

DEGRADASI PEWARNA SINTESIS MENGGUNAKAN FOTOKATALIS BERBASIS TiO_2

DEGRADATION OF SYNTHETIC DYE USING TiO_2 -BASED PHOTOCATALYST

Fahrizal Adnan*, Rahmahtriananda Faradilla

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mulawarman University
Jl. Sambaliung No. 9, Gunung Kelua, Samarinda, Indonesia

*email : fahrizaladnan@ft.unmul.ac.id

(Received: 2024 06, 22; Reviewed: 2024 06, 24; Accepted: 2024 06, 24)

Abstrak

Penelitian yang dilakukan meliputi sintesis TiO_2 menggunakan metode Sol-Gel dan studi fotokatalis Reaksi degradasi metil jingga (MJ) dan metil biru (MB) oleh fotokatalis diuji menggunakan larutan konsentrasi 5 ppm. Pengambilan sampel dilakukan setiap 30 menit selama 5 jam. Deteksi sampel menggunakan spektrofotometri UV-VIS dengan panjang gelombang sepanjang 464 nm. Hasil fotolisis zat warna metil jingga masing-masing sebesar 14,17% dan 12,62% untuk UVA dan UVC. Sedangkan degradasi menggunakan UVC/ TiO_2 dan UVA/ TiO_2 masing-masing sebesar 58,49% dan 65,55%. Variasi pH dan konsentrasi MO juga dilakukan. Hasil optimum pada pH 7 sebesar 37,08% dan 27,33% masing-masing sebesar 10 ppm dan 15 ppm. Fotokatalis TiO_2 /UVC digunakan untuk mendegradasi variasi konsentrasi MB. Sejumlah 0,5, 0,75 dan 1 gr TiO_2 yang dikontakkan dengan 500 ml MB. Variasi konsentrasi MB yaitu, 5 ppm, 10 ppm, dan 15 ppm dipelajari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa degradasi metilen biru pada dosis 5 ppm berturut-turut sebesar 53,36%, 42,99% dan 18,85% untuk 0,5, 0,75 dan 1 gr TiO_2 .

Kata Kunci: fotokatalis, sintesis, TiO_2

Abstract

The research carried out included TiO_2 synthesis using the Sol-Gel method and photocatalyst studies. The degradation reaction of methyl orange (MJ) and methyl blue (MB) by photocatalyst was tested using a solution of 5 ppm concentration. Sampling was carried out every 30 minutes for 5 hours. Sample was detected using UV-VIS spectrophotometry with a wavelength of 464 nm. The photolysis results of methyl orange dye were 14.17% and 12.62% for UVA and UVC, respectively. Meanwhile, degradation using UVC/ TiO_2 and UVA/ TiO_2 was 58.49% and 65.55% respectively. Variations in pH and MO concentration were also carried out. The optimum results at pH 7 were 37.08% and 27.33%, respectively 10 ppm and 15 ppm. TiO_2 /UVC photocatalyst was used to degrade various concentrations of MB. A total of 0.5, 0.75 and 1 g of TiO_2 were contacted with 500 ml of MB. Variations in MB concentration, namely, 5 ppm, 10 ppm, and 15 ppm were studied. The results showed that the degradation of methylene blue at a dose of 5 ppm was 53.36%, 42.99% and 18.85% for 0.5, 0.75 and 1 g TiO_2 , respectively.

Keywords: photocatalyst, synthesis, TiO_2

1. PENDAHULUAN

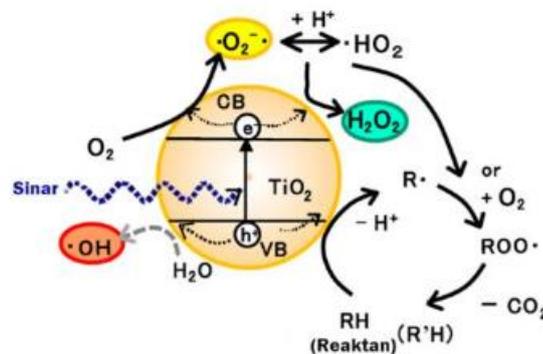
Industri tekstil selama ini menggunakan pewarna sintetis seperti pewarna azo yang tidak dapat terbiodegradasi. Pewarna azo sulit atau membutuhkan waktu lebih lama untuk terurai. Pewarna azo yang banyak digunakan seperti metil biru (MB) dan metil jingga (MJ). Senyawa azo digambarkan

sebagai bahan karsinogenik dan mutagenik (Christina, 2007). Oleh karena itu, kebutuhan dekolorisasi pewarna azo semakin mendapat pertimbangan untuk meningkatkan perlindungan lingkungan.

Pengolahan yang efektif perlu dilakukan untuk meminimalkan limbah pewarna sebelum dibuang ke perairan karena dampaknya terhadap lingkungan. Cara-cara yang selama ini diterapkan seperti secara kimia menggunakan koagulan yang akan menghasilkan lumpur, secara fisik misalnya sedimentasi dan adsorpsi, serta secara biologis seringkali kurang efektif karena zat warna mempunyai sifat tahan terhadap degradasi biologis. Cara ini dinilai menimbulkan masalah baru bagi lingkungan. Salah satu metode tersebut adalah fotodegradasi dengan menggunakan fotokatalis semikonduktor dan sinar ultraviolet (Widihati, 2011).

