

**EFEK SINERGISTIK ADSORPSI-FOTOKATALIS SENYAWA AURIVILLIUS $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$
UNTUK MENDEGRADASI CIPROFLOXACIN**

SKRIPSI

**Oleh:
ANISA FEBRIANTI
NIM. 210603110017**



**PROGRAM STUDI KIMIA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2024**

**EFEK SINERGISTIK ADSORPSI-FOTOKATALIS SENYAWA AURIVILLIUS $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$
UNTUK MENDEGRADASI CIPROFLOXACIN**

SKRIPSI

**Oleh:
ANISA FEBRIANTI
NIM. 210603110017**

**Diajukan Kepada:
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S. Si)**

**PROGRAM STUDI KIMIA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2024**

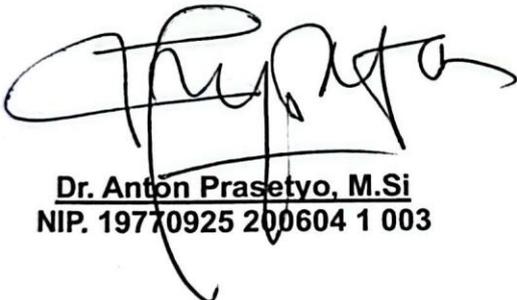
**EFEK SINERGISTIK ADSORPSI-FOTOKATALIS SENYAWA AURIVILLIUS $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$
UNTUK MENDEGRADASI CIPROFLOXACIN**

SKRIPSI

Oleh:
ANISA FEBRIANTI
NIM. 210603110017

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji:
Tanggal: 25 Juni 2025

Pembimbing I



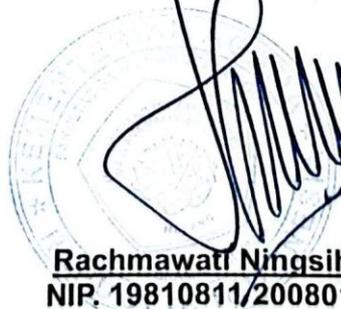
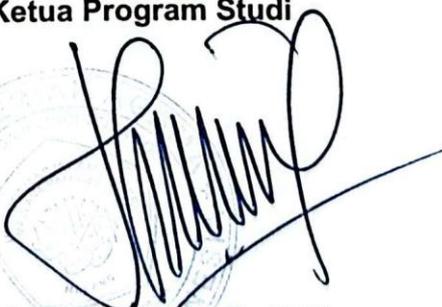
Dr. Anton Prasetyo, M.Si
NIP. 19770925 200604 1 003

Pembimbing II



Kivah Aha Putra, M.Pd.I
NIP. 19900425 202321 1 024

**Mengetahui,
Ketua Program Studi**



Rachmawati Ningsih, M.Si
NIP. 19810811/200801 2 010

**EFEK SINERGISTIK ADSORPSI-FOTOKATALIS SENYAWA AURIVILLIUS $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$
UNTUK MENDEGRADASI CIPROFLOXACIN**

SKRIPSI

Oleh:
ANISA FEBRIANTI
NIM. 210603110017

**Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi
dan Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)**

Tanggal: 30 Juni 2023

Ketua Penguji : Himmatul Barroroh, M.Si
NIP. 19750730 200312 2 001

Anggota Penguji I : Susi Nurul Khalifah, M.Si
NIP. 19851020 201903 2 012

Anggota Penguji II : Dr. Anton Prasetyo, M.Si
NIP. 19770925 200604 1 003

Anggota Penguji III : Kivah Aha Putra, M.Pd.I
NIP. 19900425 202321 1 024

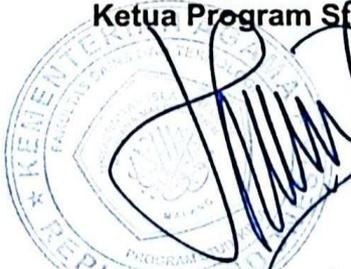
(.....)

(.....)

(.....)

(.....)

**Mengetahui,
Ketua Program Studi**

Rachmawati Ningsih, M.Si
NIP. 19810811 200801 2 010

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Anisa Febrianti

NIM : 210603110017

Program Studi : Kimia

Fakultas : Sains dan Teknologi

Judul : Efek Sinergistik Adsorpsi-Fotokatalis Senyawa Aurivillius $SrBi_4Ti_4O_{15}$
Untuk Mendegradasi Ciprofloxacin

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambil alihan data, tulisan, atau pikiran orang lain yang saya akui sebagai tulisan atau pikiran saya sendiri, kecuali dengan mencantumkan sumber cuplikan pada daftar pustaka. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan skripsi ini hasil jiplakan, maka saya bersedia menerima sanksi dari perbuatan tersebut.

Malang, 25 Juni 2025

Yang membuat pernyataan,



Anisa Febrianti

NIM. 210603110017

HALAMAN PERSEMBAHAN

Rasa syukur Alhamdulillah yang saya haturkan kepada Allah Swt. atas kesempatan, takdir dan pelajarann yang sudah diberikan. Tak lupa sholawat serta salam yang tucurahkan kepada baginda Rasulullah Muhammad SAW. Sehingga saya bisa menyelesaikan tugas akhir saya ini. Saya penulis akan mempersembahkan tulisan ini untuk:

Terutama untuk kedua orang tua saya tercinta, Bapak Imron Rosidi dan Ibu Siti Asfiah juga kepada adik saya Faris Firmansyah yang selama ini telah memberi dukungan baik berupa do'a, kasih sayang, dukungan dan materi. Terimakasih karena telah memberi izin, ridho serta memotivasi saya untuk menempuh pendidikan setinggi-tingginya dan telah berkorban sehingga saya mendapatkan gelar sarjana ini. Saya persembahkan tulisan ini kepada diri sendiri yang sudah tetap bertahan dan kuat untuk sampai sejauh ini dan tidak menyerah sampai mendapatkan gelar sarjana. Semoga kalian selalu dalam perlindungan Allah SWT, umur yang berkah, kesehatan, kasih sayang dan kebaikan di dunia maupun akhirat.

Kepada seluruh Ibu dan Bapak dosen kimia terutama kepada dosen pembimbing saya bapak Dr. Anton Prasetyo, M.Si yang telah membimbing saya dengan tulus dan sabar. Terimakasih atas semua bantuan, dukungan serta motivasi sehingga saya dapat menyelesaikan studi saya. Terimakasih kepada Ibu Eny Yulianti, M.Si yang telah membantu, membimbing, dan memotivasi penulis sehingga tugas akhir ini menjadi lebih baik. Terimakasih kepada pembimbing agama saya bapak Kivah Aha Putra, M.Pd.I yang telah membimbing saya dalam menyelesaikan skripsi ini sehingga karya ini menjadi lebih baik. Tak lupa juga ucapan terimakasih kepada seluruh staf Program Studi Kimia yang telah membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Terimakasih juga kepada teman-teman saya yang senantiasa memberi semangat, motivasi dan mendukung penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Terimakasih juga kepada Zulfikar, Alifia, Sarah, Dshinta yang memberikan support, saran dan menemani dalam penyelesaian skripsi ini. Kepada teman-teman Laili, Rutfa, Puput, Hanum, Maulida, Diffa, Nada yang telah menghibur dan memberi semangat kepada penulis. Teman-teman seperbimbingan saya yang mensupport dalam penyelesaian skripsi ini. Kepada kakak-kakak kimia Mbak Aeni, Mbak Nurul, Mbak Rosyidah, Mbak Ainin, Mas Bima, Mas Vio, yang turut membantu untuk mengarahkan penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Terimakasih juga kepada seluruh teman kimia A dan angkatan 2021. Semoga kebaikan-kebaikan kalian semua dibalas oleh Allah SWT.

MOTTO

“ Perjuangan dan pengorbanan yang telah dilalui, merupakan bekal untuk membentuk pribadi yang kuat dan tangguh dalam menghadapi dunia selanjutnya.”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan naskah skripsi ini. Selawat dan salam penulis haturkan kepada junjungan Nabi Muhammad saw. yang telah mengembangkan ajaran Islam di muka bumi demi keselamatan umat manusia. Penyusunan naskah skripsi yang berjudul "**Efek Sinergistik Adsorpsi-Fotokatalis Senyawa Aurivillius SrBi₄Ti₄O₁₅ Untuk Mendegradasi Ciprofloxacin**" semoga dapat berjalan baik dan lancar juga berkat dukungan, bantuan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, keluarga dan orang terkasih yang telah memberikan doa dan dukungan moril serta material sehingga penyusunan skripsi ini dapat terselesaikan.
2. Prof. Dr. H. M. Zainuddin, MA, selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Prof. Dr. Sri Harini, M.Si, selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Ibu Rachmawati Ningsih, M.Si, selaku Ketua Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
5. Dr. Anton Prasetyo, M.Si, selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan motivasi dalam proses penyusunan skripsi ini.
6. Kivah Aha Putra, M.Pd.I selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan arahan dan nasihat dalam penulisan skripsi ini.
7. Seluruh warga Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

Semoga segala bantuan Bapak/Ibu serta pihak lain kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini dibalas oleh Allah Swt. dengan pahala dan ridha-Nya. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kritik, saran, serta bimbingan yang sifatnya membangun sangat penulis harapkan.

Malang, 25 Mei 2025

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	v
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	vii
HALAMAN PERSEMBAHAN	ix
MOTTO.....	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
DAFTAR PERSAMAAN	xxiii
ABSTRAK	xxv
ABSTRACT	xxvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah.....	6
1.5 Manfaat Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 SrBi ₄ Ti ₄ O ₁₅	7
2.2 Ciprofloxacin.....	8
2.3 Fotokatalis	9
2.4 Efek Sinergis Adsorpsi-Fotokatalis.....	10
2.5 Pengaruh Morfologi Pada Aktivitas Fotokatalis	12
2.6 Degradasi Bahan Antibiotik oleh Material Fotokatalis.....	13
2.7 Sintesis Senyawa Aurivillius Dengan Metode Lelehan Garam	14
2.8 Sintesis Senyawa SrBi ₄ Ti ₄ O ₁₅ Dengan Metode Lelehan Garam	15
2.9 Pengolahan Pencemaran Lingkungan dalam Pandangan Islam	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	21
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	21
3.2 Alat dan Bahan	21
3.2.1 Alat.....	21
3.2.2 Bahan.....	21
3.3 Rancangan Penelitian.....	21
3.4 Tahapan Penelitian	23
3.5 Prosedur Kerja.....	23
3.5.1 Preparasi Bahan	23
3.5.2 Sintesis SrBi ₄ Ti ₄ O ₁₅ dengan Metode Lelehan Garam	23
3.5.3 Karakterisasi Sampel Produk SrBi ₄ Ti ₄ O ₁₅	24
3.5.3.1 Karakterisasi Menggunakan Instrumen XRD	24
3.5.3.2 Karakterisasi Menggunakan Instrumen SEM	24
3.5.3.3 Karakterisasi Menggunakan Instrumen UV-Vis DRS.....	24
3.5.3.4 Karakterisasi Menggunakan Instrumen FTIR.....	24
3.5.4 Analisis Data	24
3.5.4.1 Analisis Data XRD	24
3.5.4.2 Analisis Data SEM	24
3.5.4.3 Analisis Data UV-Vis DRS	24
3.5.4.4 Analisis Data FTIR.....	25
3.5.5 Uji Sinergitas Adsorpsi-Fotokatalis menggunakan Lampu UV	25
3.5.5.1 Pembuatan Larutan Induk <i>Ciprofloxacin</i>	25

3.5.5.2	Pembuatan Kurva Standar.....	25
3.5.5.3	Pengujian Kestabilan Larutan <i>Ciprofloxacin</i>	25
3.5.5.4	Pengujian Kesetimbangan Adsorpsi-Desorpsi Senyawa SrBi ₄ Ti ₄ O ₁₅	25
3.5.5.5	Pengujian Adsorpsi-Fotokatalitik Menggunakan Lampu UV	26
3.6	Analisis Data.....	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		29
4.1	Sintesis SrBi ₄ Ti ₄ O ₁₅ dengan Metode Lelehan Garam.....	29
4.2	Karakterisasi Senyawa SrBi ₄ Ti ₄ O ₁₅ Menggunakan XRD.....	30
4.3	Karakterisasi Senyawa SrBi ₄ Ti ₄ O ₁₅ Menggunakan SEM.....	31
4.4	Karakterisasi Senyawa SrBi ₄ Ti ₄ O ₁₅ Menggunakan UV-Vis DRS	33
4.5	Uji Sinergitas Adsorpsi-Fotokatalis.....	34
4.5.1	Penentuan Panjang Gelombang Maksimum Ciprofloxacin	34
4.5.2	Pembuatan Kurva Standar Larutan Ciprofloxacin	35
4.5.3	Uji Kestabilan Larutan Ciprofloxacin	36
4.5.4	Pengujian Kesetimbangan Adsorpsi-Desorpsi Senyawa SrBi ₄ Ti ₄ O ₁₅	38
4.5.5	Pengujian Sinergistik Adsorpsi-Fotokatalitik Menggunakan Lampu UV .	39
4.5.6	Analisis Spektra FTIR SrBi ₄ Ti ₄ O ₁₅ Sebelum dan Sesudah Proses Adsorpsi-Fotokatalitik Ciprofloxacin.....	43
4.5.7	Pengujian Sinergistik Adsorpsi-Fotokatalitik Ciprofloxacin dalam Perspektif Islam.....	45
BAB V PENUTUP.....		49
5.1	Kesimpulan.....	49
5.2	Saran.....	49
DAFTAR PUSTAKA		51
LAMPIRAN.....		57

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Alur Penelitian	57
Lampiran 2. Diagram Alir	58
Lampiran 3. Perhitungan.....	64
Lampiran 4. Data Hasil Karakterisasi	71
Lampiran 5. Uji Sinergitas Adsorpsi-Fotokatalis	78
Lampiran 6. Dokumentasi	80

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	7
Gambar 2. 2	Struktur ciprofloxacin	8
Gambar 2. 3	Spektra IR Ciprofloxacin	9
Gambar 2. 4	Mekanisme fotokatalis pada degradasi antibiotik	10
Gambar 2. 5	Persentase degradasi metilen biru oleh $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	13
Gambar 2. 6	Mekanisme fotokatalis degradasi antibiotik	13
Gambar 2. 7	Ilustrasi proses lelehan garam	15
Gambar 2. 8	Difraktogram $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	15
Gambar 2. 9	(a) mikrograf-SEM (b) spektrum EDS	16
Gambar 2. 10	(a) spektrum UV-DRS dan (b) Tauc Plot $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	16
Gambar 2. 11	Difraktogram $\text{SrBi}_4\text{Ti}_{3.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_{15}$ dengan variasi garam.....	17
Gambar 2. 12	Mikrograf senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_{3.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_{15}$ dengan variasi garam (a) NaCl; (b) KCl; (c) NaCl-KCl.....	17
Gambar 2. 13	(a) % Reflektan $\text{SrBi}_4\text{Ti}_{3.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_{15}$ (b) <i>Plot Tauc</i> $\text{SrBi}_4\text{Ti}_{3.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_{15}$	18
Gambar 3. 1	Alat fotoreaktor	26
Gambar 4. 1	Perubahan warna sampel (a) sebelum kalsinasi dan (b) sesudah kalsinasi.....	29
Gambar 4. 2	Difraktogram senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	31
Gambar 4. 3	Hasil SEM senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan perbesaran (a) 10.000x dan (b) distribusi ukuran partikel	32
Gambar 4. 4	a) Spektra reflektansi senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (b) <i>Plot Tauc</i> senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	33
Gambar 4. 5	Spektra ciprofloxacin 8 ppm.....	34
Gambar 4. 6	Spektrum absorbansi UV-Vis pada larutan standar ciprofloxacin	35
Gambar 4. 7	Hasil pembuatan kurva standar	35
Gambar 4. 8	Spektra absorbansi UV-Vis uji kestabilan tanpa sinar UV.....	36
Gambar 4. 9	Spektra absorbansi UV-Vis uji kestabilan teradiasi sinar UV	37
Gambar 4. 10	Spektra kesetimbangan adsorpsi-desorpsi senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (a) pengulangan 1, (b) pengulangan 2	38
Gambar 4. 11	Grafik Adsorpsi-Desorpsi (a) hubungan waktu dengan konsentrasi ciprofloxacin (b) hubungan waktu dengan persen adsorpsi.....	39
Gambar 4. 12	Spektra sinergistik adsorpsi-fotokatalitik senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. (a) pengulangan 1, dan (b) pengulangan 2	40
Gambar 4. 13	Grafik Adsorpsi-Fotokatalis (a) hubungan waktu dengan konsentrasi ciprofloxacin (b) hubungan waktu dengan persen degradasi.....	41
Gambar 4. 14	Spektra IR $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (a) sebelum fotokatalis dan (b) setelah fotokatalis	45
Gambar 4. 15	Spektra absorbansi UV-Vis uji kestabilan tanpa sinar UV.....	78

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1	Massa tiap prekursor untuk mendapatkan senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	21
Tabel 3. 2	Data Penelitian Pengujian Adsorpsi-fotokatalisis	22
Tabel 4. 1	Hasil uji kestabilan larutan ciprofloxacin tanpa sinar UV	36
Tabel 4. 2	Hasil uji kestabilan larutan ciprofloxacin dengan sinar UV	37
Tabel 4. 3	Hasil Uji Adsorpsi-Desorpsi.....	39
Tabel 4. 4	Hasil uji sinergistik adsorpsi-fotokatalitik	41
Tabel 4. 5	Tabel Fotokatalitik.....	41

DAFTAR PERSAMAAN

Persamaan 3.1 Kubelka-Munk	18
Persamaan 3.2 Degradasi (%).....	22

ABSTRAK

Febrianti, A. 2024. **Efek Sinergistik Adsorpsi-Fotokatalis Senyawa Aurivillius $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Untuk Mendegradasi Ciprofloxacin**. Skripsi. Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing I: Dr. Anton Prasetyo, M.Si; Pembimbing II: Kivah Aha Putra, M.Pd.I.

Kata kunci: $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$, adsorpsi-fotokatalitik, lelehan garam NaCl-KCl, *ciprofloxacin*

Senyawa Aurivillius lapis empat $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dilaporkan berpotensi sebagai material fotokatalis dengan energi celah pita 3,2 eV, sehingga sangat efisien untuk mendegradasi ciprofloxacin. Energi celah pita dan morfologi partikel yang dihasilkan dapat mempengaruhi aktivitas fotokatalitiknya. Metode sintesis lelehan garam diketahui menghasilkan morfologi dan ukuran partikel yang seragam sehingga dapat memberikan keuntungan pada material fotokatalis. Dalam penelitian ini, akan dilakukan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi senyawa Aurivillius $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ menggunakan metode lelehan garam NaCl-KCl, serta menguji efektivitasnya dalam mendegradasi ciprofloxacin melalui mekanisme sinergistik adsorpsi-fotokatalis. Senyawa disintesis pada suhu 750 dan 820°C, lalu dikarakterisasi menggunakan XRD untuk identifikasi fasa kristal, SEM untuk melihat morfologi partikel, UV-Vis DRS untuk mengukur energi celah pita, serta FTIR untuk mengidentifikasi interaksi permukaan. Hasil menunjukkan bahwa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ memiliki struktur kristal sesuai JCPDS dan teridentifikasi beberapa fasa pengotor yang menandakan material tidak murni, morfologi plate-like dengan distribusi ukuran partikel yang bervariasi sebesar 1–2 μm dengan adanya aglomerasi parsial, dan energi celah pita sebesar 3,14 eV. Uji adsorpsi ciprofloxacin menunjukkan efisiensi penghilangan sebesar 64,73% dalam 90 menit, sedangkan uji sinergistik adsorpsi-fotokatalis menghasilkan efisiensi degradasi 67,57%. Aktivitas fotokatalitik menunjukkan angka yang lebih kecil dan menurun, menunjukkan bahwa proses adsorpsi lebih berkontribusi dibandingkan fotokatalis. Spektrum FTIR menunjukkan perubahan intensitas yang menandakan terjadinya interaksi antara ciprofloxacin dan permukaan $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ serta kontribusi terbesar terdapat pada proses adsorpsi dibandingkan fotokatalis. Hasil ini menunjukkan bahwa senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ tetap berpotensi sebagai material multifungsi dalam pengolahan limbah antibiotik berbasis fotokatalisis.

ABSTRACT

Febrianti, A. 2024. **Synergistic Effect of Adsorption-Photocatalysis of Aurivillius Compound $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ to Degrading Ciprofloxacin**. Thesis. Study Program of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Supervisors: Dr. Anton Prasetyo, M. Si; Co-Supervisor: Kivah Aha Putra, M.Pd.I.

