

Fotodegradasi Metilen Biru oleh Metal Organic Framework (MOF) Fe-PTC dengan Penambahan H₂O₂ dan Dioptimasi Menggunakan Desain Box Behnken

Photodegradation of Methylene Blue by Metal-Organic Framework (MOF) Fe-PTC with Addition of H₂O₂ and Optimized Using Box Behnken Design

Muhammad Fathurrahman^{1,2}, Agustino Zulys^{1*}, Jarnuzi Gunlazuardi¹

¹Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia

²Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pakuan, Bogor, Indonesia

*E-mail: zulys@ui.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.26874/jkk.v6i2.228>

Received: 4 Nov 2023, Revised: 18 Jan 2024, Accepted: 18 Jan 2024, Online: 19 Jan 2024

Abstrak

Metilen biru merupakan salah satu zat warna yang sangat sulit terdegradasi dan mengganggu ekosistem perairan. Metal Organic Framework (MOF) merupakan kelompok material yang dapat bertindak sebagai fotokatalis untuk mendegradasi zat warna di bawah cahaya tampak. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis material MOF baru menggunakan logam besi (Fe) dan penghubung organik perylene-3,4,9,10-tetracarboxylate (PTC) melalui metode solvothermal pada suhu 170 °C selama 24 jam, lalu dikarakterisasi menggunakan FTIR, XRD, DRS, dan SEM-EDS, serta aplikasinya dalam menentukan kondisi optimum dari fotodegradasi zat warna metilen biru oleh MOF Fe-PTC dengan penambahan H₂O₂ menggunakan desain box behnken. Indikasi keberhasilan sintesis MOF Fe-PTC ditunjukkan oleh beberapa karakterisasi yaitu (1) spektrum FTIR dengan serapan pada bilangan gelombang 572 cm⁻¹ yang mengidentifikasi keberadaan ikatan antara Fe dan O, (2) uji kelarutan yang menunjukkan material sukar larut dalam pelarut polar, semipolar, dan nonpolar, serta (3) EDS Mapping yang menunjukkan keberadaan unsur Fe dengan persentase bobot sebesar 21,6%. MOF Fe-PTC hasil sintesis memiliki derajat kristalinitas sebesar 46,56% dan rata-rata ukuran kristal sebesar 50,9 nm dengan puncak difraksi tertinggi pada 2θ = 33.16°. Analisis DRS menunjukkan bahwa MOF Fe-PTC mempunyai energi bandgap sebesar 1,93 eV dengan panjang gelombang maksimum (λ_{max}) sebesar 638 nm. Karakterisasi menggunakan SEM menunjukkan bahwa MOF Fe-PTC mempunyai bentuk seperti tabung silinder. Kondisi optimum yang diperoleh dari fotodegradasi metilen biru oleh MOF Fe-PTC dengan penambahan H₂O₂ di bawah iradiasi cahaya tampak sebesar 250 W secara statistik adalah 1,35 mg untuk bobot fotokatalis, 0,22 M untuk konsentrasi H₂O₂, dan 135 menit untuk waktu kontak.

Kata kunci: MOF Fe-PT, H₂O₂, fotodegradasi, metilen biru

Abstract

Metal-organic framework (MOF) is a group of materials that can act as a photocatalyst to degrade dyes under visible light. This research aims to synthesize a new MOF material using iron metal (Fe) and the organic linker perylene-3,4,9,10-tetracarboxylate (PTC) via the solvothermal method, then characterize it using FTIR, XRD, DRS, and SEM-EDS, as well as its application in photodegradation of methylene blue dye by MOF Fe-PTC with the addition of H₂O₂ using a Box Behnken design. FTIR spectrum with absorption at a wave number of 572 cm⁻¹ which identifies the presence of bonds between Fe and O. Solubility tests show that the material was difficult to dissolve in polar, semipolar, and nonpolar solvents. EDS Mapping which shows the presence of the Fe element with a weight percentage of 21.6%. The synthesized MOF Fe-PTC has a degree of crystallinity of 46.56% and an average crystal size of 50.9 nm with the highest diffraction peak at 2θ = 33.16°. DRS analysis shows that the MOF Fe-PTC

has a bandgap energy of 1.93 eV with a maximum wavelength (λ_{max}) of 638 nm. Characterization using SEM shows that the MOF Fe-PTC has a shape like a cylindrical tube. The optimum conditions obtained from photodegradation of methylene blue by MOF Fe-PTC with the addition of H_2O_2 under visible light irradiation of 250 W statistically are 1.35 mg for photocatalyst weight, 0.22 M for H_2O_2 concentration, and 135 minutes for contact time.

Keywords: Fe-PTC MOF, H_2O_2 , photodegradation, methylene blue.

1 Pendahuluan

Pertumbuhan ekonomi dan industri yang begitu cepat, pencemaran lingkungan, serta kekurangan energi menjadi faktor penting yang membatasi pembangunan masyarakat secara berkelanjutan [1]. Salah satu industri yang berkembang begitu pesat adalah industri tekstil yang menggunakan berbagai macam bahan kimia seperti pewarna, garam dan surfaktan dalam setiap prosesnya baik itu *pretreatment*, *printing/dyeing*, serta *finishing* [2]. Industri tekstil menurut Bank Dunia dilaporkan menghasilkan limbah cair sekitar 17-20% [3]. Salah satu jenis polutan yang ada di limbah zat cair tersebut adalah zat warna organik, seperti metilen biru, metil jingga, dan rhodamin B. Limbah zat warna tersebut beracun, sangat sulit terdegradasi, dan mengganggu ekosistem perairan [4]. Jika kita ingin mengatasi masalah tersebut, maka diperlukan suatu metode yang efektif untuk menghilangkan zat warna organik dari limbah tekstil.

Sampai saat ini, terdapat beberapa metode yang dapat dilakukan untuk mengurangi kandungan zat warna dalam limbah industri tekstil, seperti koagulasi, elektrokoagulasi, dan adsorpsi. Penggunaan metode-metode tersebut dapat menimbulkan permasalahan baru yaitu dihasilkannya fasa baru polutan yang lebih terkonsentrasi karena sifatnya yang hanya memindahkan zat warna dari fasa cair ke fasa padat, bukan menguraikan senyawa-senyawa kompleks dari zat warna tersebut [5]. Fotokatalisis merupakan suatu metode alternatif yang menggunakan material semikonduktor untuk melakukan degradasi zat warna dengan menggunakan sinar UV atau *Visible* sebagai sumber energinya. Sampai saat ini pengembangan material semikonduktor sebagai fotokatalis masih terus diteliti.

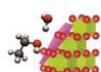
Berbagai macam semikonduktor logam oksida dan sulfida seperti TiO_2 , ZnO , CdS , dan Fe_2O_3 telah digunakan secara luas sebagai fotokatalis untuk mengolah limbah tekstil [6]. Titanium dioksida (TiO_2) meskipun memiliki

stabilitas dan efisiensi yang tinggi serta toksisitas yang rendah namun memiliki energi celah yang tinggi (3,2 eV), sehingga untuk mengaktifkan sifat fotokatalisisnya dibutuhkan energi yang besar seperti sinar *ultra violet* (UV). Sinar UV ini bersifat karsinogenik dan hanya tersedia sebanyak 5% dari sinar matahari. Selain itu jenis fotokatalis ini memiliki porositas yang rendah, kemudian untuk logam sulfida yang memiliki kestabilan dalam air yang rendah akan menghasilkan polutan yang beracun [7].

Kelompok material baru yang merupakan hibrida organik dan anorganik seperti *metal organik frameworks* (MOF) sudah dikembangkan sebagai fotokatalis dan sampai saat ini masih menjadi topik menarik untuk diteliti. Jumlah penghubung organik dan prekursor ion logam yang tersedia saat ini dapat menghasilkan material sampai lebih dari 20.000 MOFs [8]. MOFs merupakan kerangka berpori dengan luas permukaan yang sangat besar dan dapat diatur porositasnya serta stabilitasnya dalam sistem air, asam dan basa membuat material ini sangat berguna terutama dalam pengolahan limbah cair dari industri tekstil [9].

MOF dengan stabilitas yang tinggi dapat diperoleh dengan memilih logam dan penghubung organik yang sesuai. Perylene-3,4,9,10-tetrakarboxilat (PTC) merupakan ligan yang memiliki gugus karboksilat yang merupakan basa keras. Berdasarkan kepada prinsip *Hard Soft Acid Base* (HSAB) dari Pearson, basa keras akan berinteraksi kuat dengan asam keras. Salah satu contoh logam asam keras adalah Fe(III), karena memiliki biloks yang tinggi [6].