Fotokatalis secara umum didefinisikan sebagai proses reaksi kimia yang dibantu oleh cahaya dan katalis padat. Cahaya akan membentuk elektron dan hole (e^- dan h^+). Elektron akan bereaksi dengan oksigen pada permukaan katalis dan membentuk radikal superoksida (O_2^\bullet), kemudian lubang-lubang tersebut akan bereaksi dengan air pada permukaan katalis dan membentuk radikal hidroksil (OH^\bullet). Radikal hidroksil berenergi tinggi akan menguraikan polutan organik menjadi zat berbahaya lainnya (Dini, 2014). Metode fotokatalis dapat dilakukan dengan menggunakan katalis berupa semikonduktor seperti TiO_2 , ZnO , CdS dan Fe_2O_3 . Semikonduktor titanium dioksida (TiO_2) banyak digunakan sebagai fotokatalis, karena bersifat inert secara kimia dan biologis, tidak beracun, stabil terhadap korosi, terjangkau, dan melimpah di alam. TiO_2 dapat menghasilkan radikal dengan penerangan UV dengan panjang gelombang tertentu. UV berperan sebagai sumber energi untuk reaksi elektron/lubang. Peneliti sebelumnya menemukan bahwa pembentukan radikal dapat terjadi pada panjang gelombang tertentu akibat fase kristal TiO_2 .

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh fotokatalisis dengan berbagai konsentrasi TiO_2 dalam mendegradasi berbagai konsentrasi senyawa sintetik metil biri dan metil jingga. Cara ini juga diharapkan dapat diterapkan dan dikembangkan demi kemajuan industri tekstil dalam mengolah limbah cair di Indonesia.



Gambar 1.1 Skema fotokatalis TiO_2

2. METODOLOGI PENELITIAN

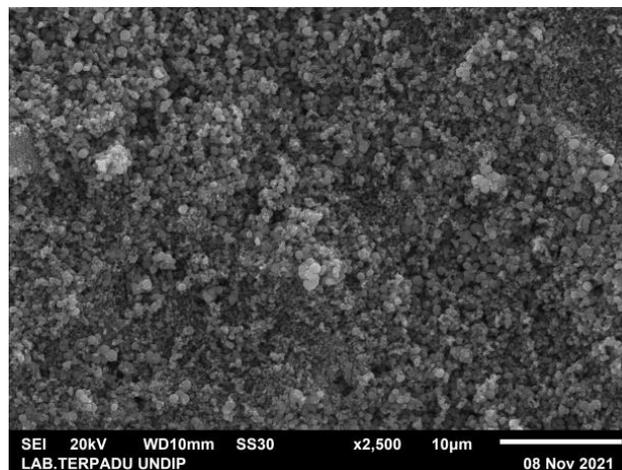
Penelitian ini menggunakan metode fotokatalitik, yaitu menggunakan katalis semikonduktor berupa TiO_2 untuk mendegradasi senyawa organik metil biru (MB) dan metil jingga (MJ). TiO_2 yang akan digunakan akan diperoleh dari sintesis TiO_2 menggunakan metode sol-gel. Dalam penelitian ini pH larutan adalah netral. Air suling digunakan dalam semua percobaan.

Satu set fotoreaktor berukuran panjang 45 cm x lebar 40 cm x tinggi 40 cm dan lampu UVC 254 nm yang dilengkapi daya 8 watt digunakan untuk proses degradasi MB. Uji nilai serapan akan dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis dengan panjang gelombang optimum MB (665 nm).

2.1 Sintesis TiO_2

Sintesis TiO_2 dilakukan dengan metode Sol-Gel dengan perbandingan 3:1:4 antara etanol, titanium oksida, dan akuades. Proses sol gel dibagi menjadi empat tahap yaitu hidrolisis, kondensasi,

penuaan, dan pengeringan. Sintesis TiO₂ dimulai dengan mencampurkan 100 ml etanol dengan 100 ml ti-butoksida. Kemudian ditambahkan etanol sebanyak 200 ml sehingga total larutan prekursor sebanyak 400 ml. Pada tahap hidrolisis, diambil 100 ml larutan prekursor dan akan dihidrolisis dengan menambahkan 100 ml air suling ke dalam buret sambil larutan diaduk menggunakan pengaduk magnet dan akan membentuk sol. Selanjutnya larutan akan melalui tahap kondensasi, dimana molekul-molekul yang telah mengalami kondensasi akan saling berikatan sehingga menghasilkan molekul gel yang mempunyai massa jenis besar dan menghasilkan kristal oksida logam. Tahap penuaan dengan memasukkan gelas kimia yang berisi larutan yang telah dibentuk ke dalam lemari es selama 24 jam. Selanjutnya padatan putih dan cairan yang terbentuk dipisahkan, selanjutnya padatan putih dan cairan yang terbentuk dipisahkan, dan padatan putih tersebut dipindahkan ke dalam cawan porselen untuk dimasukkan ke dalam oven. Proses pengeringan berlangsung selama 4 jam dalam oven bersuhu 105°C. Setelah itu, padatan putih tersebut dihancurkan menggunakan lesung dan alu hingga halus dan dipindahkan ke krusibel untuk dikalsinasi menggunakan tanur bersuhu 250°C selama ± 2 jam. TiO₂ yang terbentuk akan digunakan pada penelitian ini dengan berbagai dosis TiO₂ sebanyak 0,5 gram, 1 gram, dan 0,75 gram.