Keywords: $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$, adsorption-photocatalysis, NaCl-KCl molten salt, ciprofloxacin

The four-layer Aurivillius compound $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ has been reported to have potential as a photocatalytic material with a band gap energy of 3.2 eV, making it highly efficient for degrading ciprofloxacin. The band gap energy and particle morphology can significantly affect its photocatalytic activity. The molten salt synthesis method is known to produce uniform particle morphology and size, offering advantages for photocatalytic performance. In this study, $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ was synthesized using the NaCl-KCl molten salt method at calcination temperatures of 750 °C and 820 °C, and characterized using XRD for phase identification, SEM for particle morphology, UV-Vis DRS for band gap energy, and FTIR for surface interaction analysis. The results showed that $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ exhibited a crystal structure consistent with JCPDS, although several impurity phases were detected, indicating incomplete purity. The material displayed a plate-like morphology with particle sizes ranging from 1–2 μm and partial agglomeration, with a band gap energy of 3.14 eV. The ciprofloxacin adsorption test demonstrated a removal efficiency of 64.73% within 90 minutes, while the synergistic adsorption–photocatalysis test achieved a degradation efficiency of 67.57%. The lower and decreasing photocatalytic activity suggests that the adsorption process contributed more significantly than photocatalysis. FTIR spectra revealed intensity changes and new absorption bands after treatment, indicating interactions between ciprofloxacin and the $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ surface, with adsorption playing the dominant role. These findings suggest that $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ still holds promise as a multifunctional material for photocatalytic-based antibiotic wastewater treatment.

ملخص

فيبرياني، أ، 2024. التأثير التازري من عملية الامتزاز والحفز الضوئي لمركب أوريفيلبيوس $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ في تحليل السيبروفلوكساسين. البحث الجامعي. قسم التقنية الكيميائية، كلية العلوم والتقنية، جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرف الأول: الدكتور أنتون براسيتيو الماجستير. المشرف الثاني: كيفه أها بوترا الماجستير.

الكلمات المفتاحية: $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ ، عملية الامتزاز والحفز الضوئي، انصهار الملح NaCl-KCl، السيبروفلوكساسين

يعتبر أن لمركب أوريفيلبيوس أربع طبقات منها $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ وهي المواد الواعدة كعامل المحفز الضوئي، حيث يتميز بطاقة فجوة نطاق تبلغ 3.2 eV، مما يجعله أكثر فعال في تحليل السيبروفلوكساسين. طاقة فجوة النطاق ومورفولوجيا الجزيئات المنتجة تؤثران في نشاطه المحفز الضوئي. ومن المعروف أن طريقة تخليق انصهار الملح تنتج مورفولوجيا موحدة وتحمج جزيئات متجانسة، مما توفر ميزة كبيرة في مواد المحفز الضوئي. في هذا البحث، سيتم تخليق مركب أوريفيلبيوس $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ وتوصيفه باستخدام طريقة انصهار الملح NaCl-KCl، وكذلك اختبار فعاليته في تحليل السيبروفلوكساسين من خلال آلية تازرية بين الامتزاز والحفز الضوئي. تم تخليق المركب عند درجة حرارة 750 و820، ثم تم توصيفه باستخدام XRD لتحديد الطور البلوري و SEM لدراسة مورفولوجيا الجسيمات UV-Vis DRS لقياس طاقة فجوة النطاق و FTIR لتحديد التفاعلات السطحية. أوضحت النتائج أن مركب $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ بلورية مطابقة لمصطلحة JCPDS، وقد تم تحديد بعض الأطوار الشائبة مما يدل على أن المادة غير نقية. يتميز بوجود مورفولوجيا على شكل صفائح مع توزيع متفاوت في حجم الجسيمات يتراوح بين 1-2 ميكرومتر، مع وجود الخوازمية الجزيئية، كما بلغت طاقة فجوة الحزمة 3.14 eV. أشار اختبار الامتزاز للسيبروفلوكساسين إلى كفاءة إزالة بلغت 64.73٪ خلال 90 دقيقة. أما الاختبار التازري بين الامتزاز والحفز الضوئي أشار إلى تحقيق كفاءة تحلل بلغت 67.57٪. وقد انخفضت فعالية المحفز الضوئي انخفاضاً واضحة أي لعملية الامتزاز أكبر مساهمة من مقارنة بالمحفز الضوئي. أشار طيف FTIR إلى تغير في الشدة، مما يدل على حدوث تفاعل بين السيبروفلوكساسين وسطح $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ ، وكانت لها مساهمة كبيرة من خلال عملية الامتزاز مقارنة بالمحفز الضوئي. وأوضحت هذه النتائج أن مركب $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ لا يزال متمتعاً بإمكانيات كمادة الوظائف المتعددة في معالجة النفايات الدوائية المعتمدة على المحفز الضوئي.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan populasi telah menyebabkan produksi obat-obatan meningkat secara signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Salah satunya penggunaan antibiotik yang meluas dapat menyebabkan akumulasi zat berbahaya di perairan, yang berdampak negatif terhadap kesehatan manusia, hewan, dan tumbuhan (Abdurahman, dkk., 2021). Penggunaan yang meluas ini mengakibatkan kekhawatiran mengenai resistensi antibiotik dan dampaknya terhadap kesehatan manusia serta ekosistem (Fei, dkk., 2016). Ciprofloxacin merupakan antibiotik fluoroquinolone yang paling umum ditemukan di fasilitas pengolahan air limbah dan air minum dengan konsentrasi yang signifikan (Parsa, dkk., 2016). Berbagai macam metode seperti adsorpsi dan fotokatalis, telah dikembangkan untuk mengatasi limbah antibiotik, namun juga memiliki keterbatasan termasuk efisiensi yang rendah dalam kondisi tertentu. Allah SWT berfirman dalam QS. Al-A'raf ayat 56:

وَلَا تُفْسِدُوا فِي الْأَرْضِ بَعْدَ إِصْلَاحِهَا وَادْعُوهُ خَوْفًا وَطَمَعًا إِنَّ رَحْمَتَ اللَّهِ قَرِيبٌ مِّنَ الْمُحْسِنِينَ

Artinya : *“Dan janganlah kamu membuat kerusakan di muka bumi, sesudah (Allah) memperbaikinya dan berdoalah kepada-Nya dengan rasa takut (tidak akan diterima) dan harapan (akan dikabulkan). Sesungguhnya rahmat Allah amat dekat kepada orang-orang yang berbuat baik.” (Q.S. al-A'raf: 56)*

Menurut Shihab (2011), ayat ini melarang tindakan yang dapat menyebabkan kerusakan pada bumi. Kerusakan dianggap sebagai salah satu bentuk pelanggaran batas. Allah SWT menciptakan alam semesta dalam keadaan seimbang dan memenuhi kebutuhan makhluk hidup. Dia menciptakan segalanya dengan baik dan memerintahkan hamba-Nya untuk merawatnya. Perbaikan yang dilakukan oleh Allah SWT termasuk mengutus para Nabi untuk menata dan memperbaiki kehidupan umat manusia. Oleh karena itu, kerusakan yang terjadi setelah perbaikan dianggap lebih serius daripada sebelum adanya perbaikan. Ayat ini menekankan larangan untuk menyakiti dan juga melarang merusak sesuatu yang baik (Shihab, 2011).

Tafsir al-Misbah menjelaskan bahwa larangan terhadap tindakan merusak yang terdapat dalam surat al-A'raf ayat 56 merupakan salah satu bentuk Isyraf. Begitupun dalam Tafsir Al-Jalalayn menjelaskan bahwa Allah melarang manusia menciptakan kerusakan di bumi setelah Dia memperbaikinya. Larangan ini menekankan pentingnya menjaga ciptaan-Nya dari tindakan destruktif, baik yang bersifat moral, sosial, maupun lingkungan. Alam semesta diciptakan oleh Allah SWT dengan baik untuk memenuhi kebutuhan makhluk hidup, dan manusia diperintahkan untuk memperbaikinya. Allah mengutus para nabi untuk memperbaiki kehidupan yang kacau, sehingga kerusakan setelah perbaikan lebih buruk daripada sebelumnya, dan merusak yang masih baik juga dilarang (Muhammad, 2022). Salah

satu larangan dalam berbuat maksiat adalah merusak lingkungan. Allah SWT menciptakan bumi dengan segala manfaatnya untuk memberikan keuntungan bagi manusia, agar dapat dimanfaatkan dengan bijak demi kesejahteraan (Muhammad, 2022). Berbagai upaya telah dilakukan untuk mengurangi pencemaran lingkungan akibat penggunaan ciprofloxacin. Beberapa metode yang dilaporkan antara lain fotolisis, fotokatalis, sonokatalis, ozonasi, elektrolisis, dan reaksi fenton (Alam, dkk., 2022). Salah satu metode yang menunjukkan potensi besar adalah teknologi fotokatalis (Wei, dkk., 2020). Fotokatalis banyak diminati karena biaya yang rendah, efisiensi, ramah lingkungan, serta kemampuannya untuk mendegradasi antibiotik dalam kondisi lingkungan dan di bawah sinar matahari (He, dkk., 2014).

Salah satu metode yang telah banyak dikembangkan untuk mengatasi masalah pencemaran limbah antibiotik adalah dengan menggunakan metode fotokatalis. Fotokatalis merupakan proses yang menggunakan cahaya untuk mempercepat reaksi kimia dengan bantuan fotokatalis. Proses degradasi ciprofloxacin melalui fotokatalisis melibatkan produksi spesies reaktif yang dapat menyerang dan menghancurkan molekul ciprofloxacin (Liu, dkk., 2020). Untuk mendegradasi ciprofloxacin, salah satu senyawa yang digunakan adalah TiO_2 nanotubes (TNTAs). Kustiningsih, dkk (2023) mensintesis TNTAs melalui proses anodisasi menunjukkan efisiensi yang tinggi. Dalam kondisi optimal (voltase 50 V, kadar air 25%), degradasi ciprofloxacin mencapai 93,04% dengan konsentrasi akhir 0,58 ppm. Laju degradasi mengikuti model kinetika orde satu dengan konstanta laju $8,24 \text{ jam}^{-1}$. Hasil tersebut menunjukkan efektivitas fotokatalisis dalam mengurangi pencemaran limbah ciprofloxacin, dimana proses degradasi dimulai setelah proses adsorpsi. Proses degradasi ciprofloxacin menggunakan TiO_2 sangat efektif dalam mengurangi konsentrasi ciprofloxacin dalam media air. Efisiensi degradasi bervariasi tergantung pada jenis fotokatalis dan intensitas cahaya yang digunakan (Alam, dkk., 2022). Alam, dkk (2022) telah membuktikan bahwa Mn/Co oxide juga efektif dalam menghilangkan ciprofloxacin dari larutan akuatik melalui proses degradasi ciprofloxacin di bawah sinar matahari menghasilkan laju degradasi fotokatalisis mencapai $7,9 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ jauh lebih tinggi dengan fotolisis yang hanya $3,8 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$.

Peningkatan efisiensi degradasi fotokatalis dapat dilakukan dengan mengkombinasikan antara proses adsorpsi dan fotokatalisis yang dapat memberikan efek sinergistik. Proses adsorpsi memungkinkan ciprofloxacin terikat pada permukaan sebelum terpapar oleh cahaya, sehingga konsentrasi senyawa yang terpapar kepada spesies reaktif selama fotokatalisis akan meningkat (Liu, dkk., 2020). Adsorpsi memiliki sifat yang merujuk pada kemampuan suatu bahan untuk menarik serta menempelkan molekul dari larutan pada permukaannya. Dalam proses fotokatalis, adsorpsi memiliki peranan yang sangat baik. Efek sinergistik antara adsorpsi dan fotokatalisis terjadi karena adsorpsi memungkinkan lebih banyak molekul ciprofloxacin terikat pada permukaan katalis, sehingga meningkatkan konsentrasi substrat yang tersedia untuk reaksi fotokatalitik. Dengan adanya lebih banyak

molekul yang teradsorpsi, jarak antara molekul ciprofloxacin dan situs aktif pada katalis menjadi lebih pendek yang dapat mempercepat reaksi degradasi. Proses fotokatalisis yang memanfaatkan cahaya untuk mengaktivasi katalis, kemudian dapat berjalan lebih efisien dan meningkatkan laju degradasi. Efek sinergistik adsorpsi-fotokatalis telah dilaporkan beberapa pihak yaitu Feng, dkk (2022) membuktikan hasil efek sinergistik antara adsorpsi dan fotokatalis ditunjukkan bahwa kombinasi kedua proses secara signifikan meningkatkan efisiensi penghilangan polutan organik. Mekanisme fotokatalisis yang melibatkan proses adsorpsi terdiri dari beberapa tahap yang saling berinteraksi. Ketika material semikonduktor yang digunakan dalam fotokatalis terkena sinar UV atau cahaya matahari akan mengakibatkan terbentuknya pasangan elektron dan *hole* dalam struktur material semikonduktor. Elektron yang teraktivasi berpindah ke pita konduksi, sementara *hole* tetap berada di pita valensi. Selanjutnya, permukaan fotokatalis yang telah teradsorpsi oleh polutan mendukung interaksi antara elektron dan polutan tersebut. Proses adsorpsi akan meningkatkan konsentrasi polutan di dekat permukaan fotokatalis sehingga dapat mempercepat reaksi reduksi. Elektron yang dihasilkan memiliki kemampuan untuk mereduksi polutan menjadi polutan yang kurang berbahaya. Dengan adanya adsorben dapat meningkatkan efisiensi fotokatalisis dengan memperbaiki interaksi antara fotokatalis dengan polutan serta mempercepat pemisahan elektron dan *hole*. Dengan demikian mekanisme ini menunjukkan kombinasi antara proses adsorpsi dan fotokatalisis dalam mengurangi pencemaran di lingkungan (Du, dkk., 2024).

Efek sinergistik adsorpsi-fotokatalis telah dilaporkan berbagai pihak. Material heterojunction $\text{Cu}_2\text{V}_2\text{O}_7/\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_8/\text{g-C}_3\text{N}_4$ efektif dalam mengadsorpsi kontaminan, diikuti oleh degradasi saat terkena cahaya, sehingga meningkatkan penghilangan antibiotik dan pewarna dibandingkan dengan penggunaan masing-masing proses secara terpisah yang membuktikan bahwa sinergi ini dapat meningkatkan kinerja dalam pengolahan air limbah. Liu, dkk (2020) juga membuktikan efek sinergistik adsorpsi fotokatalis dalam penelitiannya yang ditunjukkan oleh peningkatan efisiensi degradasi norfloxacin menggunakan komposit $\text{ZnO}/\text{ZnS}@\text{BC}$. Dengan rasio ZnO/ZnS optimal (1:1), komposit ini mencapai penghilangan norfloxacin hingga 49%, baik dalam gelap maupun di bawah sinar UV.

Ukuran partikel dan morfologi material memiliki hubungan yang signifikan dengan kinerja adsorpsi dan fotokatalisis. Ukuran partikel yang lebih kecil dapat meningkatkan luas permukaan material serta berkontribusi pada aktivitas fotokatalitik yang lebih tinggi karena harus menyediakan lebih banyak situs aktif yang memudahkan migrasi elektron dan *hole* (h^+) ke permukaan fotokatalis. Dengan lebih banyak situs aktif, kemampuan material untuk mengikat kontaminan dari larutan meningkat, sehingga efisiensi adsorpsi juga meningkat (Cui, dkk., 2016). Dalam fotokatalisis, ukuran partikel yang kecil dapat meningkatkan laju reaksi karena meningkatkan interaksi antara cahaya dan material fotokatalis. Morfologi material termasuk bentuk dan struktur berpori juga berpengaruh signifikan. Material dengan struktur berpori dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi karena pori-pori tersebut menyediakan ruang

untuk penyerapan kontaminan. Selain itu, morfologi mendukung distribusi cahaya yang merata dapat meningkatkan efisiensi fotokatalisis dengan memastikan bahwa lebih banyak area permukaan material terpapar cahaya sehingga dilakukan dalam proses degradasi (Feng, dkk., 2022).

Senyawa Aurivillius bermorfologi *plate-like* dilaporkan mempunyai aktivitas fotokatalisis yang baik. Salah satunya $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang disintesis oleh (Haikal & Prasetyo, 2021) menghasilkan bentuk *plate-like* yang berkontribusi signifikan terhadap aktivitas fotokatalitiknya. *Plate-like* ini dapat meningkatkan luas permukaan yang dapat memperbanyak situs aktif untuk reaksi degradasi. Morfologi ini juga mendukung pemisahan dan transfer muatan yang lebih efisien, sehingga mengurangi kemungkinan rekombinasi antara dan *hole*. Struktur permukaan dari senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ memungkinkan terjadinya interaksi yang efektif dengan molekul rhodamin-B sehingga mendukung proses adsorpsi yang bersifat fisika dan kimia, tergantung pada kekuatan interaksi seperti daya tarik *Van der Waals* atau ikatan kovalen. Energi celah pita yang didapatkan sebesar 3,02 eV. Senyawa tersebut menunjukkan kemampuan yang baik dalam mendegradasi rhodamin-B yang mencapai tingkat degradasi sebesar 41,1% dalam waktu 120 menit. Chen, dkk (2016) juga melaporkan bahwa penelitiannya menggunakan metode sintesis *sol-gel* dan proses hidrotermal menghasilkan *nanosheet* $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ memiliki bentuk *plate-like* yang menunjukkan kinerja yang sangat baik dan berkontribusi pada peningkatan aktivitas fotokatalitik karena memiliki luas permukaan lebih besar yang memungkinkan lebih banyak situs aktif untuk berinteraksi dengan substrat. *Nanosheet* tersebut mencapai efisiensi fotodegradasi rhodamine B hingga 79,2% dalam waktu 90 menit di bawah sinar matahari yang merupakan tiga kali lipat dari efisiensi $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ yang diolah secara konvensional. $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ memiliki struktur permukaan dengan *facet* $\{0\ 0\ 1\}$ yang memberikan area permukaan aktif yang lebih besar dan meningkatkan interaksi dengan molekul target seperti rhodamin-B. Material tersebut beroperasi pada panjang gelombang sekitar 410,54 nm dalam spektrum sinar UV yang menjadikannya optimal untuk fotokatalisis. Senyawa Aurivillius memiliki kemampuan untuk melakukan adsorpsi dan berfungsi sebagai fotokatalis. Adsorpsi memainkan peran penting dalam degradasi fotokatalitik khususnya material Aurivillius. Proses tersebut dapat meningkatkan konsentrasi kontaminan di dekat permukaan katalis (Li, dkk., 2016). Energi celah pita yang baik dapat mendukung transisi elektron yang efisien. Senyawa Aurivillius bersifat semikonduktor dapat menghantarkan listrik dengan konduktivitas yang meningkat saat terpapar cahaya serta menunjukkan potensi besar untuk aplikasi dalam degradasi polutan organik di lingkungan (Haikal & Prasetyo, 2021 dan Chen, dkk 2016).

Salah satu metode yang menjanjikan adalah metode lelehan garam NaCl-KCl. Metode lelehan garam adalah metode sintesis yang melibatkan penggunaan lelehan garam yang dicampurkan dengan prekursor pada suhu lebih rendah dibandingkan dengan metode konvensional lainnya. Metode ini memiliki banyak keunggulan antara lain penggunaan suhu

yang relatif rendah, peningkatan laju reaksi, difusi ion, dan derajat homogenitas, pengendalian ukuran dan bentuk partikel, minimasi aglomerasi, menghasilkan produk yang relatif murni, stabilitas yang relative tinggi dan ramah lingkungan (Ke, dkk., 2007; Zuniga, 2018; Porob dan Maggard, 2006; dan wendari, dkk., 2020). Sintesis senyawa Aurivillius dengan menggunakan metode lelehan garam telah dilaporkan berbagai pihak, Al-Abror, dkk (2023) mensintesis senyawa Aurivillius $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan metode lelehan garam NaCl-KCl (1:1) dengan suhu awal 700°C untuk proses kalsinasi awal dan dikalsinasi ulang pada suhu 750 dan 800°C selama 8 jam mendapatkan hasil bahwa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ memiliki morfologi *plate-like* dengan banyak aglomerasi yang dapat mempengaruhi aktivitas fotokatalitiknya. Energi celah pita senyawa ini dihasilkan sebesar $3,14$ eV. Chang, dkk (2014) melaporkan bahwa hasil sintesis $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang dilakukannya menggunakan metode lelehan garam dengan NaCl , Na_2SO_4 , K_2SO_4 dan KCl pada suhu 1100°C menghasilkan mikroplatelet berukuran $3-5$ mm dan ketebalan $0,2-0,4$ mm. $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ menunjukkan sifat piezoelectric dan aktivitas fotokatalitik yang baik dalam menguraikan rhodamin B di bawah cahaya UV. Hao, dkk (2007) melaporkan bahwa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang disintesisnya menggunakan metode *microwave-assisted molten salt synthesis* (MAMSS) menggunakan garam KCl pada suhu 600°C selama 30 menit menghasilkan butiran $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan bentuk *plate-like* yang lebih jelas yang dapat meningkatkan aktivitas fotokatalitiknya menunjukkan peningkatan penyerapan cahaya dan efisiensi pemisahan pasangan elektron-*hole*. Energi celah pita yang dihasilkan sebesar $3,2$ eV.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian mengenai adsorpsi dan fotokatalis menggunakan $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang disintesis melalui metode lelehan garam NaCl-KCl belum banyak dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengadsorpsi antibiotik ciprofloxacin. Hasil sintesis yang diperoleh akan dikarakterisasi menggunakan beberapa teknik, yaitu: (a) difraksi sinar-X (XRD) untuk mengidentifikasi fasa dan struktur kristal produk, (b) mikroskop elektron pindai dengan *scanning electron microscope* (SEM) untuk menentukan morfologi, ukuran partikel, dan komposisi unsur senyawa, serta (c) spektroskopi reflektansi difus ultraviolet-tampak (UV-Vis DRS) untuk mengukur energi celah pita.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana struktur kristal, morfologi, ukuran partikel, energi celah pita $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang disintesis dengan menggunakan metode lelehan garam dan uji sinergistik adsorpsi-fotokatalitik senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ terhadap antibiotik ciprofloxacin.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui penelitian ini adalah mengetahui struktur kristal, morfologi, ukuran partikel, energi celah pita $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang disintesis dengan

menggunakan metode lelehan garam dan mengetahui sinergitas adsorpsi-fotokatalitik senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ terhadap antibiotik ciprofloxacin.

