

**APLIKASI *RESPONSE SURFACE METHODOLOGY* (RSM)
PADA OPTIMASI FOTODEGRADASI LIMBAH ZAT
WARNA METILEN BIRU DENGAN FOTOKATALIS Fe_3O_4 -
 ZnO -BENTONIT**

SKRIPSI

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Syarat Guna Memperoleh
Gelar Sarjana Strata 1 dalam Ilmu Kimia**



Oleh : Nisfakh Tri Oktafiani

NIM : 1908036002

**PROGRAM STUDI KIMIA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI WALISONGO
SEMARANG
2024**

**APLIKASI *RESPONSE SURFACE METHODOLOGY* (RSM)
PADA OPTIMASI FOTODEGRADASI LIMBAH ZAT
WARNA METILEN BIRU DENGAN FOTOKATALIS Fe_3O_4 -
 ZnO -BENTONIT
SKRIPSI**

**Oleh
Nisfakh Tri Oktafiani
1908036002**

**Disusun untuk Memenuhi Sebagian Syarat Guna
Memperoleh Gelar Sarjana Strata 1 dalam Ilmu Kimia**

**PROGRAM STUDI KIMIA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI WALISONGO
SEMARANG**

2024

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Nisfakh Tri Oktafiani

NIM : 1908036002

Menyatakan bahwa skripsi yang berjudul :

**APLIKASI *RESPONSE SURFACE METHODOLOGY* (RSM)
PADA OPTIMASI FOTODEGRADASI LIMBAH ZAT
WARNA METILEN BIRU DENGAN FOTOKATALIS Fe_3O_4 -
 ZnO -BENTONIT**

Secara keseluruhan adalah hasil penelitian atau karya sendiri dan bukan jiplakan karya orang lain, kecuali bagian tertentu yang dirujuk dari sumbernya.

Semarang, 20 September 2024
Pembuat pernyataan,



Nisfakh Tri Oktafiani
NIM : 1908036002



KEMENTERIAN AGAMA RI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI WALISONGO
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
Jl. Prof. Dr. Hamka Ngaliyan, Semarang Telp. 024-7601295

PENGESAHAN

Naskah skripsi berikut ini :

Judul : Aplikasi Response Surface Methodology (RSM)
pada Optimasi Fotodegradasi Limbah Zat Warna
Metilen Biru dengan Fotokatalis $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-}$
Bentonit
Penulis : Nisfakh Tri Oktafiani
NIM : 1908036002
Jurusan : Kimia

Telah diujikan dalam sidang munaqosah oleh Dewan Penguji
Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo dan dapat
diterima sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana
dalam ilmu Kimia.

Semarang, 12 November 2024

DEWAN PENGUJI

Ketua Sidang

Winda Udaibah, M.Si
NIP: 198501042009122003

Sekretaris Sidang

Deni Ebit Nugroho, S.Si, M.Pd
NIP: 1985072020190310007

Penguji I

Dr. Ervin Tri Suryandari, S.Si,
M.Si
NIP: 197407162009122001

Penguji II

Dr. Eng. Anissa Adiweni
Putri, M.Si
NIP: 198504052011012015

Pembimbing I

Winda Udaibah, M.Si
NIP: 198501042009122003

Pembimbing II

Kholidah, M.Sc
NIP: 198508112019032008

NOTA DINAS

Semarang, 20 September 2024

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Walisongo

DI Semarang

Assalamu'alaikum wr.wb

Dengan ini diberitahukan bahwa saya telah melakukan bimbingan, arahan dan koreksi naskah skripsi dengan :

Judul : Aplikasi *Response Surface Methodology* (RSM) Pada Optimasi Fotodegradasi Limbah Zat Warna Metilen Biru Dengan Fotokatalis Fe_3O_4 -Zno-Bentonit

Nama : Nisfakh Tri Oktafiani

NIM : 1908036002

Jurusan : Kimia

Saya memandang bahwa naskah skripsi tersebut sudah dapat diajukan kepada Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo Semarang untuk diajukan dalam Sidang Munaqosah.

Wassalamu'alaikum wr.wb

Pembimbing I,



Wirda Udaibah, M.Si

NIP. 198501042009122003

NOTA DINAS

Semarang, 20 September 2024

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Walisongo

Di Semarang

Assalamu'alaikum wr.wb

Dengan ini diberitahukan bahwa saya telah melakukan bimbingan, arahan dan koreksi naskah skripsi dengan :

Judul : Aplikasi *Response Surface Methodology* (RSM) Pada Optimasi Fotodegradasi Limbah Zat Warna Metilen Biru Dengan Fotokatalis $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO}$ -Bentonit

Nama : Nisfakh Tri Oktafiani

NIM : 1908036002

Jurusan : Kimia

Saya memandang bahwa naskah skripsi tersebut sudah dapat diajukan kepada Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo Semarang untuk diajukan dalam Sidang Munaqasah.

Wassalamu'alaikum wr.wb

Pembimbing II,



Kholidah, M.Sc

NIP. 198508112019032008

ABSTRAK

Penurunan kualitas air bersih akibat limbah industri, khususnya zat warna *non-biodegradable*, seperti metilen biru (MB), menjadi masalah lingkungan yang serius. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan pH, waktu penyinaran, dan konsentrasi MB dalam proses fotodegradasi menggunakan komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO}$ -bentonit di bawah iradiasi sinar UV. Metode *Response Surface Methodology* (RSM) dan desain *Central Composite Design* (CCD) digunakan untuk mengevaluasi interaksi antar parameter dan menentukan kondisi optimum. Hasil menunjukkan kondisi optimum pada pH 9, konsentrasi MB 40 ppm dan waktu penyinaran 100 menit. Analisis regresi dan ANOVA mengungkapkan bahwa tidak ada variabel bebas atau interaksi antarvariabel yang signifikan mempengaruhi respon degradasi ($p\text{-value} > 0,05$), serta tidak adanya masalah multikolinieritas dalam model (VIF mendekati 1). Solusi optimal dari *software MiniTab* yang dihasilkan dari hasil persamaan regresi, *counter plot* dan 3D *surface* (variabel konsentrasi, pH dan waktu), serta analisis ANOVA menunjukkan pH 4,56618; konsentrasi MB 46,4554 ppm dan waktu penyinaran 143,863 menit dengan tingkat degradasi 97,28%.

Kata Kunci: *Metilen biru, fotokatalis, $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO}$ -bentonit, Response Surface Methodology, Central Composite Design.*

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb

Alhamdulillah, puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat dan karuniaNya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan skripsi ini sebagaimana mestinya. Shalawat serta salam selalu tercurah kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW.

Skripsi dengan judul “**APLIKASI RESPONSE SURFACE METHODOLOGY (RSM) PADA OPTIMASI FOTODEGRADASI LIMBAH ZAT WARNA METILEN BIRU DENGAN FOTOKATALIS $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-BENTONIT}$** ” disusun untuk memenuhi syarat guna memperoleh gelar sarjana dalam Ilmu Kimia Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo Semarang. Penulis menyadari bahwa dalam pelaksanaan penelitian dan penyusunan skripsi tentunya tidak lepas dari dukungan, arahan, bimbingan, serta motivasi dari banyak pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Nizar, M. Ag selaku Rektor Universitas Islam Negeri Walisongo Semarang.
2. Prof. Dr. H. Musahadi M.Ag selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi.

3. Ibu Mulyatun M. Si selaku Ketua Prodi Kimia.
4. Ibu Ika Nur Fitriani, M. Si dan Ibu Dyah Fitasari, M.Si selaku wali dosen saya yang selalu memberikan bimbingan, motivasi, saran dan masukan serta dukungan kepada penulis.
5. Ibu Wirda Udaibah, M.Si, selaku dosen pembimbing pertama saya yang selalu memberikan bimbingan, ilmu, pengalaman, kritik dan saran, serta dukungan kepada penulis selama penulisan skripsi.
6. Ibu Kholidah, M.Sc, selaku dosen pembimbing kedua saya yang selalu memberikan bimbingan, ilmu, pengalaman, kritik dan saran, serta dukungan kepada penulis selama penulisan skripsi.
7. Seluruh dosen Kimia yang telah memberikan ilmu pengetahuan dan pengalaman berharga kepada penulis.
8. Kedua orang tua saya, Bapak Rosyid dan Ibu Siti Umiati/Ibu Ene yang selalu memberikan dukungan, semangat, materiil selama saya di rantauan serta senantiasa selalu sabar dan berdoa untuk kelulusan saya.
9. Kakak-kakak saya, A Afif Muslihuddin, A Lutfi Dwi Saputra dan Mba Hilda Ariyandhi, yang selalu memberikan semangat, materiil dan juga doa untuk kelulusan saya.
10. Maulida Hasanah, Faza Shafa Aulia, Mutiah Al Mardiyah, Nurul Putri Tasqya, Ryzka Irayuda, Rizki Ade Afriyanti,

Tara Bintang Aghnia, Fatiyya Azzamuna, Sulistyaningsih, Siti Nazilatul Amanah, Hervintari Gebi, Maya Susilowati dan Anisa Fitria, yang selalu menemani dan menyemangati serta menghibur saya selama di perkuliahan dan penulisan skripsi.

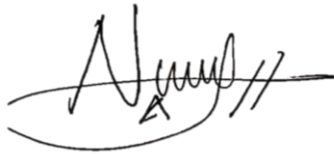
11. Bayu Rahmad Saputra selaku partner saya yang selalu menemani dan memberikan dukungan dengan tulus dalam menyelesaikan skripsi ini.
12. Teman-teman Kimia 2019 A yang selalu kebersamai dan menyemangati saya selama perkuliahan.
13. Teman-teman pengurus HMJ Kimia masa bakti 2021 yang selalu kebersamai saya selama perkuliahan.
14. Teman-teman pengurus DEMA FST masa bakti 2022 yang juga selalu kebersamai saya selama perkuliahan.
15. Rekan seperjuangan mahasiswa Kimia terkhusus Angkatan 2019 yang telah menemani dan berjuang bersama selama saya berkuliah di UIN Walisongo Semarang.
16. Semua pihak-pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah membantu dan berkontribusi dalam penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan dan jauh dari kesempurnaan. Penulis berharap memperoleh saran dan masukan dari semua pihak

sehingga penulis dapat memperbaiki dalam penulisan berikutnya. Penulis juga berharap semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi orang lain tidak hanya untuk penulis, *Aamiin Aamiin Ya Rabbal 'Alamin*.

Wassalamu'alaikum Wr.Wb.

Semarang, 20 September 2024

A handwritten signature in black ink, featuring a large, stylized initial 'N' followed by 'isfakh Tri Oktafiani' and a long horizontal flourish at the end.

Nisfakh Tri Oktafiani

NIM : 1908036002

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	ii
PENGESAHAN	iii
NOTA DINAS	iv
NOTA DINAS	v
ABSTRAK	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	12
C. Tujuan Penelitian.....	12
D. Manfaat Penelitian	12
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	15
A. Fotokatalisis	15
B. Fotokatalis	17
C. Magnetit (Fe_3O_4).....	20
D. Metilen Biru	22
E. Optimasi dengan <i>Response Surface Methodology</i> (RSM) 23	
F. <i>Design of Experiment</i> (DoE).....	26

G. Variabel yang Berpengaruh Pada Proses Fotokatalitik	33
H. Kajian Pustaka.....	38
I. Hipotesis Penelitian.....	43
BAB III METODE PENELITIAN	45
A. Alat dan Bahan.....	45
B. Prosedur Kerja.....	45
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	57
A. Pengukuran Panjang Gelombang Maksimum Metilen Biru	57
B. Pembuatan Kurva Standar	59
C. Analisis Respon Hasil Degradasi Metilen Biru Menggunakan Komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-Bentonit}$	60
BAB V PENUTUP.....	89
A. Kesimpulan.....	89
B. Saran	90
DAFTAR PUSTAKA	93
DAFTAR LAMPIRAN	106
RIWAYAT HIDUP.....	111

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1	Formulasi perlakuan menggunakan CCD.....	51
Tabel 4. 1	Konsentrasi Larutan Standar Metilen Biru dan Absorbansinya.....	59
Tabel 4. 2	Data Hasil Degradasi	61
Tabel 4. 3	Data Parameter Hasil Degradasi Metilen Biru	72
Tabel 4. 4	Hasil Analisis Regresi dengan Koefisien Terkode.....	74
Tabel 4. 5	Analisis Regresi.....	79
Tabel 4. 6	Hasil ANOVA Degradasi Metilen Biru pada Software MiniTab.....	82
Tabel 4. 7	Solusi Optimal dari Data Hasil Degradasi Metilen Biru dalam Software MiniTab	86

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Mekanisme Fotokatalisis	16
Gambar 2. 2	Struktur Kristal Fe_3O_4	21
Gambar 2. 3	Struktur Kimia Molekul Metilen Biru	22
Gambar 2. 4	Ilustrasi plot kontur Response Surface	24
Gambar 3. 1	Software MiniTab	47
Gambar 3. 2	Pilihan Metode yang Ingin Digunakan.....	47
Gambar 3. 3	Response Surface Design.....	48
Gambar 3. 4	Display Available Design	49
Gambar 3. 5	Desain Pada Response Surface	50
Gambar 3. 6	Batas Bawah dan Batas Akhir Pada Faktor	50
Gambar 4. 1	Panjang Gelombang Metilen Biru.....	58
Gambar 4. 2	Kurva Standar Larutan Metilen Biru	60
Gambar 4. 3	Counter Plot Variabel Faktor Konsentrasi Metilen Biru-Waktu Penyinaran vs Respon Degradasi.....	63
Gambar 4. 4	3D Surface Variabel Faktor Konsentrasi Metilen Biru-Waktu Penyinaran vs Respon Degradasi..	63
Gambar 4. 5	Counter Plot Variabel Faktor pH Larutan-Waktu Penyinaran vs Respon Degradasi	65
Gambar 4. 6	3D Surface Variabel Faktor pH Larutan-Waktu Penyinaran vs Respon Degradasi	65
Gambar 4. 7	Counter Plot Variabel Faktor pH Larutan- Konsentrasi Metilen Biru vs Respon Degradasi	67
Gambar 4. 8	3D Surface Variabel Faktor pH Larutan- Konsentrasi Metilen Biru vs Respon Degradasi	67
Gambar 4. 9	Grafik Perbandingan Nilai Aktual dan Nilai Prediksi.....	78

Gambar 4. 10 Grafik Pareto dari Variasi Faktor Percobaan
Terhadap Respon.....84

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kualitas air bersih semakin berkurang dengan seiring meningkatnya populasi serta jumlah industri. Sektor industri berkontribusi besar terhadap penurunan kualitas air akibat limbah zat warna yang dihasilkan adalah senyawa organik yang tidak dapat terurai secara alami (*non-biodegradable*). Zat warna ialah senyawa kimia yang dianggap sebagai polutan berbahaya namun sering digunakan pada industri tekstil, kertas, plastik, serta kosmetik. Air limbah pewarna dapat diproduksi dalam volume tinggi pada industri tekstil (Rahimi *et al.*, 2022). Zat warna yang sering digunakan dalam industri tekstil diantaranya *rhodamin B*, metilen biru, metilen violet, tartrazi, *sunset yellow* dan *allura red* (Baunsele dan Missa, 2020).

Metilen biru (*3,7-bis(dimethylamino) phenothiazine chloride tetra methylthionine chloride*) merupakan zat warna yang sering digunakan pada aktivitas industri tekstil, beberapa diantaranya ialah pewarna kertas, wol, sutera, kapas serta pembuatan cat dan tinta ukiran (Khodaie *et al.*, 2013 ; Pathania *et al.*, 2017). Pewarna tersebut juga dipakai dalam industri kosmetik (Dardouri dan Sghaier, 2017). Pembuangan metilen

biru tanpa *treatment* yaitu bisa berdampak pada tanaman yaitu akan terhambat pertumbuhannya, pengurangan pigmen dan kandungan protein mikroalga *Chlorella vulgaris* dan *Spirulina platensis* dan akan mengganggu ekosistem perairan karena dapat menyebabkan penurunan kandungan oksigen terlarut (Moorthy *et al.*, 2021 dan Indah, 2022). SK Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2014 menjelaskan bahwa batas maksimum konsentrasi metilen biru yang diizinkan dalam perairan adalah sekitar 5 mg/L (Hardian *et al.*, 2021).

Hal-hal negatif dari limbah tersebut akan membuat kerusakan pada lingkungan sekitar baik manusia, tumbuhan maupun hewan. Allah SWT telah membuat penekanan tentang larangan berbuat kerusakan di muka bumi seperti yang dijelaskan dalam Al-Qur'an surah Ar-Rum (30) : 41,

ظَهَرَ الْفَسَادُ فِي الْبَرِّ وَالْبَحْرِ بِمَا كَسَبَتْ أَيْدِي النَّاسِ لِيُذِيقَهُمْ بَعْضَ الَّذِي عَمِلُوا لَعَلَّهُمْ يَرْجِعُونَ ﴿٤١﴾

“Telah nampak kerusakan di darat dan di laut disebabkan karena perbuatan tangan manusia, supaya Allah merasakan kepada mereka sebahagian dari (akibat) perbuatan mereka, agar mereka kembali (ke jalan yang benar)”

Menurut tafsir Al-Muyassar, ayat tersebut menjelaskan bahwa segala kerusakan di daratan dan lautan, seperti kekeringan, minimnya hujan, serta banyaknya penyakit dan

wabah, disebabkan oleh kemaksiatan yang dilakukan oleh manusia. Kerusakan-kerusakan tersebut merupakan hukuman dari sebagian perbuatan manusia di dunia agar segera bertaubat kepada Allah SWT dan kembali kepada-Nya dengan meninggalkan kemaksiatan. Salah satu bentuk kemaksiatan manusia yaitu membuang limbah zat warna sembarangan tanpa penanganan yang benar sehingga mengakibatkan penyakit bagi manusia (Tafsir Al-Muyassar. (n.d.). Surah Ar-Rum.)

Metilen biru termasuk zat warna tekstil yang sulit didegradasi karena memiliki gugus benzena (Yulianti, 2020). Metode pengolahan limbah zat warna sudah banyak yang dikembangkan, seperti metode adsorpsi, filtrasi, klorinasi, biodegradasi dan ozonisasi (Ramadhannur *et al.*, 2021). Metode yang banyak diterapkan yaitu metode adsorpsi karena biaya operasional dari metode ini relatif murah. Namun, metode adsorpsi tidak terlalu efektif. Hal ini dikarenakan selektivitasnya rendah, membutuhkan jumlah adsorben yang banyak dan proses regenerasi yang sulit untuk dilakukan (Handayani, 2021). Metode fotokatalisis juga merupakan metode modern yang banyak digunakan untuk pengolahan limbah zat warna. Kelebihan dari metode fotokatalisis yaitu prosesnya yang mudah, ramah lingkungan, serta mengubah polutan organik zat warna menjadi CO_2 , H_2O dan mineral

anorganik sehingga tidak menghasilkan polutan sekunder (Ramadhannur *et al.*, 2021; Szostak dan Banach, 2019).

Fotokatalisis merupakan metode fotodegradasi senyawa dengan menggunakan sumber energi dari cahaya tampak maupun sinar UV untuk mengaktivasi katalis dalam suatu proses kimia. Prosesnya diawali saat katalis yang terpapar cahaya tampak atau sinar UV, elektron-elektron di dalamnya akan berpindah ke tingkat energi yang lebih tinggi sehingga menciptakan pasangan *electron-hole*. Pasangan *electron-hole* kemudian dapat berpartisipasi dalam reaksi redoks dengan senyawa-senyawa organik yang terlarut dalam air atau udara. Reaksi tersebut akan menghasilkan radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$) yang sangat reaktif yang dapat mengoksidasi senyawa organik yang ada dalam larutan atau udara menjadi produk yang lebih sederhana seperti karbon dioksida dan air (Naimah *et al.*, 2014). Beberapa penelitian yang menggunakan metode fotodegradasi dalam mengolah limbah zat warna metilen biru (MB) yaitu penelitian yang dilakukan oleh Suprihatin *et al.* (2022) dengan sinar UV sebagai sumber energinya dan menggunakan fotokatalis nanopartikel perak (NPAg). Penelitian lainnya yaitu dilakukan oleh Komariah *et al.* (2022) yang menambahkan H_2O_2 dalam penggunaan Fe_3O_4 -kitosan *beads* pada sistem foto-Fenton untuk mendegradasi MB. Hasil

yang didapatkan dari kedua penelitian tersebut mendekati 100%.