Gambar 2.1 Hasil Citra SEM TiO₂

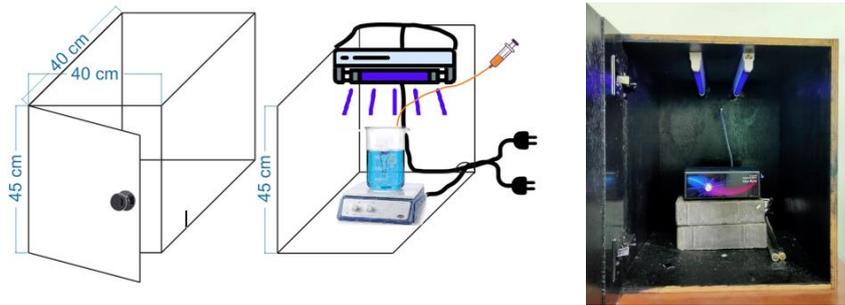
2.2 Uji Aktivitas Fotokatalitik

Tiga dari gelas kimia 500 mL diisi dengan masing-masing 500 mL MB dan MJ 5 ppm. Kemudian ditambahkan TiO₂ sebanyak 0,5 gram, 0,75 gram, dan 1 gram ke dalam masing-masing gelas kimia dilanjutkan dengan penyinaran UV selama 5 jam di dalam fotoreaktor. Sampel 5 ml dikumpulkan setiap 30 menit untuk analisis lebih lanjut. Sebelum dilakukan pengukuran konsentrasi zat warna, sisa TiO₂ pada sampel dipisahkan menggunakan sentrifugasi. Proses fotokatalitik ini diulang sebanyak tiga kali.

Konsentrasi pewarna ditentukan dari kurva standar menggunakan nilai serapan yang diukur dengan spektrofotometer UV-visibel, yang disesuaikan pada 665 nm (panjang gelombang sesuai dengan serapan maksimum MB). Efisiensi proses dievaluasi berdasarkan persentase degradasi, yang dihitung menggunakan persamaan,

$$\% \text{ Degradasi warna} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \dots \dots \dots (1)$$

dimana C₀ dan C_t masing-masing adalah konsentrasi awal dan konsentrasi zat warna pada waktu t.

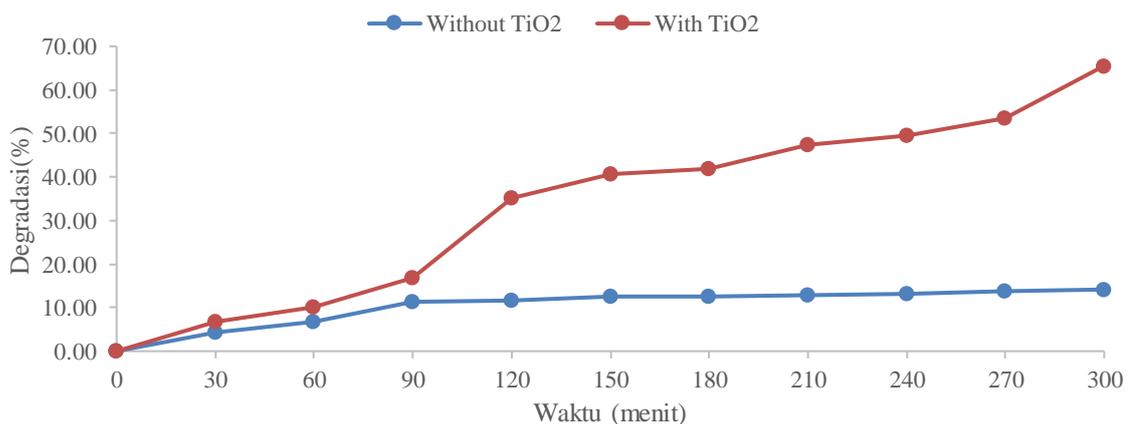


Gambar 2.2 Desain reaktor uji fotokatalitik

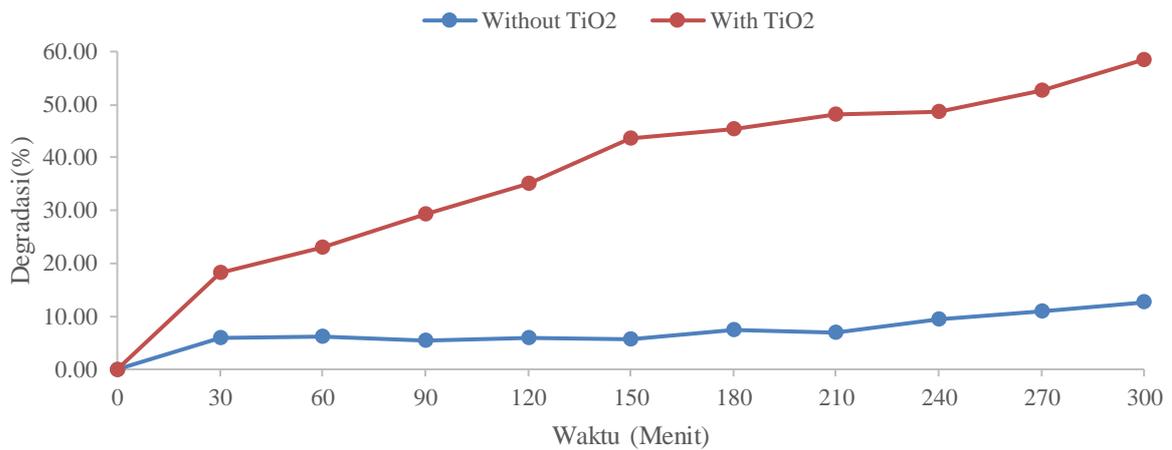
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengaruh UVA, UVC, UVA/TiO₂ dan UVC/TiO₂