Ligan PTC ini pernah digunakan sebagai penghubung organik untuk membangun MOF bersama dengan prekursor logam seperti Sm, Dy, Ni, La, Y, K, Cr, dan Co. MOF Sm-PTC dan Dy-PTC pernah disintesis dan dikarakterisasi [10]. MOF Ni-PTC pernah disintesis untuk aplikasi fotokatalisis produksi hidrogen [11]. MOF La-PTC pernah disintesis untuk aplikasi fotokatalisis degradasi zat warna [9]. MOF Y-PTC pernah



disintesis untuk aplikasi fotokatalitik degradasi metilen biru dan metil jingga [12]. Selain itu, MOF K-PTC juga pernah disintesis untuk lapisan sensor kelembaban [13]. MOF Cr-PTC pernah disintesis untuk fotodegradasi metilen biru [14]. Co(II) pun pernah menjadi prekursor logam dengan PTC namun dalam bentuk anhidridanya (PTCDA) sehingga membentuk material MOF untuk dianalisis sifat fluoresensinya [15]. Sampai saat ini belum ada penelitian tentang sintesis dan karakterisasi MOF berbasis logam Fe(III) dan ligan PTC beserta aplikasinya dalam bidang fotodegradasi.

Sampai saat ini, penelitian menggunakan metode respon permukaan terutama desain Box Behnken untuk mencari kondisi optimum dan hubungan antar variabel dari proses fotokatalisis masih jarang dilakukan. Salah satu contoh penelitian yang menggunakan metode respon permukaan adalah penggunaan *Central Composite Design* (CCD) untuk optimasi parameter proses fotokatalisis degradasi metilen biru menggunakan nanopartikel CdSe sebagai semikonduktor [16]. Aplikasi yang digunakan dalam mendesain rancangan percobaan ini adalah software Minitab versi 19.

Pada penelitian ini dilakukan sintesis material MOF berbasis logam Besi(III) dan PTC sebagai penghubung organik dan fotosensitizer. Sintesis material MOF tersebut dilakukan melalui solvotermal dan dikarakterisasi menggunakan *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR), *X-Ray Diffraction* (XRD), *Diffuse Reflectance Spectroscopy Ultraviolet-Visible* (DRS UV-Vis), *Scanning Electron Microscope - Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (SEM-EDS). Selanjutnya evaluasi fotodegradasi *methylene blue* (MB) akan dilakukan melalui analisis Spektrofotometri UV-Vis. Semua variabel bebas yang mempengaruhi proses fotokatalitik dioptimasi, yaitu bobot fotokatalis, konsentrasi peroksida, dan waktu iradiasi. Konsentrasi peroksida diduga memiliki pengaruh yang paling kuat diantara variabel bebas yang lain karena memegang peran penting dalam menghambat proses rekombinasi elektron dan hole. Hipotesis tersebut perlu dibuktikan menggunakan metode respon permukaan *Box Behnken Design* (BBD). Kelebihan dari metode ini yaitu (1) mendapatkan kondisi optimum dari kombinasi variabel bebas yang digunakan, (2)

mendapatkan besar pengaruh variabel bebas terhadap variabel respon, (3) memiliki jumlah percobaan yang lebih sedikit dibanding CCD sehingga menghemat biaya, bahan, energi, dan waktu.

2 Metode Penelitian

2.1 Bahan dan Alat

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu FeCl₃.6H₂O (Sigma-Aldrich), *Perylene-3,4,9,10-tetracarboxylic dianhydride* (PTCDA) (Sigma-Aldrich), NaOH (Merck), *dimethyl formamide* (DMF) (Merck), etanol (Merck), dan aquades.

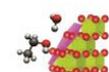
Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi gelas kimia, *hotplate*, neraca analitis, *autoclave stainless*, serta peralatan lain sesuai dengan kebutuhan penelitian. Sedangkan peralatan instrumentasinya adalah *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) Prestidge 21 Shimadzu, *X-Ray Powder Diffraction* (XRD) 7000 Maxima-X, Spektrofotometer UV-Vis Agilent Carry 60, *FESEM Thermo Scientific Quattro S completed with EDS Detector*, dan *Diffuse Reflectance Spectrophotometer* (DRS) Shimadzu UV 2450.

2.2 Preparasi Na-PTC dari PTCDA

PTCDA (0,5 g, 1,27 mmol) dilarutkan dalam 50 ml aquades lalu ditambahkan NaOH (0.379 g, 8.9 mmol) sambil diaduk dengan *magnetic stirrer* pada kecepatan sekitar 300 rpm selama satu jam. Larutan kehijauan yang dihasilkan kemudian disaring. Filtrat yang diperoleh ditambahkan etanol berlebih untuk memperoleh endapan berwarna kuning. Endapan kuning Na-PTC yang dihasilkan kemudian disaring dan dicuci dengan etanol hingga pH netral lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 50 °C selama 3 jam [17]. Serbuk Na-PTC yang diperoleh kemudian dikarakterisasi dengan menggunakan FTIR.

2.3 Sintesis MOF Fe-PTC

Metode sintesis MOF Fe-PTC mengikuti metode sintesis MOF La-PTC dan Ni-PTC [18], serta Y-PTC dan Cr-PTC [14]. FeCl₃.6H₂O dan Na-PTC masing-masing sebanyak 2 mmol dan 1 mmol dicampurkan dalam pelarut DMF 5 mL dan H₂O 25 mL kemudian distirer selama 45 menit pada kecepatan 300 rpm. Campuran tersebut kemudian dipindahkan ke autoklaf baja tahan karat berlapis teflon dan dipanaskan pada suhu



170 °C selama 24 jam. Setelah didinginkan pada suhu ruang, kemudian kristal yang terbentuk dicuci dengan aquades dan DMF, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 70°C selama 24 jam.

2.4 Karakterisasi Material

Tahap karakterisasi material dilakukan untuk mengetahui keberhasilan sintesis serta mengetahui informasi mengenai karakteristik materialnya. Karakterisasi yang pertama adalah analisis gugus fungsi menggunakan instrumen FTIR. Material yang dianalisis gugus fungsinya adalah Na-PTC dan MOF Fe-PTC. Jika spektrum IR yang dihasilkan menunjukkan keberadaan gugus fungsi dalam senyawa tersebut maka tentu ini menunjukkan keberhasilan dari sintesis yang telah dilakukan.

Karakterisasi selanjutnya adalah dengan menggunakan XRD untuk material MOF Fe-PTC. Difraksi XRD direkam pada difraktometer dengan radiasi Cu-K α ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$) pada kisaran 2θ yaitu 3°-90° dengan kecepatan pemindaian 10° per menit pada suhu 25 °C. Fase kristal dan derajat kristalinitas dievaluasi serta ukuran rata-rata kristal dihitung dengan menggunakan persamaan Debye-Scherrer (1).

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

Keterangan:

λ = panjang gelombang sinar-X yang digunakan,

θ = sudut difraksi,

K = adalah konstanta = 0,94

β = Full Width at Half Maximum (FWHM).

Karakterisasi selanjutnya adalah mencari nilai energi celah (*band gap*) dengan menggunakan DRS UV-Vis. Proses ini dilakukan pada panjang gelombang 200-800 nm dengan serbuk BaSO₄ digunakan sebagai blanko. Energi celah pita dari MOF Fe-PTC ditentukan dengan menggunakan modifikasi persamaan Kubelka Munk (2).

$$\alpha (hv) \approx B (hv - Eg)^n \quad (2)$$

Keterangan:

α = Koefisien ekstinsi

B = Konstanta absorpsi

Eg = energi celah pita (eV)

h = konstanta Planck (6,626 x 10⁻³⁴ J. s)

ν = frekuensi radiasi ($\nu = c/\lambda \text{ s}^{-1}$)

n = nilai transisi elektronik yang diizinkan (n = 2 untuk transisi indirect, diplot sebagai $(\alpha hv)^{1/2}$ versus E, n = 1/2 untuk transisi direct, diplot sebagai $(\alpha hv)^2$ versus E).