Katalis nanomaterial oksida logam yang sering digunakan dalam prosedur fotokatalisis ialah ZnO. Hal ini dikarenakan ZnO terbukti efektif dalam dekomposisi polutan organik di bawah sinar UV (Rahimi *et al.*, 2022). ZnO memiliki berbagai keunggulan diantaranya yaitu sensitivitas cahaya, potensi oksidatif yang kuat, non-toksik, stabilitas kimia serta biaya yang rendah. ZnO memiliki nilai lebar pita atau biasa disebut *band gap* yang tinggi yaitu sekitar 3,2 – 3,4 eV. Hal tersebut membuat ZnO dapat menyerap di wilayah UV. Fe₃O₄ merupakan salah satu logam oksida yang memiliki *band gap* sekitar 1,28 – 2,25 eV. *Band gap* yang rendah membuat aktivitas fotokatalitik Fe₃O₄ terbatas jika dibandingkan dengan material semikonduktor dengan *band gap* yang lebih besar. Oleh karena itu, Fe₃O₄ sering digunakan bersama semikonduktor lain, seperti ZnO, dalam aplikasi fotokatalitik untuk meningkatkan efisiensi degradasi polutan seperti zat warna metilen biru. Fe₃O₄ sering digunakan sebagai fotokatalis karena memiliki stabilitas yang baik, murah, tidak beracun dan tidak menggumpal dalam waktu yang lama (Huang *et al.*, 2020). Selain itu, Ramadhannur *et al.* (2021) melaporkan bahwa Fe₃O₄ dapat meningkatkan aktivitas katalis karena kandungan Fe³⁺ dari Fe₃O₄ dapat memperlambat rekombinasi

electron-hole pada katalis ZnO. Turunnya laju rekombinasi *electron-hole* membuat lebih banyak elektron sampai ke permukaan katalis sehingga limbah metilen biru akan lebih banyak yang terdegradasi.

Hambatan dalam pengaplikasian $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO}$ yaitu menghasilkan aglomerasi material yang menyebabkan aktivitas fotokatalisis menurun. Solusi untuk mengatasi hal tersebut yaitu dengan cara menambahkan material lain yang memiliki stabilitas mekanik seperti bentonit (Riskiani *et al.*, 2018). Penambahan bentonit dalam komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO}$ dapat membuat luas permukaan interaksi pada katalis menjadi lebih besar, sehingga penggunaan fotokatalis akan semakin efisien. Penggunaan bentonit sebagai padatan pengemban akan memudahkan dan mempercepat proses transfer massa adsorbat sehingga kontak antara oksida logam fotokatalis dengan senyawa organik lebih cepat berlangsung (Suprihatin *et al.*, 2021).

Penelitian nanokomposit bentonit/ $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{/ZnO}$ telah dilakukan oleh Rahimi *et al.* (2022) untuk menghilangkan zat warna *Acid Red 206* (AR206). Efisiensi degradasi maksimum zat warna AR206 dalam proses fotokatalitik dicapai pada pH = 3, dosis katalis = 0,25 g/L dan konsentrasi zat warna = 40 mg/L. Hasil tersebut memberikan kesimpulan bahwa nanokomposit bentonit/ $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{/ZnO}$ memiliki kemampuan yang baik untuk

mendegradasi zat warna AR206. Penelitian fotokatalisis menggunakan komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-Bentonit}$ juga telah dilakukan oleh Amanah (2023) untuk membuktikan bahwa penggabungan komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-Bentonit}$ menggunakan metode kopresipitasi memiliki kemampuan fotodegradasi yang lebih baik dibandingkan dengan ZnO , Fe_3O_4 ataupun bentonit. Penelitian Amanah (2023) memberikan hasil bahwa variasi komposit yang ke-3 dengan komposisi 8,91 gr $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$; 2 gr bentonit; 4,170 gr $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dan 12,164 gr $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ memiliki efisiensi degradasi paling tinggi yaitu 96,02%.

Aktivitas fotodegradasi limbah zat warna dipengaruhi oleh beberapa parameter yaitu konsentrasi larutan metilen biru, waktu penyinaran dan pH. Konsentrasi larutan metilen biru harus mencapai nilai yang optimum untuk menghasilkan reaksi katalitik yang efisien dan menghindari jumlah katalis yang berlebih. Waktu penyinaran juga merupakan salah satu variabel yang mempengaruhi proses fotokatalitik. Waktu penyinaran penting untuk diuji karena berdampak pada lama interaksi antara sinar UV dengan fotokatalisis untuk menghasilkan radikal OH (Setiawan *et al.*, 2023). Semakin lama durasi penyinaran, semakin banyak radikal OH yang terbentuk (Rachmanto dan Pebritama, 2021). Namun, terdapat titik jenuh jika waktu penyinaran terus meningkat sehingga zat warna yang sudah terikat oleh katalis akan terlepas sehingga tidak

lagi memberikan peningkatan signifikan (Hamu *et al.*, 2019). Selain waktu kontak dan konsentrasi, nilai pH larutan juga berpengaruh pada efektivitas degradasi polutan (Habib *et al.*, 2013). Wahyu & Dini (2014) melakukan penelitian degradasi metilen biru menggunakan fotokatalis ZnO-Zeolit dan didapatkan pH yang optimum adalah pH 9. Di penelitian tersebut dijelaskan bahwa pada pH yang rendah dianggap jenuh karena kelebihan ion H^+ , sehingga menghambat metilen biru dari yang terserap dan dapat mengurangi jumlah muatan positif pada permukaan katalis, yang berperan dalam memfasilitasi pembentukan radikal hidroksil dari katalis aktif. Sedangkan semakin tinggi pH, akan membuat proses degradasi zat warna menurun secara signifikan. Hal ini dikarenakan jika reaksi terjadi pada pH yang semakin tinggi, maka akan menghasilkan radikal hidroksil berlebih yang mulai bersaing dengan molekul zat warna untuk spesies oksigen reaktif (Soltani *et al.*, 2012).

Penelitian seputar variabel operasi fotodegradasi telah dilakukan oleh beberapa penelitian, seperti Rahimi *et al.* (2022) yaitu uji pH nanokomposit, konsentrasi AR206, waktu kontak dan dosis katalis. Variabel yang paling berpengaruh dalam penelitian tersebut yaitu pH. Efisiensi proses fotokatalisis menjadi tinggi jika ada gaya tarik elektrostatik antara polutan dan katalis. Hal ini karena dalam proses

fotokatalisis, terdapat dua spesi pengoksidasi kuat yang penting yaitu radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$) dan lubang elektronik positif (h^+) yang dapat dengan mudah menguraikan bahan organik. Penelitian ini bersumber dari penelitian Amanah (2023) yang meneliti aktivitas fotokatalitik bentonit, ZnO , Fe_3O_4 dan komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-Bentonit}$ dalam fotodegradasi metilen biru menggunakan variabel konsentrasi metilen biru 20 ppm dengan pH 9 dan dilakukan penyinaran sinar UV selama 60 menit. Hasil yang didapatkan yaitu penggabungan komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-Bentonit}$ menggunakan metode kopresipitasi memiliki kemampuan fotodegradasi yang lebih baik dibandingkan dengan ZnO , Fe_3O_4 ataupun bentonit. Hasil yang dibuktikan oleh penelitian Amanah (2023), berlanjut pada penelitian ini dengan memanfaatkan *Design of Experiment* (DoE) yang digunakan untuk optimalisasi variabel yang diuji menggunakan metode *Response Surface Methodology* (RSM).

Penggunaan DoE dalam optimasi fotodegradasi nanokomposit menjadi pilihan dalam melakukan eksperimen karena mengumpulkan lebih banyak data yang mewakili variasi faktor-faktor yang terlibat dibandingkan dengan penelitian yang menggunakan metode pendekatan “one test” atau satu percobaan saja. Pendekatan *one test* memiliki kelemahan, beberapa diantaranya yaitu menyebabkan

pemborosan waktu dan sumber daya serta menghasilkan sedikit informasi yang berguna seperti informasi tentang interaksi antara faktor-faktor. Hal ini dikarenakan, peneliti hanya melakukan satu percobaan dengan variasi faktor tunggal, sehingga menyebabkan ketidakmampuan untuk mengevaluasi interaksi kompleks antara faktor-faktor yang mempengaruhi degradasi. (Franceschini dan Macchietto, 2008).

Pada beberapa tahun terakhir ini, metode optimasi menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) sudah digunakan untuk mengoptimasi kondisi operasi (Variyana dan Susanti, 2022). *Response Surface Methodology* (RSM) merupakan pendekatan optimisasi multivariat dengan menggunakan berbagai metode statistik dan matematika. Fokus dari metode ini yaitu pemberian istilah polinomial untuk data eksperimen. RSM mengoptimalkan respons untuk mencapai efisiensi sistem yang terbaik (Shaq *et al.*, 2022). RSM sangat berguna untuk proses ketika *output* dipengaruhi oleh beberapa variabel *independent* secara bersamaan. Metode RSM memiliki keuntungan yaitu agar menghasilkan tingkat faktor yang bisa membuat hasil eksperimen menjadi optimal (Ihsan, 2022). Kelebihan RSM tersebut menjadi salah satu alasan penelitian ini memilih menggunakan DoE dengan metode RSM dikarenakan analisis statistik ini lebih efisien dengan

memperhitungkan efek interaksi antara variabel yang diteliti dan penentuan kombinasi level yang lebih akurat untuk menghasilkan proses yang optimal. DoE dalam proses fotokatalitik memiliki peran penting dalam kemampuan mencapai reaksi katalitik yang optimum (Sakkas *et al.*, 2010).

Salah satu desain dasar yang sering digunakan dalam RSM yaitu *Central Composite Design* (CCD). CCD merupakan desain eksperimen yang berguna untuk menentukan jumlah percobaan dan dilanjutkan evaluasi untuk mengoptimalkan efisiensi penghilangan polutan dengan serangkaian kondisi tertentu, CCD dapat mengurangi jumlah percobaan yang diperlukan dan sangat efisien dalam menganalisis efek interaksi simultan dari variabel proses, yang biasanya terabaikan dalam ortogonal normal, desain dan uji faktor tunggal (Bhowmik *et al.*, 2018). Data kombinasi percobaan yang menggunakan CCD telah ditentukan oleh program RSM sehingga tidak memerlukan banyak data percobaan dan tidak membutuhkan waktu yang lama untuk dilakukan. Salah satu penelitian yang telah menggunakan desain CCD yaitu penelitian dari Sa'adah *et al.* (2022). Respon yang diteliti yaitu nilai efisiensi degradasi dengan variasi konsentrasi Cu, daya gelombang mikro dan waktu sintesis.

Penelitian ini diharapkan menghasilkan nilai variabel yang lebih optimal dengan menggunakan metode RSM agar

kinerja komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO}$ -Bentonit lebih baik untuk mendegradasi limbah zat warna metilen biru.

B. Rumusan Masalah

1. Bagaimana kondisi optimum dari pH larutan, waktu penyinaran dan konsentrasi metilen biru dalam fotodegradasi metilen biru dengan komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO}$ -Bentonit ?
2. Bagaimana interaksi antar parameter (pH larutan, waktu penyinaran dan konsentrasi metilen biru) yang dihasilkan oleh *design of experiment Central Composite Design (CCD)*-*Response Surface Methodology (RSM)* ?

C. Tujuan Penelitian

1. Mengetahui kondisi optimum dari pH larutan, waktu penyinaran dan konsentrasi metilen biru dalam fotodegradasi metilen biru dengan komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO}$ -Bentonit.
2. Mengetahui interaksi antar parameter (pH larutan, waktu penyinaran dan konsentrasi metilen biru) yang dihasilkan oleh *design of experiment Central Composite Design (CCD)*-*Response Surface Methodology (RSM)*.

D. Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini antara lain :

1. Bagi peneliti

Menambah wawasan baru mengenai proses optimasi nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CuO}$ -Bentonit menggunakan metode RSM untuk mendegradasi metilen biru.

2. Bagi Masyarakat

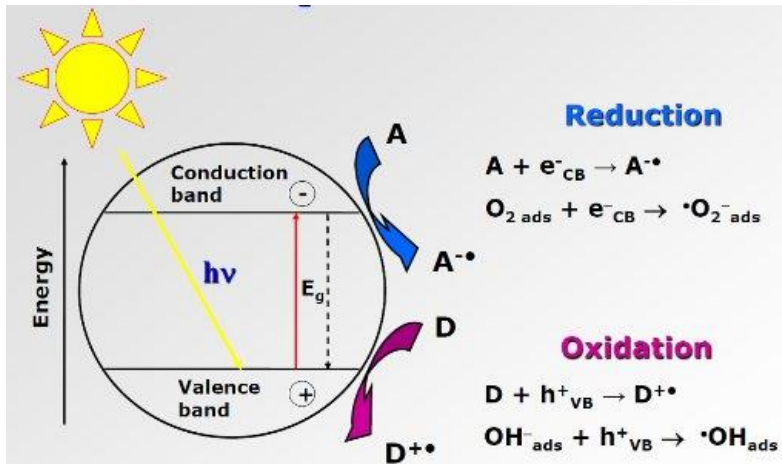
Sebagai bahan acuan agar dapat digunakan untuk mengatasi suatu permasalahan terkait dengan limbah berupa zat warna khususnya metilen biru sehingga pencemaran lingkungan dapat berkurang.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Fotokatalisis

Fotokatalisis merupakan reaksi perpaduan antara fotokimia dan katalis, yaitu proses transformasi kimia yang memanfaatkan foton sebagai sumber energi dan katalis sebagai pemercepat laju reaksi sehingga proses fotokatalisis dibantu oleh cahaya dan material katalis. Foton dapat berasal dari sumber cahaya alami yaitu cahaya matahari ataupun sumber cahaya buatan seperti sinar UV. Fotokatalisis didasarkan pada kemampuan ganda material semikonduktor untuk menyerap foton dan secara simultan melakukan reaksi transformasi antar muka material seperti TiO_2 , ZnO , Fe_2O_3 , CdS dan ZnS (Adnan *et al.*, 2022). Pada fotokatalis semikonduktor, setelah foton diserap oleh fotokatalis, elektron akan berpindah ke pita konduksi, sementara lubang terbentuk di pita valensi. Selanjutnya, terjadi transfer elektron ke permukaan fotokatalis untuk memicu reaksi redoks seperti yang terlihat pada Gambar 2.1 (Sofi'i dan Sudarman, 2022).



Gambar 2. 1 Mekanisme Fotokatalisis (Zainul *et al.*, 2020)

Fotokatalisis dapat dimanfaatkan untuk menghancurkan limbah zat pewarna dengan menggunakan katalis semikonduktor di bawah iradiasi cahaya. Proses ini melibatkan akumulasi polutan di permukaan fotokatalis, yang kemudian difotodegradasi oleh spesies reaktif saat disinari dengan cahaya yang memiliki panjang gelombang yang sesuai (Nyamukamba *et al.*, 2017). Prinsip fotodegradasi melibatkan loncatan elektron dari pita valensi ke pita konduksi pada logam semikonduktor ketika terkena energi foton. Loncatan elektron ini menghasilkan *hole* (lubang elektron) yang dapat berinteraksi dengan pelarut (air) untuk membentuk radikal $\bullet OH$. Radikal ini bersifat aktif dan dapat melanjutkan proses penguraian senyawa organik target (Fatimah dan Wijaya, 2005). Faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya

fotokatalisis meliputi luas permukaan partikel, struktur kristal, komposisi fasa, ukuran partikel, dan energi celah pita (Rahmayanti *et al.*, 2023).

B. Fotokatalis

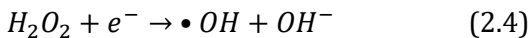
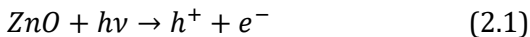
Fotokatalis ialah bahan yang bersifat semikonduktor dengan melalui reaksi fotokimia untuk mempercepat laju reaksi oksidasi maupun reduksi (Wulandari *et al.*, 2014). Katalis merupakan suatu substansi yang mampu mempercepat laju reaksi sedangkan fotokatalisis ialah proses kimia dengan bantuan katalis semikonduktor, cahaya matahari atau radiasi sinar ultraviolet (UV) (Suryandari *et al.*, 2019). Ukuran dan bentuk partikel yang digunakan dapat mempengaruhi fotokatalisis. Luas permukaan material akan mempengaruhi reaksi kimia menjadi lebih efektif jika luas permukaan material lebih besar, begitu juga dengan reaksi fotokatalisis yang dipengaruhi oleh ukuran partikel yang dihasilkan jika berada pada ukuran nano (1-100 nm) maka reaksi fotokatalisis akan lebih reaktif. Hal ini disebabkan kecilnya ukuran partikel akan membuat permukaan fotokatalis menjadi lebih luas, sehingga semakin besar interaksi reaktan di permukaan partikel (Naimah *et al.*, 2011).

Bahan semikonduktor ialah bahan yang mempunyai konduktivitas diantara isolator dan konduktor (Sistesya, 2013). Bahan semikonduktor mempunyai pita valensi (pita

bonding) yang terisi elektron dan pita konduksi (pita anti *bonding*) yang tidak terisi elektron (Effendy, 2010). Kedua pita tersebut dipisahkan oleh energi ambang yang dikenal sebagai energi celah pita (*gap energy* atau *band gap*). Bahan semikonduktor dibagi dua kelompok berdasarkan jumlah pembawa muatannya, yaitu semikonduktor tipe-p dan tipe-n. Semikonduktor tipe-p adalah semikonduktor yang mengalami kekurangan elektron, sehingga memiliki muatan positif, di mana lubang (*hole*) berfungsi sebagai pembawa muatan. Sedangkan semikonduktor tipe-n merupakan semikonduktor yang mengalami kelebihan elektron, sehingga bermuatan negatif dan elektron merupakan pembawa muatannya (Anwar dan Mulyadi, 2015).

Band gap yang dimiliki semikonduktor berperan untuk menentukan semikonduktor bisa menjadi fotokatalis atau tidak. Rentang energi *band gap* yang dimiliki semikonduktor yaitu 1– 5 eV. Menurut Halliday dan Resnick (1990), energi *band gap* (E_g) terbentuk dikarenakan *overlapping* orbital atom yang bisa membuat pita menjadi lebar ataupun sempit. Jika ZnO disinari cahaya dengan energi foton ($E = h\nu$) yang melebihi *band gap* ZnO maka akan terjadi eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Proses ini menghasilkan pasangan *electron-hole* (e^- , h^+). Elektron yang terbentuk pada pita konduksi akan berinteraksi dengan molekul oksigen (O_2) yang

teradsorpsi pada permukaan ZnO lalu akan menghasilkan superoksida radikal ($O_2^- \bullet$). Superoksida radikal ini bersifat sangat reaktif dan dapat bereaksi dengan ion hidrogen (H^+) di dalam larutan dan akan menghasilkan hidrogen peroksida (H_2O_2). Hidrogen peroksida adalah senyawa antara (intermediet) yang juga bersifat reaktif dan berperan penting dalam menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet OH$) dan ion hidroksida (OH^-) dengan berinteraksi dengan elektron pada pita konduksi. Radikal hidroksil ini merupakan spesies oksidator yang sangat kuat dan berperan besar dalam degradasi molekul polutan (Wulandari *et al.*, 2014). Selain itu, *hole* pada pita valensi juga dapat bereaksi dengan ion hidroksida yang ada di larutan untuk menghasilkan radikal hidroksil (Wardhani, 2014). Reaksi dalam fotokatalisis bisa dilihat pada Persamaan 2.1 ; 2.2 ; 2.3 ; 2.4 dan 2.5 di bawah ini :



Pasangan *electron-hole* bisa kembali ke tempat aslinya atau terekombinasi dengan melepaskan panas dikarenakan

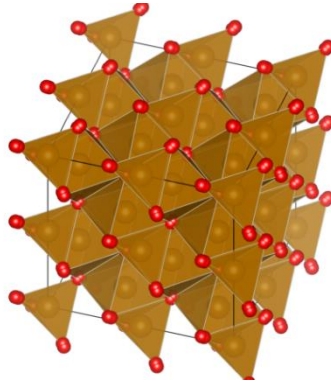
pasangan *electron-hole* tersebut tidak stabil (Hanifehpour *et al.*, 2016).

Fotokatalis yang berasal dari bahan semikonduktor yaitu ZnO, CdS, Fe₂O₃, TiO₂ dan sebagainya. ZnO dan TiO₂ merupakan bahan yang paling sering digunakan dalam proses fotokatalis (Sakthivel *et al.*, 2003). TiO₂ memiliki energi *band gap* sebesar 3,28 eV, dimana energi *band gap* sebesar itu memerlukan penyinaran sinar ultraviolet untuk menginisiasi proses fotokatalitik sedangkan ZnO memiliki energi *band gap* sebesar 3,37 eV yang membuat aktivitas katalitik ZnO jauh lebih baik daripada bahan lain karena ZnO dapat menyerap cahaya dalam spektrum yang lebih luas dibanding bahan lain (Salim dan Sudaryanto, 2016 ; Siagian *et al.*, 2022).

