2 /zeolit juga membantu penyerapan molekul polutan, yang memperkuat proses penguraian. Sifat asam atau basa di permukaan juga berpengaruh terhadap efektivitasnya, karena keberadaan situs asam atau basa dapat meningkatkan interaksi permukaan dengan polutan tertentu. Konsentrasi serta bagaimana TiO_2 didistribusikan dalam matriks zeolit juga perlu diperhatikan, karena jika terjadi penggumpalan partikel, aktivitas permukaan dan efektivitas fotokatalitik bisa berkurang. Metode pembuatan dan kondisi pengaktifan, seperti pemberian zat dan pemanasan, juga berdampak pada struktur dan karakteristik permukaan katalis¹⁸.

Sementara itu, faktor di luar seperti jenis dan tingkat cahaya memengaruhi kemampuan TiO_2 dalam menyerap energi dan menghasilkan radikal bebas yang aktif. Cahaya ultraviolet biasanya lebih efektif dan pH larutan juga sangat penting karena memengaruhi muatan permukaan katalis dan bentuk ion zat pencemar, yang selanjutnya menentukan kemampuan menyerap dan efisiensi proses penguraian. Selain itu, durasi penyinaran memengaruhi jumlah radikal yang terbentuk serta lamanya reaksi berlangsung. Jika waktu terlalu singkat, proses degradasi tidak akan tuntas, sedangkan waktu terlalu lama bisa menyebabkan pembentukan produk samping yang tidak diinginkan¹⁹.

2.3 Fotolisis dan Fotokatalisis

2.3.1 Pengertian Fotolisis

Fotolisis adalah proses yang memerlukan cahaya ultraviolet dengan panjang gelombang (λ) kecil yaitu 405 nm. Metode ini dianggap efektif dan efisien karena dapat digunakan di lapangan karena cahaya ultraviolet bisa diperoleh dari sinar matahari. Saat permukaan katalis TiO_2 disinari, permukaan tersebut menjadi tidak menyerap air atau hidrofobik, tetapi juga memiliki sifat hidrofilisitas yang membantu menguraikan zat organik menjadi karbon dioksida dan air¹⁰.

2.3.2 Prinsip Dasar Fotokatalisis

Fotokatalisis adalah cara mempercepat reaksi kimia dengan menggunakan sinar matahari dan bantuan bahan yang disebut fotokatalis. Titanium dioksida (TiO_2) adalah salah satu jenis

fotokatalis berupa bahan semikonduktor yang sering diteliti karena memiliki ketahanan tinggi, harga murah, dan tidak beracun²⁰.

Prinsip dasar fotokatalisis adalah penyerapan foton oleh bahan semikonduktor, contohnya TiO_2 yang menyebabkan elektron berpindah dari pita valensi ke pita konduksi. Proses ini meninggalkan lubang di pita valensi. Elektron dan lubang yang dihasilkan dapat terlibat dalam reaksi reduksi dan oksidasi, di mana elektron di pita konduksi mengurangi molekul, sedangkan lubang di pita valensi mengoksidasikan molekul²¹.

Efisiensi proses fotokatalitik sangat dipengaruhi oleh terjadinya gabungan antara elektron dan lubang. Jika gabungan ini terjadi sebelum reaksi kimia berlangsung, maka proses fotokatalisis akan kurang efektif. Karena itu, para peneliti telah mencari berbagai cara untuk memisahkan elektron dan lubang secara lebih baik serta mengurangi kecepatan gabungannya, seperti dengan menambahkan unsur logam atau non-logam, serta merancang struktur material yang lebih baik. Dalam dunia nyata, TiO_2 digunakan dalam berbagai bidang, seperti menghancurkan polutan organik, memproduksi hidrogen dari air, serta membersihkan udara. Kelebihan TiO_2 adalah sifat kimianya yang stabil, daya tahan terhadap kerusakan, serta tersedia melimpah di alam²².

2.3.3 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Proses Fotokatalisis

Proses fotokatalisis bisa dipengaruhi oleh beberapa faktor yang memengaruhi bagaimana efisien dan baiknya reaksi berjalan. Faktor utama yang perlu diperhatikan adalah pH larutan. Perubahan pH bisa mengubah muatan permukaan bahan fotokatalis seperti TiO_2 yang selanjutnya memengaruhi kemampuan menempelnya molekul yang ingin dihilangkan dan kinetika reaksi fotokatalitik²³.