1.4 Batasan Masalah

Sintesis senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan menggunakan garam NaCl/KCl dengan rasio molar 1:7 dan suhu kalsinasi yang digunakan 750 dan 820°C.

1.5 Manfaat Penelitian

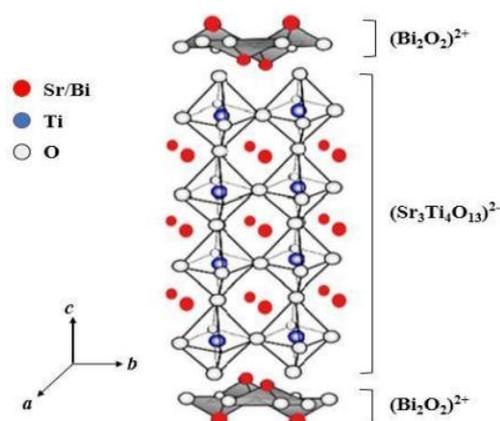
Manfaat pada penelitian ini adalah untuk memberikan informasi baru mengenai pengolahan limbah antibiotik ciprofloxacin menggunakan senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang disintesis menggunakan metode lelehan garam campuran NaCl/KCl.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 SrBi₄Ti₄O₁₅

SrBi₄Ti₄O₁₅ adalah salah satu senyawa golongan Aurivillius lapis empat yang terdiri atas kombinasi lapis bismuth dan struktur *perovskite*. Senyawa berstruktur Aurivillius mempunyai rumus formula Bi₂A_{n-1}B_nO_{3n+3}, dengan nilai $n = 1, 2, 3, \dots$. Senyawa ini dapat digambarkan sebagai kombinasi antara struktur lapisan bismut [Bi₂O₂]²⁺ disertai struktur berbasis *perovskite* [A_{n-1}B_nO_{3n+1}]²⁻ (Shrinagar, dkk., 2008). Pada posisi *A* ditempati oleh kation berukuran besar (1,34-1,61 Å) dan bermuatan kecil dengan koordinasi dodekahedral seperti Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Sr²⁺, Ba²⁺, Pb²⁺, Bi³⁺, dan Ln atau logam tanah jarang. Sementara itu, pada posisi *B* ditempati oleh kation berukuran kecil (0,59-0,65Å) dan bermuatan besar dengan koordinasi oktahedral seperti Fe³⁺, Mn³⁺, Cr³⁺, Ti⁴⁺, Nb⁵⁺ atau W⁶⁺. Nilai n yang disebutkan adalah berupa bilangan bulat ($1 \leq n \leq 8$) yang menunjukkan jumlah oktahedral pada lapisan *perovskite* BO₆ (Borg, dkk., 2002). Adapun struktur kristal senyawa SrBi₄Ti₄O₁₅ ditampilkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Senyawa SrBi₄Ti₄O₁₅

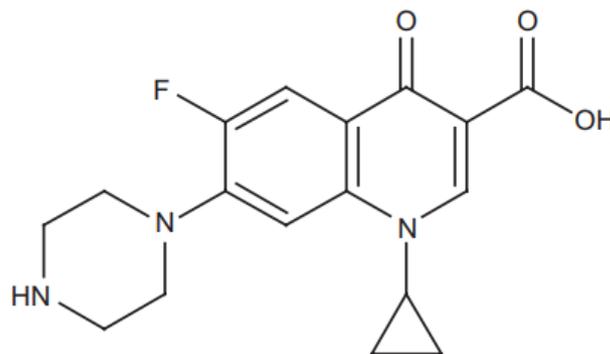
Senyawa ini dilaporkan mempunyai beberapa sifat menarik diantaranya kemampuannya sebagai fotokatalis. Salah satu sifat senyawa SrBi₄Ti₄O₁₅ adalah fotokatalis dengan nilai energi celah pita sekitar 3,0 eV. Energi celah pita ini menunjukkan bahwa senyawa ini dapat menyerap cahaya dalam rentang ultraviolet, menjadikannya efektif sebagai fotokatalis dalam reaksi reduksi CO₂. SrBi₄Ti₄O₁₅ memiliki struktur *perovskite* berlapis yang menunjukkan polaritas ferroelektrik yang kuat sehingga dapat meningkatkan pemisahan muatan dalam bulk material yang dapat mengurangi laju rekombinasi muatan fotoinduksi (Tu, dkk., 2019).

Aktivitas fotokatalis senyawa SrBi₄Ti₄O₁₅ yang telah dilaporkan adalah kemampuan dalam mendegradasi senyawa zat warna. (Haikal & Prasetyo, 2021) melaporkan bahawa SrBi₄Ti₄O₁₅ mampu mendegradasi rhodamin-B sebesar 41,10% dalam waktu 120 menit. Di lain

pihak, Chen, dkk (2016) melaporkan bahwa senyawa ini mampu mendegradasi senyawa antibiotik. Struktur kristal senyawa ini mendukung keberadaan situs aktif, sementara morfologi nanosheet-nya memberikan luas permukaan yang lebih besar untuk penyerapan cahaya. Dengan celah pita yang lebih kecil dibandingkan TiO_2 , senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dapat menyerap lebih banyak foton. Hal ini berkontribusi pada peningkatan pembentukan radikal bebas seperti $\cdot\text{OH}$ dan $\cdot\text{O}_2^-$ yang berfungsi untuk memecah molekul antibiotik.

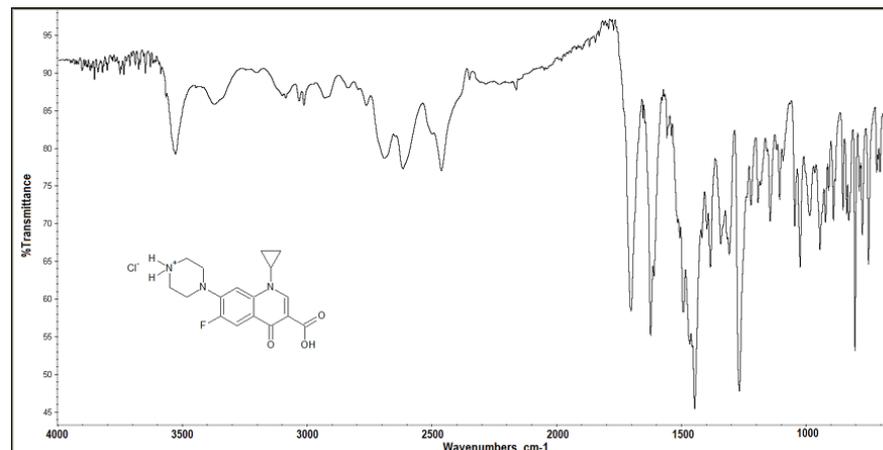
2.2 Ciprofloxacin

Ciprofloxacin adalah golongan antibiotik yang termasuk dalam kelompok fluoroquinolone dengan formula kimia $\text{C}_{17}\text{H}_{18}\text{FN}_3\text{O}_3$, ciprofloxacin memiliki struktur yang terdiri dari cincin *quinolone* dan *moiety piperazine* (Liu, dkk., 2013). Ciprofloxacin ini terbukti efektif dalam melawan berbagai bakteri Gram-positif dan Gram-negatif dengan mekanisme kerja menghambat enzim DNA *gyrase* dan *topoisomerase* IV yang berperan sangat penting dalam replikasi DNA (Gonzalez-Martinez, dkk., 2014). Nama kimia dan struktur ciprofloxacin dari ciprofloxacin adalah *1-cyclopropyl-6-fluoro-4-oxo-7-(piperazin-1-yl)-1,4-dihydroquinoline-3-carboxylic acid* ditampilkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Struktur ciprofloxacin (Sharma, dkk., 2010)

Ciprofloxacin sebagai *fluoroquinolone* mengandung gugus fungsional seperti karboksilat, amida, dan cincin piperdin yang menghasilkan pita serapan khas pada spektrum IR. Kowalczyk, dkk., (2020) melaporkan bahwa pita khas ciprofloxacin pada $3530\text{--}3373\text{ cm}^{-1}$ yang diasosiasikan dengan regangan O–H dari gugus karboksilat, serta pita $2689\text{--}2463\text{ cm}^{-1}$ yang merupakan regangan N–H dari gugus amina terionisasi dalam struktur piperazin. Selain itu, terdapat pita 1703 cm^{-1} (regangan C=O dari gugus karboksilat), 1623 cm^{-1} (regangan C=O dari cincin 4-quinolone), $1588\text{--}1495\text{ cm}^{-1}$ (regangan C=C aromatik), 1449 cm^{-1} (bending C–H), 1384 cm^{-1} (regangan C–N), 1267 cm^{-1} (regangan C–O dari COOH), dan pita $1250\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ yang dikaitkan dengan regangan C–F aromatik. Pita-pita ini merupakan ciri khas struktur ciprofloxacin dan dapat digunakan sebagai pembanding untuk mengidentifikasi keberadaan ciprofloxacin atau fragmennya dalam proses adsorpsi maupun fotokatalisis. Adapun spektra IR yang menunjukkan ciri khas struktur ciprofloxacin yang ditampilkan pada Gambar 2.3.

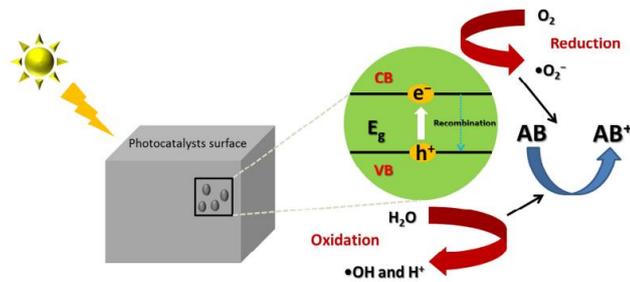


Gambar 2.3 Spektrum IR Ciprofloxacin (Kowalczuk, dkk., 2020)

Limbah ciprofloxacin menjadi masalah serius dalam pengelolaan lingkungan akibat efek merugikannya yang ditimbulkan dari pelepasan antibiotik ini ke dalam perairan. Pencemaran ini tidak hanya mengganggu ekosistem perairan, tetapi juga dapat menyebabkan resistensi antibiotik pada mikroorganisme (Alam, dkk., 2022). Peningkatan resistensi terhadap ciprofloxacin menjadi perhatian serius bagi para peneliti, terutama akibat penggunaan yang berlebihan di sektor kesehatan dan peternakan (An, dkk., 2010). Selain itu, antibiotik ini juga sering terdeteksi dalam air limbah dan air minum yang dapat menimbulkan risiko terhadap kesehatan manusia dan ekosistem yang dikarenakan keberadaannya dapat mempengaruhi mikroorganisme di lingkungan dan menyebabkan mutasi menjadi strain bakteri resisten (jenis bakteri yang kebal terhadap obat-obatan, terutama antibiotik) (De Graaff, dkk., 2011). Adapun kadar ciprofloxacin yang dapat merusak ekosistem perairan. Pada air limbah sebesar 11 hingga 99 mg/L dan pada air minum sebesar 0,032 mg/L (Parsa, dkk., 2016).

2.3 Fotokatalis

Fotokatalis adalah suatu proses yang menggunakan cahaya umumnya yang digunakan yaitu sinar ultraviolet (UV) untuk mempercepat reaksi kimia. Mekanisme fotokatalis dimulai saat material fotokatalis menyerap foton dari cahaya UV. Proses ini mengeksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi, sehingga menghasilkan pasangan elektron-*hole*. Elektron yang tereksitasi terjadi dalam reaksi reduksi, sedangkan *hole* berfungsi dalam reaksi oksidasi. Radikal yang dihasilkan dari reaksi ini kemudian menyerang kontaminan seperti senyawa organik atau antibiotik dan memfasilitasi degradasinya untuk menjadi produk yang lebih sederhana seperti air dan karbon dioksida. Proses ini sangat efektif dalam mengurangi polusi dan menangani limbah berbahaya (Chan, dkk., 2011). Mekanisme fotokatalis ditampilkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 4 Mekanisme fotokatalis pada degradasi antibiotik (Bai, dkk., 2022)

Beberapa senyawa metal oksida dilaporkan mempunyai sifat fotokatalis yang menarik di antaranya adalah titanium dioksida (TiO_2), zinc oksida (ZnO), ferum oksida (Fe_2O_3), dan cerium dioksida (CeO_2). Senyawa-senyawa ini dikenal karena stabilitasnya yang tinggi dalam berbagai kondisi pH, efisiensi yang baik dalam proses degradasi polutan organik, serta biaya yang relatif rendah dan ketersediaannya yang mudah (Kumari, dkk., 2023). Hassaan, dkk (2023) juga melaporkan bahwa TiO_2 memiliki kemampuan yang efektif dalam mengurangi kontaminan organik di bawah sinar UV, berkat energi celap pita optimal yang mendukung penyerapan cahaya dan pembentukan pasangan elektron-hole ($e^- - h^+$). ZnO juga memiliki aktivitas fotokatalitik yang baik, dapat beroperasi di bawah sinar matahari langsung dan berpotensi mengurangi emisi CO_2 (Sliem, dkk., 2019). Sementara itu, Fe_2O_3 menawarkan stabilitas yang baik dan biaya produksi rendah, menjadikannya pilihan menarik untuk aplikasi fotokatalisis dalam pemurnian air (Hassaan, dkk., 2023).

2.4 Efek Sinergis Adsorpsi-Fotokatalis

Sinergitas antara adsorpsi dan fotokatalisis merupakan pendekatan yang menjanjikan dalam pengolahan air limbah terutama untuk menghilangkan kontaminan organik seperti zat pewarna dan antibiotik. Proses adsorpsi melibatkan penempelan molekul kontaminan pada permukaan adsorben yang dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor termasuk pH, suhu, dan konsentrasi awal kontaminan. Adsorben yang efektif seperti luas permukaan yang besar menyediakan lebih banyak situs aktif untuk interaksi dengan molekul kontaminan sehingga meningkatkan kapasitas adsorpsi. Selain itu juga berpotensi meningkatkan konsentrasi kontaminan di permukaan fotokatalis yang berkontribusi pada percepatan laju reaksi fotokatalitik (Chokejaroenrat, dkk., 2023). Adsorpsi berfungsi sebagai langkah awal yang penting dalam proses fotokatalisis dimana kontaminan akan menempel pada permukaan fotokatalis. Proses tersebut dapat meningkatkan konsentrasi zat target di dekat permukaan katalis serta dapat mempengaruhi efisiensi degradasi. Li, dkk (2016) melaporkan bahwa sekitar 80% dari laju penghilangan ibuprofen berkaitan dengan adsorpsi pada BiOBr . Hal tersebut menunjukkan bahwa kemampuan adsorpsi material tersebut berkontribusi secara signifikan terhadap efektivitas proses fotokatalitik secara keseluruhan. Mekanisme pertukaran anion antara ion bromida dan ion ibuprofen yang terdisosiasi juga

berperan dalam pembentukan ikatan Bi-O pada permukaan BiOBr yang memperkuat interaksi antara kontaminan dan katalis.

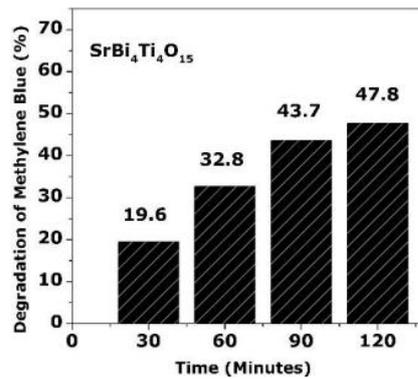
Sifat adsorpsi pada fotokatalis sangat berperan penting dalam proses degradasi polutan senyawa organik seperti ciprofloxacin di lingkungan. Adsorpsi mengacu pada kemampuan fotokatalis untuk menarik dan menempelkan molekul polutan pada permukaannya yang memfasilitasi reaksi fotokatalitik. Proses ini terjadi melalui interaksi fisik dan kimia antara permukaan fotokatalis dan molekul polutan, dimana faktor-faktor seperti luas permukaan, ukuran partikel, dan sifat kimia dari fotokatalis sangat berperan penting. Misalnya, fotokatalis berbasis titanium dioksida (TiO_2) memiliki luas permukaan yang besar dan kemampuan untuk menarik molekul polutan melalui ikatan hidrogen atau interaksi Van der Waals, sehingga dapat meningkatkan efisiensi degradasi polutan di bawah sinar UV (Wang, dkk., 2017). Selain itu, proses adsorpsi juga dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti pH larutan. pH yang rendah (asam) dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi serta efisiensi pengikatan pewarna. Hal tersebut disebabkan oleh elektrostatik interaksi antara permukaan adsorben yang terprotonasi dan ion negatif dari pewarna (Banerjee, dkk., 2021).

Kemampuan sifat adsorpsi-fotokatalis dalam penanganan limbah organik terbukti sangat efektif, terutama dalam menghilangkan kontaminan seperti antibiotik dari air. Proses ini menggabungkan dua mekanisme yaitu adsorpsi yang berfungsi untuk mengikat zat pencemar pada permukaan material. Sedangkan fotokatalis yang memanfaatkan cahaya untuk memicu reaksi degradasi. Kombinasi ini memungkinkan dapat menghilangkan kontaminan seperti antibiotik yang sulit diurai secara cepat dan lebih efisien. Beberapa pihak telah melaporkan bahwa sifat ini terbukti efektif dalam pengolahan limbah organik. Liu, dkk. (2020) telah melaporkan bahwa kemampuan sifat adsorpsi-fotokatalis terbukti efektif dalam menangani limbah organik norfoxacin (NOF) hingga 95% dalam waktu 3 jam pada kondisi optimal. Selain itu, pihak lain Nguyen, dkk. (2021) melaporkan bahwa komposit *sugarcane bagasse*/N,S- TiO_2 juga mampu menghilangkan sekitar 86% ciprofloxacin dari larutan dengan kondisi optimal. Pihak lain Banerjee, dkk. (2021) juga melaporkan bahwa $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ terbukti efektif dalam menghilangkan pewarna FD&C Yellow 5 dari larutan dengan adsorpsi sebesar 133,3 mg/g pada suhu 323 K dengan penghilangan maksimum 92% pada pH 2. Dalam proses fotokatalisisnya, efisiensi degradasi mencapai 89% untuk konsentrasi awal 10 mg/L dan 75% serta 69% untuk konsentrasi 25 mg/L dan 50 mg/L. Pihak selanjutnya yaitu Chokejaroenrat, dkk. (2023) juga melaporkan bahwa penggunaan nanopartikel $\text{Cu}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ terbukti efektif dalam menghilangkan semua jenis paraben dan OTC dalam waktu 120 menit dan 45 menit. Efisiensi degradasi paraben yang dihasilkan berkisar >95%. Pihak selanjutnya yakni Fazal, dkk. (2019) juga melaporkan bahwa penggunaan komposit biochar- TiO_2 menunjukkan efisiensi fotodegradasi >99% terhadap pewarna rhodamin-B dalam limbah tekstil.

2.5 Pengaruh Morfologi Pada Aktivitas Fotokatalis

Sifat fotokatalitik dari material semikonduktor sangat dipengaruhi oleh morfologi dan ukuran partikel. Material dengan luas permukaan yang besar, ketebalan yang rendah, dan struktur berongga dapat meningkatkan penyerapan cahaya serta aksesibilitas fotokatalis. Morfologi semikonduktor, termasuk ukuran, bentuk, dan distribusi permukaan, dapat mempengaruhi laju pemisahan dan rekombinasi pembawa muatan (elektron-*hole*) yang dihasilkan selama proses fotokatalisis (Wei, dkk., 2019). Struktur dan bentuk partikel fotokatalis dapat mempengaruhi luas permukaan, distribusi ukuran partikel, serta kemampuan penyerapan cahaya. Misalnya, fotokatalis dengan morfologi nanopartikel atau nanofiber seringkali menunjukkan luas permukaan yang lebih besar, yang meningkatkan interaksi dengan kontaminan dan mempercepat reaksi degradasi. Selain itu, morfologi yang terstruktur seperti nanotube atau *nanoplates* dapat membantu mengurangi laju rekombinasi pasangan muatan (elektron-*hole*), sehingga meningkatkan efisiensi proses fotokatalitik (Chen, dkk., 2020). Modifikasi morfologi fotokatalis, seperti doping logam atau pengaturan bentuk, dapat secara signifikan meningkatkan kinerja dalam penguraian senyawa organik, termasuk antibiotik seperti ciprofloxacin (Wang, dkk., 2017).