C. Magnetit (Fe₃O₄)

Fe₃O₄ dikenal sebagai magnetit atau magnet dalam bentuk mineral dan mempunyai struktur *spinel* dengan sel unit kubik yang terdiri dari 32 ion oksigen, dimana di setiap celahnya ditempati oleh ion Fe²⁺ dan Fe³⁺ seperti yang terlihat pada Gambar 2.2 (Suprihatin *et al.*, 2021). Fe₃O₄ merupakan salah satu material yang bersifat ferromagnetik yang murah, non-toksik, biokompatibel, dan memiliki aplikasi yang luas seperti sensor, katalis, dan lain-lain (Pradipta *et al.*, 2021). Selain memudahkan proses pemisahan, fotokatalis Fe₃O₄ dalam metode fotodegradasi ini juga memungkinkan

mineralisasi polutan organik secara sempurna menjadi CO_2 , sehingga polutan organik yang awalnya tidak dapat terurai secara hayati (*non-biodegradable*) menjadi dapat terurai (*biodegradable*) (Suprihatin *et al.*, 2021).

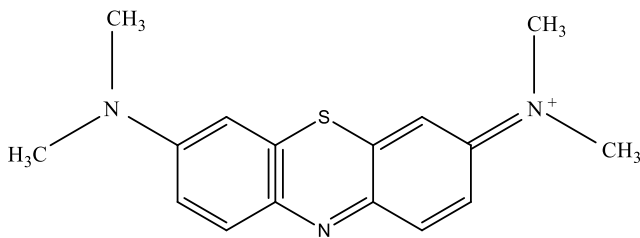


Gambar 2. 2 Struktur Kristal Fe_3O_4

Sifat dan struktur yang dimiliki Fe_3O_4 bisa membuat Fe_3O_4 digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti agen kontras *magnetic resonance imaging* (MRI), *magnetic fluids*, terapi hipertemia, penghantaran obat yang terkontrol dan terarah, pengobatan kanker, cat dan tinta magnetik, mikroelektronika, rekaman magnetik kepadatan tinggi, pendinginan magnetik, sorben untuk menghilangkan polutan, dan sebagai material fotokatalis (Maulana *et al.*, 2022).

D. Metilen Biru

Metilen biru adalah zat warna yang dapat mencemari lingkungan. Senyawa metilen biru memiliki struktur benzena yang sulit terurai seperti pada Gambar 2.3, metilen biru juga memiliki sifat toksik, karsinogenik, dan mutagenik (Wardhani, 2014). Metilen biru merupakan zat warna dasar dengan struktur senyawa kimia aromatik heterosiklik. Metilen biru biasanya digunakan untuk mewarnai sutra, kulit, plastik, kertas serta pembuatan cat dan tinta ukiran. Sumber lain metilen biru juga berasal dari industri kertas dan kosmetik.



Gambar 2. 3 Struktur Kimia Molekul Metilen Biru

Dampak negatif pencemaran dari zat warna metilen biru yaitu dapat menyebabkan alergi, iritasi kulit, peningkatan detak jantung, muntah-muntah dan sianosis pada manusia serta dapat menyebabkan perubahan gen. Dampak negatif juga dirasakan oleh tumbuhan air karena dengan adanya pencemaran metilen biru maka akan terjadi penghambatan terhadap penetrasi sinar matahari, yang mengakibatkan

penurunan tingkat fotosintesis pada tumbuhan air dan mengganggu ekosistem perairan, serta dapat menyebabkan kurangnya kandungan oksigen terlarut (Baunsele dan Missa, 2020).

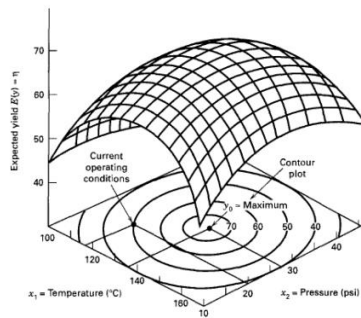
E. Optimasi dengan *Response Surface Methodology* (RSM)

Optimalisasi adalah cara menyesuaikan variabel kontrol dalam setiap proses untuk menemukan tingkat faktor yang cocok agar menghasilkan hasil atau respons terbaik. Secara umum ada dua strategi berbeda untuk pengoptimalan yaitu pengoptimalan simpleks dan *respons surface methodology* (RSM). Optimalisasi simpleks adalah strategi eksperimen bertahap yang dilakukan satu per satu. Optimum eksak hanya dapat ditentukan dengan RSM, sedangkan metode simpleks akan melingkari optimum. RSM adalah metode matematika dan statistik yang banyak digunakan untuk memodelkan dan menganalisis suatu proses dimana respons dipengaruhi oleh banyak variabel dan tujuannya untuk mengoptimalkan respons (Aydar, 2018). Dasar dari metode RSM adalah memanfaatkan desain eksperimen dengan bantuan statistik untuk mencari nilai optimal dari suatu respon (Faulina, 2011).

Level-level dari beberapa variabel seperti suhu (x_1) dan tekanan (x_2) akan dicari untuk mengoptimalkan suatu hasil produksi (y). Hubungan variabel-variabel tersebut dapat dituliskan dalam Persamaan 2.6 :

$$y = f(x_1 + x_2) + \varepsilon \quad (2.6)$$

ε_i merupakan *experimental error* pada respon y . Jika nilai harapan respon dituliskan $E(y) = f(x_1 + x_2) = \eta$, maka $\eta = f(x_1 + x_2)$ merepresentasikan sebuah permukaan yang disebut permukaan respon.



Gambar 2. 4 Ilustrasi plot kontur *Response Surface* (Faulina, 2011)

Permukaan respon digambarkan dengan sebuah grafik kontur seperti Gambar 2.4. Kontur dari permukaan respon berguna untuk membantu visualisasi dari bentuk permukaan plot. Di dalam kontur tersebut, garis respon yang konstan berada pada permukaan datar ($x_1 + x_2$), sedangkan garis respon yang lain berada pada permukaan lengkung di atasnya.

RSM adalah metode yang berfokus pada penempatan permukaan. Oleh karena itu, tujuan utama RSM adalah memahami topografi permukaan respons, termasuk garis

maksimum dan minimum lokal, serta menemukan area di mana respons paling optimal terjadi. RSM juga menyelidiki hubungan yang akurat antara variabel *input* dan *output*, serta mengidentifikasi kondisi operasi optimal untuk sistem yang diteliti (Farooq *et al.*, 2013). Data eksperimen diteliti agar sesuai dengan model statistik yaitu linear, kuadrat, kubik atau 2FI (*two factor interaction*). Koefisien model diwakili oleh suku konstanta; A, B dan C (koefisien linier untuk variabel bebas); AB, AC dan BC (koefisien suku interaktif); A^2 , B^2 dan C^2 (koefisien suku kuadrat). Koefisien korelasi (R^2), koefisien determinasi yang disesuaikan ($\text{Adj-}R^2$) dan presisi yang memadai digunakan untuk memeriksa ketepatan data. Data dikatakan optimal jika nilai $P < 0,05$ dan $R^2 > 0,9$. Signifikansi statistik dari perbedaan rata-rata dapat diuji menggunakan *analysis of variance* (ANOVA) (Aydar *et al.*, 2017).

RSM melewati beberapa langkah yaitu melakukan percobaan yang telah dirancang secara statistik, mengestimasi model matematika, menganalisis model dan memprediksi respon (Ratnam *et al.*, 2005). RSM mampu mengoptimasi suatu respon yang dipengaruhi beberapa variabel (Bas dan Boyaci, 2007). Kelebihan dari RSM yaitu mampu mengurangi jumlah unit percobaan yang dibutuhkan untuk memberikan cukup informasi untuk hasil yang dapat diterima secara statistik (Kim *et al.*, 2002).

Salah satu desain dalam RSM yang sering digunakan yaitu desain komposit pusat atau *Central Composite Design* (CCD) (Bhattacharya, 2021). Desain komposit pusat merupakan desain faktorial yang melibatkan lima level berbeda dari tiap faktor, mengandung kombinasi *central point* atau nilai tengah dan beberapa *star point* sehingga memungkinkan untuk estimasi kurva. Jarak dari nilai tengah ke *factorial point* adalah ± 1 dan jarak nilai tengah ke *star point* adalah $\pm \alpha$. Nilai α dipengaruhi oleh sifat tertentu yang diinginkan untuk desain dan jumlah faktor yang terlibat. Jika desain adalah *rotatable* yaitu level berada di sekeliling dan nilai tengah sebagai pusatnya, maka nilai α dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.7 :

$$\alpha = [2^k]^{\frac{1}{4}} \quad (2.7)$$

(Bevilacqua *et al.*, 2010)

Sedangkan jumlah percobaan (N) dalam CCD ditentukan menggunakan Persamaan 2.8 :

$$N = 2^k + 2k + N_0 \quad (2.8)$$

(Amirvaresi *et al.*, 2020)

Nilai k dalam persamaan tersebut adalah jumlah faktor dan N_0 adalah jumlah pengulangan pada titik tengah.

F. *Design of Experiment (DoE)*

Desain eksperimen adalah metode yang digunakan untuk menganalisis data tentang variabel tertentu pada suatu

permasalahan dalam penelitian. DoE membantu memaksimalkan kebenaran hasil atau respon dari suatu proses dengan meminimalkan jumlah percobaan untuk meningkatkan kinerja sistem. Fungsi DoE tidak hanya menentukan faktor terpenting yang mempengaruhi *output* tetapi juga menunjukkan interaksi yang terjadi antara faktor dan *ouput*. Perhitungan residu merupakan selisih antara hasil eksperimen dan hasil estimasi yang digunakan untuk validasi dan menentukan serangkaian kondisi dalam model matematis yang diperoleh di DoE. Model matematika yang baik ditandai dengan nilai residu yang rendah (Knight, 2010). Komponen rancangan pendekatan untuk eksperimen terdiri dari faktor atau variabel, level dan respon (Atalan *et al.*, 2020). Variabel independen dan dependen merupakan variabel yang terdapat di desain eksperimen. Variabel independen atau faktor merupakan variabel yang dapat diubah dalam tingkat atau nilai yang berbeda, sedangkan variabel dependen atau respons merupakan variabel yang dipengaruhi oleh faktor tersebut (Knight, 2010). Level adalah pengaturan yang terkait dengan setiap faktor sistem sedangkan respon adalah konstituen yang menentukan kinerja proses. Berbagai jenis DoE antara lain, *Full Factorial Design*, *Fractional Factorial Design*, *Plackett-Burman Design*, *Central Composite Rotational Design*, *Box-Behnken Design*, *Central Composite Design* dan lainnya. Jenis-jenis desain

tersebut masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan sehingga pemilihan desain berdasarkan tujuan penelitian dan sumber daya yang tersedia (Ranganathan dan Aggarwal, 2018).

1. Full Factorial Design

Full factorial design biasanya digunakan di RSM. Desain ini menggabungkan faktor (k) dan levelnya dengan sedemikian rupa sehingga memiliki semua kemungkinan kombinasi. Faktor (k) ialah parameter yang ingin diuji secara eksperimental, sedangkan level ialah nilai yang diasumsikan oleh suatu faktor (Baker *et al.*, 2017). Rancangan desain ini dapat simetris ketika jumlah level sama untuk semua faktor yang diuji dan akan asimetris jika setiap faktor memiliki jumlah level yang berbeda. Desain dengan dua tingkat (2^k) merupakan bentuk sederhana dari desain ortogonal. Desain ini biasa digunakan untuk menyaring variabel serta menganalisis faktor. Penerapan desain dengan lebih dari tiga level sering digunakan untuk membangun permukaan respon karena tidak hanya menunjukkan faktor linier tetapi juga bisa menunjukkan faktor kuadrat. *Full factorial design* tidak banyak digunakan karena proses yang rumit dan mahal (Pereira *et al.*, 2021). *Full factorial design* banyak digunakan dalam industri otomotif. Penelitian (Chen dan Tan, 2012) menggunakan desain ini untuk mengetahui

efek parameter seperti kecepatan ruang gas per jam, suhu operasi dan jumlah ammonia yang digunakan pada konversi NO_x dan NH_3 dalam sistem *Selective Catalyst Reduction* (SCR).

2. ***Fractional Factorial Design***

Desain ini lebih ekonomis dari *full factorial design* karena mengurangi jumlah percobaan. Namun, hal ini membuat beberapa efek dari faktor penelitian tidak dapat dibedakan, sehingga tingkat fraksinasi akan bergantung pada resolusi yang ingin diperoleh. Notasi yang sering digunakan untuk jenis desain ini yaitu I^{k-p} , dimana I adalah jumlah level yang dianalisis pada setiap faktor; k adalah jumlah faktor yang digunakan dalam analisis serta p adalah ukuran fraksi *ful factorial* yang diterapkan (Latha *et al.*, 2017). Desain ini umum digunakan dalam penyelidikan ilmiah dan aplikasi industri. Penelitian (Jaynes *et al.*, 2013) menggunakan *fractional factorial design* di bidang virologi untuk menyelidiki sistem biologis dengan *Herpes simplex virus* (HSV) tipe 1 dan enam antivirus.

3. ***Plackett-Burman Design***

Plackett-Burman Design dikembangkan oleh R.L. Plackett dan J.P. Burman pada tahun 1946. Desain ini dirancang untuk meningkatkan proses kontrol kualitas

yang dapat digunakan untuk mempelajari efek parameter desain pada status sistem. Desain ini berguna untuk memperkirakan efek utama dari faktor-faktor yang terlibat tetapi tidak dapat digunakan untuk mendapatkan permukaan respons selama optimalisasi proses tersebut (Pereira *et al.*, 2021). Kelebihan dari desain ini yaitu bisa memungkinkan dua level untuk masing-masing faktor dari kontrol k (-1, +1). Desain Plackett-Burman memiliki dua tingkat sama dengan *fractional factorial design* yang berarti tujuh faktor dianalisis dengan faktorial fraksional (2^{7-4}) dan dengan PBD keduanya membutuhkan delapan pengamatan. Untuk mempelajari 11 faktor digunakan PBD dengan 12 *run*, sedangkan desain faktorial fraksional membutuhkan 16 observasi. Dengan demikian PBD membutuhkan lebih sedikit percobaan daripada desain faktorial yang sangat terfraksionasi yang mencakup jumlah faktor yang sama (Vanaja dan Rani, 2007).

4. Central Composite Rotational Design

Desain ini sering digunakan untuk mendapatkan permukaan respon karena memungkinkan model orde kedua (kuadrat) untuk respon yang akan dibangun (Latha *et al.*, 2017). Penelitian Wolf dan Paulino (2019) menggunakan desain ini untuk mempelajari imobilisasi laktase dalam hidrogel berbasis *Arabic gum-based*

hydrogel (AGBH) dan *chitoan-based hydrogel* (CBH). Imobilisasi laktase diteliti secara eksperimental pada suhu yang berbeda, konsentrasi enzim awal dan nilai pH sehingga hasil eksperimen dapat dibandingkan dengan data prediksi dari *central composite rotational design*.

5. **Box-Behnken Design**

Box-Behnken Design merupakan salah satu metodologi dari DoE yang membantu mengembangkan model tingkat tinggi dengan proses yang lebih sedikit dibandingkan dengan desain faktorial lainnya. Desain ini sering digunakan di RSM dikarenakan mudah digunakan dan hasilnya tidak berbeda jauh dari hasil percobaan yang sebenarnya, sehingga banyak digunakan dalam studi eksperimental (Zhao *et al.*, 2016). BBD juga menghemat waktu serta biaya dengan mengurangi jumlah percobaan. BBD bisa memberikan tiga hingga tujuh faktor dengan tiga level kondisi eksperimental yaitu tingkat rendah, sedang dan tinggi (Tak *et al.*, 2015). Tujuan dari BBD yaitu untuk mengoptimalkan *output* dari sistem dengan operasi paling sedikit dengan menggabungkan metode matematika dan statistik yang diperlukan untuk pemodelan optimasi dan analisis eksperimen di mana *output* dipengaruhi oleh banyak faktor (Wahdame *et al.*, 2009). Penelitian Walbi *et al.* (2022) menggunakan desain ini sebagai alat statistik

untuk mengoptimalkan konsentrasi variabel formulasi atau parameter proses dan untuk memprediksi pengaruh gabungan dari variabel independen serta kecepatan pengadukan yang digunakan pada respon yang bergantung.

6. *Central Composite Design*

CCD merupakan desain faktorial lima tingkat yang paling sering digunakan untuk konstruksi model permukaan respons orde kedua. Desain ini terdiri dari tiga jenis titik, yaitu titik kubus yang berasal dari faktorial, titik aksial dan titik pusat, sehingga jumlah percobaan (N) yang dibutuhkan dapat ditentukan dengan $N = 2^k + 2k + C_0$, di mana k adalah banyaknya faktor, 2^k adalah kubik berjalan, $2k$ adalah aksial berjalan dan C_0 adalah titik pusat berjalan. Titik pusat CCD sering digunakan untuk menghitung kesalahan eksperimental. Jarak titik aksial dari titik pusat dilambangkan dengan α yang bergantung pada jumlah faktor yang dipilih untuk percobaan. Namun, desain ini memakan waktu dengan sejumlah besar faktor (Sakkas *et al.*, 2010).

Penelitian Lin *et al.* (2009) menggunakan CCD berdasarkan RSM dalam optimalisasi degradasi fotokatalitik *methylparaben*. Parameter proses yang dipilih adalah pH, konsentrasi TiO_2 , konsentrasi oksigen

dan fluks cahaya. Rancangan percobaan yang diterapkan terdiri dari 28 percobaan yang dibagi menjadi tiga blok yaitu ; (a) empat variabel ($n = 4$) pada dua level yaitu rendah (-1) dan tinggi ($+1$), *full factorial design* 2^4 (semua kombinasi kemungkinan nilai yang terkodifikasi $+1$ dan -1); (b) 8 (2^n) titik aksial yang terletak di tengah dan kedua tingkat ekstrem; (c) empat pusat pengulangan dari titik pusat. Parameter terpenting untuk degradasi *methylparaben* adalah fluks cahaya. Kondisi eksperimen optimal untuk efisiensi fotokatalitik tertinggi dari *methylparaben* diperkirakan dengan desain eksperimen multivariat ditemukan pada fluks cahaya, foton $5.8 \times 10^{15} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, pH 9, konsentrasi oksigen 18 mg L^{-1} dan konsentrasi TiO_2 $2,5 \text{ g L}^{-1}$. Penelitian Sakkas *et al.* (2007) juga menggunakan CCD untuk mengoptimisasi degradasi fotokatalitik salbutamol dalam larutan TiO_2 . Penelitian ini melakukan 11 kali percobaan, di mana dua variabel yaitu konsentrasi TiO_2 dan pH dikodifikasi dalam lima tingkat dengan tiga titik pusat untuk validitas statistik.

G. Variabel yang Berpengaruh Pada Proses Fotokatalitik

1. Pengaruh Waktu

Waktu menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi proses fotodegradasi. Waktu dapat

dihubungkan dengan presentase degradasi untuk mengetahui pengaruhnya. Persentase degradasi merupakan banyaknya limbah zat warna yang terdegradasi. Penelitian Dony *et al.* (2013) membuktikan bahwa waktu penyinaran mempengaruhi persen degradasi zat warna metilen biru. Persen degradasi akan semakin tinggi jika waktu penyinaran semakin lama. Hal ini karena waktu penyinaran merujuk pada durasi interaksi antara fotokatalis dan sumber cahaya dalam menghasilkan radikal OH, serta mempengaruhi lama kontak antara radikal OH dan limbah zat warna yang didegradasi. Semakin lama waktu penyinaran, energi foton yang dihasilkan akan meningkat. Peningkatan energi foton ini akan menghasilkan lebih banyak radikal OH (Wardhani, 2014). Hasil penelitiannya menunjukkan kenaikan signifikan terjadi pada 10 menit pertama, namun pada menit ke-20, persen degradasi cenderung akan stabil. Penelitian Fouda *et al.* (2020) melakukan fotodegradasi metilen biru menggunakan nanokomposit CuO/ZnO dengan perbandingan 20 : 80. Nanokomposit tersebut mampu mendegradasi metilen biru hingga 97% pada waktu optimum 85 menit. Penelitian Abbasi *et al.* (2023) mendegradasi metilen biru menggunakan fotokatalis *carbon dots* (CDots). CDots mampu

mendegradasi metilen biru hingga 96% pada waktu 55 menit.