Konsentrasi awal polutan juga berperan penting, konsentrasi yang terlalu tinggi dapat menyebabkan saturasi pada permukaan fotokatalis, sehingga menurunkan efisiensi degradasi. Selain itu, intensitas dan panjang gelombang cahaya yang digunakan dalam proses fotokatalisis menentukan jumlah foton yang tersedia untuk eksitasi elektron, sehingga memengaruhi kinetika reaksi²⁴.

Parameter lain yang memengaruhi proses ini adalah bentuk dan ukuran partikel fotokatalis. Partikel yang lebih kecil memiliki permukaan yang lebih luas sehingga memberikan area lebih besar untuk terjadinya reaksi yang akhirnya meningkatkan efisiensi fotokatalitik. Selain itu, penambahan bahan seperti hidrogen peroksida juga dapat mempercepat proses degradasi karena menghasilkan spesies reaktif tambahan yang membantu dalam reaksi fotokatalisis²³.

2.4 Titanium Dioksida (TiO_2)

2.4.1 Struktur dan Sifat TiO_2

Titanium dioksida (TiO_2) adalah bahan semikonduktor yang memiliki struktur elektronik dengan pita valensi yang penuh dan pita konduksi yang kosong. Pita valensi dan pita konduksi terpisah

oleh energi celah (*band gap energy*) sebesar 3,2 eV untuk fase anatase dan 3,0 eV untuk fase rutil. TiO₂ dalam bentuk anatase memiliki aktivitas yang lebih baik dibandingkan bentuk rutil. Anatase juga memiliki luas permukaan lebih besar dan ukuran lebih kecil dibanding rutil. Bentuk kristal anatase yang teramati dalam penelitian terjadi ketika TiO₂ berbentuk serbuk dipanaskan mulai dari suhu 120°C hingga mencapai bentuk anatase sempurna pada suhu 500°C. Setelah itu, pada suhu 700°C mulai terbentuk kristal rutil, sehingga terjadi penurunan luas permukaan dan penurunan tajam aktivitas fotokatalis²⁵.

2.4.2 Titanium Dioksida (TiO₂) sebagai Fotokatalis

Fotokatalisis adalah proses degradasi suatu senyawa dengan menggunakan bantuan cahaya. Saat suatu zat disinari cahaya, zat tersebut menyerap energi dari foton, sehingga terjadi reaksi kimia²⁶. Energi foton tersebut akan memengaruhi air dalam sampel dan menghasilkan radikal OH. Radikal OH kemudian menyerang bagian aktif dari zat tersebut, menyebabkan zat itu terurai. Dalam proses ini diharapkan zat akan berubah menjadi senyawa sederhana, yaitu CO₂ dan H₂O. Proses fotolisis ini memecah zat organik menjadi senyawa yang lebih sederhana dengan bantuan foton. Reaksi ini bisa dipercepat dengan menambahkan katalis salah satunya TiO₂²⁷.

Proses fotokatalisis adalah teknologi yang memanfaatkan katalis aktif saat terkena sinar matahari. Titanium dioksida (TiO₂) adalah salah satu bahan fotokatalis yang paling stabil dan sering digunakan dalam penelitian lingkungan. Penggunaan TiO₂ dalam proses fotokatalisis telah terbukti efektif dalam berbagai bidang, seperti membersihkan air dan udara, membunuh mikroorganisme, menguraikan zat warna serta senyawa kimia beracun, serta menghasilkan gas hidrogen dan oksigen. TiO₂ banyak digunakan sebagai fotokatalis karena memiliki sifat *inert*, stabil pada suhu tinggi, tidak beracun, tahan terhadap panas, dan memiliki aktivitas katalitik yang cukup baik. Aktivitas fotokatalitik dari TiO₂ bisa ditingkatkan dengan mengubah struktur, luas permukaan, dan ukuran partikel melalui penambahan ion dopan. TiO₂ memiliki lebar *band gap* sekitar 3,2 hingga 3,8 eV. Besarnya lebar *band gap* ini memengaruhi proses eksitasi elektron dari pita valensi menuju ke pita konduksi²⁵.