Analisis perbandingan antara reaksi yang terjadi antara penggunaan UVA, UVC, UVA/TiO₂ dan UVC/TiO₂ dipelajari untuk degradasi senyawa metil jingga 5 ppm dalam larutan pH 7 selama 300 menit selama proses fotolisis. Perbandingan persentase degradasi metil jingga antara sinar UVA tanpa sinar UVA/TiO₂ dan sinar UVA dengan 0,5 gTiO₂ dan persentase degradasi MJ antara sinar UVC tanpa penambahanTiO₂ dan sinar UVC dengan penambahan 0,5 g TiO₂. Hasil menunjukkan bahwa penggunaanTiO₂ sebagai katalis pada proses fotolisis sangat berpengaruh dalam menurunkan kadar MJ dalam larutan. Pada percobaan fotolisis UVA tanpa TiO₂, hanya mampu mendegradasi metil jingga sebesar 14,17%, sedangkan bila 0,5 g MJ TiO₂ ditambahkan, kemampuan degradasi meningkat menjadi 65,55% selama 300 menit. Hal serupa juga terjadi pada percobaan menggunakan sinar UVC. Dimana percobaan dilakukan tanpa penambahanTiO₂ hanya mampu mendegradasi metil jingga sebesar 12,63% sedangkan penambahan 0,5 g TiO₂ mampu meningkatkan reaksi fotolisis hingga 58,49% dalam waktu 300 menit. Pada sinar UVA dengan penambahan TiO₂, degradasi yang terjadi jauh lebih tinggi dibandingkan reaksi fotokatalis UVC dengan TiO₂. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Forseca-Cervantes (2020) mengenai efek band gap untuk TiO₂ fotokatalis, ditemukan bahwa TiO₂ dalam bentuk anatase lebih cocok dan mampu bereaksi lebih baik terhadap cahaya dengan panjang gelombang sekitar 380 nm. TiO₂ mampu bereaksi lebih baik membentuk senyawa radikal hidroksil pada sinar UVA dimana sinar UVA sendiri memiliki panjang gelombang berkisar antara 315 – 400 nm.



Gambar 3.1 Persentase Degradasi Metil Jingga terhadap UVA dan UVA/TiO₂

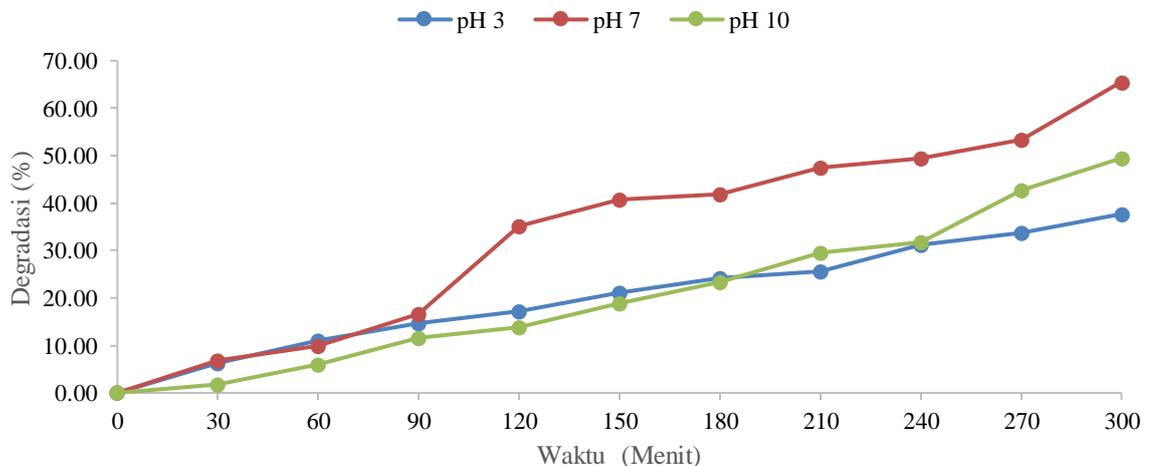


Gambar 3.2 Persentase Degradasi Metil Jingga terhadap UVC dan UVC/TiO₂

Dalam reaksi dari TiO₂ dengan gelombang cahaya, telah terjadi perubahan senyawa OH⁻ di menjadi senyawa radikal dimana senyawa radikal tersebut akan mendegradasi senyawa organik jingga metil dalam larutan. Oleh karena itu, titanium dioksida (TiO₂) merupakan katalis yang dapat mempercepat reaksi degradasi MJ pada proses fotolisis.

3.2 Pengaruh pH

Analisis perbandingan efektivitas yang terjadi antara penggunaan variasi pH yaitu pada kadar asam, netral, dan basa terhadap kemampuannya dalam mendegradasi senyawa jingga metil dalam larutan selama 300 menit selama proses fotokatalis.



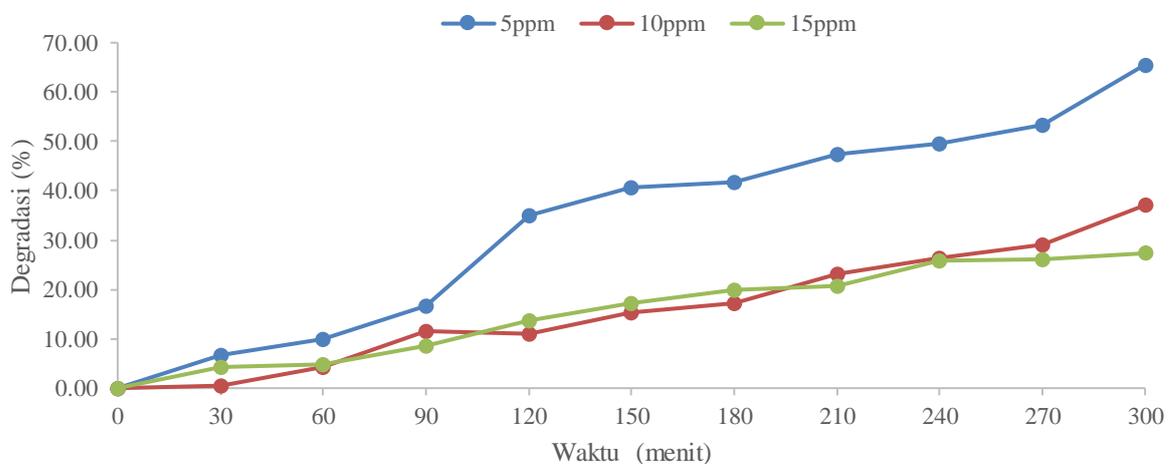
Gambar 3.3 Persentase Degradasi Metil Jeruk terhadap pH 3, 7 dan 10