2. Pengaruh pH

pH merupakan salah satu parameter penting yang dapat mempengaruhi laju fotokatalitik. Penelitian Wahyu dan Dini (2014), menunjukkan pH optimum metilen biru yang didapat yaitu pada pH 9. Pada pH tinggi, terdapat kelebihan anion OH yang memfasilitasi fotodegradasi OH radikal sehingga dapat meningkatkan laju reaksi fotokatalis. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa terjadi penurunan laju degradasi pada pH asam yang disebabkan oleh adsorpsi yang tinggi pada pH rendah. Adsorpsi yang tinggi menyebabkan permukaan katalis terhalang oleh molekul zat warna, sehingga mengakibatkan penyerapan radiasi UV pada permukaan katalis menurun (Chakrabarti dan Dutta, 2004). Pada pH rendah, kondisi ini disebut jenuh dengan kelebihan ion H^+ , yang menghambat penyerapan metilen biru (MB). Hal ini dapat mengurangi jumlah muatan positif pada permukaan katalis dalam kondisi asam, sehingga memfasilitasi pembentukan radikal hidroksil dari katalis aktif (Sapawe et al., 2013).

Penelitian Abbasi *et al.* (2023) menunjukkan pH optimum metilen biru terjadi pada pH 8. Hal ini disebabkan metilen biru merupakan zat warna kationik

yang bermuatan positif pada pH yang lebih besar dari 6, sehingga pada pH 8 akan ada daya tarik elektrostatis yang lebih tinggi antara kationik dari metilen biru dan titik karbon yang bermuatan negatif sehingga degradasi zat warna menjadi lebih efektif (Salazar-Rabago *et al.*, 2017). Namun, semakin tinggi pH akan membuat proses degradasi zat warna menurun secara signifikan. Hal ini dikarenakan kelebihan radikal hidroksil yang dihasilkan pada pH yang lebih tinggi mulai bersaing dengan molekul zat warna untuk spesies oksigen reaktif (Soltani *et al.*, 2012).

3. Pengaruh Konsentrasi Zat Warna

Proses degradasi zat warna berlangsung dengan fotokatalis yang disinari sumber cahaya sehingga terjadi eksitasi elektron dari pita valensi menuju pita konduksi. Pita valensi akan membentuk *hole* dan berinteraksi dengan air sehingga menghasilkan radikal OH. Elektron pada pita konduksi akan bereaksi dengan oksigen membentuk radikal O_2 . Radikal OH merupakan oksidator sedangkan radikal O_2 merupakan reduktor. Kemudian proses fotodegradasi zat warna akan terjadi sehingga akan berubah menjadi H_2O , CO_2 dan senyawa asam dalam konsentrasi rendah.

Penelitian Wardhani (2014) menunjukkan bahwa konsentrasi metilen biru yang optimal adalah 10 mg/L. Semakin tinggi konsentrasi metilen biru yang digunakan, semakin banyak jumlah molekul yang tersedia. Banyaknya molekul ini menyebabkan terjadinya kompetisi antar molekul metilen biru untuk teradsorpsi pada katalis TiO_2 -zeolit, yang mengakibatkan penurunan proses adsorpsi (Dony *et al.*, 2013). Selain itu, konsentrasi zat warna yang besar akan mempengaruhi sumber cahaya yang sampai pada fotokatalis. Energi foton yang mengenai fotokatalis akan semakin sedikit serta kemampuan elektron bereksitasi semakin kecil jika sumber cahaya yang mengenai fotokatalis sedikit. Hal tersebut akan menghasilkan radikal OH yang semakin sedikit dan kemampuan mengoksidasi metilen biru akan menurun. Penelitian Suprihatin *et al.* (2022) menunjukkan NPAg mampu mendegradasi metilen biru mencapai 98,21% pada konsentrasi 100 ppm. Namun, pada konsentrasi 150 ppm presentase degradasi turun dikarenakan kinerja NPAg dalam menghasilkan radikal menurun juga. Hal ini disebabkan oleh banyaknya molekul metilen biru yang menghalangi permukaan NPAg untuk menyerap foton dari UV, sehingga penyerapan foton oleh NPAg tidak optimal. Akibatnya, jumlah radikal yang dihasilkan pun tidak

banyak, sementara jumlah molekul metilen biru yang harus didegradasi semakin meningkat. Penelitian Adzra *et al.* (2022) menunjukkan hasil degradasi metilen biru mencapai 99,01% pada konsentrasi 20 ppm menggunakan fotokatalis ZnO-C. Penelitian Arisky (2022) menggunakan fotokatalis TiO₂ yang terlapis pada permukaan semen untuk mendegradasi zat warna metilen biru. Fotokatalis tersebut mampu mendegradasi metilen biru mencapai 100% pada konsentrasi 50 ppm.

H. Kajian Pustaka

Penelitian yang dilakukan oleh Wahyu dan Dini (2014) menggunakan fotokatalis ZnO-Zeolit untuk mendegradasi zat warna metilen biru dengan variasi konsentrasi metilen biru, yaitu 10, 20, 30, 40, dan 50 mg/L serta variasi pH yang mencakup 3, 5, 7, 9, dan 11, dan waktu kontak selama 10, 20, 30, 40, dan 50 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi optimum metilen biru yang terdegradasi adalah 20 mg/L, dengan pH optimum pada pH 9 dan waktu kontak optimum selama 50 menit. Temuan ini menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi metilen biru yang digunakan, semakin menurun kemampuan degradasi zat tersebut. Sementara itu, pada pH basa, aktivitas fotokatalis semakin meningkat, dan pada waktu kontak 50 menit, jumlah metilen biru yang terdegradasi semakin banyak.

Penelitian Suprihatin *et al.* (2021) menggunakan fotokatalis bentonit-Fe₃O₄ untuk mendegradasi zat warna *Naphthol blue black*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimum yang diperoleh yaitu massa bentonit-Fe₃O₄ sebesar 50 mg, pH 5 dan waktu kontak dengan sinar UV adalah 30 menit. Persentase fotodegradasi pada kondisi optimum sebesar 98,95±0,01%. Hal ini membuktikan bahwa fotokatalis ini efektif menurunkan konsentrasi zat warna *Naphthol blue black*.

Penelitian Diego-lopez *et al.* (2023) menggunakan fotokatalis SiO₂-WO₃-Fe₃O₄ untuk mendegradasi metilen biru. Hasil menunjukkan bahwa fotokatalis SiO₂-WO₃-Fe₃O₄ dengan penambahan H₂O₂ lebih tinggi dibandingkan tanpa adanya penambahan H₂O₂. Pembentukan radikal hidroksil terjadi karena penurunan pasangan *e-h*⁺ rekombinasi dari WO₃ akibat reduksi Fe³⁺ menjadi Fe²⁺ pada cangkang magnetit. Penambahan H₂O₂ dalam reaksi meningkatkan reaksi fenton. Berikut reaksi fenton yang terjadi terlihat pada persamaan 2.9,

$$\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \cdot\text{OH} + \cdot\text{OH} \quad (2.9)$$

Penambahan H₂O₂ dapat mempertahankan siklus Fe³⁺/ Fe²⁺ agar tetap aktif sehingga dapat menghasilkan banyak radikal hidroksil. Adanya kandungan Fe₃O₄ dalam fotokatalis juga mempercepat fotodegradasi metilen biru karena proses transfer elektronnya jadi lebih efisien. Hal ini dikarenakan

dengan adanya sinar cahaya dan H_2O_2 dapat menginduksi efek sinergis antara Fe_3O_4 dan WO_3 yang bisa meningkatkan aktivitas katalitiknya.

Penelitian Khodamorady dan Bahrami (2023) meneliti rasio ZnO/ZnS terbaik dalam fotokatalis $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-BNPs-ZnO-ZnS}$ untuk menghilangkan limbah zat warna metilen biru. Hasil penelitian tersebut membuktikan bahwa rasio ZnO/ZnS terbaik ialah 0,75 : 0,25. Persentase penghilangan pewarna metilen biru menggunakan fotokatalitik ini yaitu mencapai 80,5% dengan pH 7, jumlah katalis 0,08 gram dan waktu kontak selama 90 menit. Laju degradasi untuk metilen biru lebih tinggi pada pH basa karena metilen biru merupakan pewarna kationik, sehingga pada pH 8 muatan negatif lebih banyak berada di permukaan fotokatalis. Hal tersebut membuat jumlah penyerapan pewarna pada permukaan fotokatalis akan lebih tinggi karena adanya tarikan elektrostatik sehingga persentase degradasi zat warna meningkat.

Penelitian Chaker *et al.* (2021) melakukan optimalisasi fotodegradasi metil jingga menggunakan ZnO mesopori yang didoping oleh cerium melalui *Response Surface Methodology* (RSM) dengan desain eksperimen *Central Composite Design* (CCD). ZnO mesopori disintesis dengan penambahan cerium (Ce) yang berbeda yaitu dengan berat 2%, 5% dan 7%.

Aktivitas fotokatalitik dari katalis CeNPs (*Cerium Oxide Nanoparticles* atau nanopartikel CeO_2) menunjukkan hasil yang dapat meningkatkan kinerja fotokatalitik yaitu pada berat kandungan Ce 2%. Proses fotodegradasi metil jingga oleh katalis 2% CeNPs dengan variabel dari pH larutan, dosis katalis dan konsentrasi metil jingga akan digambarkan secara matematis oleh CCD-RSM. Berdasarkan pemodelan statistic (regresi kuadrat) dan proses optimasi (analisis ANOVA), hasil optimum yang dicapai untuk pH larutan yaitu 5,58, konsentrasi metil jingga yaitu 20,72 mg/L dan dosis katalis yaitu 0,63 g/L. secara keseluruhan, nilai koefisien determinasi ($R^2 = 0,9901$) menunjukkan bahwa model yang dipertimbangkan cukup sesuai dan CCD-RSM yang dipilih berhasil mengoptimalkan kondisi untuk fotodegradasi metil jingga.

Penelitian Mohammadi *et al.* (2023) melakukan proses fotokatalitik dengan nanokomposit $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ tipe 1 untuk menurunkan konsentrasi zat limbah tetrasiklin pada air menggunakan optimasi RSM berbasis CCD. Variabel yang akan dioptimalkan oleh metode RSM-CCD yaitu konsentrasi awal, jumlah fotokatalis, waktu penyinaran dan pH. Hasil yang didapatkan berupa tabel ANOVA yang menunjukkan berpengaruh atau tidaknya masing-masing variabel dan antar variabel terhadap hasil degradasi tetrasiklin serta plot kontur dan 3D yang menggambarkan efek simultan dari konsentrasi

awal, jumlah fotokatalis, waktu penyinaran dan pH. Plot 3D konsentrasi awal tetrasiklin dan jumlah fotokatalis menunjukkan peningkatan efisiensi degradasi dengan peningkatan jumlah fotokatalis dan penurunan konsentrasi awal tetrasiklin. Pada diagram tersebut, nilai yang optimal untuk jumlah fotokatalis yaitu 614 mg/L, konsentrasi awal 30 ppm, waktu penyinaran 161 menit dan pH 5,4. Hasil ANOVA menunjukkan bahwa model multivariat polinomial orde kedua sangat signifikan, dengan nilai F sebesar 290,11 dan nilai p kurang dari 0,0001. Nilai R^2 yang diperoleh dari model orde kedua yaitu sebesar 0,9963 yang menunjukkan adanya kesesuaian antara model dengan proses degradasi. Berdasarkan hal tersebut, semua variabel yang dioptimalkan menggunakan metode RSM memiliki pengaruh signifikan pada kinerja degradasi tetrasiklin. Hasil persentase degradasi dalam penelitian ini mencapai 97,43%.

Penelitian Amanah (2023) mengembangkan material fotokatalis $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-Bentonit}$ untuk melihat kemampuan fotodegradasi terhadap zat warna metilen biru. Kombinasi material Bentonit, ZnO, dan Fe_3O_4 disintesis menggunakan metode kopresipitasi. Variabel yang divariasikan dalam penelitian ini yaitu perbandingan berat dari FeSO_4 : FeCl_3 . Berdasarkan karakterisasi XRD, UV-DRS, dan SEM-EDX didapatkan bahwa komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-Bentonit}$ memiliki

struktur kristalin. Nilai band gap dari komposit 1, 2, dan 3 adalah 2,94 ; 2,07 ; dan 2,20 eV. Morfologi strukturnya berupa bongkahan kecil dan tidak beraturan. Puncak Fe, Zn, dan Si terdeteksi dalam analisis unsur, serta Fe_3O_4 dan ZnO tersebar merata pada bentonit. Komposit 3 memiliki aktivitas fotokatalitik yang paling tinggi dengan efisiensi degradasi mencapai 96,02% pada kondisi larutan metilen biru 20 ppm (pH 9) selama 60 menit. Sintesis komposit Fe_3O_4 -ZnO-Bentonit terbukti meningkatkan aktivitas fotodegradasi metilen biru dibanding material awal penyusun komposit.

I. Hipotesis Penelitian

Penelitian ini adalah penelitian lanjutan dari penelitian “Sintesis Komposit Fe_3O_4 -ZnO-Bentonit dan Aktivitasnya dalam Fotodegradasi Metilen Biru” yang dilakukan oleh Amanah (2023). Berdasarkan penelitian yang dilakukan sebelumnya, perbedaan dari penelitian ini terletak pada penambahan metode optimasi. Metode optimasi yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode RSM yang bertujuan untuk mempelajari interaksi antar parameter yaitu konsentrasi metilen biru, waktu penyinaran dan pH larutan dari proses fotokatalisis komposit Fe_3O_4 -ZnO-Bentonit untuk mendegradasi metilen biru. Optimasi menggunakan metode RSM ini diharapkan akan menghasilkan nilai variabel yang

lebih optimal agar kinerja komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO}$ -Bentonit lebih baik untuk mendegradasi limbah zat warna metilen biru.

BAB III

METODE PENELITIAN

A. Alat dan Bahan

1. Alat

Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu pipet tetes, gelas beaker, erlenmeyer, botol vial 50 mL, labu ukur 50 mL, gelas ukur, gelas arloji, spatula, pH universal, timbangan analitik *electronic balance* LQS, kapsul magnet, *magnetic stirrer*, *aluminium foil*, reaktor fotokatalis, lampu UV (UV-A lamp, merek Sankyo denki F20T10BLB, λ : 352 nm), *sentrifuge* Scilogix, spektrofotometer UV-Vis Orion Aquamate 8000, laptop dengan *software MiniTab 18*.

2. Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu aquades, larutan metilen biru 100 ppm (Merck), komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-Bentonit}$, larutan HCl 6 M (Merck), NaOH (Merck).

B. Prosedur Kerja

Penelitian ini adalah penelitian lanjutan yang dilakukan oleh Amanah (2023) sehingga prosedur kerja untuk preparasi komposit telah dilakukan oleh Amanah (2023) dengan judul riset “Sintesis Komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-Bentonit}$ dan Aktivitasnya

dalam Fotodegradasi Metilen Biru”. Fokus penelitian ini adalah optimasi fotodegradasi metilen biru dengan material komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-Bentonit}$.

1. Proses Optimasi Menggunakan Metode RSM (*Response Surface Methodology*)

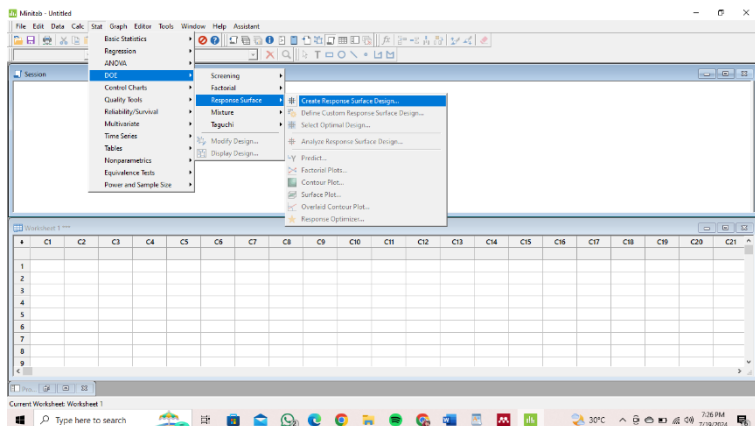
Optimasi waktu, konsentrasi metilen biru dan pH dilakukan menggunakan metode RSM (*Response Surface Methodology*) dengan rancangan percobaan kombinasi perlakuan CCD (*Central Composite Design*). Batas waktu yang digunakan yaitu 50 – 120 menit, dengan variasi batas konsentrasi MB yaitu 10 – 50 ppm serta batas pH 6 – 12. Di mana formulasi perlakuan ditentukan melalui CCD menggunakan *software MiniTab* (Pramudya dan Fahmi, 2022). Formulasi perlakuan dibuat menggunakan *software MiniTab* dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- a) Unduh aplikasi *software MiniTab* di Google, setelah selesai diunduh buka *software MiniTab* untuk digunakan.



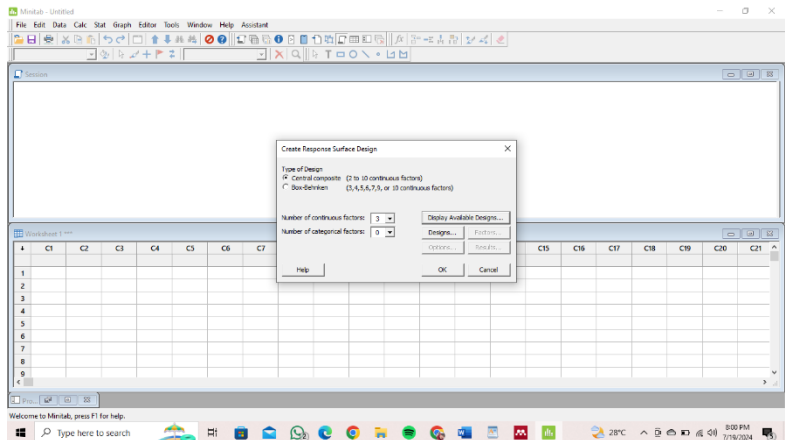
Gambar 3. 1 Software MiniTab

- b) Klik *stat* lalu pilih DoE (*Design of Experiment*) dan gunakan metode *response surface*.



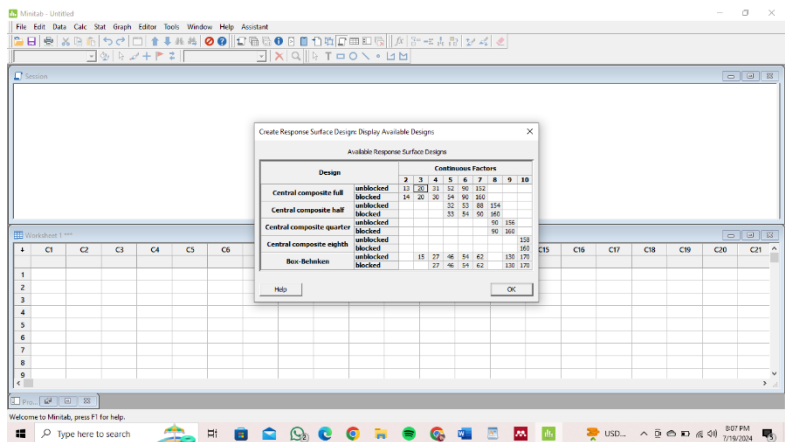
Gambar 3. 2 Pilihan Metode yang Ingin Digunakan

- c) Buat *response surface design* dengan memilih *central composite design* dan tentukan jumlah faktor yang ingin diuji. Penelitian ini terdapat tiga faktor yang ingin diuji. Selanjutnya pilih *display available design*.



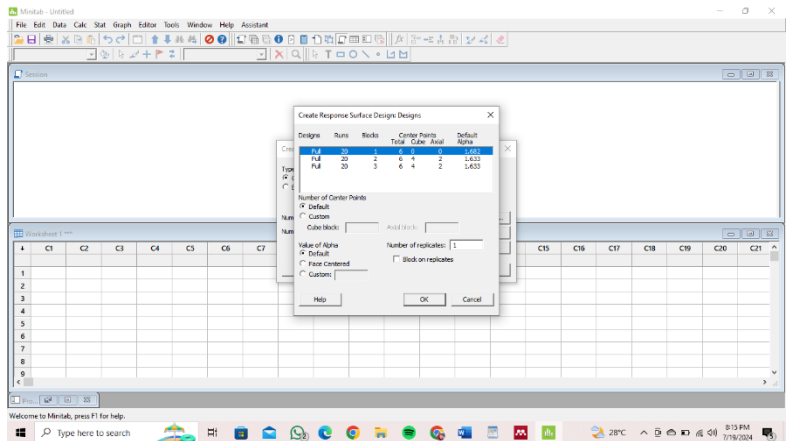
Gambar 3. 3 Response Surface Design

- d) Tentukan jumlah *running* yang akan diuji pada *display available design* dengan jumlah faktor yang sudah ditentukan. Penelitian ini terdapat tiga faktor sehingga jumlah *running* yang sesuai dengan model CCD dan jumlah faktor adalah 20. Jumlah tersebut ditetapkan dari rumus $N = 2k + 2k + C_0$, di mana k adalah banyaknya faktor, 2^k adalah kubik berjalan, $2k$ adalah aksial berjalan dan C_0 adalah titik pusat berjalan.