Untuk mendapatkan hasil dekomposisi yang lebih baik dalam proses fotolisis, ditambahkan TiO₂-anatase sebagai katalis yang telah terbukti mampu mempercepat penguraian senyawa organik. TiO₂-anatase adalah bahan yang sering digunakan karena memiliki sifat khusus, yaitu tidak larut dalam air, tahan lama, dan tahan terhadap gesekan^{28,29}. Kinerja katalitik TiO₂-anatase sangat tergantung pada struktur kristal, ukuran partikel, luas permukaan, dan tingkat porositasnya³⁰.

2.5 Struktur dan Sifat Zeolit

Zeolit merupakan mineral kristal alumina silika tetrahidrat berpori yang mempunyai struktur kerangka tiga dimensi. Struktur ini terbentuk dari tetrahedral [SiO₄]⁴⁻ dan [AlO₄]⁵⁻ yang saling terhubung melalui atom oksigen, membentuk kerangka tiga dimensi dengan ruang-ruang

dalamnya. Ruang-ruang tersebut biasanya diisi oleh ion logam, seperti alkali atau alkali tanah, serta molekul air yang bisa bergerak bebas. Karena struktur ini, zeolit bisa digunakan sebagai bahan penyerap, penukar ion, dan katalis. Zeolit alam memiliki muatan negatif pada struktur kerangkanya, yang memengaruhi kemampuannya sebagai penyerap. Untuk meningkatkan kinerjanya sebagai penyerap, zeolit alam bisa dimodifikasi dengan surfaktan kationik.

Struktur zeolit memiliki ion aluminium yang cukup kecil sehingga dapat ditempatkan di tengah bentuk tetrahedral yang terdiri dari empat atom oksigen. Perubahan isomorfik di mana ion silikon (Si^{4+}) digantikan oleh ion aluminium (Al^{3+}) menyebabkan munculnya muatan negatif dalam struktur kisi zeolit. Muatan negatif ini kemudian ditetrifikasi oleh ion kation, seperti natrium, kalium, atau kalsium. Ion-ion ini bisa digantikan oleh ion logam berat, seperti timbal, kadmium, seng, dan mangan³¹. Fakta bahwa ion kation yang digunakan dalam proses pertukaran ini umumnya tidak berbahaya, seperti natrium, kalsium, dan kalium, membuat zeolit sangat cocok digunakan untuk menyerap ion logam berat yang berbahaya dari limbah industri. Salah satu penggunaan awal zeolit alami adalah untuk memurnikan logam³².

2.5.1 Peran Zeolit dalam Meningkatkan Efisiensi TiO_2

Zeolit memberikan dukungan yang baik untuk katalis TiO_2 karena memiliki pori dan saluran yang teratur serta kemampuan menyerap yang baik. Zeolit memiliki struktur kristal tiga dimensi yang kaku, mirip dengan sarang lebah, terdiri dari jaringan saluran dan ruang yang saling terhubung. Dengan demikian, TiO_2 yang didukung oleh zeolit memiliki luas permukaan yang besar dan sifat transparan, yang membantu meningkatkan penyerapan dan difusi polutan secara merata menuju TiO_2 , sehingga proses degradasinya lebih efisien³³.

2.5.2 Modifikasi TiO_2 dengan Zeolit

TiO_2 digunakan karena sifatnya tidak bereaksi dengan bahan lain, energi celahnya kecil, dan tahan lama. Aktivitas fotokatalitik TiO_2 bisa ditingkatkan dengan cara mengembangkannya ke bahan pendukung seperti zeolit sehingga terbentuk $\text{TiO}_2/\text{zeolit}$ ³⁴. Proses pengembangan TiO_2 dengan zeolit bertujuan untuk memperluas permukaan TiO_2 dan dalam proses ini terjadi secara bersamaan proses degradasi dan penyerapan. Zeolit adalah senyawa yang memiliki rongga beraturan dan luas permukaan yang besar. Zeolit bisa digunakan sebagai bahan penyerap dan sebagai pendukung katalis³⁵.