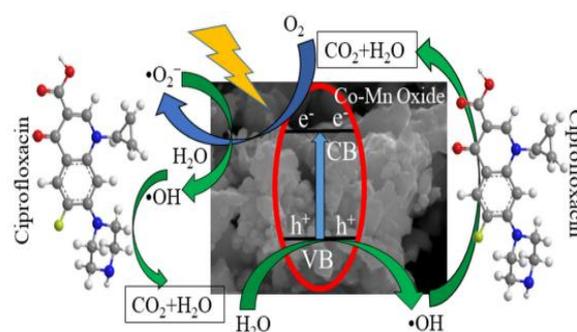
Senyawa Aurivillius khususnya $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ memiliki morfologi partikel yang berbentuk lembaran (*sheet*) yang terbukti memiliki aktivitas fotokatalitik yang baik. Beberapa pihak telah melaporkan diantaranya al-Abror, dkk. (2023) yang mengatakan bahwa partikel dengan bentuk lembaran memiliki jumlah situs aktif yang lebih banyak di permukaan serta berkontribusi pada peningkatan interaksi antara fotokatalis dan zat pencemar. Partikel $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang dihasilkan melalui metode lelehan garam menunjukkan morfologi berbentuk lembaran dengan ukuran partikel berkisar 250-500 nm dan cenderung teragregasi. Hal tersebut menunjukkan bahwa laju nukleasi yang lebih tinggi dibandingkan laju pertumbuhan partikel memproduksi lebih kecil yang memiliki area permukaan yang lebih besar (al-Abror, dkk., 2023). Morfologi lembaran pada senyawa Aurivillius seperti yang dilaporkan oleh Sari, dkk. (2022), meningkatkan aktivitas fotokatalitik dengan memperbesar luas permukaan dan menyediakan lebih banyak situs aktif akan mengurangi rekombinasi elektron-*hole* dan meningkatkan efisiensi degradasi zat pencemar. Kemampuan fotokatalis $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dalam mendegradasi metilen biru meningkat seiring berjalannya waktu. Setelah 120 menit, konsentrasi metilen biru berkurang hingga 47,8%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa waktu yang lebih lama dalam proses fotokatalitik meningkatkan efisiensi degradasi (al-Abror, dkk., 2023). Hasil persentase degradasi metilen biru oleh $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ tersebut ditampilkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Persentase degradasi metilen biru oleh $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (al-Abror, dkk., 2023)

2.6 Degradasi Bahan Antibiotik oleh Material Fotokatalis

Salah satu aplikasi dari teknologi fotokatalis adalah dapat digunakan untuk mendegradasi senyawa antibiotik. Mekanisme senyawa fotokatalisis dalam mendegradasi antibiotik dapat diterangkan sebagai berikut. Fotokatalis yang menyerap foton dengan energi lebih tinggi dari celah pita semikonduktornya. Proses fotoinduksi ini memisahkan pasangan elektron (e^-) dan *hole* (h^+), yang kemudian berpindah ke permukaan fotokatalis. h^+ yang dihasilkan bereaksi dengan antibiotik secara langsung yang menyebabkan degradasi senyawa tersebut menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$). Secara singkat radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) dan antibiotik teradsorpsi pada permukaan katalis, di mana interaksi antara ($\bullet\text{OH}$) dan antibiotik dalam larutan menjadi jalur utama untuk degradasi fotokatalitik antibiotik berbasis bismut (Chen, dkk., 2020). Antibiotik kemudian teroksidasi oleh oksigen menjadi senyawa molekul yang lebih kecil, yang akhirnya menghasilkan H^+ , O_2 , atau OH yang terdekomposisi menjadi CO_2 dan H_2O (Zhao, dkk., 2013). Mekanisme fotokatalis degradasi antibiotik ditampilkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 6 Mekanisme fotokatalis degradasi antibiotik (Alam, dkk., 2022)

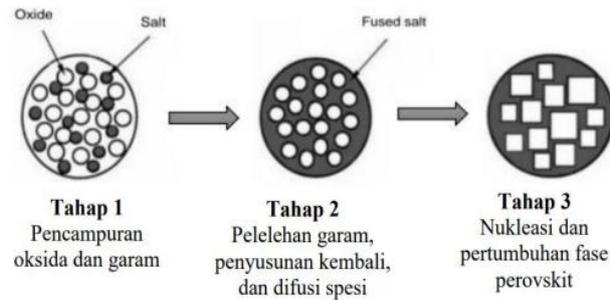
Beberapa senyawa telah dilaporkan mampu mendegradasi senyawa antibiotik diantaranya adalah bismut oksida (Bi_2O_3), bismut sulfida, bismut oksihalida, titanium dioksida (TiO_2) dan zinc oksida (ZnO). Wei, dkk. (2020) melaporkan bahwa TiO_2 efektif untuk menguraikan tetracycline dalam limbah antibiotik dengan efisiensi degradasi lebih dari 90%. Qin, dkk (2021) juga melaporkan bahwa senyawa fotokatalis bismut mampu mendegradasi

antibiotik dengan efektivitas yang signifikan. Salah satu contohnya adalah penggunaan bismut oksida (Bi_2O_3) yang mampu menghilangkan hingga 94,79% tetracycline dalam waktu 150 menit saat terpapar sinar tampak. Selain itu, Sliem, dkk (2019) juga melaporkan bahwa senyawa nanopartikel logam oksida seperti ZnO dan NiO mampu mendegradasi antibiotik menggunakan fotokatalisis untuk menguraikan senyawa anthracene, menunjukkan bahwa efisiensi degradasi lebih dari 90%.

2.7 Sintesis Senyawa Aurivillius Dengan Metode Lelehan Garam

Metode sintesis yang digunakan adalah metode lelehan garam. Metode ini merupakan teknik sederhana untuk menghasilkan partikel dengan morfologi khas seperti *microsphere*, dan *plate-like*. Dalam metode ini, garam berfungsi sebagai media reaksi. Kelebihan metode lelehan garam adalah dapat dilakukan pada suhu sintesis yang rendah, ramah lingkungan, waktu sintesis singkat, dan sederhana (Chanif, 2021). Beberapa faktor yang mempengaruhi proses ini meliputi: (a) suhu sintesis, (b) jenis garam fluks, dan (c) rasio oksida terhadap garam. Beberapa peneliti menggunakan campuran garam NaCl-KCl dan $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{K}_2\text{SO}_4$ untuk melakukan sintesis.

Tahapan sintesis lelehan garam terdapat tiga tahap. Pada tahap awal, oksida reaktan dicampurkan dengan garam seperti NaCl, KCl, atau campuran eutektik seperti NaCl-KCl, NaOH-KOH, atau $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{K}_2\text{SO}_4$. Campuran ini kemudian dipanaskan pada suhu di atas titik leleh garam untuk membentuk fluks cair. Pada suhu ini, molekul prekursor menyebar, terdisosiasi, mengatur ulang, dan berdifusi secara cepat di seluruh larutan garam. Selanjutnya, partikel produk mulai terbentuk melalui proses pengendapan. Pemilihan suhu dan durasi pemanasan berperan penting dalam mengontrol karakteristik bubuk yang dihasilkan. Setelah proses reaksi, campuran didiamkan hingga mencapai suhu ruangan dan dicuci dengan pelarut seperti air untuk menghilangkan sisa garam. Setelah pengeringan, bubuk oksida *perovskite* kompleks dapat diperoleh. Metode sintesis lelehan garam ini memiliki beberapa karakteristik unik dibandingkan dengan teknik sintesis lainnya. Keunikan karakteristik dari *Molten Salt Synthesis* (MSS) ditentukan oleh pemilihan jenis garam yang digunakan untuk mensintesis senyawa Aurivillius. Pemilihan garam ini dapat mempengaruhi morfologi dan kemurnian hasil sintesis. Senyawa Aurivillius telah berhasil disintesis menggunakan metode ini, yang dapat memanfaatkan campuran garam eutektik seperti NaCl-KCl, NaOH-KOH, atau $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{K}_2\text{SO}_4$, serta garam tunggal seperti NaCl atau KCl (Chang, dkk., 2014). Adapun ilustrasi proses lelehan garam yang ditampilkan pada Gambar 2.6.

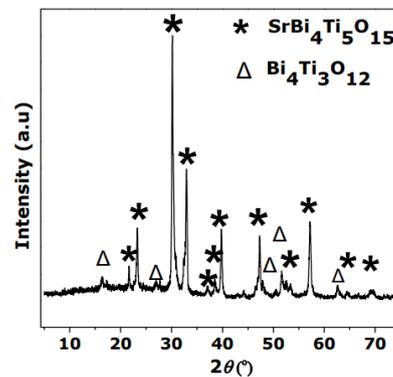


Gambar 2. 7 Ilustrasi proses lelehan garam (Chanif, 2021)

Metode lelehan garam terbukti efektif dalam menghasilkan morfologi Aurivillius yang khas berbentuk seperti *plate-like*. Mekanisme pembentukan morfologi berbentuk *plate-like* dengan metode lelehan garam adalah sebagai berikut: (1) reaksi padatan dan nukleasi, (2) proses pembentukan morfologi *plate-like*, (3) proses difusi dan nukleasi tepi, dan (4) proses difusi dan pertumbuhan kristal. Jenis dan rasio mol garam juga merupakan faktor penting yang mempengaruhi ukuran dan ketebalan partikel berbentuk *plate-like* (Himmah, dkk., 2022).

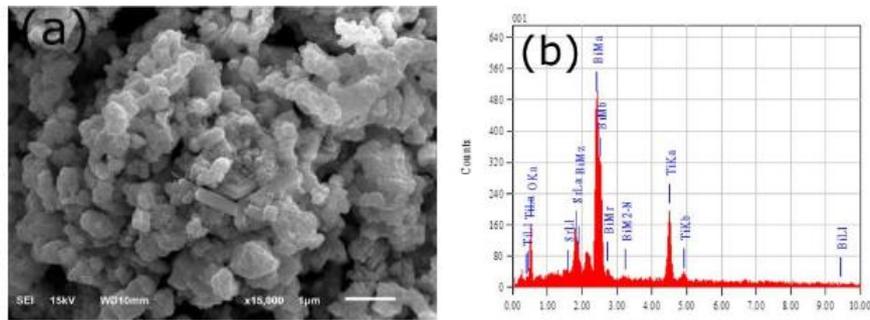
2.8 Sintesis Senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Dengan Metode Lelehan Garam

Sintesis senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ telah dilaporkan beberapa pihak. Al-Abror, dkk (2023) melaporkan bahwa senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ berhasil disintesis dengan metode lelehan garam NaCl-KCl yang dilakukan pada 750 dan 800°C. Difraktogram $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ ditampilkan pada Gambar 2.7.



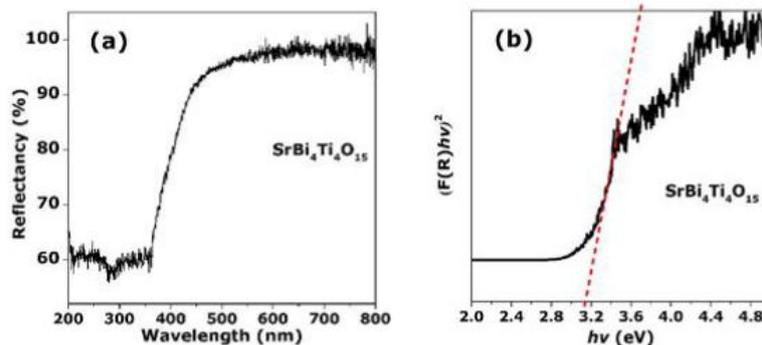
Gambar 2. 8 Difraktogram $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (al-Abror dkk., 2023)

Hasil difraktogram $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang ditampilkan pada Gambar 2.8, menunjukkan puncak-puncak difraksi sesuai dengan data *Joint Committee on Powder Diffraction Standard* (JCPDS) No.43-0973. Puncak-puncak yang teridentifikasi pada posisi $2\theta = 21,76; 23,1; 30,3; 32,9; 37,2; 38,7; 39,7; 47,2; 52,5; 57,2; 64,57; \text{ dan } 69,2^\circ$. Akan tetapi difraktogram juga menunjukkan adanya puncak tambahan yang mengidentifikasikan adanya senyawa pengotor $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$. Puncak-puncak tersebut terletak pada $2\theta = 16,3; 26,93; 48,09; 51,39; \text{ dan } 62,52^\circ$ yang menunjukkan bahwa reaksi antara prekursor Bi_2O_3 dan TiO_2 tidak sepenuhnya berhasil karena tidak ada reaksi dengan SrCO_3 .



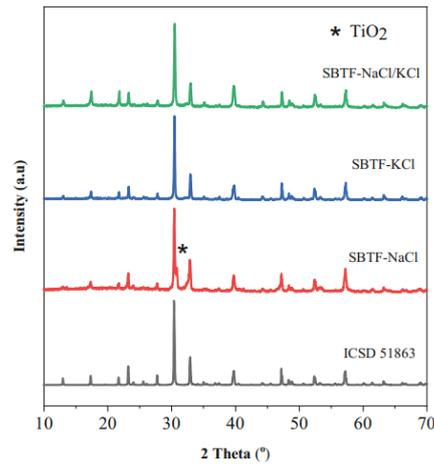
Gambar 2. 9 (a) mikrograf-SEM (b) spektrum EDS (al-Abror, dkk, 2023)

Hasil analisis SEM pada Gambar 2.9, sintesis yang dilakukannya menggunakan metode lelehan garam menghasilkan partikel dengan morfologi berbentuk *plate-like* dengan ukuran partikel sekitar 250-500 nm dan banyak aglomerasi yang menunjukkan bahwa laju nukleasi lebih tinggi dibandingkan laju pertumbuhan partikel. Laju nukleasi yang lebih tinggi menghasilkan sejumlah besar partikel berukuran kecil yang seragam. Serta ukuran kristalit yang dihasilkan sekitar 80 nm. Sementara itu, hasil analisis UV-DRS pada Gambar 2.10 menunjukkan energi celah pita yang dihasilkan sebesar 3,14 eV dengan panjang gelombang 394,85 nm.



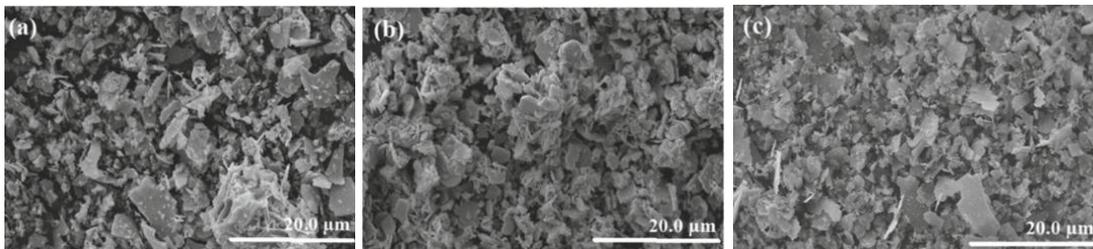
Gambar 2. 10 (a) spektrum UV-DRS dan (b) Tauc Plot SrBi₄Ti₄O₁₅ (al-Abror dkk., 2023)

Selain itu, pihak lain Sholikhah & Prasetyo (2023) berhasil mensintesis senyawa SrBi₄Ti_{3.9}Fe_{0.1}O₁₅ dengan menggunakan metode lelehan garam dengan variasi garam NaCl-KCl, KCl dan NaCl. Hasil analisis XRD pada Gambar 2.9 menunjukkan bahwa senyawa target berhasil disintesis tanpa adanya kontaminasi pada variasi garam NaCl-KCl dan KCl. Puncak-puncak khas yang teramati pada posisi 2θ mencakup 17,3; 21,7; 23,2; 27,7; 30,4; 32,9; 39,7; 47,2; 52,3; dan 57,1°. Puncak-puncak difraksi tersebut sesuai dengan data yang ada di *Joint Committee on Powder Diffraction Standard* (JCPDS) Nomor 51863. Namun, pada sampel yang disintesis menggunakan garam NaCl, terdeteksi adanya puncak tambahan pada 30.75° yang menunjukkan keberadaan kontaminasi TiO₂ akibat reaksi yang tidak sempurna. Adapaun gambar difraktogram SrBi₄Ti_{3.9}Fe_{0.1}O₁₅ dengan variasi garam yang ditampilkan pada Gambar 2.11.



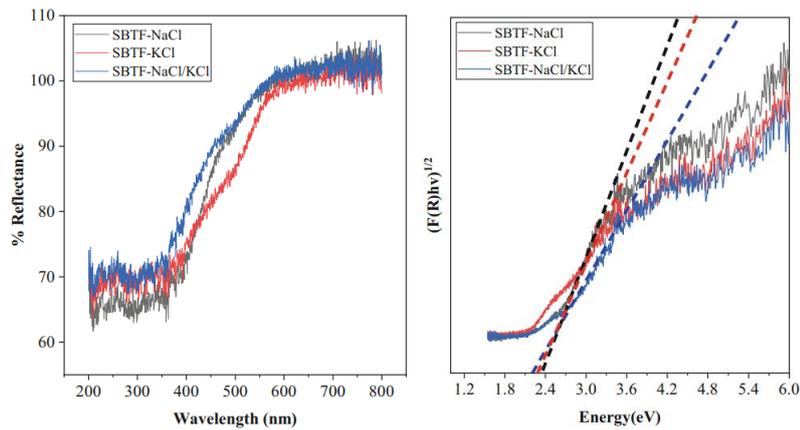
Gambar 2. 11 Difraktogram $\text{SrBi}_4\text{Ti}_{3.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_{15}$ dengan variasi garam (Sholikhah & Prasetyo, 2023)

Dalam hasil analisis SEM pada Gambar 2.11, morfologi partikel yang dihasilkan memiliki bentuk menyerupai *plate-like* tebal dengan ukuran yang tidak seragam yang mengindikasikan bahwa proses pertumbuhan partikel berlangsung secara konsisten meskipun terdapat variasi ukuran. Sampel yang disintesis dengan garam NaCl-KCl memiliki ukuran partikel yang lebih kecil dibandingkan dengan sampel menggunakan garam NaCl dan KCl yang dapat berpengaruh terhadap aktivitas fotokatalitik dari senyawa tersebut. Adapun hasil analisis SEM senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_{3.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_{15}$ dengan variasi garam yang ditampilkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2. 12 Mikrograf senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_{3.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_{15}$ dengan variasi garam (a) NaCl; (b) KCl; (c) NaCl-KCl (Sholikhah & Prasetyo, 2023)

Sementara itu, hasil analisis UV-DRS pada Gambar 2.12 menunjukkan bahwa penambahan Fe sebagai dopan mengakibatkan pergeseran penyerapan ke area cahaya tampak yang mengindikasikan pengurangan energi celah pita. Nilai energi celah pita yang dihasilkan sebesar 2,31 hingga 2,21 eV. Penurunan tersebut menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ sebesar 3,0 eV. Hal tersebut menunjukkan bahwa doping Fe berhasil menurunkan energi celah pita dan meningkatkan potensi senyawa untuk digunakan sebagai material fotokatalis. Adapun hasil analisis UV-DRS ditampilkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2. 13 (a) % Reflektan $\text{SrBi}_4\text{Ti}_{3.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_{15}$ (b) Plot Tauc $\text{SrBi}_4\text{Ti}_{3.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_{15}$ (Sholikhah & Prasetyo, 2023)

2.9 Pengolahan Pencemaran Lingkungan dalam Pandangan Islam

Pencemaran lingkungan merupakan salah satu faktor yang sangat mempengaruhi keseimbangan ekosistem dan kehidupan manusia. Oleh karena itu, pengolahan pencemaran lingkungan merupakan teknologi penting bagi kehidupan manusia dan lingkungan di seluruh dunia. Allah Swt berfirman dalam surat al-Ahzab ayat 72:

إِنَّا عَرَضْنَا الْأَمَانَةَ عَلَى السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ وَالْجِبَالِ فَأَبَيْنَ أَنْ يَحْمِلْنَهَا وَأَشْفَقْنَ مِنْهَا وَحَمَلَهَا الْإِنْسَانُ
إِنَّهُ كَانَ ظَلُومًا جَهُولًا

Artinya : “Kami telah mengemukakan amanat kepada langit, bumi dan gunung-gunung, maka semuanya enggan untuk memikul amanat itu dan mereka khawatir akan mengkhianatinya, dan dipikullah amanat itu oleh manusia. Sesungguhnya manusia itu amat zalim dan amat bodoh.” (Q.S al-Ahzab/33: 72).

Menurut tafsir al-Misbah, amanah adalah tanggung jawab yang diberikan kepada orang lain untuk dijaga dan dikembalikan tepat waktu atau sesuai permintaan pemiliknya. Begitupun menurut tafsir al-Jalalayn yang menjelaskan bahwa amanah yang ditawarkan kepada langit, bumi, dan gunung-gunung adalah tanggung jawab yang besar. Ketiga ciptaan tersebut menolak untuk memikul amanah ini karena merasa tidak mampu, sedangkan manusia menerima tawaran tersebut. Amanah berlawanan dengan pengkhianatan dan hanya diberikan kepada individu yang dianggap mampu menjaga apa yang diberikan dengan baik. Dalam ajaran agama, amanah atau kepercayaan merupakan salah satu indikator keimanan, sebagaimana dinyatakan dalam sabda Nabi SAW yang menyebutkan bahwa tidak ada iman bagi orang yang tidak dapat dipercaya. Selain itu, amanah, yang berlawanan dengan pengkhianatan, berkaitan dengan perilaku dan interaksi seseorang. Amanah memerlukan kepercayaan yang menciptakan ketenangan batin dan keyakinan. Dalam konteks ini, amanah mencakup tidak hanya hal-hal material, tetapi juga aspek non-material yang beragam. Semua ini diperintahkan oleh Allah untuk dilaksanakan dengan baik (Shihab, 2011).