Perbandingan persentase degradasi MJ antara larutan jingga metil pH 3, pH 7, dan pH 10 dilakukan dengan menggunakan konsentrasi MJ 5 ppm. TiO₂ yang kemudian direaksikan dalam kotak hitam berisi cahaya UVA. Grafik persentase degradasi jingga metil pada pH 3, 7, dan 10 dapat dilihat melalui gambar 4. Terlihat bahwa penggunaan pH 7 pada larutan jingga metil mempunyai kemampuan mendegradasi senyawa organik lebih besar dibandingkan pH 3 dan pH 10. Diketahui bahwa pada larutan pH 3 reaksi fotokatalis hanya terjadi mampu mendegradasi metil jingga sebesar 37,70 % dan pada larutan pH 10 reaksi fotokatalis mampu mendegradasi metil jingga sebesar 49,47%. Sedangkan pada pH 7 mampu meningkatkan degradasi metil jingga sebesar 65,55%.

Berdasarkan Bilal (2019), penggunaan pelarut dan prekursor dalam pembentukan TiO_2 mempengaruhi pembentukan TiO_2 dimana hal tersebut akan mempengaruhi ukuran partikel, luas permukaan partikel, dan pH optimum reaksi fotokatalis yang terjadi pada larutan metil jingga. Pada penelitian ini pH optimum fotokatalis jingga metil pada suatu larutan mempunyai pH 7. Hal ini menunjukkan bahwa pH 7 pada larutan dapat membantu TiO_2 dalam membentuk senyawa hidroksilnya sehingga mampu mendegradasi senyawa jingga metil lebih baik dibandingkan dengan senyawa hidroksil yang terbentuk ketika TiO_2 pada larutan pH 3 dan pH 10.

3.3 Pengaruh Konsentrasi MJ

Dengan penyinaran UVA dengan penambahan TiO_2 , degradasi yang terjadi jauh lebih tinggi dibandingkan reaksi fotokatalis UVC dengan TiO_2 . Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Forseca-Cervantes (2020) mengenai efek band gap untuk TiO_2 fotokatalis, ditemukan bahwa TiO_2 dalam bentuk anatase lebih cocok dan mampu bereaksi lebih baik terhadap cahaya dengan panjang gelombang sekitar 380 nm. TiO_2 bereaksi lebih baik membentuk senyawa radikal hidroksil pada sinar UVA dimana sinar UVA sendiri memiliki panjang gelombang berkisar antara 315 – 400 nm.



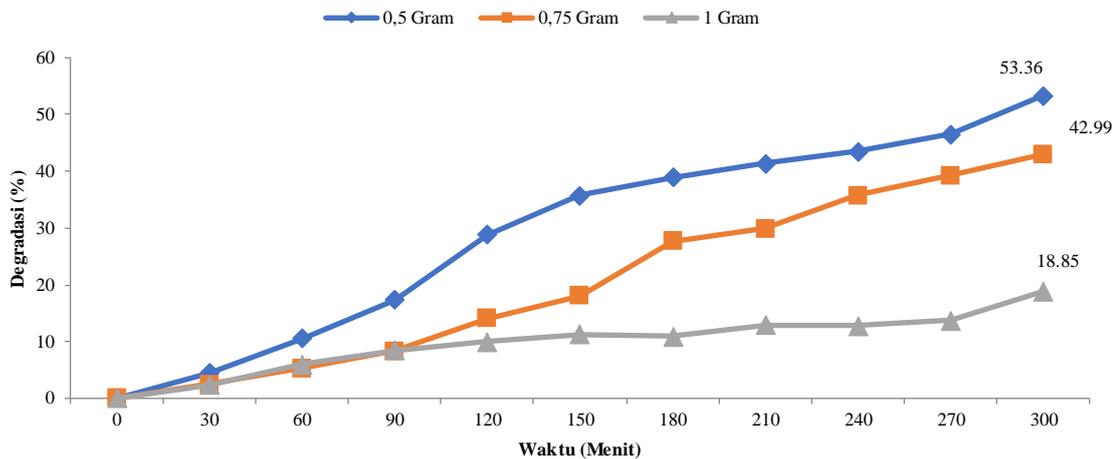
Gambar 3.4 Degradasi MO pH 7 dengan konsentrasi 5, 10, dan 15 ppm oleh UVA/ TiO_2

Analisis perbandingan antara variasi konsentrasi metil jingga pada 5, 10, dan 15 ppm dilakukan untuk mengetahui efektivitas penggunaan 0,5 g yang dapat mendegradasi larutan MJ pada pH 7 dengan bantuan sinar UVA. Perbandingan efektivitas variasi konsentrasi MJ ini dapat dilihat pada gambar 5. Perbandingan persentase degradasi MJ dengan variasi konsentrasi, terlihat bahwa 0,5 g TiO_2 fotokatalis di bawah sinar UVA dan tingkat keasaman pH 7 mampu mendegradasi dengan baik pada MJ konsentrasi 5 ppm hingga 65,55%. Jika dibandingkan dengan variasi konsentrasi 10 ppm dimana persentase tingkat degradasi hanya 37,08% dan 27,33% pada variasi konsentrasi 15 ppm, maka UVA/ TiO_2 fotokatalis paling efisien dalam mendegradasi 5 ppm metil jingga. Berdasarkan Yuningrat (2015), TiO_2 mengandung senyawa radikal yang dapat mendegradasi senyawa organik. Senyawa radikal yang terbentuk dan kemampuan serapannya sebesar 0,5 g TiO_2 cenderung sama, sehingga dapat dikatakan semakin kecil konsentrasi MJ maka persentase degradasinya semakin tinggi.