2.5.3 Mekanisme Degradasi Pestisida dengan $\text{TiO}_2/\text{Zeolit}$

TiO_2 berfungsi sebagai bahan oksidator sedangkan zeolit membantu memperluas permukaan senyawa tersebut³⁶. Mekanisme degradasi pestisida dengan $\text{TiO}_2/\text{Zeolit}$ dimulai dari tahap adsorpsi oleh zeolit, kemudian dilanjutkan dengan fotokatalisis oleh TiO_2 . Awalnya, molekul pestisida (terutama yang hidrofobik atau bermuatan positif) teradsorpsi kuat ke dalam pori-pori dan permukaan zeolit yang luas dan bermuatan negatif, melalui gaya *Van Der Waals* atau interaksi elektrostatik. Proses ini memekatkan pestisida di dekat partikel TiO_2 yang terdispersi pada zeolit. Ketika komposit disinari cahaya UV ($\lambda < 388 \text{ nm}$), foton dengan energi cukup akan

terekstasi oleh TiO_2 , menyebabkan elektron (e^-) melompat dari pita valensi ke pita konduksi dan meninggalkan lubang positif (h^+) di pita valensi. Lubang h^+ yang sangat oksidatif ini dapat langsung mengoksidasi pestisida yang teradsorpsi atau bereaksi dengan air (H_2O)/ion hidroksida (OH^-) menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$). Sementara itu, elektron e^- di pita konduksi mereduksi oksigen terlarut (O_2) membentuk radikal superoksida ($\bullet\text{O}_2^-$) kemudian, bereaksi membentuk hidrogen peroksida (H_2O_2) dan akhirnya radikal $\bullet\text{OH}$ tambahan. Spesies oksidatif kuat terutama radikal $\bullet\text{OH}$ (juga h^+ , $\bullet\text{O}_2^-$, H_2O_2) secara agresif menyerang molekul pestisida yang teradsorpsi, menyebabkan reaksi pemutusan rantai seperti dehalogenasi, dealkilasi, oksidasi gugus fungsional, dan hidroksilasi. Serangan berulang ini mengurai pestisida kompleks secara bertahap menjadi produk antara yang lebih sederhana, hingga akhirnya termineralkan menjadi senyawa anorganik tak berbahaya, seperti CO_2 , H_2O , dan asam mineral. Produk degradasi yang lebih kecil dan polar lalu terdesorpsi dari permukaan katalis, sementara zeolit yang telah kosong siap mengadsorpsi pestisida baru dan TiO_2 terus aktif berfotokatalisis, menyempurnakan siklus degradasi³⁷.

2.6 Spektrofotometer UV-Vis

Dalam spektrofotometer UV-Vis, cahaya yang digunakan memiliki panjang gelombang antara 200 hingga 800 nm, yang dibagi menjadi dua bagian, yaitu sinar *ultraviolet* (200–400 nm) dan cahaya tampak (400–800 nm). Jenis radiasi elektromagnetik ini memiliki energi sekitar 1,8 hingga 40 eV. Energi ini cukup besar untuk memicu elektron di kulit terluar molekul agar berpindah ke tingkat energi yang lebih tinggi. Saat cahaya UV-Vis berinteraksi dengan senyawa organik, hal ini memungkinkan identifikasi struktur molekul melalui perubahan energi elektron, terutama elektron yang berikatan (π) dan tidak berikatan (n). Ketika cahaya menyentuh molekul, elektron tersebut menyerap energi dan berpindah dari keadaan dasar ke keadaan tereksitasi. Proses ini menghasilkan spektrum serapan yang menunjukkan hubungan antara panjang gelombang dan tingkat penyerapan yang tergantung pada jenis elektron yang ada dalam molekul. Semakin mudah elektron tereksitasi, semakin panjang gelombang yang diserap, dan semakin tinggi absorbansi yang dihasilkan³⁸.