Allah telah memberikan tanggung jawab kepada manusia untuk mematuhi perintah-Nya dan menjauhi larangan-Nya. Setiap individu yang menerima perintah dari Allah SWT diwajibkan untuk melaksanakannya. Salah satu contohnya adalah dalam menjaga kelestarian lingkungan hidup; setiap orang harus berupaya menjaga kebersihan lingkungan agar tidak rusak atau tercemar, karena tugas yang diberikan Allah kepada manusia adalah untuk mengelolanya. Dalam konteks ini, Rasulullah SAW juga sangat menganjurkan umatnya untuk merawat lingkungan dan makhluk hidup di sekitarnya, seperti yang tercantum dalam hadis berikut:

ارْحَمُوا مَنْ فِي الْأَرْضِ يَرْحَمَكُم مَّن فِي السَّمَاءِ

Artinya: *“Sayangilah makhluk yang ada di bumi, niscaya makhluk yang ada di langit akan menyayangi kalian.”* (HR At-Tirmidzi: 1847).

Hadis tersebut menunjukkan bahwa setiap umat Islam berkewajiban untuk mencintai, menyayangi, merawat, dan menghargai lingkungan. Umat Islam tidak boleh meremehkan, mengabaikan, atau bahkan merusak lingkungan. Sumber daya alam dan lingkungan diciptakan untuk kepentingan manusia, tetapi manusia seharusnya tidak menggunakan atau merusaknya sembarangan. Nabi Muhammad SAW mendorong umatnya untuk peduli terhadap lingkungan. Allah menjanjikan dua jenis pahala, yaitu pahala di dunia berupa kehidupan yang bahagia dan sejahtera dalam lingkungan yang bersih dan hijau, serta pahala di akhirat berupa surga. Oleh karena itu, tindakan yang mencemari lingkungan dan tidak diperbaiki adalah suatu kerugian yang besar (Istianah, 2015).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Februari-Maret 2025 yang bertempat di Laboratorium Kimia Fisika Jurusan Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

Alat yang digunakan antara lain, seperangkat alat gelas, mortar *agate*, neraca analitik, tanur, *hot plate*, oven, alumunium foil, kertas saring, fotoreaktor, seperangkat instrumen XRD, seperangkat instrumen SEM, seperangkat instrumen UV-Vis DRS, seperangkat instrumen FTIR, dan seperangkat lampu UV.

3.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi serbuk SrCO_3 (Sigma Aldrich, 99,9%), serbuk Bi_2O_3 (Sigma Aldrich, 99,9%), serbuk TiO_2 (Sigma Aldrich, 99,9%), KCl (Sigma Aldrich, 99,9%), NaCl (Sigma Aldrich, 99,9%), AgNO_3 (Sigma Aldrich 2,3%), larutan ciprofloxacin, aseton dan akuades.

3.3 Rancangan Penelitian

Adapun rancangan penelitian ini adalah sebagai berikut,

- a. Tahapan sintesis $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan metode lelehan garam.
Penelitian dilakukan dengan metode deskriptif kualitatif. Adapun komposisi berat prekursor yang digunakan ditampilkan pada Tabel 3.1. Sintesis $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan metode lelehan garam NaCl/KCl dengan rasio sampel dan garam adalah 1:7:7. Sintesis dilakukan dengan mencampurkan prekursor dan garam secara stoikiometrik. Campuran yang terbentuk dikalsinasi berturut-turut pada suhu 750 dan 820°C selama 6 jam dan dilakukan pendinginan pada suhu ruang. Kemudian menghilangkan kadar garam dengan aquades dan endapan kemudian di oven pada suhu 90°C selama 3 jam (Haikal & Prasetyo, 2021; dan Saputra, 2024).

Tabel 3. 1 Massa tiap prekursor untuk mendapatkan senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

Senyawa Target	Massa Target (gram)	Massa Prekursor (gram)				
		SrCO_3	Bi_2O_3	TiO_2	NaCl	KCl
$\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	4	0,4281	2,702568	0,92644328	1,1843	1,5135

- b. Tahapan karakterisasi $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$
Tahapan karakterisasi disini dilakukan dengan XRD, SEM, dan UV-Vis DRS. Dilakukan karakterisasi (a) XRD digunakan untuk mengetahui kisi kristal, dan fasa yang yang

terbentuk, (b) SEM untuk mengetahui morfologi partikel, (c) Uv-Vis untuk mengetahui nilai energi celah pita senyawa produk dan (d) untuk mengetahui gugus fungsi apa saja yang terdapat di dalam sampel sebelum dan sesudah proses adsorpsi-fotokatalis.

c. Tahapan uji sinergitas adsorpsi-fotokatalis

Tahapan uji sinergitas adsorpsi-fotokatalis dilakukan dengan pengujian (a) kestabilan larutan ciprofloxacin untuk memastikan bahwa larutan ciprofloxacin tidak mengalami penguraian selama pengujian, (b) dilakukan pengujian kesetimbangan adsorpsi-desorpsi produk sintesis dengan variasi waktu 0; 30; 60; 90; 120; 140; dan 160 menit dalam reaktor pada kondisi gelap (tanpa sinar) untuk mengetahui senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ memiliki kemampuan menyerap terhadap ciprofloxacin. Kemudian dilanjutkan dengan penyaringan dengan kertas saring untuk memisahkan $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dari larutan. Selanjutnya dilakukan pengukuran absorbansi menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 271 nm. Pengujian kemampuan adsorpsi $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dilakukan sebanyak 3 kali pengulangan untuk memastikan bahwa hasil yang diperoleh konsisten dan meningkatkan akurasi pengukuran. (c) terakhir dilakukan pengujian adsorpsi-fotokatalisis produk yang sudah disintesis terhadap degradasi ciprofloxacin menggunakan reaktor fotokatalis dengan variasi waktu 30; 60; dan 90 menit. Pada tahapan uji aktivitas fotokatalitik dilakukan penyinaran menggunakan 5 lampu bohlman LED UV spotlight bulb 80 LEDs 220 V E27 yang secara umum memancarkan cahaya UV di kisaran panjang gelombang 365-395 nm. Selanjutnya dilakukan pengukuran absorbansi menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 271 nm dan dilakukan sebanyak 3 kali pengulangan.

Tabel 3. 2 Data Penelitian Pengujian Adsorpsi-fotokatalisis

Waktu	Pengulangan 1		Pengulangan 2		Rata-rata	
	Konsentrasi (ppm)	Degradasi (%)	Konsentrasi (ppm)	Degradasi (%)	Konsentrasi (ppm)	Degradasi (%)
30						
60						
90						

d. Analisa data

Analisis data senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ untuk menyesuaikan fasa kristal hasil sintesis menggunakan XRD. Data yang dihasilkan akan dibandingkan dengan database *Joint Committee on Powder Diffraction Standart* (JCPDS) untuk memastikan identifikasi fasa yang tepat. Dari data XRD yang diperoleh kemudian dilakukan analisa dengan perangkat lunak Rietica menggunakan metode Le-Bail untuk mengidentifikasi data kristalografi. Selain itu, data difraksi sinar-X juga dapat menunjukkan kristalinitas dan kemurnian hasil sintesis $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. Selanjutnya, morfologi dan ukuran partikel senyawa akan dianalisis menggunakan instrument SEM yang kemudian diolah dengan

Software image-J untuk hasil gambar karakterisasi. Ukuran partikel senyawa menggunakan SEM dianalisis apakah mempengaruhi sifat adsorpsi dan fotokatalisis. Analisa sampel untuk mengetahui energi celah pita menggunakan instrumen UV-Vis DRS, dimana setelah di analisa dengan instrumen tersebut dilakukan analisa dengan persamaan Kubelka-Munk. Analisis FTIR untuk mengetahui gugus fungsi apa saja yang terdapat di dalam sampel sebelum dan sesudah proses adsorpsi-fotokatalisis. Pada pengujian kesetimbangan adsorpsi-desorpsi data yang dihasilkan dari instrumen UV-Vis digunakan untuk mengukur nilai absorbansi yang kemudian dihitung untuk menentukan % adsorpsi. Sedangkan pengujian sinergitas adsorpsi-fotokatalis data absorbansi yang dihasilkan dari instrumen UV-Vis dihitung untuk menilai degradasi ciprofloxacin, sehingga dapat menganalisis sinergitas antara adsorpsi dan fotokatalis.

3.4 Tahapan Penelitian

Adapun tahap penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Tahapan sintesis senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan metode lelehan garam
- b. Tahapan karakterisasi senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ menggunakan (a) XRD; (b) SEM; (c) UV-Vis DRS; (d) FTIR
- c. Tahapan uji sinergitas adsorpsi-fotokatalis

3.5 Prosedur Kerja

3.5.1 Preparasi Bahan

Senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ disintesis sebanyak 4 gram dengan menggunakan prekursor SrCO_3 , Bi_2O_3 , TiO_2 . Adapun komposisi berat prekursor yang digunakan ditampilkan pada Tabel 3.1. Prekursor selanjutnya digerus menggunakan mortar *agate* selama 1 jam dan dihomogenkan menggunakan aseton.

3.5.2 Sintesis $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan Metode Lelehan Garam

Sampel yang telah dihaluskan akan dicampur dengan garam NaCl/KCl. Rasio garam yang digunakan adalah 1:1, dan rasio antara sampel dan garam adalah 1:7. Sampel dan garam dihomogenkan dengan cara digerus dalam mortar *agate* selama 1 jam. Sampel kemudian dikalsinasi pada suhu 750 dan 820°C selama 6 jam. Setelah itu, sampel dikeluarkan dari tanur dan didinginkan hingga mencapai suhu ruang. Sampel dicuci berulang kali menggunakan aquades panas untuk menghilangkan garam. Kandungan garam dalam produk dianalisis dengan meneteskan larutan AgNO_3 ke dalam filtrat; indikasi adanya garam dalam filtrat adalah terbentuknya endapan putih. Setelah garam hilang, produk dikeringkan dalam oven pada suhu 90°C selama 3 jam (Haikal & Prasetyo, 2021).

3.5.3 Karakterisasi Sampel Produk SrBi₄Ti₄O₁₅

3.5.3.1 Karakterisasi Menggunakan Instrumen XRD

Sampel sebanyak 0,5 g ditempatkan pada sampel *holder*. Pengukuran dilakukan pada suhu kamar menggunakan XRD dengan radiasi Cu K α (40 kV dan 30 mA) pada rentang $2\theta=10-90^\circ$.

3.5.3.2 Karakterisasi Menggunakan Instrumen SEM

Sampel sebanyak 50 mg ditempatkan pada sampel *holder* dan kemudian ditempatkan pada instrumen SEM untuk dilakukan analisa dengan pembesaran 5.000-15.000 kali.

3.5.3.3 Karakterisasi Menggunakan Instrumen UV-Vis DRS

Sampel dalam bentuk serbuk halus ditempatkan pada sampel *holder* dan persentase reflektansinya diukur pada 200–800 nm (Gu, dkk., 2017; Zhang, dkk., 2018).

3.5.3.4 Karakterisasi Menggunakan Instrumen FTIR

Sampel yang telah disaring pada perlakuan uji adsorpsi-desorpsi dan adsorpsi fotokatalis pada waktu tertentu, dikeringkan. Kemudian dicampur dengan KBr (kalium bromida) dalam perbandingan tertentu dan dipres menjadi pelet tipis. Pelet ini kemudian dianalisis menggunakan instrumen FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) dalam rentang bilangan gelombang 4000-400 cm⁻¹.

3.5.4 Analisis Data

3.5.4.1 Analisis Data XRD

Data yang didapatkan adalah pola difraksi sinar-X yang akan dibandingkan dengan standar SrBi₄Ti₄O₁₅ yang terdapat pada database *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS). Dari data XRD yang diperoleh kemudian dilakukan analisa dengan perangkat lunak Rietica menggunakan metode Le-Bail untuk mengidentifikasi data kristalografi. Selain itu, data difraksi sinar-X juga dapat menunjukkan kristalinitas dan kemurnian hasil sintesis SrBi₄Ti₄O₁₅ (Ranieri, dkk., 2013).

3.5.4.2 Analisis Data SEM

Data yang didapatkan adalah morfologi dan ukuran partikel dari senyawa SrBi₄Ti₄O₁₅ Gambar hasil karakterisasi diolah menggunakan *software image-J* (Rochayati,2023).

3.5.4.3 Analisis Data UV-Vis DRS

Data yang didapatkan akan dianalisa menggunakan persamaan Kubelka-Munk yang ditunjukkan pada persamaan 3.1 (Gu, dkk., 2017; Yurdakal, dkk., 2019).

$$F(R)=\frac{(1-R)^2}{2R}=\frac{k}{s}.....3.1$$

$F(R)$ adalah faktor Kubelka-Munk, K adalah koefisien absorpsi molar, S adalah koefisien scattering, dan R adalah nilai reflektan yang diukur. Nilai energi celah pita ditentukan

dengan membuat plot antara energi foton ($h\nu$) sebagai sumbu x dan $(F(R).h\nu)^{1/2}$ sebagai sumbu y . Energi foton dapat dihitung dari data panjang gelombang yang terukur, dimana $h\nu = hc/\lambda$ dengan c adalah tetapan cahaya dan h adalah tetapan *Planck*. Energi celah pita dihitung secara regresi linier pada nilai x ($h\nu =$ energi celah pita) ketika $y = 0$ (Gu, dkk., 2017; Yurdakal, dkk., 2019).

3.5.4.4 Analisis Data FTIR

Data yang didapatkan berupa spektrum dengan sumbu x yaitu panjang gelombang (cm^{-1}) dan sumbu y adalah transmittan. Spektra yang telah didapatkan kemudian diidentifikasi serapannya yang menunjukkan adanya gugus fungsi.

3.5.5 Uji Sinergitas Adsorpsi-Fotokatalis menggunakan Lampu UV

3.5.5.1 Pembuatan Larutan Induk *Ciprofloxacin*

Ciprofloxacin sebanyak 3 ml dilarutkan dengan menambahkan aquades dalam labu ukur 100 ml hingga tepat tanda batas dan dihomogenkan. Sehingga, diperoleh larutan induk 50 ppm.

3.5.5.2 Pembuatan Kurva Standar

Langkah pertama yang dilakukan yaitu diambil larutan induk ciprofloxacin sebanyak 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 mL kemudian dimasukkan ke dalam labu ukur 100 mL dan ditandabatkan menggunakan akuades kemudian dihomogenkan. Selanjutnya diambil sebanyak 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 ppm dan diukur absorbansinya menggunakan spektroskopi UV-Vis.

3.5.5.3 Pengujian Kestabilan Larutan *Ciprofloxacin*

Pengujian dilakukan dengan perlakuan tanpa sampel dan dengan/tanpa radiasi sinar UV pada larutan ciprofloxacin 8 ppm sebanyak 100 mL dengan dilakukan secara duplo. Kemudian masing-masing larutan diuji kestabilan di daerah gelap dan diuji kestabilan terpapar sinar UV dengan diletakkan dalam reaktor fotokatalis untuk mengetahui sifat dari larutan tersebut. Setelah itu, masing-masing larutan diuji selama 120 menit tanpa sinar UV dan diuji dengan sinar UV. Selanjutnya diukur masing-masing absorbansinya menggunakan spektroskopi UV-Vis. Pengukuran diulangi sebanyak tiga kali.

3.5.5.4 Pengujian Kesetimbangan Adsorpsi-Desorpsi Senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

Pengujian dilakukan pada sampel katalis $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. Larutan induk ciprofloxacin 8 ppm sebanyak 80 mL dimasukkan ke dalam gelas ukur 100 mL. Kemudian ditambahkan katalis $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ sebanyak 80 mg. Campuran kemudian dimasukkan ke dalam reaktor fotokatalis dan diaduk selama 0, 30, 60, 90, dan 120 menit penyimpanan tanpa cahaya untuk mengetahui kondisi kesetimbangan adsorpsi-desorpsi. Setelah itu, disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan endapan katalis dan supernatan. Supernatan dipindahkan ke dalam kuvet untuk diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Kemudian

diperiksa pH dengan menggunakan indikator universal. Pengukuran diulangi sebanyak dua kali.

3.5.5.5 Pengujian Adsorpsi-Fotokatalitik Menggunakan Lampu UV

Pengujian dilakukan pada sampel katalis $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. Larutan ciprofloxacin 8 ppm sebanyak 80 mL dimasukkan ke dalam beaker glass 100 mL. Kemudian ditambahkan katalis $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ sebanyak 80 mg. Campuran dimasukkan ke dalam reaktor fotokatalis dan diaduk dalam kegelapan selama waktu kesetimbangan (hasil percobaan pengujian adsorpsi-desorpsi). Kemudian dilakukan penyinaran menggunakan 5 lampu bohlman LED UV spotlight bulb 80 LEDs 220 V E27 (lampu UV komersial) selama 30, 60, dan 90 menit. Setelah dilakukan penyinaran, larutan disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan larutan ciprofloxacin dan endapan senyawa katalis. Kemudian, larutan ciprofloxacin dimasukkan ke dalam kuvet untuk dilakukan pengukuran serapan menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Nilai absorbansi pada panjang gelombang maksimum digunakan untuk mengetahui persen degradasi senyawa ciprofloxacin dan dilakukan pengukuran pH. Aktivitas fotodegradasi ciprofloxacin dilakukan dengan membandingkan absorbansi awal dan absorbansi setelah limbah didegradasi. Hasil data pengukuran degradasi akan diperoleh hubungan antara komposisi katalis, dengan % degradasi ciprofloxacin yang dihitung menggunakan persamaan 3.2.

$$\text{Degradasi (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \dots\dots\dots 3.2$$

Dengan C_0 adalah konsentrasi awal ciprofloxacin (mg/L) dan C_t adalah konsentrasi pada waktu t . Pengukuran diulang sebanyak tiga kali (Du, dkk., 2024).



Gambar 3. 1 Alat fotoreaktor

3.6 Analisis Data

Analisis data senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ untuk menyesuaikan fasa kristal hasil sintesis menggunakan XRD. Data yang dihasilkan akan dibandingkan dengan database *Joint Committee on Powder Diffraction Standart* (JCPDS) untuk memastikan identifikasi fasa yang tepat. Dari data XRD yang diperoleh kemudian dilakukan analisa dengan perangkat lunak Rietica menggunakan metode Le-Bail untuk mengidentifikasi data kristalografi. Selain itu, data

difraksi sinar-X juga dapat menunjukkan kristalinitas dan kemurnian hasil sintesis $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. Selanjutnya, morfologi dan ukuran partikel senyawa akan dianalisis menggunakan instrument SEM yang kemudian diolah dengan *Software image-J* untuk hasil gambar karakterisasi. Ukuran partikel senyawa menggunakan SEM dianalisis apakah mempengaruhi sifat adsorpsi dan fotokatalisis. Analisa sampel untuk mengetahui energi celah pita menggunakan instrumen UV-Vis DRS, kemudian dilakukan analisa dengan persamaan Kubelka-Munk. Analisa FTIR digunakan untuk melihat bagaimana kondisi gugus fungsi senyawa pada saat sebelum dan sesudah proses fotokatalis. Pada pengujian kesetimbangan adsorpsi-desorpsi data yang dihasilkan dari instrumen UV-Vis digunakan untuk mengukur nilai absorbansi yang kemudian dihitung untuk menentukan % adsorpsi. Sedangkan pengujian sinergitas adsorpsi-fotokatalis data absorbansi yang dihasilkan dari instrumen UV-Vis dihitung untuk menilai degradasi ciprofloxacin, sehingga dapat menganalisis sinergitas antara adsorpsi dan fotokatalis.

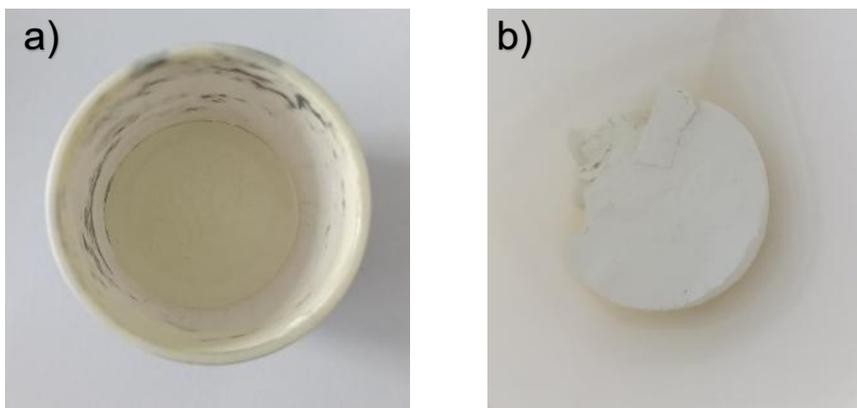
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini telah sintesis senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan metode lelehan garam campuran NaCl/KCl pada suhu kalsinasi 750 dan 820°C selama 6 jam. Senyawa produk hasil sintesis kemudian dikarakterisasi menggunakan: (a) XRD untuk mengetahui fasa dan struktur kristal yang terbentuk, (b) SEM untuk mengetahui morfologi partikel senyawa hasil sintesis, (c) UV-Vis DRS untuk mengetahui energi celah pita yang didapatkan dari senyawa hasil sintesis. Setelah itu, dilakukan uji adsorpsi-desorpsi ciprofloxacin oleh senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dan dilanjutkan dengan uji sinergistik adsorpsi-fotokatalis ciprofloxacin oleh senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. Kemudian dilakukan analisis FTIR sebelum dan sesudah proses adsorpsi-fotokatalitik ciprofloxacin.