3.4 Pengaruh Dosis TiO_2

Kajian pengaruh dosis TiO_2 terhadap penyisihan MB secara fotodegradasi ditunjukkan pada Gambar 3.5. Berdasarkan grafik, penurunan intensitas warna metilen biru dipengaruhi oleh dosis katalis yang digunakan yaitu TiO_2 . Hasil persentase degradasi terbaik ditunjukkan pada larutan metilen biru dengan penambahan dosis TiO_2 0,5 gram dengan persentase penyisihan sebesar 53,36%. Pada variasi dosis TiO_2 0,75 gram dan 1 gram terjadi penurunan aktivitas katalis. Dosis katalis dapat mempengaruhi efisiensi degradasi senyawa organik. Semakin banyak jumlah katalis yang digunakan maka semakin banyak pula radikal hidroksil yang dapat terbentuk. Namun jika jumlah katalis yang

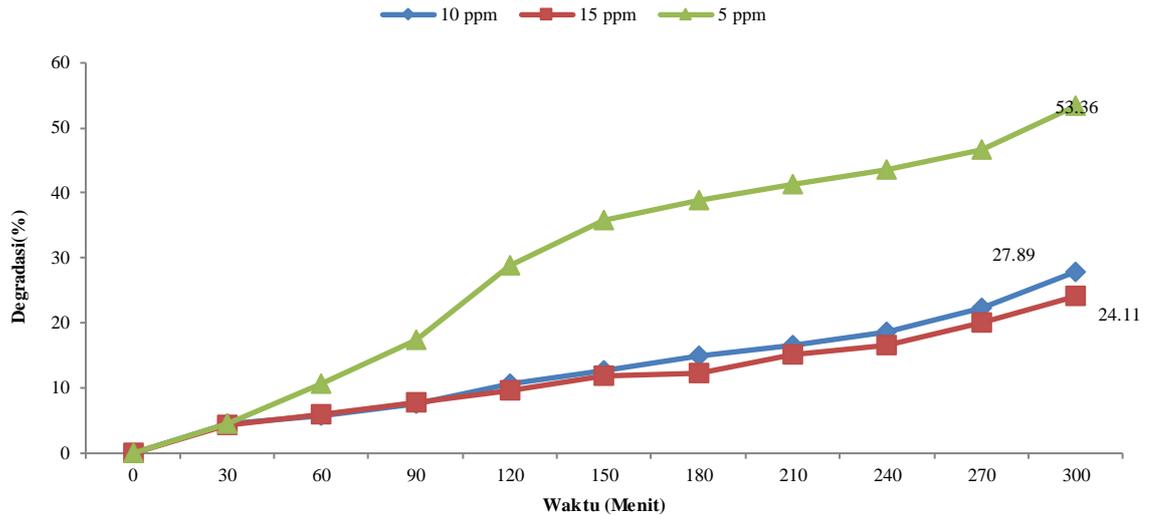
ditambahkan terlalu banyak maka akan menurunkan efisiensi proses fotokatalitik itu sendiri. Hal ini dapat terjadi karena kelebihan katalis dalam larutan akan mengakibatkan penumpukan katalis dan dapat meningkatkan kekeruhan larutan. Kehadiran bahan katalis berlebih bertindak sebagai penghalang radiasi UV. Ketika intensitas cahaya yang masuk ke dalam larutan berkurang akibat meningkatnya tingkat kekeruhan larutan, maka katalis TiO_2 akan menyerap energi lebih sedikit. Jika energi yang diserap berkurang maka eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi juga akan berkurang, sehingga radikal hidroksil yang terbentuk juga tidak optimal dan dapat menurunkan persentase degradasi yang dihasilkan.



Gambar 3.5 Penyisihan MB terhadap konsentrasi TiO_2

3.5 Pengaruh Konsentrasi Metilen Biru

Berdasarkan gambar 3.6, nilai serapan semakin menurun seiring bertambahnya intensitas larutan. Persentase penyisihan degradasi yang ditunjukkan pada variasi konsentrasi larutan MB 5 ppm adalah sebesar 53,36%. Untuk variasi konsentrasi larutan MB 10 ppm persentase degradasinya terlihat mengalami penurunan yaitu sebesar 27,89%, dan untuk larutan MB dengan konsentrasi tertinggi yaitu 15 ppm mempunyai persentase penyisihan terendah yaitu sebesar 24,11%. Penurunan persentase degradasi warna yang signifikan diamati dengan peningkatan konsentrasi larutan MB. Hal ini terkait dengan tertutupnya sisi aktif katalis akibat meningkatnya adsorpsi molekul zat warna sehingga terjadi pembentukan radikal hidroksil yang berperan dalam mendegradasi senyawa organik yang tertekan. Kemungkinan lainnya adalah efek penyaringan sinar UV yang meningkat seiring dengan meningkatnya intensitas warna (tinggi). Oleh karena itu, lebih sedikit energi foton yang mencapai situs aktif katalis, dan akan menurunkan jumlah radikal hidroksil. Selain itu, senyawa antara akan terbentuk selama proses degradasi dengan meningkatkan konsentrasi zat warna awal dan dapat mereduksi senyawa radikal aktif yang seharusnya bereaksi dengan zat warna. Akibatnya, efisiensi dekolerasi secara keseluruhan akan berkurang. Semakin tinggi konsentrasi larutan maka akan semakin banyak pula molekul yang terkandung dalam larutan, sehingga dapat menimbulkan persaingan antar molekul metilen biru untuk diadsorpsi oleh permukaan katalis TiO_2 .