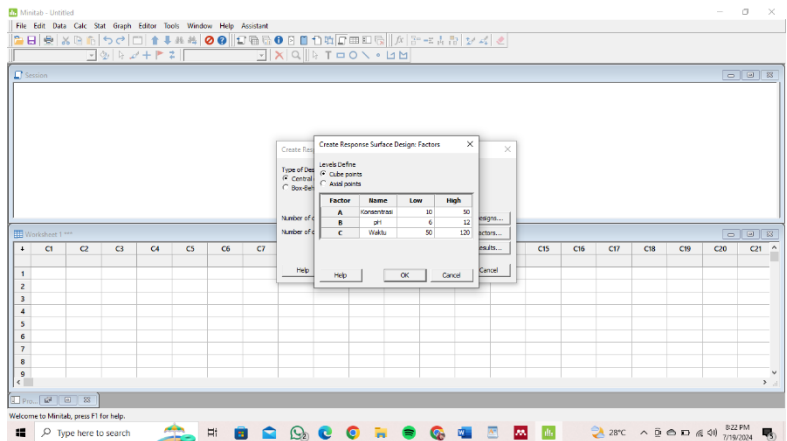
Gambar 3. 4 *Display Available Design*

- e) Pilih *designs* untuk bisa lihat desain pada *response surface*.



Gambar 3. 5 Desain Pada *Response Surface*

- f) Pilih *factors* untuk menentukan batas bawah dan batas akhir pada faktor konsentrasi metilen biru, pH larutan dan waktu penyinaran.



Gambar 3. 6 Batas Bawah dan Batas Akhir Pada Faktor

Langkah-langkah pada *software MiniTab* tersebut memberikan hasil formulasi perlakuan yang tertera pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Formulasi perlakuan menggunakan CCD

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Konsentrasi (ppm)	pH	Waktu (menit)
3	1	1	1	20	12	50
11	2	-1	1	40	3,95	85
9	3	-1	1	6,36	9	85
10	4	-1	1	73,63	9	85
8	5	1	1	60	12	120
4	6	1	1	60	12	50
16	7	0	1	40	9	85
12	8	-1	1	40	14,04	85
19	9	0	1	40	9	85
7	10	1	1	20	12	120
15	11	0	1	40	9	85
5	12	1	1	20	6	120
6	13	1	1	60	6	120
17	14	0	1	40	9	85
20	15	0	1	40	9	85
2	16	1	1	60	6	50
13	17	-1	1	40	9	26,13
18	18	0	1	40	9	85
14	19	-1	1	40	9	143,86
1	20	1	1	20	6	50

2. Uji Fotokatalitik Berdasarkan Formulasi Metode RSM-CCD

Uji fotokatalitik digunakan untuk mendapatkan hasil terbaik dari formulasi yang sudah tertera dalam *software minitab*. Langkah pertama sebanyak masing-masing 0,1 g komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-Bentonit}$ ditambahkan

ke dalam erlenmeyer berisi metilen biru dengan konsentrasi (mengikuti Tabel 3.1) sebanyak 50 mL pada pH (mengikuti Tabel 3.1). Larutan yang telah tercampur kemudian dimasukkan ke dalam reaktor fotokatalis dan diradiasi menggunakan sinar UV selama waktu yang terteta dalam Tabel 3.1 pada suhu kamar. Larutan yang telah diradiasi dalam reaktor fotokatalis kemudian dipisahkan menggunakan sentrifuse agar diperoleh filtrat. Filtrat tersebut kemudian diukur nilai absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum 665 nm dan persentase degradasi metilen biru ditentukan menggunakan rumus persen degradasi yang tertera pada Persamaan 3.1.

3. Analisis Data

a. Persentase Degradasi Metilen Biru

Analisis ini dilakukan pada panjang gelombang 665 nm. Nilai absorbansi tersebut digunakan untuk menghitung konsentrasi sisa MB (C_t). Nilai konsentrasi dari MB disubstitusi ke dalam Persamaan 3.1 untuk mendapatkan persentase degradasi :

$$(\%D) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (3.1)$$

C_0 : konsentrasi awal metilen biru

C_t : konsentrasi akhir metilen biru

b. Analisis Hasil Metode RSM

Metode RSM adalah metode optimasi yang efektif untuk mengoptimalkan reaksi fotokatalisis. Dalam penelitian ini, RSM digunakan untuk memahami dan mengoptimalkan faktor-faktor yang mempengaruhi reaksi fotokatalitik pada titik tingkat yang maksimum. Setiap respon eksperimental dapat ditulis pada Persamaan 3.2 :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (3.2)$$

Keterangan :

Y : variabel terikat

β_0 : konstanta

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$: koefisien regresi yang menunjukkan seberapa besar pengaruh masing-masing variabel bebas terhadap variabel terikat (Y)

$X_1, X_2, \dots, X_k$: variabel bebas yang digunakan untuk menjelaskan atau memprediksi variabel terikat

ε : konstanta *error* atau kesalahan

Model regresi sederhana akan beralih ke model regresi polinomial dikarenakan adanya pertimbangan beberapa efek (individu, kuadrat, dan interaksi) dari parameter seperti pada Persamaan 3.3 :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^K \beta_i x_i + \sum_{i=1}^K \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=2}^K \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

(3.3)

Keterangan :

$\sum_{i=1}^K \beta_i x_i$: komponen linier dari model regresi

$\sum_{i=1}^K \beta_{ii} x_i^2$: komponen kuadrat dari model regresi

$\sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=2}^K \beta_{ij} x_i x_j$: komponen interaksi dari model regresi

Regresi polinomial meminimalkan jumlah kesalahan kuadrat saat menghitung nilai yang diharapkan dari variabel terikat. Dengan demikian, hasil regresi akan memberikan perkiraan koefisien β_i yang dilambangkan dengan $\hat{\beta}_i$. Selain itu, vektor suku kesalahan akan diganti dengan vektor sisa dan nilai riil variabel terikat Y diganti dengan nilai prediksinya $\hat{Y}$.

Secara keseluruhan, variabel-variabel dari faktor yang tertera di Tabel 3.1 diukur menggunakan Persamaan 3.4 :

$$x_i = \frac{X_1 - X_{io}}{\Delta X_i} \quad (3.4)$$

Dimana x_i adalah nilai kode, X_1 adalah nilai riil, X_{io} nilai riil di tengah bidang dan ΔX_i adalah interval variasi.

Analisis dilakukan setelah menyelesaikan sistem persamaan multivariabel. Permukaan respon merupakan representasi grafis dari persamaan yang didapat untuk menggambarkan efek individual dan kumulatif dari variabel independen terhadap variabel terikat (respon) (Chaker *et al.*, 2021).

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

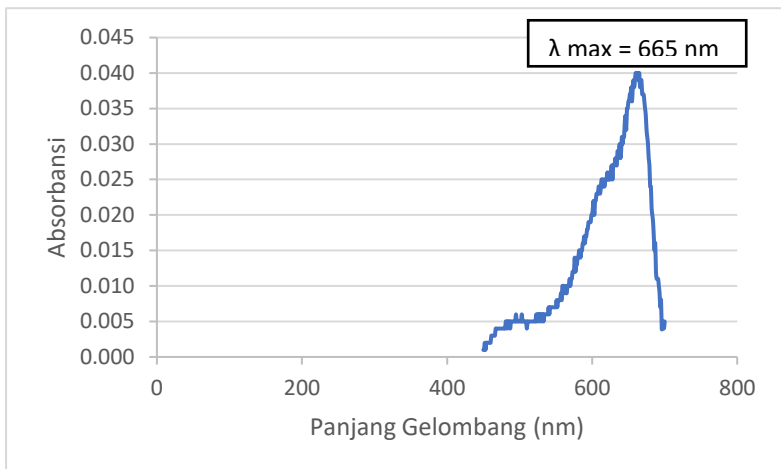
Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kondisi optimum parameter serta interaksi antar parameter dari proses fotokatalisis komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO}$ -Bentonit untuk mendegradasi metilen biru menggunakan metode *Response Surface Methodology* (RSM) - *Central Composite Design* (CCD). Parameter yang digunakan dalam proses fotokatalisis ini yaitu konsentrasi metilen biru (MB), waktu penyinaran dan pH larutan. Parameter tersebut dioptimasi menggunakan *design of experiment* CCD-RSM.

A. Pengukuran Panjang Gelombang Maksimum Metilen Biru

Panjang gelombang optimum MB dilihat dari nilai absorbansi yang maksimal. Panjang gelombang optimum MB ditentukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis dengan rentang panjang gelombang 450-700 nm. Pemilihan rentang panjang gelombang tersebut dikarenakan metilen biru memiliki warna biru yang komplementernya adalah kuning atau oranye. Warna komplementer ini menyerap spektrum cahaya yang berlawanan dengan biru, sehingga cahaya biru yang dipantulkan membuat metilen biru tampak biru bagi yang

melihatnya. Rentang panjang gelombang yang ditetapkan mencakup spektrum cahaya yang diserap oleh warna komplementer biru tersebut (Nitsae et al., 2021).

Panjang gelombang optimum metilen biru pada penelitian ini ada pada 665 nm dengan nilai absorbansi yang didapat yaitu 0,040. Hasil panjang gelombang optimum pada penelitian ini sebanding dengan penelitian-penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa panjang gelombang optimum menggunakan spektrofotometer UV-Vis untuk metilen biru yaitu pada rentang 663-665 nm (Tiandho et al., 2021). Penelitian Amanah (2023) juga membuktikan bahwa panjang gelombang optimum metilen biru ada pada panjang gelombang 665 nm.



Gambar 4. 1 Panjang Gelombang Metilen Biru

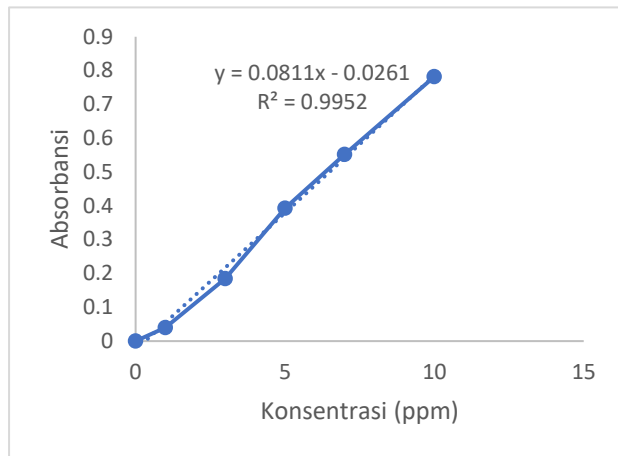
B. Pembuatan Kurva Standar

Pembuatan kurva kalibrasi dalam penelitian ini menggunakan konsentrasi larutan standar metilen biru untuk diukur nilai absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Konsentrasi larutan standar metilen biru yang digunakan adalah 0, 1, 3, 5, 7 dan 10 ppm pada panjang gelombang optimum yang terlihat pada Gambar 4.1 yaitu 665 nm.

Tabel 4. 1 Konsentrasi Larutan Standar Metilen Biru dan Absorbansinya

Konsentrasi (ppm)	Abs
0	0
1	0,04
3	0,185
5	0,393
7	0,552
10	0,782

Hasil yang tertera pada Tabel 4.1 dibuat grafik hubungan antara absorbansi dengan konsentrasi larutan standar MB yang tertera pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Kurva Standar Larutan Metilen Biru

Berdasarkan kurva kalibrasi pada Gambar 4.2, diperoleh persamaan garis lurus $y = mx + c$ yaitu $y = 0,0811x - 0,0261$ dengan koefisien korelasi (R^2) yang didapat yaitu 0,9952. Nilai R^2 tersebut mendekati 1 yang menunjukkan bahwa konsentrasi dan absorbansi terdapat hubungan linier yang baik.

C. Analisis Respon Hasil Degradasi Metilen Biru Menggunakan Komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-Bentonit}$

Metode optimasi untuk parameter fotokatalisis di penelitian ini menggunakan metode *Response Surface Methodology* (RSM) dengan model *Central Composite Design* (CCD). Respon yang akan diamati

dalam penelitian ini merupakan hasil degradasi dari proses fotodegradasi metilen biru menggunakan komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-Bentonit}$ dan terdapat tiga faktor yaitu konsentrasi metilen biru, pH larutan dan waktu penyinaran. Hasil degradasi kemudian diinput ke dalam *software MiniTab* seperti pada Tabel 4.2, selanjutnya respon hasil degradasi dianalisis sehingga akan menghasilkan model dan persamaan matematis yang menunjukkan variasi variabel terbaik untuk mendapatkan respon terbaik.

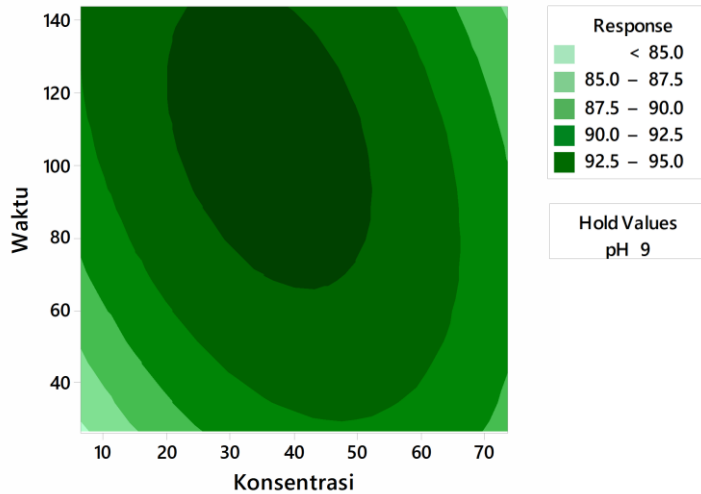
Tabel 4. 2 Data Hasil Degradasi

RunOrder	Konsentrasi (ppm)	pH	Waktu (menit)	Hasil Degradasi (%)
1	20	12	50	94,14
2	40	3,95	85	87,69
3	6,36	9	85	87,77
4	73,63	9	85	93,83
5	60	12	120	84,48
6	60	12	50	87,73
7	40	9	85	95,94
8	40	14,04	85	96,08
9	40	9	85	96,39
10	20	12	120	91,36
11	40	9	85	98,46
12	20	6	120	97,34
13	60	6	120	94,92
14	40	9	85	88,92
15	40	9	85	99,48
16	60	6	50	93,3
17	40	9	26,13	91,15
18	40	9	85	95
19	40	9	143,86	96,11
20	20	6	50	89,08

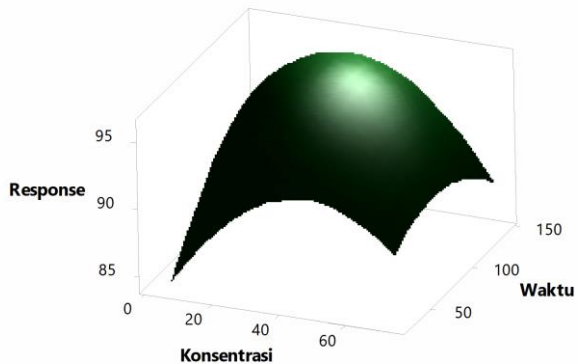
1. Kondisi Optimum dari Faktor-Faktor yang Diuji dalam Fotodegradasi Metilen Biru Menggunakan Komposit Fe_3O_4 -ZnO-Bentonit Melalui Analisis Grafik Permukaan

Penelitian ini menggunakan tiga variabel bebas yaitu konsentrasi metilen biru, pH larutan dan waktu penyinaran untuk menunjukkan interaksi tiga variabel dan pengaruhnya terhadap respon degradasi metilen biru yang akan dijelaskan sesuai gambar *counter plot* dan *3D Surface*. Gambar-gambar ini merupakan hasil optimasi faktor-faktor yang diuji terhadap respon degradasi menggunakan *design of experiment* CCD-RSM yang diolah dari *software MiniTab*.

a) **Grafik Permukaan Konsentrasi Metilen Biru - Waktu Penyinaran vs Respon Degradasi**



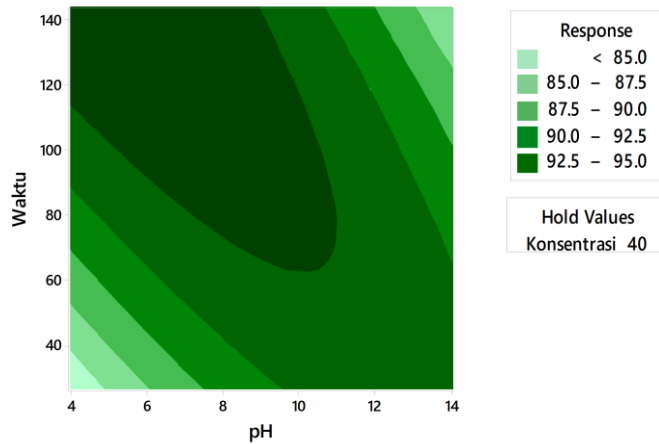
Gambar 4. 3 *Counter Plot* Variabel Faktor Konsentrasi Metilen Biru-Waktu Penyinaran vs Respon Degradasi



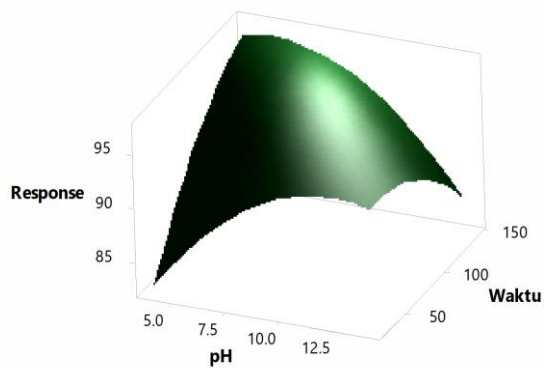
Gambar 4. 4 *3D Surface* Variabel Faktor Konsentrasi Metilen Biru-Waktu Penyinaran vs Respon Degradasi

Berdasarkan Gambar 4.3, plot kontur adalah representasi dua dimensi yang merupakan irisan melintang kurva tiga dimensi. Plot ini berguna untuk menganalisis efek interaksi antar faktor terhadap respon (Amri, 2015). Sementara itu, pada Gambar 4.4 terdapat permukaan 3D yang menunjukkan bentuk parabola, di mana hasil optimasi yang diperoleh menunjukkan hasil minimasi, yaitu nilai pengaruh interaksi antara konsentrasi metilen biru, pH larutan dan waktu penyinaran yang bersifat kuadratik terbalik terhadap respon degradasi metilen biru. Berdasarkan Gambar 4.4 terlihat bahwa seiring dengan peningkatan konsentrasi, respon juga meningkat hingga mencapai puncaknya pada titik tertentu kemudian menurun. Begitu pula dengan waktu, respon meningkat seiring berjalannya waktu hingga mencapai titik optimal, setelah itu mulai menurun. Berdasarkan Gambar 4.3 dan Gambar 4.4, tampak bahwa konsentrasi sekitar 40 ppm memberikan respon maksimum sedangkan pada waktu sekitar 100 menit juga memberikan respon yang maksimum.

b) Grafik Permukaan pH Larutan – Waktu Penyinaran vs Respon Degradasi



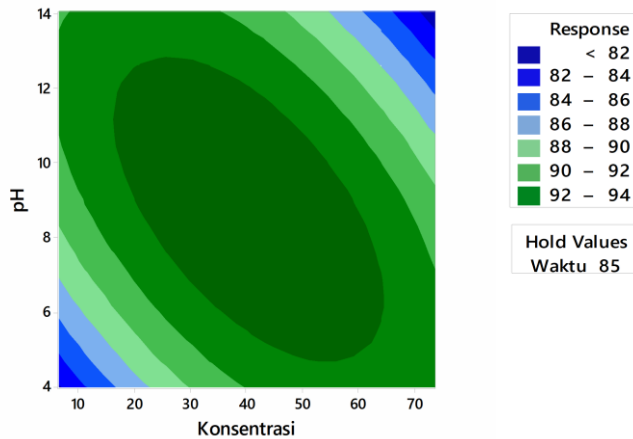
Gambar 4. 5 *Counter Plot* Variabel Faktor pH Larutan-Waktu Penyinaran vs Respon Degradasi



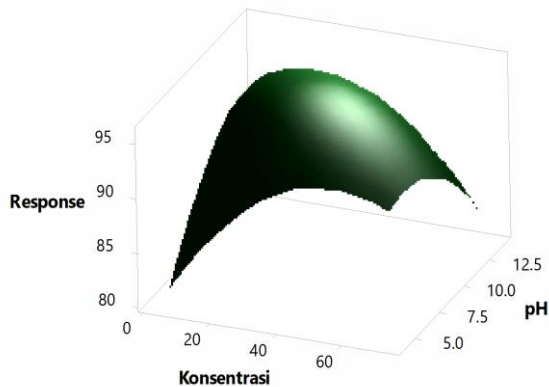
Gambar 4. 6 *3D Surface* Variabel Faktor pH Larutan-Waktu Penyinaran vs Respon Degradasi

Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 merupakan grafik permukaan dari variabel pH larutan dan waktu penyinaran terhadap respon MB. Berdasarkan Gambar 4.6 terlihat bahwa seiring dengan peningkatan pH larutan, respon meningkat hingga puncaknya pada titik tertentu kemudian menurun. Begitu pula dengan waktu, respon meningkat seiring berjalannya waktu hingga mencapai titik optimal, setelah itu menurun. Sehingga dari Gambar 4.5 dan Gambar 4.6, tampak bahwa pH sekitar 9 memberikan respon maksimum dan pada waktu sekitar 100 menit juga memberikan respon maksimum.

c) Grafik Permukaan pH Larutan – Konsentrasi Metilen Biru vs Respon Degradasi



Gambar 4. 7 *Counter Plot* Variabel Faktor pH Larutan-
Konsentrasi Metilen Biru vs Respon Degradasi



Gambar 4. 8 *3D Surface* Variabel Faktor pH Larutan-
Konsentrasi Metilen Biru vs Respon Degradasi

Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 merupakan grafik permukaan dari variabel konsentrasi MB dan pH larutan terhadap respon degradasi MB. Berdasarkan Gambar 4.8 terlihat bahwa seiring dengan peningkatan konsentrasi, respon meningkat hingga mencapai puncaknya pada titik tertentu kemudian menurun. Begitu pula dengan pH larutan, respon meningkat seiring dengan kenaikan pH hingga mencapai titik optimal, setelah itu menurun. Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 menunjukkan bahwa konsentrasi sekitar 40 ppm memberikan respon maksimum sedangkan pH berada di sekitar 9.