4.1 Sintesis $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan Metode Lelehan Garam

Pada tahap sintesis senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ terjadi perubahan warna yang signifikan pada senyawa produk $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. Sebelum proses kalsinasi, sampel berwarna kuning kehijauan. Setelah proses kalsinasi, warna sampel berubah menjadi putih kekuningan. Perubahan ini ditampilkan pada Gambar 4.1. Perubahan warna yang terjadi menunjukkan bahwa suatu reaksi kimia antar prekursor pada saat proses kalsinasi berhasil dilakukan. Reaksi yang terjadi dalam sintesis $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ ditampilkan pada persamaan 4.1.



Gambar 4. 1 Perubahan warna sampel (a) sebelum kalsinasi dan (b) sesudah kalsinasi

Garam yang digunakan berperan sebagai media reaksi yang membantu homogenisasi campuran, tetapi harus dipastikan bahwa sisa garam tidak tertinggal dalam senyawa target karena dapat mempengaruhi sifat material yang dihasilkan. Oleh karena itu, setelah dikalsinasi, dilakukan proses pencucian menggunakan air panas untuk menghilangkan sisa-sisa garam, yang kemudian diuji keberadaannya dengan metode identifikasi ion klorida menggunakan larutan AgNO_3 . Hasil menunjukkan bahwa tidak ada endapan tetapi tidak jernih.

Prinsip uji ini merupakan reaksi ion Ag^+ dari larutan AgNO_3 dengan ion Cl^- dari sisa NaCl atau KCl dalam sampel yang membentuk endapan putih perak klorida (AgCl). Adapun reaksi yang terjadi selama proses identifikasi sisa garam dengan larutan AgNO_3 ditampilkan pada persamaan 4.2 dan 4.3.



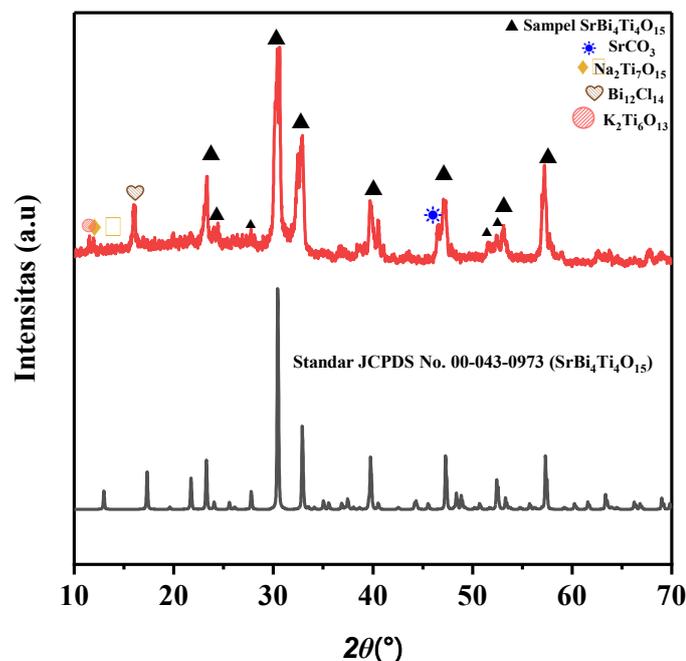
4.2 Karakterisasi Senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Menggunakan XRD

Difraktogram senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ ditampilkan pada Gambar 4.2. Dan selanjutnya dilakukan identifikasi puncak-puncak difraksi senyawa produk dengan mencocokkan pada data *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS) No. 00-049-0973 milik senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa telah ditemukan puncak-puncak khas pada senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ ditemukan pada 2θ ($^\circ$): 21,72 ; 23,36 ; 24,04 ; 26,1 ; 27,7 ; 30,4 ; 32,9 ; 36,8 ; 39,7 ; 40,5 ; 47,2 ; 48,3 ; 48,9 ; 51,6 ; 52,38 ; 53 dan 57. Selain itu, ditemukan beberapa puncak tambahan yang tidak sesuai dengan standar yang diindikasikan sebagai fasa pengotor. Setelah diidentifikasi, fasa pengotor yang terbentuk meliputi fasa SrCO_3 (2θ ($^\circ$) = 46,6), $\text{Na}_2\text{Ti}_7\text{O}_{15}$ (2θ ($^\circ$) = 11,94), $\text{K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{12}$ dan $\text{Bi}_{12}\text{Cl}_{14}$ (2θ ($^\circ$) = 11,5).

Fasa pengotor yang ditemukan dalam hasil sintesis senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dan garam yang digunakan, hal ini menunjukkan bahwa reaksi sintesis belum berlangsung sempurna. Fasa seperti SrCO_3 diduga berasal dari prekursor yang tidak bereaksi sempurna. Ketidakefektifan reaksi kemungkinan besar disebabkan oleh beberapa faktor yakni rasio prekursor yang kurang tepat, serta pencampuran yang kurang homogen sehingga prekursor tidak seluruhnya berinteraksi secara merata. Sedangkan fasa berbasis NaCl ($\text{Na}_2\text{Ti}_7\text{O}_{15}$, $\text{K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{12}$, dan $\text{Bi}_{12}\text{Cl}_{14}$) berkemungkinan besar terbentuk akibat interaksi antara prekursor dan komponen garam lelehan NaCl-KCl yang digunakan sebagai media sintesis. Dalam sintesis menggunakan metode lelehan garam, garam tidak hanya berfungsi sebagai media reaksi untuk meningkatkan difusi ionik, tetapi juga dapat bereaksi secara langsung dengan prekursor, terutama pada suhu tinggi (Tu, dkk., 2019). Ion Na^+ dan Cl^- dari garam NaCl-KCl berpotensi membentuk senyawa baru apabila berinteraksi dengan kation dari prekursor seperti Ti^{4+} atau Bi^{3+} , sehingga membentuk senyawa seperti $\text{Na}_2\text{Ti}_7\text{O}_{15}$, $\text{Na}_{0,57}\text{Ti}_2\text{O}_4$, dan $\text{Bi}_{12}\text{Cl}_{14}$. Pihak lain, Dewi & Prasetyo (2023) melaporkan bahwa penggunaan garam NaCl-KCl cenderung menghasilkan fasa pengotor seperti SrCO_3 dan $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (Dewi & Prasetyo, 2023). Zhong, dkk., (2018) juga melaporkan bahwa $\text{Bi}_4\text{Nb}_8\text{O}_8\text{Cl}$ yang disintesisnya juga teridentifikasi fasa pengotor BiOCl yang disebabkan oleh volatilisasi senyawa Bi-O-Cl dari zona leleh selama proses pemanasan dan pendinginan yang terlalu lambat, sehingga senyawa tersebut menguap dan kemudian mengkristal kembali di luar zona pertumbuhan utama (Zhong, dkk., 2018). Teridentifikasinya puncak-puncak minor atau adanya fasa pengotor pada difraktogram, disebabkan oleh proses homogenisasi prekursor yang kurang merata, suhu kalsinasi yang belum optimal, serta sisa garam yang belum sepenuhnya tereliminasi setelah pencucian.

Ketidakhadiran material yang dihasilkan dapat berpengaruh terhadap morfologi dan ukuran partikel material menurunkan aktivitas fotokatalitik karena fasa pengotor dapat menutupi situs aktif permukaan katalis atau menghambat proses pemisahan muatan, sehingga menurunkan efisiensi fotodegradasi ciprofloxacin.

Difraktogram senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang dihasilkan menunjukkan puncak-puncak difraksi yang melebar dan tidak tajam disertai dengan latar belakang intensitas yang cukup tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa material tersebut memiliki tingkat kristalinitas yang rendah. Pelebaran puncak difraksi biasanya terjadi akibat ukuran kristalit yang kecil serta adanya ketidakteraturan dalam struktur kristal. Semakin kecil ukuran kristalit, semakin lebar pula puncak yang terbentuk. Latar belakang yang tinggi dan tidak merata pada difraktogram XRD disebabkan oleh keberadaan fase amorf pada sampel yang menghasilkan hamburan difus sehingga meningkatkan intensitas latar belakang. Keberadaan fase amorf menyebabkan intensitas puncak difraksi menurun dan memperlebar puncak tersebut sehingga mempersulit identifikasi fase kristalin yang ada (Veres, dkk., 2012).

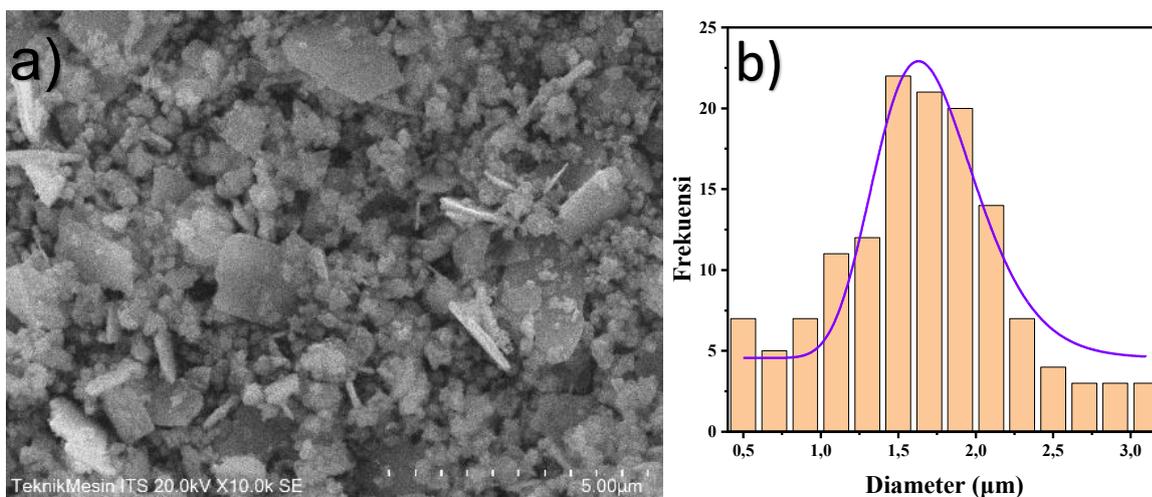


Gambar 4. 2 Difraktogram senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

4.3 Karakterisasi Senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Menggunakan SEM

Hasil karakterisasi menggunakan SEM dengan perbesaran 10.000 kali yang ditampilkan pada Gambar 4.3. Morfologi partikel yang dihasilkan menunjukkan adanya morfologi *plate-like*. Morfologi tersebut adalah ciri khas dari senyawa Aurivillius salah satunya $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang memiliki struktur kristal berlapis dan anisotropik. Anisotropik merupakan susunan atom berlapis yang mempengaruhi arah pertumbuhan kristal yang menyebabkan terbentuknya morfologi *plate-like* (Zhang, dkk., 2023). Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa sampel memiliki ukuran partikel yang tidak seragam dengan adanya partikel-partikel

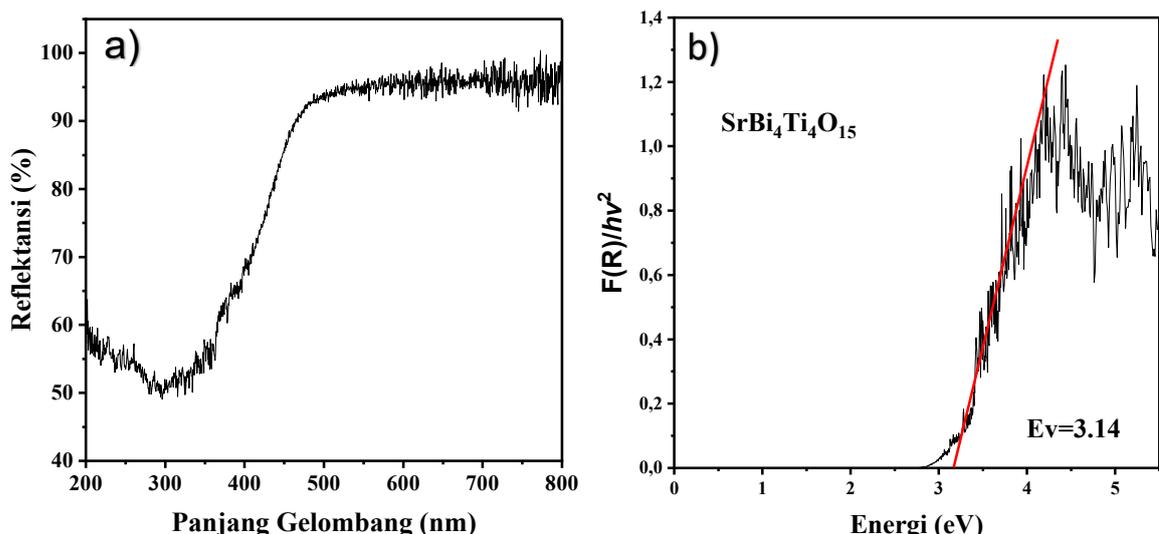
kecil yang tersebar bersamaan dengan partikel berukuran besar. Distribusi ukuran partikel ini menunjukkan heterogenitas morfologi permukaan, dimana partikel dengan ukuran dominan berkisar 1–2 μm , namun juga ditemukan partikel dengan ukuran yang lebih besar. Ukuran partikel memiliki hubungan berbanding terbalik dengan luas permukaan spesifik, di mana semakin kecil ukuran partikel maka luas permukaan total yang tersedia akan semakin besar. Ukuran partikel yang tidak seragam dapat memengaruhi luas permukaan aktif yang tersedia untuk proses adsorpsi. Semakin besar luas permukaan, maka semakin banyak situs aktif yang tersedia untuk berinteraksi dengan molekul ciprofloxacin. Ukuran partikel yang relatif kecil ini mengindikasikan bahwa laju nukleasi yang tinggi. Marela, dkk., (2021) melaporkan bahwa pada suhu sintesis yang lebih rendah, laju nukleasi lebih tinggi sehingga menghasilkan banyak inti kristal dalam waktu singkat. Pembentukan inti kristal yang banyak dapat menyebabkan pertumbuhan partikel cenderung terbatas, sehingga menghasilkan ukuran partikel yang lebih kecil secara keseluruhan. Meskipun terdapat variasi ukuran partikel, ditemukan juga indikasi terjadinya aglomerasi parsial (proses penggumpalan partikel-partikel kecil menjadi agregat padat) (Marella, dkk., 2021). Morfologi plate-like dan ukuran partikel yang tidak seragam serta adanya aglomerasi parsial dipengaruhi oleh jenis garam, rasio prekursor dan suhu kalsinasi yang belum mampu memfasilitasi pertumbuhan kristal sehingga menghasilkan distribusi ukuran partikel yang tidak seragam. Dengan demikian, morfologi *plate-like* yang terbentuk tetap menunjukkan ciri khas Aurivillius, tetapi ketidakseragaman ukuran partikel dapat menjadi indikasi bahwa fasa utama tidak terbentuk secara murni. Dapat dikatakan bahwa hasil XRD yang tidak murni berpengaruh terhadap ketidakseragaman ukuran. Ketidakhomogenan ukuran partikel dapat memengaruhi kinerja adsorpsi dan aktivitas fotokatalitik material karena morfologi permukaan yang beragam akan mempengaruhi luas permukaan efektif serta distribusi cahaya dan transfer muatan antar partikel (Li, dkk., 2020).



Gambar 4.3 Hasil SEM senyawa SrBi₄Ti₄O₁₅ dengan perbesaran (a) 10.000x dan (b) distribusi ukuran partikel

4.4 Karakterisasi Senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Menggunakan UV-Vis DRS

Spektra reflektansi senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ ditampilkan pada Gambar 4.4. Data yang didapat selanjutnya diolah menggunakan persamaan Kubelka-Munk untuk menghitung nilai energi celah pita. Berdasarkan hasil yang didapat senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ menghasilkan energi celah pita sebesar 3,14 eV dengan panjang gelombang sebesar 394,85 nm yang mengindikasikan bahwa sampel dapat bekerja dibawah sinar tampak. Beberapa pihak telah melaporkan bahwa nilai energi celah pita senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. Al-Abror, dkk., (2023) melaporkan bahwa senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang disintesisnya menggunakan metode yang sama mendapatkan nilai energi celah pita sebesar 3,14 eV dengan panjang gelombang 394,85 nm (Al-Abror, dkk., 2023). Sementara pihak lain, Saputra (2024) juga melaporkan bahwa ia berhasil mensintesis senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan mendapatkan nilai energi celah pita sebesar 3,146 dengan panjang gelombang 394,41 nm. Hasil penelitian ini juga telah sesuai dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Saputra, 2024). Nilai energi celah pita sebesar 3,14 eV yang diperoleh masih berada dalam kisaran khas untuk $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$, sehingga secara umum tidak menunjukkan adanya penyimpangan besar akibat ketidakmurnian fasa. Namun, kehadiran fasa pengotor yang teridentifikasi dari hasil XRD tetap dapat memengaruhi nilai energi celah pita, terutama jika jumlahnya signifikan. Fasa pengotor atau cacat struktur dapat menyebabkan sedikit perubahan pada struktur elektronik material, yang bisa memperkecil atau memperbesar nilai energi celah pita (Nkrumah, dkk., 2023). Oleh karena itu, meskipun nilai 3,14 eV masih sesuai, energi celah pita juga dapat digunakan sebagai indikator pendukung untuk mengevaluasi tingkat kemurnian material. Spektrum reflektansi dan *Plot Tauc* dari senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ ditampilkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 a) Spektrum reflektansi senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (b) *Plot Tauc* senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

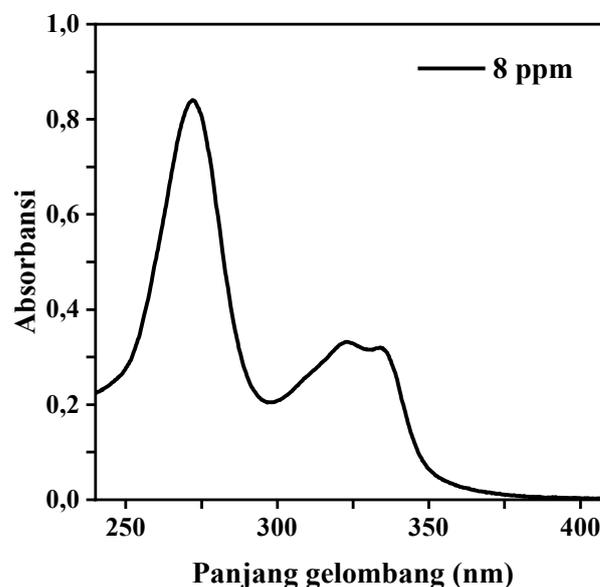
Energi celah pita senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ sebesar 3,14 meibatkan transisi elektronik dari orbital Bi-6s dan O-2p pada pita valensi menuju orbital Ti-3d pada pita konduksi (Al-Abror, dkk., 2022). Menurut Fujishima dan Honda (1972), transisi elektronik ini bertanggung jawab

atas proses eksitasi elektron yang terjadi saat material menyerap sinar ultraviolet (Fujishima & Honda, 1972). Rentang celah pita ini menunjukkan bahwa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ memiliki potensi sebagai fotokatalis, meskipun penyerapan utama berada pada wilayah UV yang merupakan bagian kecil dari spektrum cahaya matahari. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa celah pita efektif untuk aplikasi fotokatalis biasanya berkisar antara 1,5 hingga 3,2 eV, dimana transisi elektron yang terlalu kecil atau terlalu besar akan membatasi efisiensi penyerapan cahaya tampak (Li, dkk., 2020).

4.5 Uji Sinergitas Adsorpsi-Fotokatalis

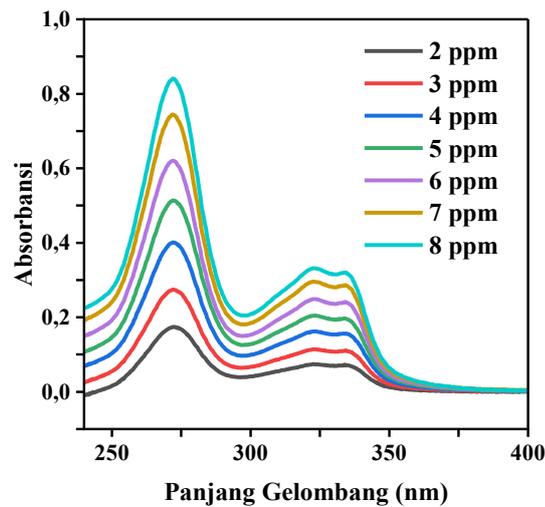
4.5.1 Penentuan Panjang Gelombang Maksimum Ciprofloxacin

Penentuan panjang gelombang maksimum larutan standar ciprofloxacin dilakukan menggunakan spektroskopi UV-Vis untuk mengetahui nilai absorbansi maksimum larutan ciprofloxacin. Spektrum ciprofloxacin ditampilkan pada Gambar 4.5. Dan dapat dilihat bahwa panjang gelombang maksimum dari ciprofloxacin adalah 272 nm yang melibatkan transisi elektron pada orbital π atau orbital *nonbonding* yang bertindak sebagai donor *n*-elektron. Transisi ini terjadi pada saat elektron dari orbital nonbonding (Dachriyanus, 2004). Transisi yang terjadi pada ciprofloxacin yaitu dari $\sigma \rightarrow \sigma^*$, $n \rightarrow \sigma^*$, $n \rightarrow \pi^*$, atau $\pi \rightarrow \pi^*$, (HOMO) (Gu, dkk., 2017).