Gambar 3.6 Penyisihan MB terhadap Konsentrasi MB

4. KESIMPULAN

Sintesis fotokatalis TiO_2 dilakukan dengan metode Sol-Gel dengan perbandingan 3:1 antara etanol dan titanium butoksida kemudian perbandingan 1:1 antara larutan prekursor dan air DI. Untuk mengetahui reaksi fotolisis jingga metil yang terjadi pada sinar UVA dan UVC diuji menggunakan konsentrasi 5 ppm dalam 500 mL larutan dan pH 7 dimana pengambilan sampel dilakukan setiap 30 menit selama 5 jam. Kemudian diuji menggunakan spektrofotometri UV-VIS dengan panjang gelombang sepanjang 464 nm dan hasil fotolisis zat warna metil jingga sebesar 10,46% pada UVA dan 9,54% pada UVC. Sedangkan degradasi menggunakan sinar UVC dan UVA dengan menambahkan 0,5 g TiO_2 , diperoleh hasil degradasi pada UVC/ TiO_2 sebesar 43,03% dan 50,23% pada UVA/ TiO_2 . Variasi pH 3 dan 10 dilakukan pada 500 mL larutan 5 ppm metil jingga menggunakan 0,5 g TiO_2 di bawah sinar UVA. Hal ini disebabkan penggunaan sinar UVA dan TiO_2 0,5 g mendapatkan proporsi degradasi yang lebih baik dibandingkan variasi cahaya lainnya. Kemudian persentase degradasi sebesar 28,65% pada pH 3 dan 38,97% pada pH 10. Variasi terakhir yang dilakukan adalah variasi konsentrasi jingga metil 10 ppm dan 15 ppm menggunakan sinar UVA dan TiO_2 0,5 g serta pada pH 7. Hal ini dikarenakan pada pH 7 proporsi degradasi terbesar diperoleh. Persentase degradasi sebesar 32,36% pada 10 ppm jingga metil dan 24,92% pada 15 ppm jingga metil. Degradasi senyawa organik MB dilakukan dengan sinar UVC dengan larutan netral (pH=7). Hasil yang diperoleh pada penelitian ini, bahwa dosis TiO_2 optimum dalam mendegradasi 500 ml zat warna MB 5 ppm adalah 0,5 gram. Hasil tersebut menunjukkan bahwa dosis yang berlebihan pada proses fotokatalitik akan menghambat kinerja fotokatalitik. Pada berbagai konsentrasi diperoleh konsentrasi larutan MB optimum pada proses fotokatalisis adalah 5 ppm dengan persentase degradasi sebesar 53,36%. Teknik fotokatalitik lebih baik pada konsentrasi MB yang rendah karena persentase penghilangan menurun seiring dengan meningkatnya konsentrasi pewarna.

DAFTAR PUSTAKA

- Aziztyana, Aprilya Putri. (2019). Optimasi Fotodegradasi Metil Jeruk Menggunakan Fotokatalis TiO_2 -Zeolit dan H_2O_2 Dalam Keadaan Asam. *Ilmu dan Teknik Material*, 546.
- Bilal, Muhammad. (2019). Pengaruh Pelarut terhadap Struktur dan Sifat Nanopartikel Titanium Dioksida serta Aktivitas Antibakterinya. *Artikel Penelitian*, 38(4).
- Castro-Beltran, Andreas. (2017). Pengaruh Rasio Molar Titanium Butoksida pada Ukuran Nanopartikel TiO_2 dan Degradasi Metilen Biru, *Jurnal Internasional untuk Optik Cahaya dan Elektron*, 157, 890 – 894.
- Fonseca-Cervantes. (2020). Efek Celah Pita untuk Fotokatalisis pada Dukungan TiO_2 dengan Menambahkan Emas dan Rutenium. *Jurnal Proses*, 8, 1032.