Berdasarkan hasil grafik permukaan dari faktor pH larutan, konsentrasi MB dan waktu penyinaran vs respon degradasi didapatkan kondisi optimum untuk pH larutan ; konsentrasi MB ; waktu penyinaran adalah 9 ; 40 ppm ; 100 menit. Hasil penelitian ini konsisten dengan temuan Wahyu dan Dini (2014) tentang penggunaan fotokatalis ZnO-Zeolit untuk mendegradasi zat warna MB dengan variasi pH yaitu 3, 5, 7, 9 dan 11, yang menunjukkan bahwa pH optimum untuk degradasi MB adalah pada pH 9. Pada pH rendah atau dalam lingkungan asam, proses degradasi terhambat karena terlalu banyak ion H^+ . Kelebihan ion

ini membuat permukaan fotokatalisnya menjadi jenuh karena permukaan fotokatalis akan dipenuhi oleh ion-ion tersebut sehingga fotokatalis tidak bisa secara efektif menyerap molekul metilen biru (MB) karena permukaannya sudah jenuh dengan ion H^+ . Ion H^+ yang berlebih juga dapat mengurangi ketersediaan situs aktif bermuatan positif ($Zn-OH_2^+$) pada permukaan fotokatalis, karena ion H^+ akan menetralkan muatan positif yang seharusnya mendukung pembentukan radikal hidroksil. Sebaliknya, pada pH yang lebih tinggi, proses degradasi zat warna menurun karena terlalu banyak radikal hidroksil yang terbentuk dan akan bersaing dengan molekul zat warna untuk bereaksi dengan oksigen reaktif (Soltani *et al.*, 2012).

Konsentrasi optimum pada penelitian ini juga membuktikan bahwa semakin besar konsentrasi metilen biru yang digunakan, maka semakin banyak jumlah molekulnya. Jumlah molekul yang semakin banyak bisa menyebabkan molekul zat warna menutupi permukaan fotokatalis sehingga mengurangi efisiensi degradasi. Konsentrasi zat warna yang semakin tinggi juga bisa mengakibatkan OH radikal yang dihasilkan semakin sedikit karena kurangnya

pembentukan pasangan *electron-hole*. Konsentrasi komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-Bentonit}$ juga menjadi salah satu faktor dari sedikitnya OH radikal yang dihasilkan. Jumlah komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-Bentonit}$ yang digunakan adalah tetap yaitu 0,1 g sehingga kapasitas fotokatalis untuk menghasilkan OH radikal tidak berubah. Oleh karena itu, semakin banyak metilen biru, OH radikal yang dihasilkan mungkin tidak cukup untuk mendegradasi semua molekul zat warna metilen biru (MB) dengan cepat. Molekul metilen biru (MB) mulai bersaing untuk bereaksi dengan OH radikal yang menyebabkan proses degradasi melambat. Hasil tersebut sesuai dengan penelitian Wardhani (2014) yang menunjukkan bahwa konsentrasi metilen biru optimum pada penelitiannya adalah 10 mg/L menggunakan $\text{TiO}_2\text{-zeolit}$. Namun, pada penelitian ini menunjukkan bahwa komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-Bentonit}$ memiliki kapasitas fotokatalitik yang lebih tinggi dibandingkan dengan $\text{TiO}_2\text{-zeolit}$. Hal ini memungkinkan degradasi metilen biru yang lebih efektif pada konsentrasi 40 ppm, karena efek sinergis dari komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-Bentonit}$ mampu menjaga efisiensi fotodegradasi tetap tinggi meskipun ada

kompetisi antar molekul pada konsentrasi yang lebih tinggi.

Waktu optimum pada penelitian ini juga membuktikan pengaruh waktu penyinaran dalam proses fotodegradasi karena waktu penyinaran merupakan lamanya interaksi antara fotokatalis dengan sumber cahaya dalam menghasilkan radikal OH serta mempengaruhi lamanya kontak antara radikal OH dengan limbah zat warna yang didegradasi. Semakin lama waktu penyinaran maka akan meningkatkan kuantitas foton yang dihasilkan. Meningkatnya kuantitas foton yang dihasilkan maka akan menghasilkan radikal OH yang semakin banyak (Wardhani, 2014). Namun, terdapat titik jenuh jika ada peningkatan lebih lanjut dari waktu penyinaran sehingga tidak lagi memberikan peningkatan signifikan dalam laju degradasi karena terbatasnya situs aktif pada permukaan katalis. Pada penelitian ini, waktu optimum 100 menit menunjukkan bahwa komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-Bentonit}$ memiliki keseimbangan yang tepat antara waktu penyinaran dan efisiensi fotokatalitik.

Tabel 4. 3 Data Parameter Hasil Degradasi Metilen Biru

Response		Goal	Lower	Target
Degradasi	Metilen	Maximum	84,48	99,48
Biru				

Software MiniTab juga mengolah data parameter untuk respon degradasi metilen biru yang diinginkan dalam penelitian ini. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.3, respon degradasi metilen biru yang diinginkan adalah degradasi metilen biru yang tinggi. Hal ini dikarenakan, semakin tinggi hasil degradasi metilen biru, maka produk yang dihasilkan semakin baik. Oleh karena itu, dapat ditentukan bahwa tujuan respon degradasi metilen biru adalah *maximum* dengan respon degradasi yang diharapkan paling tidak harus mencapai 84,48% dan target maksimalnya adalah 99,48%.

2. Interaksi Antar Variabel yang Dihasilkan Oleh *Design of Experiment Central Composite Design (CCD)*-*Response Surface Methodology (RSM)*

Interaksi antar variabel terhadap fotodegradasi metilen biru menggunakan komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO}$ -Bentonit dianalisis melalui *software MiniTab* dengan hasil regresi dan ANOVA berikut :

a) Analisis Hasil Regresi Terhadap Respon Degradasi Metilen Biru

Hasil analisis regresi dengan koefisien terkode (*coded coefficients*) memberikan informasi pengaruh setiap variabel bebas terhadap variabel respon. Berikut adalah tabel hasil analisis regresi :

Tabel 4. 4 Hasil Analisis Regresi dengan Koefisien Terkode

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	95,71	1,74	54,93	0	-
Konsentrasi	-0,1	1,16	-0,08	0,936	1
pH	-0,21	1,16	-0,18	0,862	1
Waktu	0,89	1,16	0,77	0,458	1
Konsentrasi*Konsentrasi	-1,80	1,13	-1,60	0,14	1,02
pH*pH	-1,42	1,13	-1,26	0,235	1,02
Waktu*Waktu	-0,8	1,13	-0,71	0,491	1,02
Konsentrasi*pH	-1,89	1,51	-1,25	0,24	1
Konsentrasi*Waktu	-0,89	1,51	-0,59	0,569	1
pH*Waktu	-1,99	1,51	-1,32	0,217	1

Keterangan:

SE coef: *Standard Error* dari koefisien, mengukur ketidakpastian estimasi

VIF: *Variance Inflation Factor*, mengukur multikolinearitas, $VIF > 10$ menunjukkan masalah multikolinearitas

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 4.4, tidak ada variabel bebas atau interaksi antar variabel bebas secara signifikan mempengaruhi variabel respon karena semua *p-value* $> 0,05$. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan dalam konsentrasi metilen biru, pH larutan dan waktu penyinaran, baik secara individu maupun dalam interaksi tidak memberikan hasil yang signifikan terhadap variabel respon. Nilai VIF yang semuanya mendekati 1 menunjukkan bahwa tidak ada masalah multikolinieritas dalam model ini. Hal ini

berarti bahwa variabel-variabel bebas yang termasuk dalam model tidak saling berkorelasi secara signifikan, dan setiap variabel bebas dapat diinterpretasikan secara independen tanpa mempengaruhi atau dipengaruhi oleh variabel bebas lainnya. Maka dari itu, hasil analisis regresi yang dihasilkan dapat diandalkan dan koefisien yang diestimasi untuk setiap variabel bebas tidak terdistorsi oleh hubungan linier dengan variabel bebas lainnya.

Pada analisis regresi, persamaan regresi dalam unit asli (*uncoded units*) memberikan pemahaman yang jelas mengenai bagaimana setiap variabel bebas mempengaruhi variabel respon. Persamaan ini menunjukkan hubungan kuantitatif antara variabel-variabel tersebut dan persamaan ini sesuai dengan Persamaan 3.3.

Persamaan regresi umum:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^K \beta_i x_i + \sum_{i=1}^K \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=2}^K \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

Persamaan spesifik yang dihasilkan dari analisis regresi untuk respon yaitu:

$$\begin{aligned}
 \text{Response} = & 39,5 + 0,747 A + 5,64 B + 0,358 C - \\
 & 0,00451 A^2 - 0,158 B^2 - 0,000656 C^2 - \\
 & 0,0314 AB - 0,00127 AC - 0,0189 BC
 \end{aligned}$$

Keterangan :

A = konsentrasi metilen biru

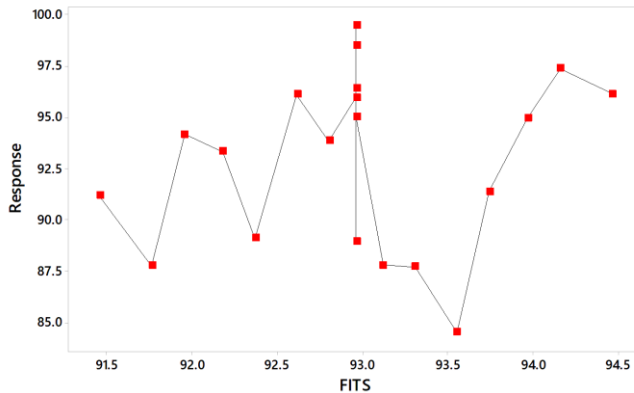
B = pH larutan

C = Waktu penyinaran

Persamaan regresi ini memberikan gambaran tentang bagaimana setiap variabel bebas yaitu konsentrasi metilen biru, pH larutan dan waktu penyinaran serta interaksi dan efek kuadratik mempengaruhi variabel respon. Konstanta (β_0) dalam persamaan regresi merupakan nilai awal respon ketika semua variabel bebas bernilai nol. Konstanta (β_0) dalam persamaan regresi sebesar 39,5. Koefisien linier menunjukkan pengaruh langsung dari setiap variabel terhadap respon. Nilai koefisien linier (β_i) untuk konsentrasi = 0,747 ; pH = 5,64 ; waktu = 0,358. Setiap peningkatan satu unit dalam variabel bebas tersebut maka akan meningkatkan respon sebesar nilai β_i yang dihasilkan, dengan asumsi variabel lain tetap konstan. Koefisien kuadratik (β_{ii}) mengindikasikan bahwa pengaruh variabel tersebut terhadap respon tidak linier, tetapi berubah berdasarkan tingkat variabel itu

sendiri. Nilai β_{ii} untuk konsentrasi (A^2) = -0,00451 ; pH (B^2) = -0,158 ; waktu (C^2) = -0,000656. Koefisien-koefisien tersebut menunjukkan adanya efek kuadratik dari konsentrasi metilen biru, pH larutan dan waktu penyinaran. Efek ini mengindikasikan bahwa peningkatan variabel bebas memiliki efek non-linier terhadap respon, dimana pengaruhnya menurun seiring dengan peningkatan variabel bebas.

Koefisien interaksi (β_{ij}) menunjukkan bagaimana kombinasi dari dua variabel bebas dapat mempengaruhi respon secara simultan. Nilai koefisien interaksi dua arah untuk konsentrasi*pH (AB) = -0,0314 ; konsentrasi*waktu (AC) = -0,00127 ; pH*waktu (BC) = -0,0189. Nilai koefisien interaksi tersebut mempengaruhi respon. Tidak adanya masalah multikolinieritas dalam model ini memastikan bahwa koefisien yang diestimasi ini stabil dan dapat diinterpretasikan dengan lebih baik. Meskipun beberapa koefisien mungkin tidak signifikan secara statistik, tetapi tetap memberikan wawasan penting tentang hubungan kompleks antara variabel bebas dan respon.



Gambar 4. 9 Grafik Perbandingan Nilai Aktual (Response) dan Nilai Prediksi (FITS)

Gambar 4.9 merupakan perbandingan antara nilai aktual dan nilai prediksi dari respon degradasi metilen biru. Grafik pada Gambar 4.9 menampilkan sebaran nilai aktual terhadap nilai prediksi. Titik-titik pada *scatter plot* tersebut mewakili pasangan nilai aktual dan nilai prediksi untuk setiap observasi. Titik-titik yang terlihat pada kurva tersebut tersebar acak dan tidak membentuk pola linier yang jelas, yang mungkin menunjukkan bahwa ada variasi yang signifikan antara nilai aktual dan prediksi. Hal ini menunjukkan bahwa model prediksi tidak akurat dalam memprediksi nilai aktual, atau ada faktor-faktor lain yang mempengaruhi respon yang tidak diperhitungkan dalam model.

Tabel 4. 5 Analisis Regresi

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4,27184	45,31%	0,00%	0,00%

Keterangan:

S: *Standard error of the regression*, menunjukkan seberapa jauh data menyebar dari garis regresi

R-sq: Koefisien determinasi, menunjukkan persentase variasi dalam variabel dependen yang dijelaskan oleh model

R-sq (adj): *R-squared* yang telah disesuaikan untuk jumlah variabel dalam model

R-sq (pred): *R-squared* prediktif, mengukur seberapa baik model memprediksi data baru

Pada Tabel 4.5 merupakan analisis regresi untuk mengkaji pengaruh konsentrasi metilen biru, pH larutan dan waktu penyinaran terhadap hasil degradasi metilen biru. Nilai S sebesar 4,27184 menunjukkan tingkat kesalahan dalam model regresi. Nilai S yang lebih rendah biasanya menunjukkan model yang lebih baik dalam mendekati data. *R-squared* yang dihasilkan sebesar 45,31% yang menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan 45,31% variabilitas dalam data degradasi metilen biru. Hal ini berarti bahwa ada faktor-faktor lain di luar model yang mempengaruhi hasil degradasi. *Adjusted R-squared* dan *predicted R-squared* masing-masing menunjukkan nilai sebesar 0,00% yang berarti model kurang relevan untuk

menjelaskan variabilitas hasil degradasi dan kurang efektif dalam memprediksi hasil degradasi metilen biru. Faktor lain yang tidak dimasukkan dalam model mungkin memiliki pengaruh lebih besar terhadap hasil degradasi sehingga dibutuhkan penelitian lebih lanjut untuk mengidentifikasi faktor-faktor tersebut dan memperbaiki model regresi yang digunakan.

Berdasarkan analisis regresi, fotodegradasi metilen biru dengan komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-Bentonit}$ dapat diketahui bahwa variabel bebas secara independen lebih berpengaruh dibanding antar variabel. Hal ini berarti konsentrasi metilen biru, pH larutan dan waktu penyinaran bersifat independen atau masing-masing variabel tersebut tidak mempengaruhi satu sama lain.

b) Analisis Hasil ANOVA Terhadap Respon Degradasi Metilen Biru

Tujuan ANOVA dalam penelitian ini adalah untuk mengetahui interaksi antara variabel-variabel seperti konsentrasi metilen biru, pH larutan dan waktu penyinaran. Keputusan dalam analisis ANOVA dibuat melalui pengujian hipotesis, yaitu hipotesis nol (H_0) dan hipotesis alternatif (H_1). H_0 menyatakan bahwa

tidak ada perbedaan antara variabel-variabel yang diuji, yaitu bahwa variasi pada konsentrasi metilen biru, pH dan waktu penyinaran tidak mempengaruhi hasil degradasi metilen biru. Rumusan H_0 adalah $H_0; \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$, di mana nilai μ adalah variabel independen yang digunakan. Sebaliknya, H_1 menyatakan bahwa ada perbedaan antara variabel-variabel tersebut, dengan rumusan $H_1; \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$. Artinya, variabel-variabel independen berpengaruh pada hasil degradasi metilen biru (Lolang, 2014). Keputusan diambil berdasarkan nilai tingkat signifikansi (α) sebesar 5%. Jika *p-value* yang dihasilkan kurang dari 5% maka H_0 ditolak dan H_1 diterima, yang berarti ada pengaruh signifikan. Namun, jika *p-value* lebih dari 5%, H_0 diterima dan H_1 ditolak, yang berarti tidak ada pengaruh signifikan (Payadnya dan Jayantika, 2018).

Tabel 4. 6 Hasil ANOVA Degradasi Metilen Biru pada Software MiniTab

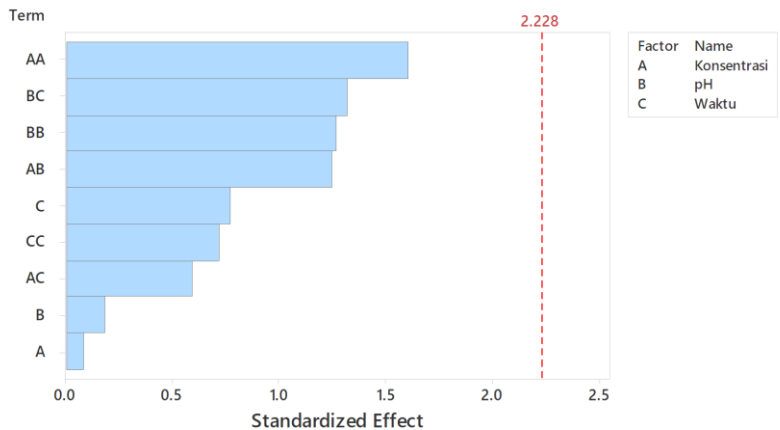
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	151,214	16,8015	0,92	0,545
Linear	3	11,589	3,8631	0,21	0,886
Konsentrasi	1	0,123	0,1234	0,01	0,936
pH	1	0,582	0,5822	0,03	0,862
Waktu	1	10,884	10,8837	0,6	0,458
Square	3	73,201	24,4003	1,34	0,317
	1	46,914	46,914	2,57	0,14
Konsentrasi*Konsentrasi					
pH*pH	1	29,086	29,0858	1,59	0,235
Waktu*Waktu	1	9,309	9,3089	0,51	0,491
2-Way Interaction	3	66,424	22,1412	1,21	0,355
Konsentrasi*pH	1	28,464	28,4635	1,56	0,24
Konsentrasi*Waktu	1	6,319	6,319	0,35	0,569
pH*Waktu	1	31,641	31,641	1,73	0,217
Error	10	182,486	18,2486		
Lack-of-Fit	5	113,588	22,7175	1,65	0,298
Pure Error	5	68,898	13,7796		
Total	19	333,699			

Berdasarkan Tabel 4.6 *software MiniTab* menunjukkan hasil ANOVA dari hasil degradasi metilen biru. Berdasarkan model regresi terdapat 3 df (*degree of freedom*/derajat bebas) karena jumlah faktor yang diteliti dalam penelitian ini adalah 3. Pemilihan model berdasarkan nilai tertinggi derajat polinomial (orde 1), apabila *p-value* kurang dari 5% maka model akan diterima. Hasil *sequential model sum of square* pada Tabel 4.6 untuk model linier memiliki bentuk persamaan $y = \beta_0 + \beta_{1 \times 1} + \beta_{2 \times 2}$. Berdasarkan Tabel

4.6 yang diolah menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) model *Central Composite Design* (CCD) pada *software Minitab*, *p-value* model linier diperoleh sebesar 0,886 (88,6%), sehingga model linier dinyatakan tidak signifikan untuk menentukan hasil degradasi metilen biru. Sedangkan persamaan untuk model 2FI (Interaksi antara 2 faktor) yaitu $y = \beta_0 + \beta_{1 \times 1} + \beta_{2 \times 2} + \beta_{3 \times 1 \times 2}$. Model 2FI pada Tabel 4.6 menunjukkan *p-value* sebesar 0,355 (35,5%), sehingga model 2FI dinyatakan tidak signifikan untuk menentukan hasil degradasi metilen biru.