Morfologi dan data persebaran unsur dalam MOF Fe-PTC dianalisis melalui SEM-EDS menggunakan mode *elemental mapping*. Kelebihan mode *elemental mapping* ini adalah selain dapat diketahui morfologi dari sampel juga dapat diketahui persentase dan pola persebaran masing-masing unsur dalam sampel sehingga dapat diambil kesimpulan mengenai bagaimana atom-atom unsur tersebut terikat satu dengan yang lainnya.

2.5 Uji Aktivitas Fotokatalitik MOF Fe-PTC

Uji aktivitas fotokatalitik degradasi metilen biru (MB) oleh MOF Fe-PTC dilakukan dalam kondisi terang dan gelap, selain itu fotolisis juga dilakukan untuk melakukan pengecekan seberapa besar zat warna akan terdegradasi oleh cahaya tanpa keberadaan fotokatalis.

Proses percobaannya adalah 1 mg fotokatalis MOF Fe-PTC didispersikan ke dalam 50 mL larutan zat warna MB 10 ppm. Campuran diaduk menggunakan magnetik stirer dengan kecepatan sekitar 300 rpm dan dibiarkan selama 3 jam pada kondisi terang dengan lampu mercury 250 W sebagai sumber cahaya tampak. 10 mL suspensi diambil dan disentrifugasi, selanjutnya konsentrasi zat warna dalam larutan sampel diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 663 nm. Proses yang sama dilakukan untuk kondisi gelap, dengan perbedaan tidak diberikannya radiasi sinar tampak.

2.6 Optimasi Fotodegradasi Metilen Biru

Optimasi fotodegradasi zat warna metilen biru dilakukan menggunakan metode Respon Permukaan/*Response Surface Methodology* (RSM) dengan menggunakan tiga variabel bebas. Variabel bebas adalah kondisi-kondisi yang akan diteliti pengaruhnya terhadap respon. Adapun yang menjadi variabel bebas dalam penelitian ini adalah bobot fotokatalis, waktu iradiasi, dan konsentrasi H₂O₂.

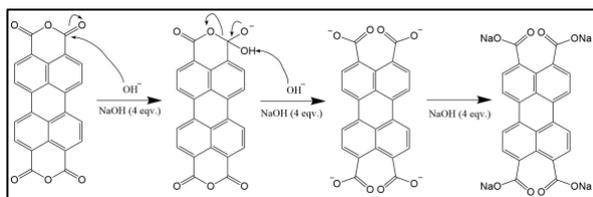
Pada penelitian ini digunakan RSM Desain *Box Behnken* (BBD) dalam aplikasi Minitab versi 19. Tiga variabel yang akan diteliti tersebut akan menghasilkan 15 baris matriks percobaan. Nilai

minimum dan maksimum dari setiap variabel ditentukan oleh peneliti, sedangkan nilai tengah sudah dihitung otomatis di dalam aplikasi. Pada penelitian ini, bobot fotokatalis memiliki nilai terendah 0,5 mg, tertinggi 1,5 mg, dan nilai tengahnya 1 mg. Sedangkan untuk variabel waktu kontak nilai terendahnya 90 menit, tertingginya 150 menit, dan nilai tengahnya 120 menit. Variabel yang terakhir yaitu konsentrasi H_2O_2 memiliki nilai terendah 0,1, nilai tertinggi 0,3 dan nilai tengahnya 0,2. Sedangkan yang menjadi variabel responnya adalah persen efisiensi degradasi zat warna.

3 Hasil dan Diskusi

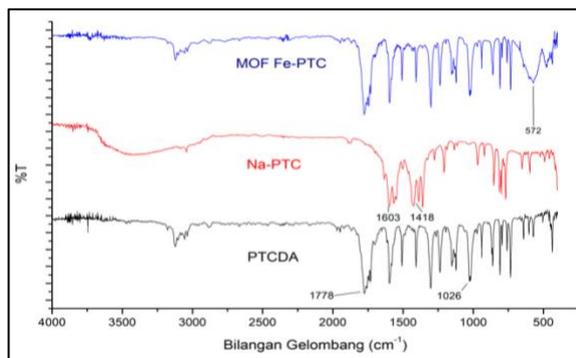
3.1 Preparasi Na-PTC

Na-PTC disiapkan dari *perylene-3,4,9,10-tetracarboxylic dianhydride* (PTCDA) yang memiliki karakteristik sukar larut dalam air [12]. Konversi menjadi bentuk garamnya adalah salah satu cara untuk meningkatkan kelarutannya dalam pelarut polar, karena ion-ion yang terbentuk menjadikannya lebih mudah tersolvasi. PTCDA ini direaksikan dengan NaOH sehingga terbentuk Na-PTC. Ion hidroksida (OH^-) dari NaOH bertindak sebagai nukleofil yang bereaksi dengan PTCDA menyebabkan ikatan anhidrida siklik menjadi terbuka dan membentuk anion PTC melalui mekanisme substitusi nukleofilik bimolekular (SN_2). Anion PTC ini kemudian berinteraksi dengan kation Na^+ membentuk suatu garam [19]. Mekanisme reaksi tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Mekanisme reaksi hidrolisis PTCDA menjadi Na-PTC

Secara fisik terjadi perubahan warna dari material PTCDA yang berwarna merah gelap menjadi Na-PTC yang berwarna kuning. Hal ini mengindikasikan bahwa Na-PTC berhasil terbentuk. Hal ini diperkuat dengan analisis gugus fungsi menggunakan FTIR seperti yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Spektrum FTIR dari PTCDA, Na-PTC, dan MOF Fe-PTC

Pada Gambar 2 dapat terlihat bahwa terjadi perbedaan spektrum FTIR antara PTCDA dan Na-PTC. Perbedaan yang dapat diamati adalah pada spektrum FTIR PTCDA terdapat bilangan gelombang 1778 cm^{-1} yang menunjukkan vibrasi ulur karbonil ($C=O$) dan bilangan gelombang 1026 cm^{-1} yang menunjukkan vibrasi ulur ($C-O$) dari anhidrida siklik PTCDA, sedangkan serapan ini tidak ditemukan pada spektrum FTIR Na-PTC. Pada spektrum FTIR dari Na-PTC ditemukan serapan pada bilangan gelombang 1603 cm^{-1} dan 1418 cm^{-1} yang merupakan vibrasi ulur asimetrik dan simetrik secara berturut-turut untuk karboksilat dalam bentuk ionnya [20]. Pada spektrum FTIR Na-PTC juga terdeteksi vibrasi ulur gugus hidroksil ($-OH$) pada bilangan gelombang $2886 - 3400\text{ cm}^{-1}$. Hal ini dapat diduga adanya gugus anhidrida dari PTCDA yang sudah terbuka namun kemudian sebagiannya tidak mengikat kation Na^+ melainkan membentuk gugus karboksilat ($-COOH$), saat pencucian material dengan etanol sampai pH netral. Serapan hidroksil ini overlap dengan vibrasi ulur $C-H$ aromatik pada gugus perylene dari Na-PTC. Hal lain yang dapat menjadi indikasi sudah terbentuknya Na-PTC adalah perbedaan spektrum FTIR dengan PTCDA pada daerah fingerprint, yaitu daerah di bawah 1400 cm^{-1} .

Rendemen Na-PTC yang didapatkan pada proses ini sebesar 84%. Hal ini disebabkan karena saat pemindahan zat, masih ada zat yang tertinggal terutama pada kertas saring setelah pengeringan.

3.2 Sintesis MOF Fe-PTC

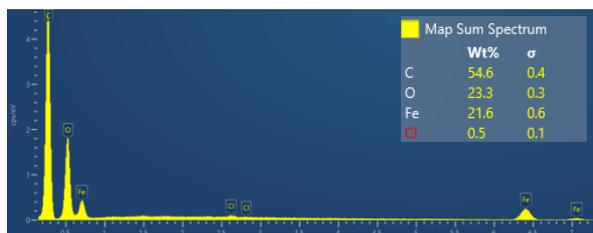
Sintesis MOF-Fe PTC ini menggunakan metode solvotermal dengan menggunakan pelarut campuran air dan DMF karena pelarut ini memiliki titik didih yang relatif tinggi dan juga stabil secara termal [21]. Sistem campuran pelarut air dan DMF ini bertujuan untuk meminimalisasi terbentuknya cacat kristal saat sintesis MOF sedang berlangsung [19], selain itu DMF juga

menyebabkan ukuran kristal menjadi lebih besar. Pengurangan volume DMF dapat menyebabkan penurunan massa kristal yang terbentuk serta kurang homogen seperti pada penelitian sintesis MOF Cu-BTC [22].