2.7 *Fourier Transform Infrared* (FTIR)

Fourier Transform Infrared (FTIR) adalah metode analisis yang digunakan untuk mengenali gugus fungsi dalam berbagai jenis sampel, seperti gas, cair, atau padat dengan menggunakan radiasi inframerah. Teknik ini bekerja berdasarkan cara interaksi antara radiasi inframerah dan bahan. Ketika radiasi inframerah diberikan, sebagian energinya diserap oleh sampel dan sebagian lagi diteruskan ke alat detektor. Energi yang diserap tergantung pada getaran ikatan-ikatan kimia dalam molekul, yang menghasilkan pola spektrum dalam bentuk persentase transmisi atau absorpsi terhadap bilangan gelombang (cm^{-1}). Setiap gugus fungsi memiliki pola serapan yang berbeda, sehingga memungkinkan pengenalan struktur molekul secara

spesifik, termasuk informasi mengenai perubahan struktur, interaksi kimia, serta adanya ikatan hidrogen dalam suatu sistem³⁹.

Daerah inframerah dalam spektrum elektromagnetik mencakup bilangan gelombang antara 14.000 hingga 10 cm⁻¹, dan dibagi menjadi tiga wilayah utama yaitu IR dekat (14.000–4.000 cm⁻¹) yang sensitif terhadap vibrasi *overtone*, IR sedang (4.000–400 cm⁻¹) yang paling umum digunakan untuk analisis senyawa organik karena memberikan informasi terkait transisi energi vibrasi dan gugus fungsi dalam molekul, serta IR jauh (400–10 cm⁻¹), yang digunakan untuk menganalisis senyawa dengan atom berat seperti senyawa anorganik, namun membutuhkan teknik khusus dalam pengukurannya⁴⁰.

2.8 X-Ray Diffraction (XRD)

X-Ray Diffraction (XRD) adalah metode analisis yang digunakan untuk mengetahui struktur kristal pada suatu bahan, baik secara kualitatif maupun kuantitatif, dengan menggunakan sinar-X. Teknik ini bisa memberikan informasi mengenai jenis fase kristal, ukuran kristal, arah susunan kristal, serta adanya kecacatan dalam struktur kristal atau susunan atom di dalamnya. XRD sangat berguna untuk menganalisis bahan anorganik, terutama yang berbentuk polikristalin atau amorf, baik berupa benda padat maupun serbuk⁴¹.

Prinsip dasar dari XRD adalah fenomena difraksi, yaitu hamburan elastis sinar-X oleh atom-atom dalam kisi kristal yang teratur secara periodik. Difraksi terjadi ketika gelombang sinar-X mengalami interferensi konstruktif, yang terjadi pada kondisi tertentu sesuai dengan persamaan Bragg:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

λ adalah panjang gelombang sinar-X, d adalah jarak antara bidang-bidang kristal, θ adalah sudut datang sinar terhadap bidang kristal, dan n adalah orde difraksi yang merupakan bilangan bulat positif. Persamaan ini digunakan untuk menentukan struktur kristal dengan menganalisis pola difraksi yang dihasilkan. Sinar-X yang memiliki panjang gelombang tetap diarahkan ke permukaan kristal, dan akan memantul hanya pada sudut tertentu, yang bergantung pada bentuk dan pola pengulangan struktur material tersebut⁴².

Ketika sinar-X menyentuh sampel, sebagian besar sinar tersebut terpantul oleh elektron-elektron yang mengelilingi inti atom. Gelombang-gelombang yang terpantul ini kemudian saling bertemu dan berinteraksi. Jika interaksi tersebut bersifat saling memperkuat, maka akan muncul pola difraksi yang bisa dideteksi dan dianalisis. Pola difraksi ini bergantung pada cara atom-atom tersebut tersusun dan tingkat keteraturannya dalam struktur kristal. Semakin rapat jarak antar bidang kisi (artinya semakin teratur), semakin besar sudut difraksi yang terbentuk, dan sebaliknya. Karena atom-atom dalam material kristalin tersusun secara teratur, data XRD dari material tersebut lebih mudah diartikan dibandingkan dengan material amorf yang tidak memiliki struktur teratur⁴². XRD menghasilkan data berupa sudut 2θ , tingkat kekuatan puncak difraksi, serta nilai konstanta kisi. Analisis kualitatif digunakan untuk mengetahui jenis fase dan

struktur kristal, sedangkan analisis kuantitatif memberikan informasi mengenai komposisi fase, perbandingan relatif antar fasa, dan ukuran butir kristalit⁴³.