Bentuk persamaan untuk model *quadratic* yaitu $y = \beta_0 + \beta_{1 \times 1} + \beta_{2 \times 2} + \beta_{3 \times 1}^2 + \beta_{4 \times 1}^2$. *P-value* yang diperoleh dari model ini sebesar 0,317 (31,7%), sehingga model *quadratic* dinyatakan tidak signifikan untuk menentukan hasil degradasi metilen biru. Berdasarkan *p-value* yang ditunjukkan oleh hasil olah data RSM-CCD untuk hasil degradasi metilen biru, tidak ada model yang signifikan untuk menentukan hasil degradasi metilen biru. Hasil *lack-of-fit* juga menunjukkan *p-value* sebesar 0,298 dimana nilai tersebut tidak signifikan. Meskipun model tidak signifikan secara keseluruhan, model tersebut cukup baik dalam menjelaskan variabilitas data yang ada,

karena tidak ada bukti signifikan bahwa model tersebut tidak sesuai dengan data.



Gambar 4. 10 Grafik Pareto dari Variasi Faktor Percobaan Terhadap Respon

Gambar 4.10 merupakan grafik Pareto yang menunjukkan efek terstandarisasi dari faktor-faktor percobaan terhadap respon yang diukur atau hasil degradasi. Sumbu horizontal (*standardized effect*) menunjukkan nilai efek terstandarisasi dari setiap faktor atau interaksi faktor sedangkan garis merah vertikal (*critical value*) merupakan garis yang mewakili nilai kritis ($\alpha = 0,05$). Efek yang melampaui garis ini dianggap signifikan pada tingkat signifikansi 5%. Grafik tersebut juga menunjukkan bahwa tidak ada faktor atau interaksi faktor yang memiliki efek

signifikan terhadap respon degradasi pada tingkat signifikansi 5%. Hal ini berarti variasi dalam konsentrasi metilen biru, pH larutan dan waktu penyinaran tidak memberikan perubahan signifikan terhadap hasil degradasi dalam kondisi eksperimen ini.

Hasil ANOVA ini selaras dengan hasil regresi yang menunjukkan bahwa efek interaksi antar parameter (konsentrasi metilen biru, pH larutan dan waktu penyinaran) tidak terlalu signifikan terhadap respon degradasi karena *range* hasil respon degradasi yang terlalu kecil sehingga tidak cukup besar untuk dideteksi secara statistik. Maka dari itu, diperlukan rentang variasi yang lebih besar dari faktor-faktor yang diuji untuk mencapai signifikansi statistik. Namun, rentang variasi untuk faktor konsentrasi metilen biru, pH larutan dan waktu penyinaran memiliki keterbatasan variasi karena pengaruh-pengaruh yang diberikan oleh faktor-faktor tersebut dalam proses fotodegradasi. Meskipun interaksi antar parameter yang digunakan dalam penelitian ini tidak signifikan, namun ada beberapa faktor yang bisa diuji dalam proses fotodegradasi pada penelitian ini selain konsentrasi metilen biru, pH larutan dan waktu penyinaran. Faktor-faktor yang bisa diuji yaitu

temperatur, konsentrasi komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO}$ -bentonit, jarak sumber cahaya ke reaktor fotokatalitik, serta variasi perbandingan antara Fe_3O_4 , ZnO dan bentonit atau faktor-faktor lainnya (Din *et al.*, 2021 ; Isai dan Shrivastava 2019 ; Asadah *et al.*, 2022 ; Priatmoko dan Wahyuni, 2021).

Berdasarkan hasil persamaan regresi, *counter plot* dan 3D *surface* dari variabel konsentrasi, pH dan waktu, serta analisis ANOVA didapatkan solusi optimal untuk degradasi metilen biru menggunakan komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO}$ -bentonit.

Tabel 4. 7 Solusi Optimal dari Data Hasil Degradasi Metilen Biru dalam Software MiniTab

Solution	Konsentrasi (ppm)	pH	Waktu (menit)	Response Fit	Composite Desirability
1	46,4554	4,56618	143,863	97,2815	0,853432

Solusi optimal atau titik optimum dengan hasil degradasi terbaik yang diperoleh yaitu kombinasi konsentrasi metilen biru sebesar 46,4554; pH sebesar 4,56618 dan waktu selama 143,863 dengan hasil degradasi metilen biru adalah 97,2815% dan nilai *desirability* sebesar 0,853432 sehingga dapat dikatakan bahwa mempunyai tingkat ketepatan sebesar 85,34%. Fungsi nilai *desirability* berguna untuk

menentukan ketepatan hasil solusi optimal. Menurut Lauce *et al.* (2009), nilai *desirability* 1 mengindikasikan respon yang sempurna dan jika nilai *desirability* 0 mengindikasikan respon harus dibuang. Nilai *desirability* 0,853432 menunjukkan bahwa solusi atau respon yang dihasilkan cukup dekat dengan kondisi yang diinginkan atau optimal meskipun tidak sempurna. Penelitian Juliantoni dan Wirasisya (2019) dalam optimasi formula obat kumur didapatkan nilai *desirability* yang tinggi yaitu 0,853 dan nilai *desirability* yang rendah adalah 0,2. Sementara itu, penelitian Putranto *et al.* (2022) dalam optimasi waktu pasteurisasi menunjukkan nilai *desirability* sebesar 0,614 dari hasil optimasi yang direkomendasikan berdasarkan analisis RSM-CCD.

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil Kesimpulan sebagai berikut:

1. Kondisi optimum fotodegradasi metilen biru dengan komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO-bentonit}$ dalam penelitian ini yaitu pH larutan 9, konsentrasi metilen biru 40 ppm dan waktu penyinaran 100 menit.
2. Berdasarkan hasil analisis regresi dan ANOVA, tidak ada variabel bebas atau interaksi antar variabel bebas yang secara signifikan mempengaruhi variabel respon, karena semua *p-value* > 0,05. Model linier memiliki *p-value* sebesar 0,886 (88,6%), model 2FI (interaksi dua faktor) memiliki *p-value* sebesar 0,355 (35,5%) dan model kuadratik memiliki *p-value* sebesar 0,317 (31,7%). Hasil *lack-of-fit* juga menunjukkan *p-value* sebesar 0,298 yang tidak signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa variasi dalam konsentrasi metilen biru, pH larutan dan waktu penyinaran tidak memberikan perubahan signifikan terhadap hasil degradasi dalam kondisi eksperimen ini. Nilai VIF yang mendekati 1 menunjukkan tidak

adanya masalah multikolinieritas dalam model yang berarti variabel-variabel bebas dalam model tidak berkorelasi signifikan satu sama lain dan setiap variabel bebas dapat diinterpretasikan secara independen tanpa saling mempengaruhi. Solusi optimal yang diberikan *software MiniTab* setelah mengolah data hasil respon degradasi metilen biru yaitu kombinasi antara pH sebesar 4,56618; konsentrasi metilen biru sebesar 46,4554 dan waktu selama 143,863 dengan hasil degradasi metilen biru yang akan didapat adalah 97,2815%.

B. Saran

Hasil analisis regresi dan ANOVA menunjukkan bahwa efek interaksi antar parameter (konsentrasi metilen biru, pH larutan dan waktu penyinaran) tidak terlalu signifikan terhadap respon degradasi karena range hasil respon degradasi yang terlalu kecil untuk dideteksi secara statistik. Oleh karena itu, diperlukan rentang variasi yang lebih besar dari faktor-faktor yang diuji untuk mencapai signifikansi statistik.

Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu perlunya mengidentifikasi faktor-faktor lain yang mempengaruhi hasil degradasi dan memperbaiki model regresi yang digunakan. Faktor-faktor lain yang

dapat diuji dalam proses fotodegradasi selain konsentrasi metilen biru, pH larutan dan waktu penyinaran meliputi temperatur, konsentrasi komposit Fe_3O_4 -ZnO-bentonit, jarak sumber cahaya ke reaktor fotokatalitik, penggunaan aditif atau senyawa pengompleksan tertentu serta variasi perbandingan antara Fe_3O_4 , ZnO dan bentonit.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbasi, A., Abushad, M., Khan, A., Bhat, Z. ul H., Hanif, S., & Shakir, M. 2023. *Bare undoped nontoxic carbon dots as a visible light photocatalyst for the degradation of methylene blue and congo red*. *Carbon Trends*. Diunduh di <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2022.100238> tanggal 10 November 2023.
- Adnan, F., Hidayat, R. K., & Meicahayanti, I. 2022. Pengaruh pH, UV dan TiO₂ untuk mendegradasi variasi asam humat berbasis fotokatalis. *Jurnal Teknologi Lingkungan*. 5(2): 9–16.
- Adzra, Z., Hadisantoso, E. P., & Setiadji, S. 2022. Pengaruh konsentrasi prekursor, konsentrasi agen pengendap, kecepatan, dan waktu pengadukan pada sintesis ZnO nanopartikel dan aplikasinya untuk penanganan metilen biru secara fotokatalisis. *Gunung Djati Conference Series*. 7: 109–117.
- Agung Rachmanto, T., & Pebritama, E. 2021. Degradasi limbah tahu dengan koagulasi flokulasi alumunium sulfat dan fotokatalis TiO₂ dalam tangki berpengaduk. *EnviroUS*. 2(1): 56–60.
- Amanah, S. N. 2023. *Sintesis komposit Fe₃O₄-ZnO-Bentonit dan aktivitasnya dalam fotodegradasi metilen biru*. Skripsi. Semarang: Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Walisongo Semarang.
- Amirvaresi, A., Rashidi, M., Kamyar, M., Amirahmadi, M., Daraei, B., & Parastar, H. 2020. Combining multivariate image analysis with high-performance thin-layer chromatography for development of a reliable tool for saffron authentication and adulteration detection. *Journal of Chromatography A*. 1628: 461461.

- Arisky, T. N. 2022. *Perbandingan degradasi methylene blue (mb) dan methyl orange (mo) menggunakan titanium dioksida (TiO₂) terlapis pada permukaan semen*. Skripsi. Yogyakarta: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Islam Negeri Yogyakarta.
- Asadah, E., Hadisantoso, E. P., & Setiadj, S. 2022. Pengaruh suhu kalsinasi terhadap sintesis kadmium sulfida (Cds) menggunakan metode presipitasi untuk penanganan metilen biru secara fotokatalisis. *Gunung Djati Conference Series*. 7: 60–69.
- Atalan, Y. A., Tayanç, M., Erkan, K., & Atalan, A. 2020. Development of nonlinear optimization models for wind power plants using box-behnken design of experiment: a case study for turkey. *Sustainability (Switzerland)*. 12(15): 6017.
- Aydar, A. Y. 2018. Utilization of response surface methodology in optimization of extraction of plant materials. *Statistical Approaches With Emphasis on Design of Experiments Applied to Chemical Processes*. 10: 158-169.
- Aydar, A. Y., Bağdathoğlu, N., & Köseoğlu, O. 2017. Effect of ultrasound on olive oil extraction and optimization of ultrasound-assisted extraction of extra virgin olive oil by response surface methodology (rsm); efecto del ultrasonido en la extracción de aceite de oliva y optimización de la extracción as. *Grasas Aceites*. 68(189): 17–3495.
- Baker, T. B., Baker, T. B., Smith, S. S., Smith, S. S., Bolt, D. M., Loh, W. Y., Mermelstein, R., Collins, L. M., Piper, M. E., Fiore, M. C., Piper, M. E., & Collins, L. M. 2017. Implementing clinical research using factorial designs: a primer. *Behavior Therapy*. 48(4): 567–580.
- Baunsele, A. B., & Missa, H. 2020. Kajian kinetika adsorpsi

metilen biru menggunakan adsorben sabut kelapa. *Akta Kimia Indonesia*. 5(2): 76.

- Bevilacqua, A., Corbo, M. R., & Sinigaglia, M. 2010. Design of experiments : a powerful tool in food microbiology design of experiments : a powerful tool in food microbiology. *Current Research, Technology and Education Topics in Applied Microbiology and Microbial Biotechnology*. 14: 1419–1429.
- Bhowmik, M., Deb, K., Debnath, A., & Saha, B. 2018. Mixed phase $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Mn}_3\text{O}_4$ magnetic nanocomposite for enhanced adsorption of methyl orange dye: neural network modeling and response surface methodology optimization. *Applied Organometallic Chemistry*. 32(3): 1–17.
- Chaker, H., Attar, A. E., Djennas, M., & Fourmentin, S. 2021. A statistical modeling-optimization approach for efficiency photocatalytic degradation of textile azo dye using cerium-doped mesoporous zno: a central composite design in response surface methodology. *Chemical Engineering Research and Design*. 171: 198–212.
- Chakrabarti, S., & Dutta, B. K. 2004. Photocatalytic degradation of model textile dyes in wastewater using ZnO as semiconductor catalyst. *Journal of Hazardous Materials*. 112(3): 269–278.
- Chen, C. T., & Tan, W. L. 2012. Mathematical modeling, optimal design and control of an SCR reactor for NO_x removal. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 43(3): 409–419.
- Dardouri, S., & Sghaier, J. 2017. Adsorptive removal of methylene blue from aqueous solution using different agricultural wastes as adsorbents. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 34(4): 1037–1043.

- Diego-lopez, A., Cabezuelo, O., Vidal-moya, A., Marin, M. L., & Bosca, F. 2023. Synthesis and mechanistic insights of $\text{SiO}_2@\text{WO}_3@\text{Fe}_3\text{O}_4$ as a novel supported photocatalyst for wastewater remediation under visible light. *Applied Materials Today*. 33: 101879.
- Din, M. I., Khalid, R., Najeeb, J., & Hussain, Z. 2021. Fundamentals and photocatalysis of methylene blue dye using various nanocatalytic assemblies- a critical review. *Journal of Cleaner Production*. 298: 126567.
- Dony, N., Azis, H., & Syukri. 2013. *Studi fotodegradasi biru metilen di bawah sinar matahari oleh ZnO-SnO_2 yang dibuat dengan metoda solid state reaction*. Prosiding Semirata FMIPA Universitas Lampung.
- Farooq, Z., Rehman, S. U., & Abid, M. 2013. Application of response surface methodology to optimize composite flour for the production and enhanced storability of leavened flat bread (naan). *Journal of Food Processing and Preservation*. 37(5): 939–945.
- Fatimah, I., & Wijaya, K. 2005. Sintesis TiO_2 /Zeolit sebagai fotokatalis pada pengolahan limbah cair industri tapioka secara adsorpsi-fotodegradasi. *Teknoin*. 10(4): 257–267.
- Faulina, R. . A. . S. & A. D. 2011. *Response surface and methodology (RSM) dan aplikasinya*. Skripsi. Surabaya: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Fouda, A., Salem, S. S., Wassel, A. R., Hamza, M. F., & Shaheen, T. I. 2020. Optimization of green biosynthesized visible light active CuO/ZnO nano-photocatalysts for the degradation of organic methylene blue dye. *Heliyon*. 6(9): e04896.
- Franceschini, G., & Macchietto, S. 2008. Model-based design of experiments for parameter precision: state of the art. *Chemical Engineering Science*. 63(19): 4846–4872.

- Habib, M. A., Shahadat, M. T., Bahadur, N. M., Ismail, I. M. I., & Mahmood, A. J. 2013. Synthesis and characterization of ZnO-TiO₂ nanocomposites and their application as photocatalysts. *International Nano Letters*. 3(1): 1–8.
- Hamu, G. V., Gauru, I., & Kadang, L. 2019. Pemanfaatan arang aktif tempurung kemiri (aleurites moluccana l. willd) sebagai adsorben zat warna naphtol. *Chem, Notes*. 1(2): 12–23.
- Handayani, T. 2021. *Pembuatan komposit Fe₃O₄ terimobilisasi dari abu daun bambu dan uji aktivitas fotokatalisis pada degradasi metil violet*. Skripsi. Yogyakarta: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Universitas Islam Indonesia Yogyakarta.
- Hardian, A., Putri, R. H., Budiman, S., & Syarif, D. G. 2021. Sintesis keramik komposit ZrO₂-ZnFe₂O₄ sebagai fotokatalis magnetik untuk degradasi metilen biru. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*. 17(1): 43.
- Huang, C. Y., Tai, K. L., Huang, C. W., Tseng, Y. T., Lo, H. Y., & Wu, W. W. 2020. Dynamic observation on the functional metal oxide conversion behaviors in Fe₃O₄/ZnO heterostructures. *Scripta Materiali*, 177: 192–197.
- Ihsan, D. M. 2022. *Optimasi delignifikasi tandan kosong kelapa sawit menggunakan batch lab-scale dan ekstruksi pada reaktor kontinu untuk produksi bioetanol*. Skripsi. Jakarta: Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta.
- Indah, D. R. 2022. Adsorpsi metilen biru menggunakan karbon baggase tanpa aktivasi. *Jurnal Ilmiah IKIP Mataram*. 9(1): 50–58.
- Isai, K. A., & Shrivastava, V. S. 2019. Photocatalytic degradation of methylene blue using ZnO and 2%Fe-ZnO semiconductor nanomaterials synthesized by sol-gel

- method: a comparative study. *SN Applied Sciences*. 1(10): 1–11.
- Jaynes, J., Ding, X., Xu, H., Wong, W. K., & Ho, C. M. 2013. Application of fractional factorial designs to study drug combinations. *Statistics in Medicine*. 32(2): 307–318.
- Juliantoni, Y., & Wirasisya, D. G. 2019. Optimasi formula obat kumur ekstrak herba ashitaba (*angelica keiskei*) sebagai antibakteri karies gigi. *Kartika : Jurnal Ilmiah Farmasi*. 6(1): 40.
- Khodaie, M., Ghasemi, N., Moradi, B., & Rahimi, M. 2013. Removal of methylene blue from wastewater by adsorption onto ZnCl₂ activated corn husk carbon equilibrium studies. *Journal of Chemistry*. 2013: 383985.
- Khodamorady, M., & Bahrami, K. 2023. Fe₃O₄@BNPs@ZnO–ZnS as a novel, reusable and efficient photocatalyst for dye removal from synthetic and textile wastewaters. *Heliyon*. 9(6): e16397.
- Kim, J. T., Cha, D. S., Lee, G. D., Park, T. W., Kwon, D. K., & Park, H. J. 2002. Process optimization of sweet potato pulp-based biodegradable plastics using response surface methodology. *Journal of Applied Polymer Science*. 83(2): 423–434.
- Knight, K. L. 2010. Study/experimental/research design: much more than statistics. *Journal of Athletic Training*. 45(1): 98–100.
- Komariah, K., Setyaningtyas, T., Riyani, K., Kimia, J., Soedirman, J., & Profesor, J. 2022. Kimia et natura acta pengaruh penambahan H₂O₂ dan variasi massa Fe₃O₄-Kitosan beads dalam mendegradasi zat warna methylene blue di bawah sinar UV. 10(1): 26–32.
- Krishna Moorthy, A., Govindarajan Rathi, B., Shukla, S. P.,