Material MOF yang terbentuk adalah MOF Fe-PTC yang berwarna merah yang berbeda dengan material sebelumnya, yaitu Na-PTC yang berwarna kuning. Hal ini dapat mengindikasikan bahwa sintesis MOF Fe-PTC berhasil dilakukan.

Bukti pendukung lain atas indikasi keberhasilan sintesis MOF Fe-PTC adalah data spektrum FTIR dari MOF Fe-PTC yang ditunjukkan pada Gambar 2. Pada spektrum FTIR MOF Fe-PTC terlihat terdapat serapan pada bilangan gelombang 572 cm^{-1} yang menunjukkan vibrasi Fe-O. Hal yang sama dilaporkan pada penelitian sintesis MOF Fe-BDC, yang menemukan serapan pada bilangan gelombang 556 cm^{-1} yang menunjukkan vibrasi ulur simetris dari Fe-O [23].

Hasil analisis komposisi unsur dari sampel MOF Fe-PTC menggunakan EDS juga mendukung indikasi keberhasilan sintesis. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 3 yang menunjukkan keberadaan Fe dengan persentase bobot sebesar 21,6%. Hal yang menarik dari spektrum EDS pada Gambar 3 ini adalah munculnya keberadaan unsur klorin (Cl) dengan persentase bobot yang kecil yaitu sebesar 0,5%. Ini menunjukkan bahwa dalam sampel terdapat atom Cl yang mungkin terikat pada MOF sebagai *counter ion* atau sebagai pengotor akibat pencucian yang kurang sempurna.



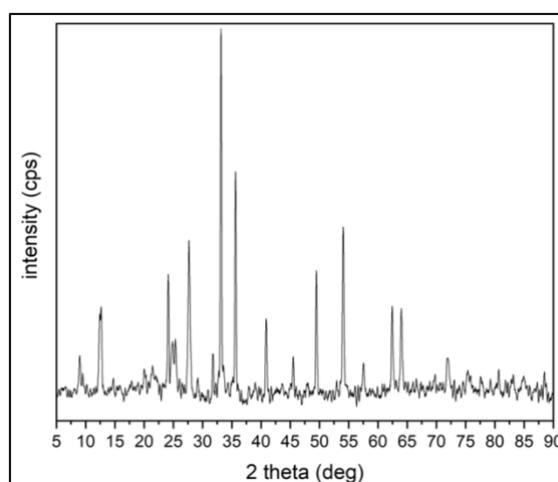
Gambar 3. Spektrum EDS Komposisi Unsur-Unsur Penyusun MOF Fe-PTC

Bukti pendukung lain adalah dari uji kelarutan. MOF cenderung sukar larut karena pembentukan kerangka pada MOF menyebabkan ukuran molekul MOF menjadi sangat besar sehingga meningkatkan sifat hidrofobisitas dan menurunkan efek gerak brown [19]. Hasil uji kelarutan menunjukkan bahwa MOF Fe-PTC relatif tidak larut dalam pelarut polar (air dan

etanol), dan sangat tidak larut dalam pelarut semipolar (kloroform) serta nonpolar (heksana).

3.3 Kristalinitas dari MOF Fe-PTC

Kristalinitas material sangat penting untuk diketahui karena terkait erat dengan aktivitas fotokatalitik [14]. Semakin tinggi derajat kristalinitas, maka artinya jumlah cacat kristal semakin kecil. Cacat kristal bertindak sebagai pusat rekombinasi antara elektron dan hole yang menjadi penyebab turunnya aktivitas fotokatalitik [24]. Sehingga dapat disimpulkan semakin tinggi nilai derajat kristalinitas suatu fotokatalis maka proses rekombinasi semakin dihambat sehingga aktivitas fotokatalisis menjadi semakin tinggi.



Gambar 4. Pola Difraktogram MOF Fe-PTC

Gambar 4 menunjukkan bahwa material MOF Fe-PTC merupakan material polikristalin yang ditunjukkan oleh 17 pusat puncak difraksi utama pada 9° , $12,66^\circ$, $24,12^\circ$, $24,88^\circ$, $25,34^\circ$, $27,68^\circ$, $31,74^\circ$, $33,16^\circ$, $35,64^\circ$, $40,88^\circ$, $45,52^\circ$, $49,48^\circ$, $54,06^\circ$, $57,52^\circ$, $62,42^\circ$, $64,02^\circ$, dan $71,96^\circ$. Difraktogram MOF Fe-PTC yang ditunjukkan oleh Gambar 4 merupakan hasil olahan software Origin Versi 2018 yang sudah mengalami proses koreksi baseline dan smoothing dengan metode Savitzky-Golay dan nilai *Point of Window* sebesar 20 pts. Berdasarkan kepada perhitungan derajat kristalinitas, yaitu dengan membandingkan luas area puncak difraksi utama dengan luas area seluruh puncak maka didapat derajat kristalinitas untuk material MOF Fe-PTC hasil sintesis pada penelitian ini adalah 46,56%.

Pembentukan kristal MOF Fe-PTC dipengaruhi oleh campuran air dan DMF sebagai pelarut dalam sintesis secara solvotermal. DMF membantu pembentukan kristal MOF Fe-PTC dengan cara mengontrol tingkat deprotonasi penghubung organik karboksilat dari PTC. Sedangkan metode solvotermal yang



menggunakan suhu di atas titik didih pelarutnya dilakukan untuk mengontrol laju pertumbuhan kristal dengan mengurangi penghalang energi aktivasi dalam reaksi antara ion logam dengan penghubung organik [25].

Pada penelitian ini juga diukur ukuran kristal dengan menggunakan persamaan Debye Scherer. Berdasarkan hasil perhitungan, maka rata-rata ukuran kristal material MOF Fe-PTC adalah sebesar 50,9 nm. Nilai ini lebih besar dua kali lipatnya jika dibandingkan dengan ukuran kristal Cr-PTC yaitu sebesar 25,7 nm [14].

3.4 Energi Celah dari MOF Fe-PTC

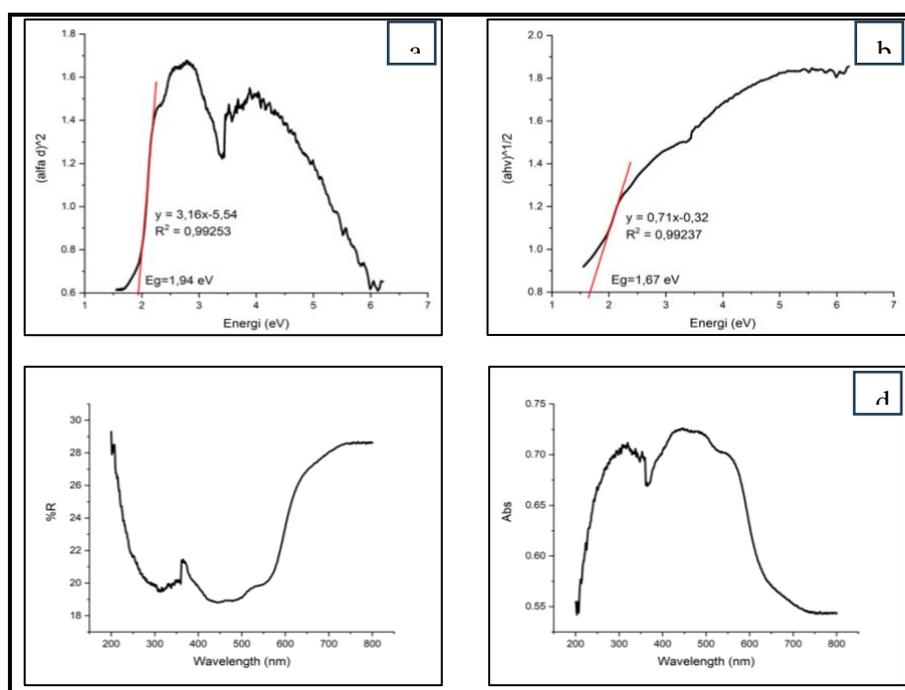
Energi celah adalah energi diantara pita konduksi dan pita valensi yang merepresentasikan energi maksimum dalam proses eksitasi elektron [14]. Gambar 5 menunjukkan bahwa MOF Fe-PTC memiliki energi celah sebesar 1,94 eV untuk sistem *direct allowed transition* dan 1,67 eV untuk sistem *indirect allowed transition*. Jika dihitung menggunakan persamaan max plank ($E=hc/\lambda$) untuk mencari panjang gelombang maksimum maka didapatkan nilai λ_{max} sebesar 638 nm untuk *direct allowed transition* dan 741 nm untuk *indirect allowed transition*.