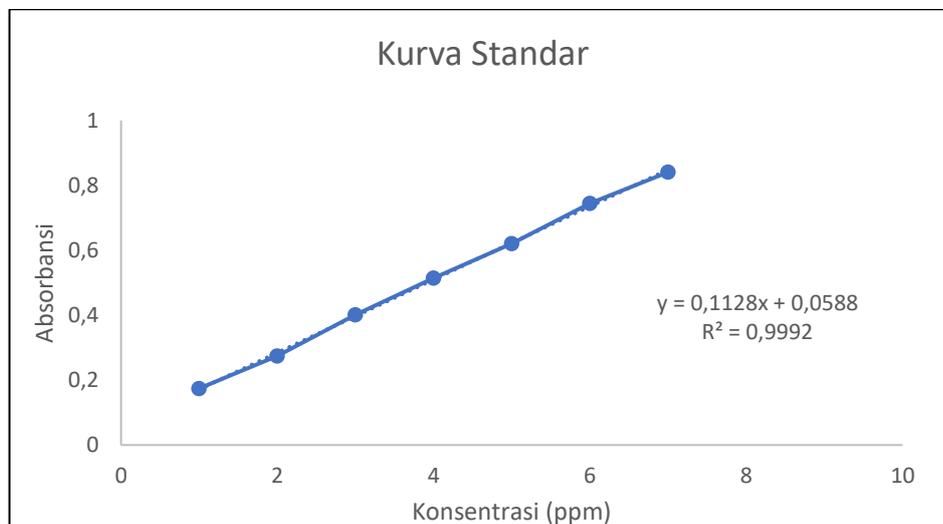
Gambar 4. 5 Spektra ciprofloxacin 8 ppm

4.5.2 Pembuatan Kurva Standar Larutan Ciprofloxacin



Gambar 4. 6 Spektrum absorpsi UV-Vis pada larutan standar ciprofloxacin

Pembuatan kurva standar ciprofloxacin dilakukan bertujuan untuk menentukan konsentrasi terukur ciprofloxacin dalam pengujian adsorpsi-desorpsi dan pengujian sinergitas adsorpsi-fotokatalis. Kurva baku dari ciprofloxacin dibuat pada konsentrasi 2, 3, 4, 5, 6, 7, dan 8 ppm dan pada panjang gelombang 272 nm. Spektrum UV-Vis larutan standar ciprofloxacin ditampilkan pada Gambar 4.7.

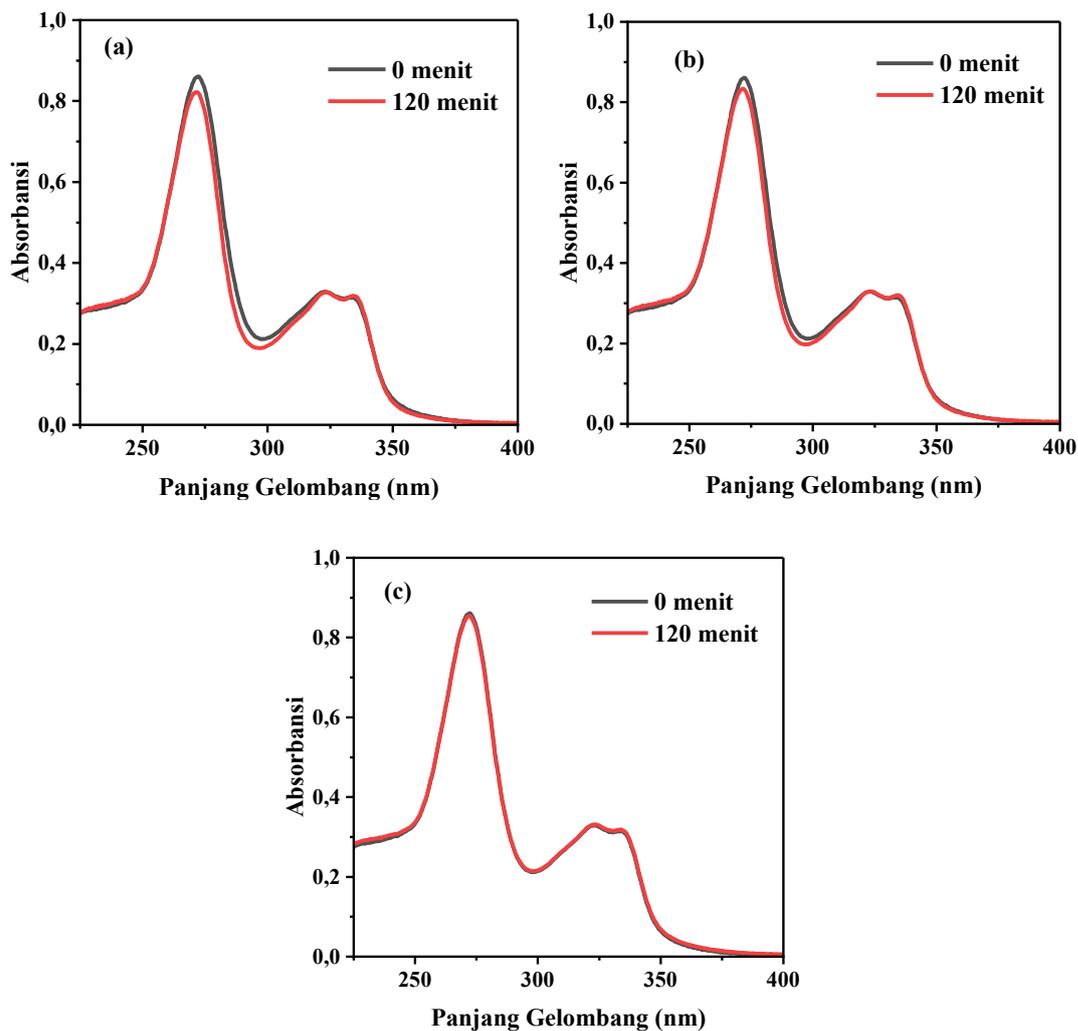


Gambar 4. 7 Hasil pembuatan kurva standar

Grafik hubungan antar konsentrasi (sumbu x) dan absorbansi (sumbu y) yang ditambihkan pada Gambar 4.7. Persamaan regresi linier grafik hubungan antara konsentrasi dan absorbansinya adalah $y = 0,1128x + 0,0588$ dengan nilai $R^2 = 0,9992$. Data koefisien koreksi (R^2) yang sangat tinggi menunjukkan kelinieran yang tinggi antara konsentrasi dan absorbansi. Hal ini menunjukkan bahwa pembuatan kurva standar larutan ciprofloxacin telah memenuhi hukum Lambert-Beer.

4.5.3 Uji Kestabilan Larutan Ciprofloxacin

Sebelum uji sinergitas adsorpsi-fotokatalis pada ciprofloxacin oleh senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$, dilakukan terlebih dahulu uji kestabilan ciprofloxacin 8 ppm pada kondisi gelap (tanpa sinar UV) dan pada kondisi terang dengan radiasi sinar UV dalam waktu 0 dan 120 menit yang dilakukan pengulangan 3 kali. Hal ini dilakukan bertujuan untuk menentukan apakah terjadi proses degradasi oleh sinar UV tanpa adanya material fotokatalis $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. Spektrum ciprofloxacin pada daerah gelap ditampilkan pada Gambar 4.8. Hasil menunjukkan terjadi penurunan yang tidak terlalu besar pada uji tanpa cahaya dan dengan cahaya. Hal ini menunjukkan bahwa larutan ciprofloxacin tidak dapat dipengaruhi oleh paparan sinar UV.



Gambar 4. 8 Spektra absorbansi UV-Vis uji kestabilan tanpa sinar UV

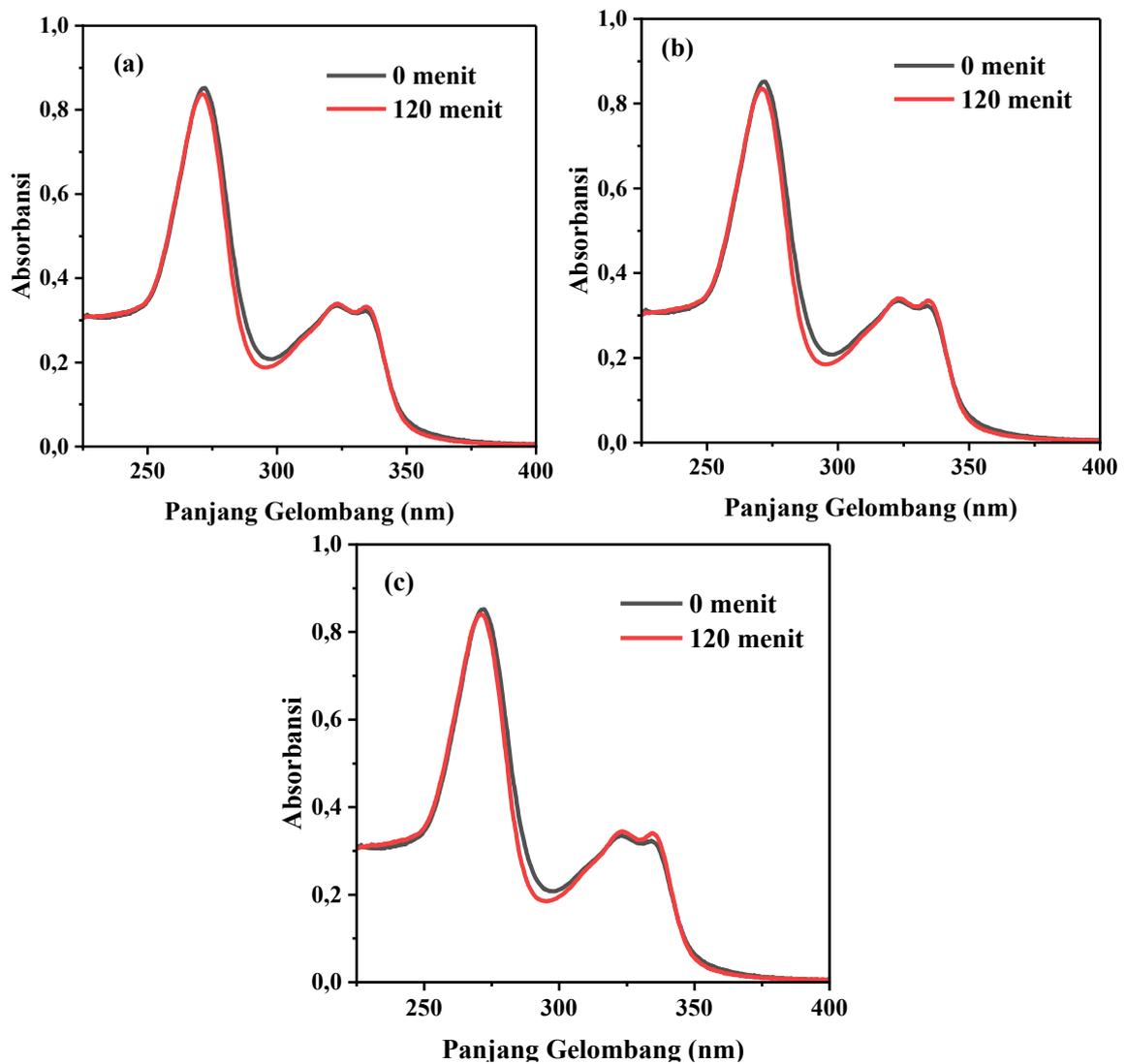
Tabel 4. 1 Hasil uji kestabilan larutan ciprofloxacin tanpa sinar UV

Pengulangan	Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi (ppm)
1	0	0,8609	7,1108
	120	0,8223	6,7686
2	0	0,8609	7,1108
	120	0,8333	6,8661
3	0	0,8609	7,1108
	120	0,8543	7,0523

Gambar 4.9 Menunjukkan spektrum uji kestabilan larutan ciprofloxacin teradiasi sinar UV dan dapat dilihat bahwa nilai absorbansi pada rentang 0 dan 120 menit yang diperoleh hampir tidak jauh berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa senyawa ciprofloxacin stabil pada rentang waktu tersebut dan tidak berpengaruh pada keadaan teradiasi sinar UV. Hasil uji kestabilan teradiasi sinar UV ditampilkan pada tabel 4.2

Tabel 4. 2 Hasil uji kestabilan larutan ciprofloxacin dengan sinar UV

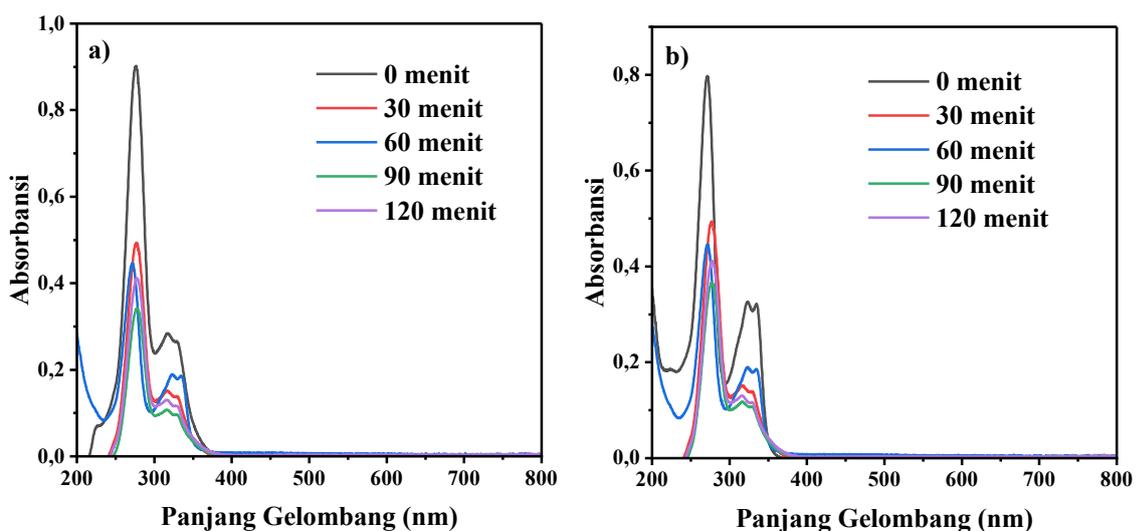
Pengulangan	Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi (ppm)
1	0	0,8519	7,031
	120	0,8381	6,9086
2	0	0,8519	7,031
	120	0,8355	6,8856
3	0	0,8519	7,031
	120	0,8405	6,9299



Gambar 4. 9 Spektra absorbansi UV-Vis uji kestabilan teradiasi sinar UV

4.5.4 Pengujian Kesetimbangan Adsorpsi-Desorpsi Senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

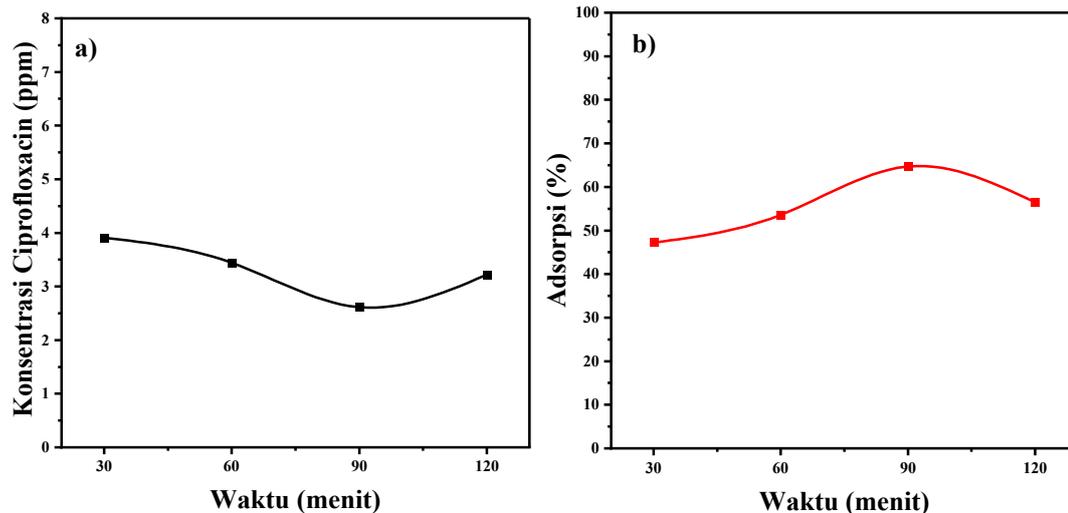
Pengujian ini dilakukan untuk menentukan waktu kesetimbangan adsorpsi-desorpsi ciprofloxacin oleh senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. Grafik spektrum UV-Vis menunjukkan bahwa nilai absorbansi menurun seiring bertambahnya waktu kontak. Penurunan ini terjadi cukup signifikan hingga menit ke-90 dan setelah itu mulai menunjukkan kecenderungan stabil. Dengan demikian, waktu kesetimbangan adsorpsi ditentukan terjadi pada menit ke-90, dimana jumlah adsorbat yang teradsorpsi mencapai maksimum. Namun pada menit ke-120, sedikit mengalami peningkatan yang menunjukkan adanya kemungkinan terjadi desorpsi atau pelepasan kembali dari permukaan $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. Terjadinya desorpsi dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti lemahnya interaksi fisik antara adsorbat dan adsorben, ketidakseimbangan termodinamika pada permukaan material. Desorpsi dapat terjadi juga ketika sistem telah mencapai titik jenuh dan adsorbat yang tidak lagi stabil pada permukaan akan kembali larut ke dalam larutan ciprofloxacin karena ikatan fisik yang lemah seperti gaya Van der Waals atau ikatan hidrogen (Gupta, dkk., 2012). Pada pengujian ini, menunjukkan penurunan konsentrasi ciprofloxacin sebesar 64,73% dalam waktu 90 menit yang mengindikasikan adanya penurunan konsentrasi ciprofloxacin setelah berinteraksi dengan $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang juga mengindikasikan bahwa senyawa ini juga dapat berfungsi sebagai adsorben. Persentase yang dihasilkan menunjukkan kapasitas adsorpsi yang tinggi (Yahya, dkk., 2018). Dengan demikian senyawa Aurivillius terbukti memiliki kemampuan adsorpsi terhadap ciprofloxacin. Pihak lain, Saputra, dkk., (2024) juga melaporkan bahwa senyawa Aurivillius $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ memiliki kemampuan adsorpsi dengan penurunan konsentrasi ciprofloxacin sebesar 17,61% dalam waktu 30 menit (Saputra dkk., 2024). Adapun grafik spektra ditampilkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Spektra kesetimbangan adsorpsi-desorpsi senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (a) pengulangan 1, (b) pengulangan 2

Tabel 4.3 Hasil Uji Adsorpsi-Desorpsi

Waktu	Pengulangan 1		Pengulangan 2		Rata-rata ± Standar Deviasi	
	Konsentrasi ciprofloxacin (ppm)	Adsorpsi (%)	Konsentrasi ciprofloxacin (ppm)	Adsorpsi (%)	Konsentrasi ciprofloxacin (ppm)	Adsorpsi (%)
30	3,85	48,12	3,97	46,40	3,91 ± 0,085	47,26 ± 1,216
60	3,42	53,85	3,45	53,34	3,44 ± 0,021	53,59 ± 0,361
90	2,50	66,26	2,72	63,21	2,61 ± 0,155	64,73 ± 2,154
120	3,13	57,88	3,32	55,19	3,22 ± 0,134	56,53 ± 1,899