- Kumar, K., & Shree Bharti, V. 2021. Acute toxicity of textile dye methylene blue on growth and metabolism of selected freshwater microalgae. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. 82: 103552.
- Latha, S., Sivaranjani, G., & Dhanasekaran, D. 2017. Response surface methodology: a non-conventional statistical tool to maximize the throughput of streptomyces species biomass and their bioactive metabolites. *Critical Reviews in Microbiology*. 43(5): 567–582.
- Lin, Y., Ferronato, C., Deng, N., Wu, F., & Chovelon, J. M. 2009. Photocatalytic degradation of methylparaben by TiO_2 : multivariable experimental design and mechanism. *Applied Catalysis B: Environmental*. 88(1–2): 32–41.
- Lolang, En. 2014. Hipotesis Nol Dan Hipotesis Alternatif. *Jurnal Kip*. 3(3): 685–696.
- Masoomah Rahimi, S., Hossein Panahi, A., Sadat Mazari moghaddam, N., Allahyari, E., & Nasseh, N. 2022. Breaking down of low-biodegradation acid red 206 dye using bentonite/ Fe_3O_4 /Zno magnetic nanocomposite as a novel photo-catalyst in presence of UV light. *Chemical Physics Letters*. 794: 139480.
- Maulana, R. A., Hadisantoso, E. P., Wijayanti, R. B., Arifiadi, F., & Wahyudi, K. 2022. Sintesis nanopartikel Mg-Co Fe_3O_4 dari limbah industri ubin keramik sebagai material fotokatalis. *Gunung Djati Conference Series*. 15: 16–22.
- Mohammadi, M., Sabbaghi, S., Binazadeh, M., Ghaedi, S., & Rajabi, H. 2023. Type-1 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ photocatalytic degradation of tetracycline from wastewater using CCD-based RSM optimization. *Chemosphere*. 336: 139311.
- Naimah, S., A., S. A., Jati, B. N., Aidha, N. N., & Cahyaningtyas, A. A. 2014. Degradasi zat warna pada limbah cair industri tekstil dengan metode fotokatalitik menggunakan

- nanokomposit TiO_2 – zeolit. *Jurnal Kimia Dan Kemasan*. 36(2): 225.
- Nitsae, M., Solle, H. R. L., Martinus, S. M., & Emola, I. J. 2021. Studi adsorpsi methylene blue terhadap arang aktif tempurung lontar (*borassus flabellifer* l.) asal nusa tenggara timur. *Jurnal Kimia Riset*. 6(1): 46.
- Nyamukamba, P., Tichagwa, L., Mamphweli, S., & Petrik, L. 2017. Silver/carbon codoped titanium dioxide photocatalyst for improved dye degradation under visible light. *International Journal of Photoenergy*. 2017: 3079276.
- P. A. Pramudya, A. S. Fahmi, L. R. 2022. Optimasi suhu dan waktu pengeringan nori berbahan baku ulva lactuca dan gelidium sp. dengan penambahan perisa bubuk kepala udang menggunakan response surface methodology. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Perikanan*. 4(2): 100–110.
- Pereira, L. M. S., Milan, T. M., & Tapia-Blácido, D. R. 2021. Using response surface methodology (RSM) to optimize 2g bioethanol production: a review. *Biomass and Bioenergy*, 151: 106166.
- Pradipta, A. R., Enriyani, R., Rahmatia, L., & Utami, A. 2021. Sintesis nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ sebagai fotokatalis yang dapat diambil kembali dalam fotoreduksi limbah ion perak(i). *Warta Akab*. 44(2): 32–39.
- Priatmoko, S., & Wahyuni, S. 2021. Fotokatalis Ni-N-TiO₂ untuk degradasi metilen biru. *Inovasi Sains Dan Kesehatan*. 5: 120–165.
- Putranto, A. W., Priyanto, A. D., Estiasih, T., Widyasari, W., & Munarko, H. 2022. Optimasi waktu α -pre-heating dan waktu pulsed electric field terhadap total mikroba dan sifat fisik susu. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Pertanian Dan Biosistem*. 10(1): 39–48.

- Rahmayanti, D., Manurung, P., & Marjunus, R. 2023. Perbandingan aktifitas fotokatalis nanotitania tanpa dan dengan penambahan etanolamina di bawah sinar matahari. 11(01): 99–104.
- Ramadhannur, A. R., Wirawan, T., & Hindryawati, N. 2021. *Pembuatan komposit Zn-Fe₃O₄ /WO₃ dan aplikasinya dalam proses fotokatalisis photocatalyst*. Prosiding Seminar Nasional Kimia.
- Ranganathan, P., & Aggarwal, R. 2018. Study designs: part 1-an overview and classification. *Perspectives in Clinical Research*. 9(4): 184–186.
- Riskiani, E., Suprihatin, I. E., & Sibarani, J. 2018. Fotokatalis bentonit-Fe₂O₃ untuk degradation zat warna remazol brilliant blue. *Cakra Kimia*. 7(1): 46–54.
- Sa'adah, F., Sutanto, H., & Hadiyanto. 2022. Optimization of the Bi₂O₃/Cu synthesis process using response surface methodology as a tetracycline photodegradation agent. *Results in Engineering*. 16: 100521.
- Sakkas, V. A., Calza, P., Medana, C., Villioti, A. E., Baiocchi, C., Pelizzetti, E., & Albanis, T. 2007. Heterogeneous photocatalytic degradation of the pharmaceutical agent salbutamol in aqueous titanium dioxide suspensions. *Applied Catalysis B: Environmental*. 77(1–2): 135–144.
- Sakkas, V. A., Islam, M. A., Stalikas, C., & Albanis, T. A. 2010. Photocatalytic degradation using design of experiments: a review and example of the congo red degradation. *Journal of Hazardous Materials*: 175(1–3): 33–44.
- Sakthivel, S., Neppolian, B., Shankar, M. V., Arabindoo, B., Palanichamy, M., & Murugesan, V. 2003. Solar photocatalytic degradation of azo dye: comparison of photocatalytic efficiency of ZnO and TiO₂. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 77(1): 65–82.

- Salazar-Rabago, J. J., Leyva-Ramos, R., Rivera-Utrilla, J., Ocampo-Perez, R., & Cerino-Cordova, F. J. 2017. Biosorption mechanism of methylene blue from aqueous solution onto white pine (*pinus durangensis*) sawdust: effect of operating conditions. *Sustainable Environment Research*. 27(1): 32–40.
- Salim, A., & Sudaryanto. 2016. *Penambahan N pada TiO_2 dan pengaruhnya pada energi band gap TiO_2 sebagai bahan pengolah limbah*. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Dan Aplikasi Reaktor Nuklir. Serpong 23 Agustus 2016.
- Sapawe, N., Jalil, A. A., Triwahyono, S., Sah, R. N. R. A., Jusoh, N. W. C., Hairom, N. H. H., & Efendi, J. 2013. Electrochemical strategy for grown ZnO nanoparticles deposited onto HY zeolite with enhanced photodecolorization of methylene blue: effect of the formation of SiOZn bonds. *Applied Catalysis A: General*. 456: 144–158.
- Setiawan, A., Sugiarto, C., Mayangsari, N. E., Ari, M., & Santiasih, I. 2023. Pemanfaatan arang aktif tempurung kemiri (*aleurites moluccana* l. willd) sebagai adsorben zat warna naphtol. 15(1): 88-96.
- Shaq, A., Mebarek-Oudina, F., Sindhu, T. N., & Rasool, G. 2022. Sensitivity analysis for walters-b nanoliquid flow over a radiative riga surface by RSM. *Scientia Iranica*. 29(3): 1236–1249.
- Siagian, S. M., Khairani, S., Chrisna HS, S., & Tampubolon, F. R. 2022. Sintesis dan karakteristik sifat optik semikonduktor ZnO dan ZnO dopping Cu. *ORBITA: Jurnal Kajian, Inovasi Dan Aplikasi Pendidikan Fisika*. 8(1): 79.
- Sofi'i, Y. K., & Sudarman. 2022. Peran kaolin clay dan karbon aktif dalam produksi gas hidrogen dengan metode fotokatalisis. 5(1): 46–55.
- Soltani, N., Saion, E., Hussein, M. Z., Erfani, M., Abedini, A.,

- Bahmanrokh, G., Navasery, M., & Vaziri, P. 2012. Visible light-induced degradation of methylene blue in the presence of photocatalytic ZnS And CdS nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences*. 13(10): 12242–12258.
- Suprihatin, I. E., Murdani, N. D., & Suarsa, I. W. 2021. Bentonit- Fe_3O_4 sebagai fotokatalis dalam proses fotodegradasi naphthol blue black dengan iradiasi UV. *Jurnal Kimia*. 15(1): 59.
- Suprihatin, I. E., Suat, R. M., & Negara, I. M. S. 2022. Fotodegradasi zat warna methylene blue dengan sinar UV dan fotokatalis nanopartikel perak. *Jurnal Kimia*. 16(2): 168.
- Suryandari, A. S., Mustain, A., Pratama, D. W., & Maula, I. 2019. Studi aktivitas reaksi fotokatalisis berbasis kata. 3: 95–101.
- Tak, B. yul, Tak, B. sik, Kim, Y. ju, Park, Y. jin, Yoon, Y. hun, & Min, G. ho. 2015. Optimization of color and COD removal from livestock wastewater by electrocoagulation process: application of box-behnken design (BBD). *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 28: 307–315.
- Tiandho, Y., Afriani, F., Evi, J., Lingga, R., & Handoyo. 2021. Kinetic evaluation of methylene blue decolorization by CuO as a fenton-like catalyst. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 926(1): 012103
- Vanaja, K., & Rani, R. H. S. 2007. Design of experiments: concept and applications of plackett burman design. *Clinical Research and Regulatory Affairs*. 24(1): 1–23.
- Variyana, Y., & Susanti, Y. 2022. Optimasi ekstraksi dari capsicum frutescens l dengan microwave-assisted soxhlet extraction (MASE) menggunakan response surface methodology (RSM). *JRST (Jurnal Riset Sains Dan*

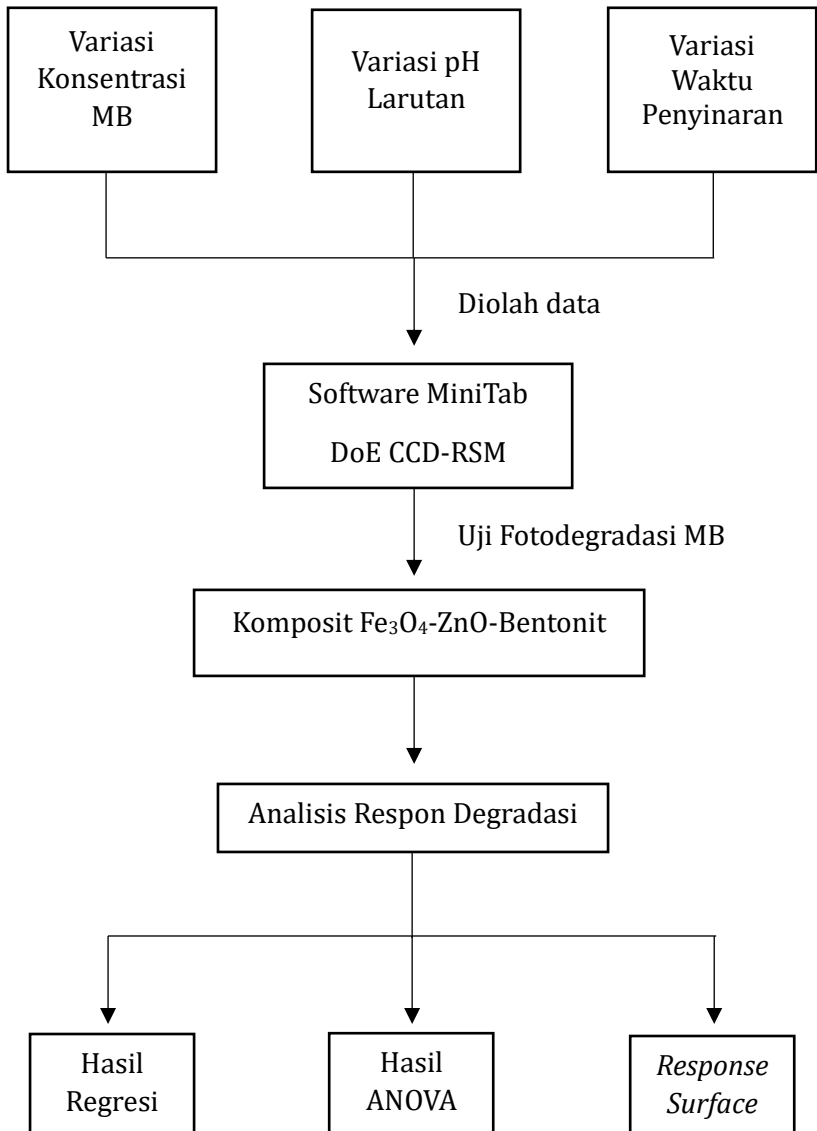
Teknologi). 5(2): 131.

- Wahdame, B., Candusso, D., François, X., Harel, F., Kauffmann, J. M., & Coquery, G. 2009. Design of experiment techniques for fuel cell characterisation and development. *International Journal of Hydrogen Energy*. 34(2): 967–980.
- Wahyu, E., & Dini, P. 2014. Degradasi metilen biru menggunakan fotokatalis ZnO-zeolit. *Chemistry Progress*. 7(1): 29–33.
- Walbi, I. A., Ahmad, M. Z., Ahmad, J., Algahtani, M. S., Alali, A. S., Alsudir, S. A., Aodah, A. H., & Albarqi, H. A. 2022. Development of a curcumin-loaded lecithin/chitosan nanoparticle utilizing a box-behnken design of experiment: formulation design and influence of process parameters. *Polymers*. 14(18): 3758.
- Wardhani, N. D. A. dan S. 2014. Fotokatalis TiO₂-zeolit untuk degradasi metilen biru. *Chemistry Progress*. 7(1): 9–14.
- Wolf, M., & Paulino, A. T. 2019. International journal of biological macromolecules full-factorial central composite rotational design for the immobilization of lactase in natural polysaccharide-based hydrogels and hydrolysis of lactose. *International Journal of Biological Macromolecules*. 135: 986–997.
- Wulandari, I. O., Wardhani, S., & Purwonugroho, D. 2014. Sintesis dan karakterisasi fotokatalis ZnO pada zeolit. *Jurnal Ilmu Kimia Universitas Brawijaya*. 1(2): 241–247.
- Yulianti, Z. W. 2020. Nanopartikel Fe₃O₄/SiO₂ berbasis bahan alam sebagai material pengadsorpsi pewarna dalam air. 09: 5–6.
- Zhao, L., Li, Q., Xu, X., Kong, W., Li, X., Su, Y., Yue, Q., & Gao, B. 2016. A novel enteromorpha based hydrogel optimized

with box-behnken response surface method: synthesis, characterization and swelling behaviors. *Chemical Engineering Journal*. 287: 537-544.

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Diagram Alir Penelitian



Lampiran 2. Panjang Gelombang Maksimum Metilen Biru

λ (nm)	Abs	λ (nm)	Abs	λ (nm)	Abs
450	0,001	478	0,004	506	0,005
451	0,001	479	0,004	507	0,005
452	0,002	480	0,004	508	0,005
453	0,001	481	0,005	509	0,005
454	0,002	482	0,005	510	0,004
455	0,002	483	0,004	511	0,005
456	0,002	484	0,005	512	0,005
457	0,002	485	0,005	513	0,005
458	0,002	486	0,005	514	0,005
459	0,002	487	0,004	515	0,005
460	0,002	488	0,005	516	0,005
461	0,003	489	0,005	517	0,005
462	0,003	490	0,005	518	0,005
463	0,003	491	0,005	519	0,005
464	0,003	492	0,005	520	0,005
465	0,003	493	0,005	521	0,005
466	0,003	494	0,005	522	0,005
467	0,004	495	0,006	523	0,006
468	0,004	496	0,005	524	0,005
469	0,004	497	0,005	525	0,006
470	0,004	498	0,005	526	0,006
471	0,004	499	0,005	527	0,005
472	0,004	500	0,005	528	0,006
473	0,004	501	0,005	529	0,006
474	0,004	502	0,005	530	0,005
475	0,004	503	0,006	531	0,006
476	0,004	504	0,005	532	0,006
477	0,004	505	0,005	533	0,005

λ (nm)	Abs	λ (nm)	Abs	λ (nm)	Abs
534	0,006	562	0,009	590	0,016
535	0,006	563	0,010	591	0,017
536	0,006	564	0,009	592	0,017
537	0,006	565	0,009	593	0,018
538	0,006	566	0,010	594	0,018
539	0,006	567	0,010	595	0,019
540	0,007	568	0,010	596	0,019
541	0,006	569	0,011	597	0,019
542	0,007	570	0,010	598	0,019
543	0,007	571	0,011	599	0,020
544	0,007	572	0,011	600	0,020
545	0,007	573	0,012	601	0,021
546	0,007	574	0,012	602	0,022
547	0,007	575	0,012	603	0,020
548	0,007	576	0,014	604	0,022
549	0,007	577	0,012	605	0,022
550	0,007	578	0,013	606	0,023
551	0,008	579	0,013	607	0,023
552	0,007	580	0,014	608	0,023
553	0,008	581	0,014	609	0,024
554	0,008	582	0,015	610	0,024
555	0,008	583	0,015	611	0,023
556	0,008	584	0,014	612	0,024
557	0,009	585	0,015	613	0,025
558	0,008	586	0,015	614	0,025
559	0,010	587	0,016	615	0,024
560	0,010	588	0,016	616	0,025
561	0,009	589	0,017	617	0,024

λ (nm)	Abs	λ (nm)	Abs	λ (nm)	Abs
618	0,025	646	0,034	674	0,034
619	0,025	647	0,032	675	0,032
620	0,025	648	0,035	676	0,031
621	0,026	649	0,035	677	0,030
622	0,025	650	0,036	678	0,028
623	0,025	651	0,036	679	0,027
624	0,026	652	0,037	680	0,024
625	0,025	653	0,037	681	0,024
626	0,026	654	0,038	682	0,021
627	0,027	655	0,036	683	0,020
628	0,025	656	0,038	684	0,019
629	0,027	657	0,039	685	0,017
630	0,027	658	0,038	686	0,015
631	0,027	659	0,039	687	0,016
632	0,028	660	0,040	688	0,012
633	0,027	661	0,040	689	0,011
634	0,027	662	0,040	690	0,011
635	0,029	663	0,040	691	0,011
636	0,029	664	0,039	692	0,010
637	0,029	665	0,040	693	0,009
638	0,030	666	0,038	694	0,007
639	0,028	667	0,039	695	0,008
640	0,029	668	0,039	696	0,004
641	0,031	669	0,037	697	0,005
642	0,030	670	0,037	698	0,005
643	0,031	671	0,037	699	0,004
644	0,031	672	0,036	700	0,005
645	0,033	673	0,035		

Lampiran 3. Hasil Nilai Prediksi yang Diprediksi Software MiniTab dengan DoE CCD-RSM

RunOrder	Konsentrasi	pH	Waktu	Hasil Degradasi	Hasil Prediksi (FITS)
1	20	12	50	94.14	91.95
2	40	3.95	85	87.69	93.3
3	6.36	9	85	87.77	93.11
4	73.63	9	85	93.83	92.79
5	60	12	120	84.48	93.54
6	60	12	50	87.73	91.76
7	40	9	85	95.94	92.95
8	40	14.04	85	96.08	92.61
9	40	9	85	96.39	92.95
10	20	12	120	91.36	93.73
11	40	9	85	98.46	92.95
12	20	6	120	97.34	94.15
13	60	6	120	94.92	93.96
14	40	9	85	88.92	92.95
15	40	9	85	99.48	92.95
16	60	6	50	93.3	92.17
17	40	9	26.13	91.15	91.45
18	40	9	85	95	92.95
19	40	9	143.86	96.11	94.45
20	20	6	50	89.08	92.36

RIWAYAT HIDUP



A. Identitas Diri

1. Nama : Nisfakh Tri Oktafiani
2. Tempat & Tgl Lahir : Jakarta, 30 Oktober 2001
3. Alamat Rumah : Jl. Cipinang Pulo,
RT05/RW012, Kec.
Jatinegara, Kel. Cipinang
Besar Utara, Jakarta Timur
4. No. Telepon : 081382280790
5. E-mail : oktafianinisfa@gmail.com

B. Riwayat Pendidikan

1. TK Bunga lulus 2007
2. SDN 09 Jakarta lulus 2013
3. SMPN 243 Jakarta lulus 2016
4. SMAN 50 Jakarta lulus 2019