Perbandingan antara data λ_{max} dengan spektrum reflektansi dan absorbansi dari MOF Fe-

PTC serta melihat nilai R^2 dari plot tauc maka dapat disimpulkan bahwa material MOF Fe-PTC hasil sintesis memiliki sistem *direct allowed transition* dengan nilai energi celah sebesar 1,94 eV. Hal ini menunjukkan bahwa material MOF Fe-PTC yang dihasilkan responsif terhadap cahaya tampak dan transisi elektronik yang terjadi murni karena terjadi interaksi antara foton dan elektron [26].

Energi celah yang rendah dipengaruhi oleh transisi elektronik $\pi-\pi^*$ pada ikatan rangkap konjugasi dari penghubung organik perylene yang digunakan. Hal ini dapat dibandingkan dengan Fe-BDC yang memiliki nilai energi celah sebesar 2,73 eV [27]. Benzena dikarboksilat (BDC) juga memiliki ikatan rangkap terkonjugasi, namun tidak sebanyak pada perylene tetrakarboxilat (PTC), sehingga menyebabkan nilai energi celah Fe-PTC lebih rendah daripada Fe-BDC.

Ukuran *secondary building unit* (SBU) ion logam juga mempengaruhi energi celah pita MOFs. Semakin besar ukuran SBU MOF, semakin sempit energi bandgapnya. Ukuran SBU bertambah seiring bertambahnya jumlah elektron. Meningkatnya jumlah elektron mempengaruhi jumlah elektron pada tingkat energi HOMO dan mengantarkan ke tingkat energi yang lebih sempit antara pita valensi dan pita konduksi [28].



Gambar 5. Plot Tauc dari MOF Fe-PTC (a) *direct allowed transition* dan (b) *indirect allowed transition* ; (c) spektrum reflektansi dan (d) spektrum absorbansi

Penelitian sebelumnya diketahui bahwa besar energi celah untuk MOF Cr-PTC adalah sebesar 2,01 eV [29]. Nilai ini lebih besar dibanding dengan energi celah dari MOF Fe-PTC yaitu sebesar 1,94 eV. Hal ini disebabkan karena jumlah elektron untuk ion logam Fe(III) pada tingkat energi HOMO lebih besar dibandingkan dengan ion logam Cr(III). Perbandingan nilai energi celah dan panjang gelombang maksimum dengan penelitian sebelumnya yang juga menggunakan basis ligan PTCDA dapat dilihat pada Tabel 1.

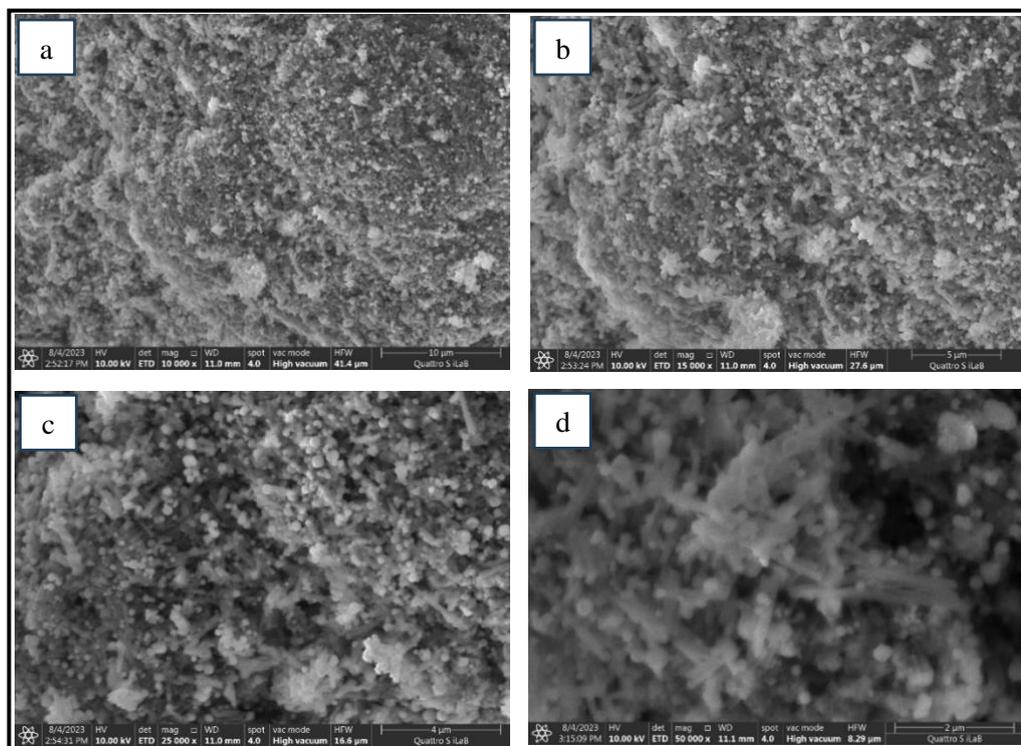
Tabel 1. Nilai energi celah dari MOF berbasis ligan perylene

No	Material	Eg (eV)	λ_{max} (nm)	Referensi
1	MOF Ni-PTC	2,41	514	[11]
2	MOF Dy-PTC	2,18	568	[10]
3	MOF Sm-PTC	2,19	564	[10]
4	MOF Y-PTC	2,23	563	[12]
5	MOF La-PTC	2,21	561	[9]
6	MOF Cr-PTC	2,01	616	[29]
7	MOF Fe-PTC	1,94	638	Penelitian ini

3.5 Morfologi dari MOF Fe-PTC

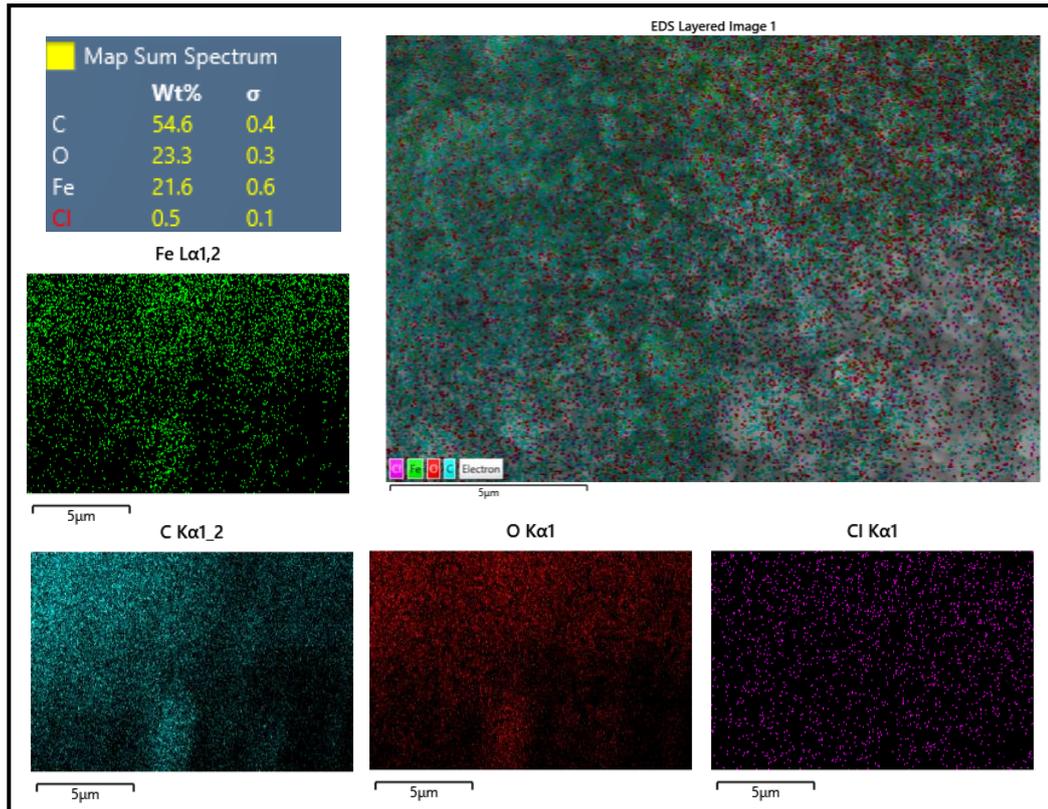
Gambar 6 menunjukkan bahwa morfologi dari MOF Fe-PTC adalah berbentuk seperti tabung silinder. Bentuk ini hampir sama dengan MOF Cr-PTC [29] dan La-PTC [9] yang juga memiliki bentuk silinder. Namun, dapat juga dilihat bahwa terdapat banyak pengotor pada tampilan morfologi MOFs Fe-PTC karena kurangnya proses pencucian selama sintesis.