- Lei, Chin Wei. (2015). Pembentukan Cepat Nanotube Titanat 1D Menggunakan Perlakuan Hidrotermal Alkali dan Kinerja Fotokatalitiknya, *Jurnal Nanomaterial*, 2, 1 – 7.
- Sakar. (2021). Fotokatalis Nanokomposit Hibrida yang Muncul untuk Degradasi Antibiotik: Wawasan tentang Desain dan Mekanismenya, *Nanomaterial Jurnal MDPI*, 11(3).
- Sreekantan, Srimala dan Ibrahim, Siti Aida. (2010). Pengaruh pH Aktif TiO₂ Nanopartikel Melalui Metode Sol Gel, *Penelitian Material Tingkat Lanjut*. 173, 184–189.
- Budiarsa, Wayan. 2015. *Pencemaran Air dan Pengolahan Air Limbah*. Bali: Pers Universitas Udayana.
- Christina, Maria., Mu'Nisatun., Saptaji, Rany., Marjanto, Djoko., 2007, Studi Pendahuluan Mengenai Degradasi Zat Warna Azo (Metil Orange) Dalam Pelarut Air Menggunakan Mesin Berkas Elektron, *Jurnal Forum Nuklir*, 1(1).
- Endar, Bagus. 2020. *Spektrum Sinar Matahari mengandung Desinfektan Alami*, Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Fatimah, Is. (2013). Preparasi Fe³⁺/TiO₂ - Montmorillonit Sebagai Katalis Pada Degradasi Zat Warna Azo, *Jurnal Reaktor*, 14(4).
- Fendri, Sandra. (2018) Fotolisis Senyawa Paracetamol Yang Berpotensi Dalam Penanganan Limbah Obat, *Jurnal Katalisator*, 3 (2).
- Ferry, Vincentius., 2017, *Ozonasi Fotokatalik Untuk Pengolahan Air dan Air Limbah*, Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Irianto, Ketut. 2015. *Buku Bahan Ajar Pencemaran Lingkungan*. Bali: Universitas Marwadewa.
- Kasuma, Sherly. 2016. *Sintesis Anorganik*. Padang: Universitas Negeri Padang Pers.
- Maria. (2012). Sintesis Multiferoik BiFeO₃ Berbasis Pasir Besi dengan Metode Sol Gel. *Jurnal Sains dan Seni*, 1(1).
- Tidak tidak. (2017) Pengaruh Jumlah Triton X100, Suhu dan Waktu Tahan Kalsinasi Terhadap Sintesis Powderzirkonia dan Aplikasinya dalam Mendegradasi Metil Orange. *Jurnal Teknik Kimia*, 23 (2).
- Naimah. Siti. (2015). Keramik Sebagai Media Fotokatalis TiO₂ – Karbon Aktif Serta Aplikasinya Pada Kesehatan Lingkungan, *Jurnal Kimia Kemasan*, 37(2), 123 – 132.
- Perdoski Satgas Covid-19. 2020. *Pengaruh Sinar Ultraviolet Terhadap Kesehatan Kajian Terhadap Berjemur (Paparan Sinar Matahari)*, Perhimpunan Dokter Spesialis Kulit dan Kelamin Indonesia, Jakarta.
- Putri, Lusia Eka. (2017) Penentuan Konsentrasi Senyawa Berwarna KMnO₄ Dengan Metoda Spektroskopi UV Visible, *Natural Science Journal*, 3(1).
- Rizkiani, Ermin. (2018). Fotokatalis Bentonit-Fe₂O₃ Untuk Degradasi Zat Warna Remazol Brilliant Blue, *Jurnal Cakra Kimia*, 7(1).
- Roeslianty, Shafira. 2020. Sintesis Karbon Kuantum Dot (Cqds) Berbahan Dasar Limbah Kulit Lemon Dan Komposit Cqds/TiO₂ Untuk Degradasi Metil Jingga, *Tugas Akhir Teknologi Industri*, Jakarta: Fakultas Universitas Pertamina.
- Setyani dan Wibowo. (2017). Fabrikasi Nanotubes Titanium Dioksida (TiO₂) Menggunakan Metode Hidrotermal, *Jurnal Kimia Valensi*. 3(1).
- Suharti, Tati. 2017. *Dasar-Dasar Spektrofotometri UV-Vis dan Spektrometri Massa Untuk Penentuan Struktur Senyawa Organik*. Bandar Lampung: Penerbit Aura.
- Sulistiyanto., 2015, *Pengolahan Limbah Organik dan Anorganik Menggunakan Kombinasi Fotokatalis TiO₂ dan Senyawa Ethylenediaminetetraacetic Acid (EDTA)*, *Jurnal Metana*, 11(2), 1 - 6.
- Supriyanto, E., Holikin, A., & Suwardiyanto, S. (2014). Pengaruh Thermal Annealing terhadap Struktur Kristal dan Morfologi Bubuk Titanium Dioksida (TiO₂). *Jurnal ILMU DASAR*, 15(1).
- Yuningrat. (2016). Fotodegradasi Methyl Orange Dalam Reaktor Fixed Bed Batu Apung-Semen. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 5(1).
- Abdellah., 2018, *Dekolorisasi Fotokatalitik Metilen Biru menggunakan Sistem TiO₂/UV yang Ditingkatkan dengan Air Sparging*, *Jurnal Teknik Alexandria*, Universitas Alexandria
- Teng Ong., 2012, *Fotodegradasi Pewarna Komersial, Methylene Blue Menggunakan Immobilized TiO₂*, *Teknik Biologi dan Lingkungan IPCBEE vol.4*, Singapura

- Chandra. dkk., 2019, Degradasi Metilen Biru dengan Metode Fotokatalitik berdasarkan Variasi Berat Katalis Zeolit-WO₃, Prosiding Seminar Kimia, [S1], hal. 127-130.
- Dini, Eka Wahyu Putri., 2014, Degradasi Metilen Biru menggunakan Fotokatalis ZnO-Zeolit, Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Brawijaya, Malang.
- Nurlalili., 2017, Pemanfaatan Limbah Cangkang Telur Ayam sebagai Adsorben Zat Warna Methyl Orange dalam Larutan, Jurnal Inovasi Teknik Kimia, Vol. 2, No.2.
- Widihati., 2011, Fotodegradasi Metilen Biru dengan Sinar UV dan Katalis Al₂O₃, Jurusan Kimia FMIPA Universitas Udayana, Bukit Jimbaran, Bali.
- Slamet., 2010, Degradasi Fotokatalisis Limbah Fenol dengan Komposit TiO₂-Precipitated Kalsium Karbonat, Departemen Teknik Kimia, FT-UI, Jakarta
- Andari., 2014, Fotokatalis TiO₂-Zeolit untuk Degradasi Metilen Biru, Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya, Malang.
- Nurzihan, Aris., 2019, Adsorpsi Zat Warna Methylene Blue menggunakan Bentonit Termodifikasi Ethylene Diamine Tetra Aceticacid (EDTA), FMIPAKes UMRi, Vol: 1 / Agustus 2019.
- Firmansyah., 2015, Aplikasi Fotokatalis TiO₂-Zeolit untuk Menurunkan Intensitas Zat Warna Tartrazin Secara Fotokatalitik, Online Jurnal of Natural Science Vol 4(1):10-16, ISSN: 2338-0950