Hasil *mapping* unsur-unsur penyusun MOF Fe-PTC dapat dilihat pada Gambar 7 yang memperlihatkan persebaran unsur-unsur C, O, Fe, Cl yang ditampilkan dengan warna-warna yang berbeda. Warna biru untuk karbon, merah untuk oksigen, hijau untuk besi, dan merah muda untuk klorin. Pada Gambar 7 dapat kita lihat persebaran unsur Fe, C, dan O memiliki pola yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa ketiga unsur ini tergabung dalam satu material yang sama yaitu MOF Fe-PTC. Sedangkan untuk unsur Cl dengan prosentase bobot yang rendah yaitu sekitar 0,5%, memiliki pola sebaran unsur yang berbeda dengan unsur yang lain. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan unsur Cl dalam material ada yang bertindak sebagai *counter ion*, dan ada pula sebagai pengotor karena pencucian yang kurang sempurna.

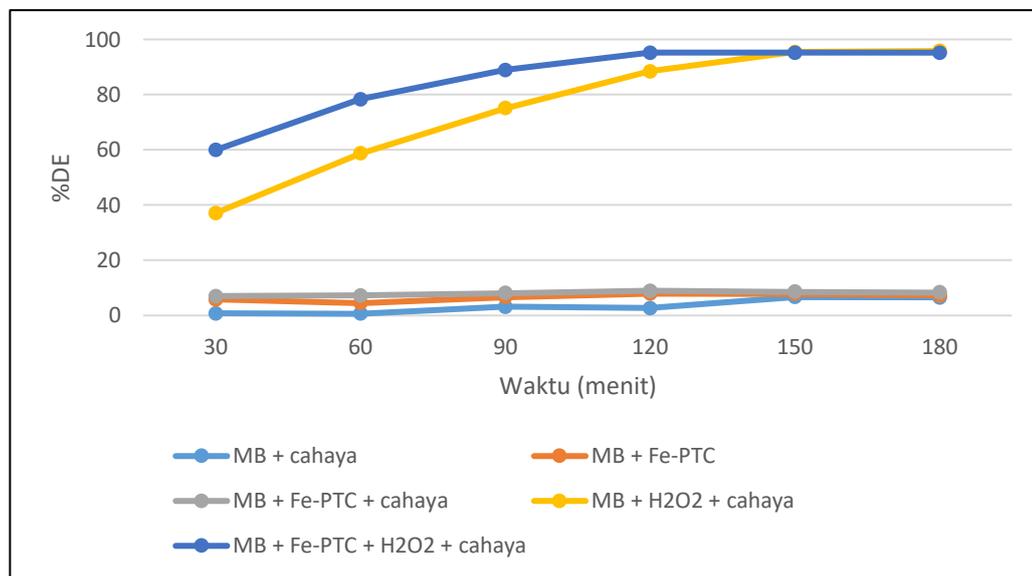


Gambar 6. Morfologi MOF Fe-PTC perbesaran (a) 10.000x; (b) 15.000x; (c) 25.000x; (d) 50.000x





Gambar 7. EDS mapping dari MOF Fe-PTC



Gambar 8. Persen Efisiensi Degradasi (%DE) dari Metilen Biru (MB) Pada Berbagai Kondisi

3.6 Aktivitas Fotokatalitik dari MOF Fe-PTC

MOF Fe-PTC diuji aktivitas fotokatalitiknya melalui serangkaian percobaan. Gambar 8 menunjukkan bahwa MOF Fe-PTC tidak memiliki aktivitas fotokatalisis secara signifikan jika dilihat dari perbandingan kurva pada kondisi terang dan gelap serta fotolisis. Hal ini menunjukkan bahwa degradasi fotokatalisis langsung oleh MOF Fe-PTC terhadap metilen biru (MB) sangat tidak

menguntungkan secara energi. Hal serupa juga terjadi ketika MOF La-PTC digunakan untuk mendegradasi zat warna metilen biru dan rhodamin B. Posisi pita konduksi dan pita valensi yang kurang sesuai menyebabkan pasangan elektron-hole mengalami rekombinasi sehingga spesies radikal untuk mendegradasi zat warna menjadi tidak terbentuk [9].

Hal yang berbeda ditunjukkan saat zat warna metilen biru ditambahkan peroksida (H₂O₂) dan atau MOF Fe-PTC. Persentase Efisiensi Degradasi (%DE) metilen biru (MB) terlihat secara signifikan saat MB ditambahkan peroksida, dan kemudian %DE meningkat lagi jika peroksida ditambahkan dengan MOF Fe-PTC. Kedua kurva ini mulai akan bertemu pada waktu iradiasi sekitar 120 menit, dengan kondisi bobot MOF Fe-PTC yang digunakan 1 mg, konsentrasi H₂O₂ yang digunakan 0,2 M dan konsentrasi MB yang digunakan sebesar 10 ppm.

Mekanisme fotodegradasi secara umum ada dua, yakni adsorpsi dan fotokatalisis. Adsorpsi zat warna oleh MOF terjadi melalui beberapa interaksi seperti elektrostatis, hidrofobik, π-π, asam basa, dan ikatan hidrogen. Sedangkan fotokatalisis degradasi zat warna terjadi melalui pembentukan elektron dan hole dari fotokatalis yang kemudian berinteraksi dengan zat-zat di dalam larutan yang sesuai tingkat energinya (misalnya dalam hal ini peroksida) kemudian membentuk radikal bebas [14].

3.7 Optimasi Fotodegradasi Metilen Biru oleh MOF Fe-PTC dengan keberadaan H₂O₂

Hasil yang sudah didapat pada aktivitas fotokatalik dari MOF Fe-PTC dengan keberadaan H₂O₂ kemudian dioptimasi menggunakan RSM Desain Box Behnken.

Tabel 2. Matriks Desain Percobaan Box Behnken

Var	X ₁	X ₂	X ₃	Y
No	Bobot Fotokatalis (mg)	Konsentrasi H₂O₂ (M)	Waktu Kontak (menit)	%DE
1	1	0.3	90	86.25
2	1.5	0.2	90	92.61
3	1.5	0.1	120	91.25
4	0.5	0.2	150	97.74
5	1	0.2	120	96.58
6	0.5	0.1	120	88.10
7	1	0.2	120	97.59
8	1	0.2	120	96.74
9	1	0.3	150	91.14
10	0.5	0.3	120	90.68
11	1	0.1	90	69.86
12	1.5	0.3	120	94.98
13	1	0.1	150	89.33
14	1.5	0.2	150	97.90
15	0.5	0.2	90	91.91

Tabel 2 menunjukkan matriks desain berupa variabel bebas (X₁, X₂, X₃) dan rentangnya serta variabel respon (Y) yang dihasilkan. Hubungan

antara variabel respon dan variabel bebas dinyatakan dalam persamaan (3). Tanda positif dari koefisien pada persamaan (3) menunjukkan pengaruh sinergis antara variabel bebas terhadap variabel respon, sedangkan tanda negatif menunjukkan pengaruh antagonisnya.

$$\%DE = -53.2 - 18.7 X_1 + 502.9 X_2 + 1.605 X_3 + 10.36 X_1 * X_1 - 831 X_2 * X_2 - 0.00502 X_3 * X_3 + 5.7 X_1 * X_2 - 0.009 X_1 * X_3 - 1.215 X_2 * X_3 \quad (3)$$

Tabel 3 menunjukkan analisis varians (ANOVA) yang digunakan untuk menguji kelayakan model yang digunakan. Jika nilai P hitung kurang dari 0,05 maka hal itu menunjukkan bahwa data signifikan secara statistika [30]. Pada penelitian ini nilai P-hitung untuk variabel independen konsentrasi H₂O₂ (X₂) dan waktu kontak (X₃) secara berturut-turut adalah 0,035 dan 0,009. Kedua variabel ini memiliki nilai P-hitung kurang dari 0,05 sehingga dapat dikatakan bahwa konsentrasi H₂O₂ dan waktu kontak memiliki pengaruh secara signifikan terhadap respon, yaitu % degradasi zat warna. Sedangkan variabel bobot fotokatalis (X₁) memiliki nilai P-hitung 0,375 yang tentu saja nilainya lebih dari 0,05, sehingga dapat dikatakan bahwa bobot fotokatalis memiliki pengaruh dalam degradasi zat warna metilen biru namun tidak signifikan. Hal yang serupa terjadi untuk variabel kuadratnya, sedangkan untuk variabel interaksi memberikan pengaruh yang tidak signifikan.

Tabel 3. Uji ANOVA Terhadap Model

Sumber	DF	Jumlah Kuadran	Rerata Kuadran	Nilai F	Nilai P
Model	9	651.142	72.349	7.93	0.017
X ₁	1	8.632	8.632	0.95	0.375
X ₂	1	75.093	75.093	8.23	0.035
X ₃	1	157.354	157.354	17.25	0.009
X ₁ *X ₁	1	24.744	24.744	2.71	0.160
X ₂ *X ₂	1	254.746	254.746	27.93	0.003
X ₃ *X ₃	1	75.394	75.394	8.27	0.035
X ₁ *X ₂	1	0.331	0.331	0.04	0.856
X ₁ *X ₃	1	0.073	0.073	0.01	0.932
X ₂ *X ₃	1	53.144	53.144	5.83	0.061
Error	5	45.602	9.120		

Keterangan:

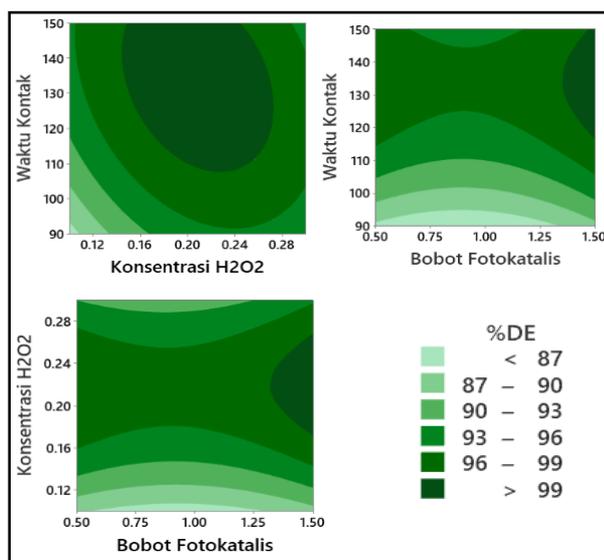
X₁: Bobot Fotokatalis;

X₂: Konsentrasi H₂O₂;

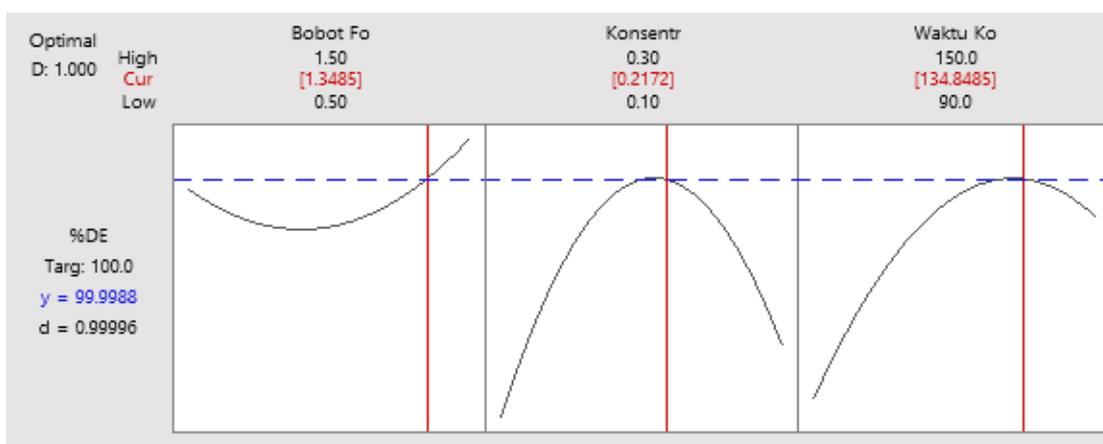
X₃: Waktu Kontak;

DF: Derajat Kebebasan





Gambar 10. Plot Kontur % Degradasi Zat Warna Metilen Biru pada Variasi Bobot Fotokatalis, Konsentrasi H₂O₂, dan Waktu Kontak



Gambar 9. Plot Optimasi Hasil Pengolahan RSM BBD untuk Fotodegradasi Metilen Biru

Berdasarkan uji ANOVA pada Tabel 3 dapat diungkap bahwa peran konsentrasi H₂O₂ dan waktu kontak berperan signifikan baik sebagai variabel independen maupun sebagai variabel kuadratik. Kedua jenis variabel tersebut berperan sebagai parameter yang berpengaruh signifikan terhadap fotodegradasi zat warna metilen biru.

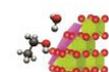
Plot kontur yang menunjukkan pengaruh dari interaksi antara variabel yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 9. Area yang berwarna gelap menunjukkan daerah yang merupakan kondisi optimum. Jika kita melihat plot kontur waktu kontak vs konsentrasi H₂O₂, maka dapat disimpulkan daerah kondisi optimum berada pada kisaran konsentrasi H₂O₂ sebesar 0,16 M - 0,26 M dan waktu kontak 110-150 menit. Sedangkan untuk plot kontur waktu kontak vs bobot fotokatalis, daerah optimum terletak pada kisaran waktu kontak 120-150 menit dan bobot fotokatalis

sekitar 1,35-1,50 mg. Terakhir plot kontur konsentrasi H₂O₂ vs bobot fotokatalis menunjukkan kondisi optimum pada kisaran konsentrasi H₂O₂ sebesar 0,17 - 0,25 M dan bobot fotokatalis sekitar 1,35-1,50 mg.

Gambar 10 menunjukkan kondisi optimum dengan target respon %DE = 100%. Namun secara statistik respon tertinggi yang dapat diperoleh adalah sebesar 99,9988% dengan kondisi optimum bobot fotokatalis MOF Fe-PTC sebesar 1,35 mg; konsentrasi peroksida (H₂O₂) sebesar 0,22 M; dan waktu kontak sebesar 135 menit.

4 Kesimpulan

MOF Fe-PTC telah berhasil disintesis dan dikarakterisasi. Secara statistik, kondisi optimum dari proses degradasi zat warna metilen biru oleh fotokatalis MOF Fe-PTC dengan penambahan



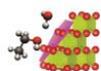
H₂O₂ adalah 1,35 mg bobot fotokatalis; 0,22 M H₂O₂; dan waktu kontak 135 menit.

Ucapan Terima Kasih

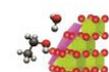
Penelitian ini dibiayai oleh Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP).

Daftar Pustaka

- [1] Xia, T., Lin, Y., Li, W. and Ju, M. 2021. Photocatalytic degradation of organic pollutants by MOFs based materials: A review. *Chinese Chemical Letters*. Elsevier B.V. p. 2975–84. 10.1016/j.cclet.2021.02.058
- [2] Siddique, K., Rizwan, M., Shahid, M.J., Ali, S., Ahmad, R. and Rizvi, H. 2017. Textile wastewater treatment options: A critical review. *Enhancing Cleanup of Environmental Pollutants*, Springer International Publishing. p. 183–207. 10.1007/978-3-319-55423-5_6
- [3] Al-Mamun, M.R., Kader, S., Islam, M.S. and Khan, M.Z.H. 2019. Photocatalytic activity improvement and application of UV-TiO₂ photocatalysis in textile wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Elsevier. 7 (5) 103248. 10.1016/J.JECE.2019.103248
- [4] Saeed, M., Usman, M. and Haq, A. ul. 2018. Catalytic Degradation of Organic Dyes in Aqueous Medium. *Photochemistry and Photophysics - Fundamentals to Applications*, InTech. 10.5772/intechopen.75008
- [5] Hardian, A., Herdiana Putri, R., Budiman, S., Gustaman Syarif Jurusan Kimia, D., Sains dan Informatika, F., Jenderal Achmad Yani, U. et al. 2021. Sintesis Keramik Komposit ZrO₂-ZnFe₂O₄ sebagai Fotokatalis Magnetik untuk Degradasi Metilen Biru. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 17 (1) 43–53. 10.20961/alchemy.17.1.39240.43-53
- [6] Mukherjee, D., Van der Bruggen, B. and Mandal, B. 2022. Advancements in visible light responsive MOF composites for photocatalytic decontamination of textile wastewater: A review. *Chemosphere*. Elsevier Ltd. 10.1016/j.chemosphere.2022.133835
- [7] Bedia, J., Muelas-Ramos, V., Peñas-Garzón, M., Gómez-Avilés, A., Rodríguez, J.J. and Belver, C. 2019. A review on the synthesis and characterization of metal organic frameworks for photocatalytic water purification. *Catalysts*. MDPI. 10.3390/catal9010052
- [8] Younis, S.A., Kwon, E.E., Qasim, M., Kim, K.H., Kim, T., Kukkar, D. et al. 2020. Metal-organic framework as a photocatalyst: Progress in modulation strategies and environmental/energy applications. *Prog Energy Combust Sci*. Elsevier Ltd. 10.1016/j.pecs.2020.100870
- [9] Zulys, A., Adawiah, A., Gunlazuardi, J. and Yudhi, M.D.L. 2021. Light-Harvesting Metal-Organic Frameworks (MOFs) La-PTC for Photocatalytic Dyes Degradation. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 16 (1) 170–8. 10.9767/bcrec.16.1.10309.170-178
- [10] Christina, L.C., Gunlazuardi, J. and Zulys, A. 2020. Synthesis and characterization of lanthanide metal-organic framework with perylene 3,4,9,10-tetracarboxylate ligand. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing Ltd. 10.1088/1757-899X/902/1/012046
- [11] Zulys, A., Asrianti, D. and Gunlazuardi, J. 2020. Synthesis and characterization of metal organic frameworks based on nickel and perylene dyes as water splitting photocatalyst. *AIP Conference Proceedings*, 2243 5–9. 10.1063/5.0005001
- [12] Adawiah, A., Yudhi, M.D.L. and Zulys, A. 2021. Photocatalytic Degradation of Methylene Blue and Methyl Orange by Y-PTC Metal-Organic Framework. *Jurnal Kimia Valensi*, LP2M Universitas Islam Negeri (UIN) Syarif Hidayatullah Jakarta. 7 (2) 129–41. 10.15408/jkv.v7i2.22267
- [13] Seco, J.M., San Sebastián, E., Cepeda, J., Biel, B., Salinas-Castillo, A., Fernández, B. et al. 2018. A Potassium Metal-Organic Framework based on Perylene-3,4,9,10-tetracarboxylate as Sensing Layer for Humidity Actuators. *Scientific Reports*, Nature Publishing Group. 8 (1). 10.1038/s41598-018-32810-7



- [14] Adawiah, A., Oktavia, W., Saridewi, N., Azhar, F.M., Fitria, R.N., Gunawan, M.S. et al. 2022. Synthesis Metal-Organic Framework (MOFs) Cr-PTC-HIna Modulated Isonicotinic Acid for Methylene Blue Photocatalytic Degradation. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 17 (2) 383–93. 10.9767/bcrec.17.2.13930.383-393
- [15] Demirci, S., Gizer, G., Polat, O., Ram, M.K. and Sahiner, N. 2022. The synthesis and characterization of PTCDA-Co(II), and PTCDA-La(III) fluorescent MOFs. *Inorganica Chimica Acta*, Elsevier B.V. 542. 10.1016/j.ica.2022.121102
- [16] Gharbani, P., Mehrizad, A. and Mosavi, S.A. 2022. Optimization, kinetics and thermodynamics studies for photocatalytic degradation of Methylene Blue using cadmium selenide nanoparticles. *Npj Clean Water*, Nature Research. 5 (1). 10.1038/s41545-022-00178-x
- [17] Sowmiya, S., Kumar, V.V., Pitchaimani, J., Madhu, V., Thiagarajan, R., Subramanian, N.S. et al. 2018. Self-assembly of water soluble perylene tetracarboxylic acid with metal cations: Selective fluorescence sensing of Cu²⁺ and Pb²⁺ ions in paper strips, zebrafish and yeast. *Journal of Luminescence*, Elsevier B.V. 203 (March) 42–9. 10.1016/j.jlumin.2018.06.026
- [18] Zulys, A., Adawiah, A. and Nasruddin, N. 2022. Efficient Degradation of Methylene Blue Using La-PTC-HIna/Ti3C2Tx MXene: Adsorption and Photocatalytic Degradation. *Indonesian Journal of Chemistry*, 22 (5) 1195–204. 10.22146/ijc.71692
- [19] Adawiah, A. 2021. Sintesis Metal Organic Framework MOF La-PTC dan Aplikasinya Sebagai Fotokatalis dalam Degradasi Zat Warna di Bawah Iradiasi Cahaya Tampak [Thesis]. Universitas Indonesia.
- [20] Pavia, D.L., Lampman, G.M. and Kriz, G.S. 2009. Introduction to Spectroscopy: a guide for students of organic chemistry. 1979. Fort Worth, Texas.
- [21] Bull, O.S., Bull, I., Amadi, G.K., Obaalologhi Odu, C. and Okpa, E.O. 2022. A Review on Metal- Organic Frameworks (MOFS), Synthesis, Activation, Characterisation, and Application. *Oriental Journal Of Chemistry*, Oriental Scientific Publishing Company. 38 (3) 490–516. 10.13005/ojc/380301
- [22] Ediati, R., Kahardian, M. and Hartanto, D. 2016. Pengaruh Perbandingan Pelarut Etanol dan Dimetilformamida pada Sintesis Metal Organik Framework HKUST-1. *Akta Kimia Indonesia*, Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat ITS. 1 (1) 25. 10.12962/j25493736.v1i1.1425
- [23] Riezzati, N., Krisnandi, Y.K. and Zulys, A. 2020. Metal organic frameworks of lanthanum and iron using BDC linker as catalysts for glucose conversion into 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing Ltd. 10.1088/1757-899X/902/1/012044
- [24] Kudo, A. and Miseki, Y. 2009. Heterogeneous photocatalyst materials for water splitting. *Chemical Society Reviews*, 38 (1) 253–78. 10.1039/b800489g
- [25] Seetharaj, R., Vandana, P. V., Arya, P. and Mathew, S. 2019. Dependence of solvents, pH, molar ratio and temperature in tuning metal organic framework architecture. *Arabian Journal of Chemistry*. Elsevier B.V. p. 295–315. 10.1016/j.arabjc.2016.01.003
- [26] Karkare, M.M. 2015. The Direct transition and not Indirect transition, is more favourable for Band Gap calculation of Anatase TiO₂ nanoparticles [Internet].
- [27] He, Q., Fu, Y., Ge, X., Al-Enizi, A.M., Nafady, A., Wang, Q. et al. 2021. Facile fabrication of Fe-BDC/Fe-2MI heterojunction with boosted photocatalytic activity for Cr(VI) reduction. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Elsevier Ltd. 9 (5). 10.1016/j.jece.2021.105961
- [28] Lin, C.K., Zhao, D., Gao, W.Y., Yang, Z., Ye, J., Xu, T. et al. 2012. Tunability of band gaps in metal-organic frameworks. *Inorganic Chemistry*, 51 (16) 9039–44. 10.1021/ic301189m



- [29] Saridewi, N., Azhar, F.M., Abdillah, P.A., Zulys, A., Nurbayti, S., Tulhusna, L. et al. 2022. SYNTHESIZE METAL-ORGANIC FRAMEWORKS FROM CHROMIUM METAL IONS AND PTCDA LIGANDS FOR METHYLENE BLUE PHOTODEGRADATION. *Rasayan Journal of Chemistry*, Rasayan Journal of Chemistry, c/o Dr. Pratima Sharma. 15 (4) 2544–50. 10.31788/RJC.2022.1547046
- [30] Indriyani, L.A., Arif, Z., Lindab, R., Purwaningsih, H., Rafi, M., Kimia, A. et al. 2019. Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi Journal of Scientific and Applied Chemistry Pengoptimuman Kondisi Adsorpsi Cd(II) oleh Adsorben Berbasis Silika Termodifikasi Glisina Menggunakan Central Composite Design [Internet]. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*.