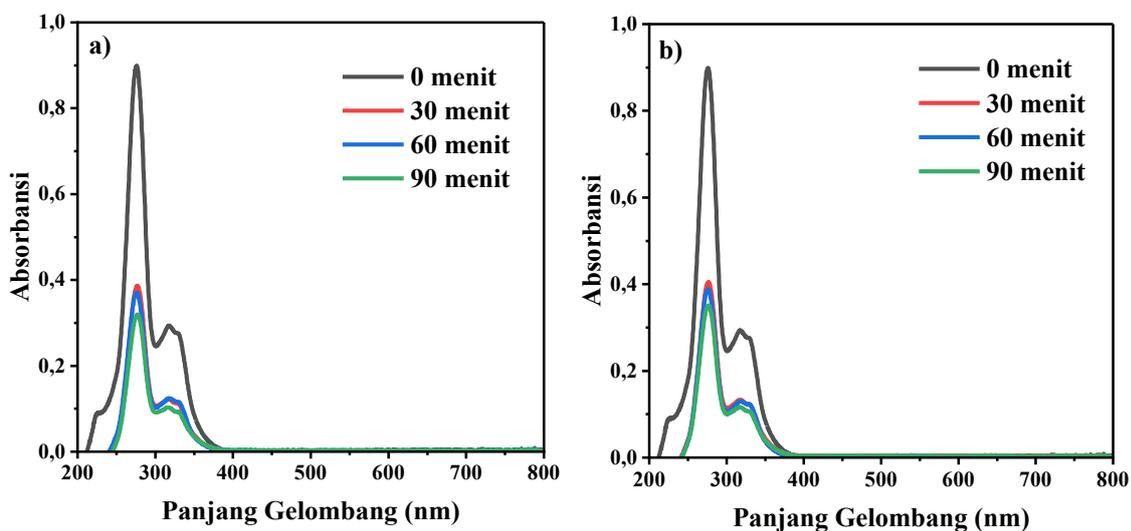


Gambar 4.11 Grafik Adsorpsi-Desorpsi (a) hubungan waktu dengan konsentrasi ciprofloxacin (b) hubungan waktu dengan persen adsorpsi

4.5.5 Pengujian Sinergistik Adsorpsi-Fotokatalitik Menggunakan Lampu UV

Pengujian sinergistik adsorpsi-fotokatalitik terhadap ciprofloxacin menggunakan senyawa Aurivillius $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ menunjukkan penurunan signifikan dalam nilai absorbansi dan konsentrasi seiring bertambahnya waktu paparan sinar UV. Sebelum proses fotokatalitik dilakukan, sampel terlebih dahulu diaduk dalam kondisi gelap selama waktu kesetimbangan yang sudah diperoleh sebesar 90 menit untuk memastikan bahwa penyerapan ciprofloxacin pada permukaan material terjadi tanpa pengaruh foton. Kemudian dilanjutkan dengan penyinaran UV selama variasi waktu 30, 60, dan 90 menit. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ mampu mendegradasi ciprofloxacin dengan efisiensi sebesar 67,57% dalam 90 menit. Hasil pengujian ini lebih tinggi dibandingkan dengan proses adsorpsi-desorpsi. Hasil yang diperoleh melebihi hasil yang dilaporkan oleh Saputra, dkk., (2024) yaitu sebesar 35% dalam 90 menit menggunakan senyawa Aurivillius $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. Efisiensi degradasi yang tinggi mengindikasikan bahwa material $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ tidak hanya mampu mengadsorpsi ciprofloxacin secara efektif, tetapi juga memiliki aktivitas fotokatalitik yang signifikan. Pada proses fotokatalisis pencahayaan UV menyebabkan tereksitasnya elektron dari pita valensi ke pita konduksi yang membentuk pasangan elektron-hole. Elektron pada pita konduksi berperan dalam mereduksi oksigen terlarut menjadi radikal superoksida ($\cdot\text{O}_2^-$),

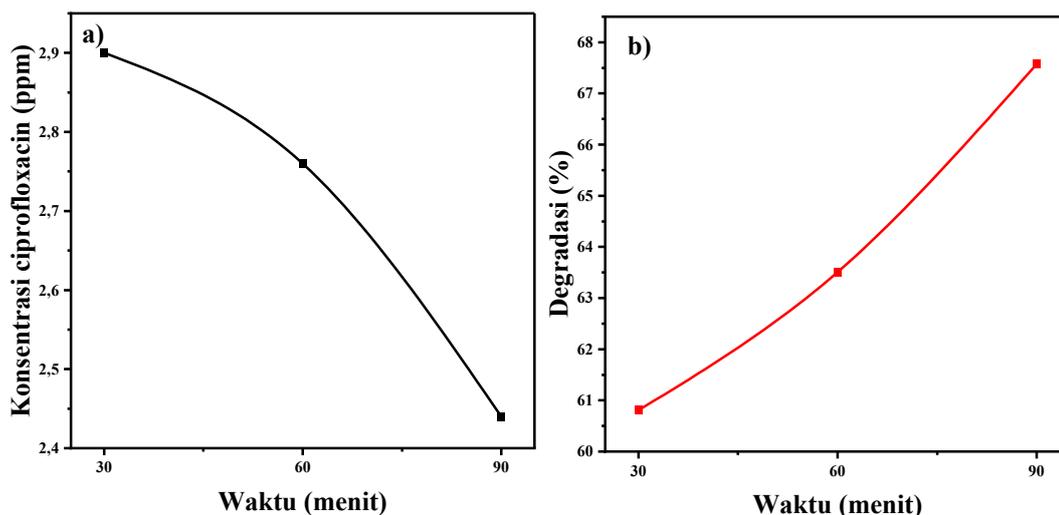
sedangkan *hole* pada pita valensi mengoksidasi molekul H_2O atau ion hidroksida (OH^-) menjadi radikal hidroksil ($\bullet OH$). Kedua jenis radikal ini sangat reaktif dan mampu menghancurkan struktur molekul ciprofloxacin secara bertahap hingga menghasilkan senyawa akhir H_2O dan CO_2 . Perbandingan antara Tabel 4.3 dengan Tabel 4.4 memperlihatkan bahwa aktivasi sinar UV meningkatkan efisiensi penghilangan ciprofloxacin yang signifikan. Efisiensi degradasi tertinggi pada uji adsorpsi-fotokatalitik tercapai pada menit ke-90 sebesar 67,57%, sedangkan pada uji adsorpsi-desorpsi sebesar 64,73% pada menit ke-90. Hal tersebut menunjukkan bahwa kehadiran cahaya UV dalam reaksi, tidak hanya mempercepat proses degradasi melalui pembentukan radikal aktif, tetapi juga berperan menstabilkan ikatan adsorbat pada permukaan material, sehingga menunjukkan aktivitas ganda sebagai adsorben dan fotokatalis, namun juga memiliki keunggulan dalam mempertahankan efisiensi reaksi pada waktu paparan yang lebih lama. Rendahnya efisiensi fotokatalitik yang diperoleh sebesar 2,84% dapat dikatakan belum menunjukkan performa optimal dari material tersebut. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya keberadaan fasa pengotor yang mengganggu transfer muatan, ukuran partikel yang besar sehingga membatasi luas permukaan aktif, material yang tidak murni, serta kemungkinan terjadinya rekombinasi pasangan elektron-hole yang tinggi. Hasil sintesis $SrBi_4Ti_4O_{15}$ yang tidak sepenuhnya murni berpengaruh terhadap kinerja fotokatalitik material. Kehadiran fasa pengotor dapat menghambat transfer muatan dan menurunkan jumlah situs aktif pada permukaan fotokatalis, sehingga menyebabkan rendahnya pembentukan radikal oksidatif selama proses fotodegradasi. Adapun grafik spektra sinergistik adsorpsi-fotokatalitik senyawa $SrBi_4Ti_4O_{15}$ ditampilkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4. 12 Spektra sinergistik adsorpsi-fotokatalitik senyawa $SrBi_4Ti_4O_{15}$. (a) pengulangan 1, dan (b) pengulangan 2

Tabel 4. 4 Hasil uji sinergistik adsorpsi-fotokatalitik

Waktu	Pengulangan 1		Pengulangan 2		Rata-rata ± Standar Deviasi	
	Konsentrasi ciprofloxacin (ppm)	Degradasi (%)	Konsentrasi ciprofloxacin (ppm)	Degradasi (%)	Konsentrasi ciprofloxacin (ppm)	Degradasi (%)
30	2,90	60,81	2,91	60,81	2,90 ± 0,007	60,81 ± 0
60	2,76	63,51	2,77	63,51	2,76 ± 0,007	63,51 ± 0
90	2,31	68,94	2,58	66,21	2,44 ± 0,190	67,57 ± 1,93

**Gambar 4. 13** Grafik Adsorpsi-Fotokatalis (a) hubungan waktu dengan konsentrasi ciprofloxacin (b) hubungan waktu dengan persen degradasi**Tabel 4. 5** Tabel Fotokatalitik

Waktu	Adsorpsi-Desorpsi	Adsorpsi-Fotokatalis	Aktivitas Fotokatalitik (%)
	% Adsorpsi	% Degradasi	
30	47,26	60,81	13,55
60	53,59	63,51	9,92
90	64,73	67,57	2,84

Berdasarkan Tabel 4.5, diperoleh bahwa nilai % adsorpsi cenderung meningkat. Peningkatan jumlah ciprofloxacin yang teradsorpsi akan membentuk lapisan tebal pada permukaan fotokatalis yang menghambat cahaya UV masuk ke permukaan aktif material. Sehingga mengakibatkan nilai aktivitas fotokatalitik menurun. Hal ini mengindikasikan bahwa kontribusi terbesar dalam penurunan konsentrasi ciprofloxacin lebih dominan berasal dari proses adsorpsi. Penurunan aktivitas fotokatalitik tersebut disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya, kejenuhan situs aktif pada permukaan fotokatalis, terjadinya rekombinasi pasangan elektron-*hole* yang lebih besar atau terhalangnya interaksi antara radikal hidroksil dengan permukaan material $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ akibat terbentuknya lapisan ciprofloxacin yang sudah teradsorpsi (Marella, dkk., 2021 ; Zhou, dkk., 2020). Faktor lain yang dapat mempengaruhi performa fotokatalitik yaitu ketidakmurnian material yang teridentifikasi pada difraktogram

XRD. Adanya fasa pengotor atau senyawa yang tidak berhasil tersusun sempurna dalam struktur kristal utama dapat menjadi pusat rekombinasi bagi pasangan elektron-*hole* yang menyebabkan penurunan efisiensi transfer muatan, sehingga menghambat proses fotodegradasi senyawa organik serta dapat mengganggu keteraturan struktur kristalin dan menurunkan luas permukaan aktif. Selain itu, morfologi material yang menunjukkan ketidakteraturan distribusi ukuran partikel dan aglomerasi dapat menurunkan luas permukaan aktif dan menghambat penyerapan sinar UV ke permukaan fotokatalis secara efektif, sehingga proses fotokatalisis tidak berlangsung secara optimal (Li, dkk., 2020). Faktor lain yang mempengaruhi adalah jenis lampu UV yang digunakan, belum diketahui panjang gelombang maksimumnya, sehingga efektivitas elektron dalam material juga belum dapat dipastikan. Ketidaksesuaian ini dapat menghambat eksitasi elektron, sehingga mengurangi produksi pasangan elektron-*hole* dan efektivitas fotodegradasi (Y. Wang, dkk., 2021).

Untuk mengetahui seberapa besar kemampuan fotokatalitik $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dalam penelitian ini, dilakukan perbandingan dengan beberapa senyawa Aurivillius lain yang telah digunakan dalam penelitian sebelumnya untuk mendegradasi ciprofloxacin. Hikmah dan Prasetyo (2024) melaporkan bahwa senyawa $\text{Bi}_4\text{Ti}_{2,9}\text{Fe}_{0,1}\text{O}_{12}$ yang digunakan mampu menurunkan konsentrasi ciprofloxacin sebesar 70,04% dalam 90 menit, dengan kontribusi adsorpsi sebesar 54,47%, sehingga aktivitas fotokatalitik murninya sebesar 15,57%. Pihak lain, Saputra dkk. (2024) melaporkan bahwa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ menunjukkan aktivitas fotokatalitik yang lebih tinggi, yaitu sekitar 17,4% dari degradasi total sebesar 35% dengan adsorpsi awal 17,61%. Sementara itu, $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dalam penelitian ini menunjukkan nilai adsorpsi tertinggi, yaitu 64,73%, namun aktivitas fotokatalitiknya paling rendah, yaitu hanya 2,84% dari total degradasi sebesar 67,57%. Hal ini menunjukkan bahwa penurunan konsentrasi ciprofloxacin dalam penelitian ini lebih banyak berkontribusi pada proses adsorpsi dibandingkan fotodegradasi. Rendahnya aktivitas fotokatalitik kemungkinan disebabkan oleh adanya fasa pengotor, morfologi dan ukuran partikel pada material atau kurang efisiennya pemisahan muatan selama proses fotokatalisis berlangsung.

Hikmah dan Prasetyo, (2024) juga melaporkan bahwa pada senyawa $\text{Bi}_4\text{Ti}_{2,9}\text{Fe}_{0,1}\text{O}_{12}$ juga menunjukkan sinergi antara adsorpsi dan fotokatalis memiliki peran penting dalam efisiensi degradasi. Meskipun material tersebut menunjukkan aktivitas fotokatalitik, mekanisme adsorpsi terbukti lebih dominan karena interaksi permukaan yang kuat menyebabkan ciprofloxacin menutupi permukaan aktif sehingga membatasi penetrasi cahaya. Hal tersebut menunjukkan bahwa adsorpsi yang berlebihan dapat menurunkan efisiensi fotokatalitik secara keseluruhan. Dengan demikian, gabungan antara proses adsorpsi dan fotokatalisis menciptakan sistem yang saling mendukung. Adsorpsi berperan mengikat ciprofloxacin pada permukaan $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ serta meningkatkan konsentrasi senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ di sekitar situs aktif. Sedangkan fotokatalisis mempercepat penguraian senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ di bawah paparan UV. Sinergi kedua proses ini dapat menekan terjadinya desorpsi,

sehingga meningkatkan efisiensi degradasi secara keseluruhan. Berdasarkan hasil yang telah didapatkan, $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ memiliki potensi besar sebagai material fotokatalis dalam pengolahan air limbah antibiotik seperti ciprofloxacin (Saputra dkk., 2024).

4.5.6 Analisis Spektra FTIR $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Sebelum dan Sesudah Proses Adsorpsi-Fotokatalitik Ciprofloxacin

Analisis spektra FTIR menunjukkan bahwa sampel $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ mengalami perubahan signifikan setelah proses adsorpsi-fotokatalis ciprofloxacin dibandingkan dengan kondisi adsorpsi-desorpsi. Pada pita serapan pada $1211,3\text{ cm}^{-1}$ dan $1151,7\text{ cm}^{-1}$ diasosiasikan dengan getaran regangan gugus C-F aromatik yang merupakan salah satu ciri khas ciprofloxacin. Pita ini sesuai dengan vibrasi khas ciprofloxacin sebagaimana dilaporkan oleh Kowalczuk, dkk., (2020), melaporkan bahwa pita-pita khas ciprofloxacin mencakup rentang $1250\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ (C-F aromatik), 1703 cm^{-1} (C=O karboksilat), 1623 cm^{-1} (C=O quinolon), $1588\text{--}1495\text{ cm}^{-1}$ (C=C aromatik), 1449 cm^{-1} (bending C-H), dan 1384 cm^{-1} (C-N).

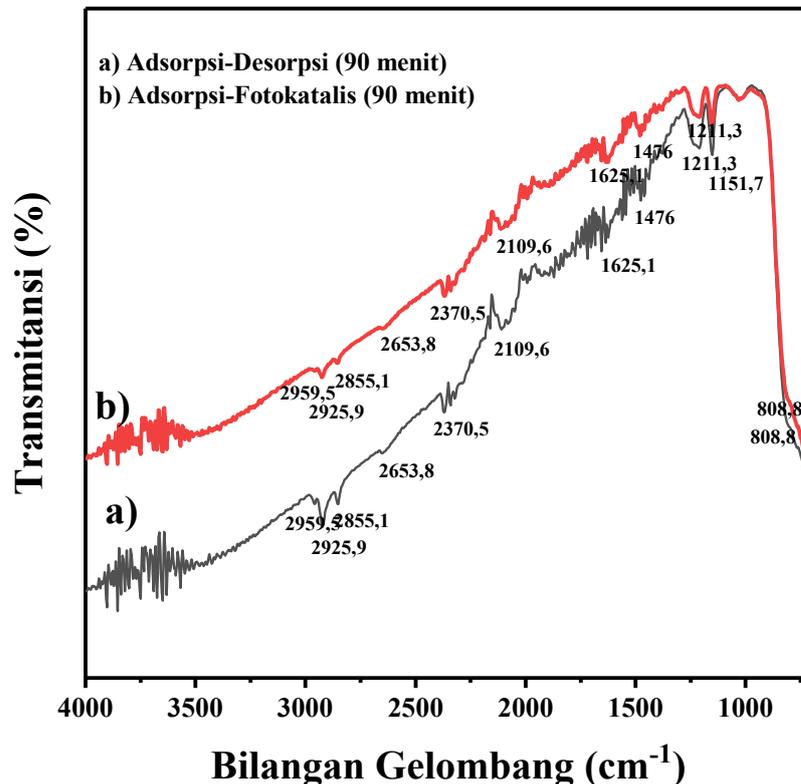
Pada pita serapan sekitar $2959,9\text{ cm}^{-1}$, $2925,9\text{ cm}^{-1}$ dan $2855,1\text{ cm}^{-1}$ yang berhubungan dengan getaran C-H alifatik, intensitas spektra meningkat setelah proses fotokatalisis dimana C-H alifatik terdeteksi pada 2927 cm^{-1} dan 2850 cm^{-1} menandakan bahwa fragmen alifatik ciprofloxacin masih berikatan dengan permukaan $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ meskipun telah degradasi parsial (Ajduković, dkk., 2023). Peningkatan intensitas pada pita ini menunjukkan bahwa gugus ciprofloxacin masih berinteraksi dengan permukaan $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ setelah proses fotokatalisis. Keberadaan pita ini juga menunjukkan kemungkinan terbentuknya fragmen hasil oksidasi sebagian yang masih mengandung struktur fungsional asli ciprofloxacin. Sementara itu, setelah proses fotokatalis, pita khas ciprofloxacin pada $1211,3\text{ cm}^{-1}$ dan $1151,7\text{ cm}^{-1}$ yang berkaitan dengan gugus regangan C-F menunjukkan penurunan intensitas yang signifikan bahkan cenderung sedikit menghilang. Hal tersebut mengindikasikan bahwa gugus fluoro dalam struktur ciprofloxacin belum sepenuhnya menghilang, melainkan mengalami degradasi parsial, di mana sebagian gugus masih terdeteksi namun sebagian lainnya kemungkinan telah terputus akibat serangan radikal $\bullet\text{OH}$ (Ajduković, dkk., 2023 ; Kowalczuk, dkk., 2020).

Selain itu, pita serapan di $2109,6\text{ cm}^{-1}$ yang umumnya diasosiasikan dengan regangan kumulatif $\text{--C}\equiv\text{C--}$ atau $\text{--C}\equiv\text{N--}$ juga menunjukkan intensitas lebih tinggi pada sampel setelah fotokatalisis. Hal ini menunjukkan kehadiran produk antara hasil reaksi oksidatif parsial ciprofloxacin yang melekat pada permukaan fotokatalis. Pada rentang pita $1625,1\text{ cm}^{-1}$ dan 1476 cm^{-1} , yang dikaitkan dengan getaran C=C aromatik dan C=O (karbonil), intensitasnya cenderung lebih tinggi pada sampel hasil fotokatalisis dibandingkan dengan hasil desorpsi. Hal ini memperkuat dugaan bahwa struktur inti ciprofloxacin mengandung gugus aromatik dan karbonil masih berinteraksi dengan permukaan $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. Berdasarkan Kowalczuk et al. (2020), ciprofloxacin memiliki pita-pita khas seperti 1703 cm^{-1} (C=O dari gugus karboksilat), 1623 cm^{-1} (C=O dari inti quinolone), $1588\text{--}1495\text{ cm}^{-1}$ (C=C aromatik), 1449 cm^{-1} (bending C-H), 1384 cm^{-1} (C-N), serta pita $1250\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ yang dikaitkan dengan regangan gugus C-F

aromatik. Pita-pita ini menjadi acuan penting dalam mengidentifikasi keberadaan ciprofloxacin atau fragmennya selama proses adsorpsi maupun fotokatalisis.

Pita serapan pada $808,8\text{ cm}^{-1}$, dikaitkan dengan vibrasi regangan ikatan Ti-O. Hou, dkk., (2009) juga melaporkan bahwa pita serapan pada 802 cm^{-1} dalam senyawa $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ sebagai bagian dari struktur kristalin berbasis TiO_6 oktahedral. Keberadaan pita ini menunjukkan bahwa struktur kristalin $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ telah terbentuk dan berperan aktif sebagai fotokatalis. Selain itu, posisi pita ini juga berada dalam rentang bilangan gelombang yang dapat diasosiasikan dengan gugus aromatik ciprofloxacin, Kemungkinan adanya tumpang tindih pita serapan pada daerah tersebut juga mengindikasikan bahwa sebagian sinyal dapat berasal dari fragmen ciprofloxacin yang masih teradsorpsi pada permukaan material. Spekttra IR ciprofloxacin yang menunjukkan pita-pita khas ciprofloxacin dapat dilihat pada Gambar 2.3 sebagai acuan untuk mengidentifikasi pita-pita khas ciprofloxacin dalam analisis spektrum FTIR setelah proses adsorpsi-fotokatalisis.

Perubahan intensitas dan kehadiran pita-pita ini mengindikasikan bahwa proses fotodegradasi belum berlangsung secara sempurna, namun sudah menghasilkan fragmen-fragmen ciprofloxacin yang teradsorpsi pada permukaan katalis. Oleh karena itu, perubahan posisi dan intensitas pita FTIR pada sampel setelah proses fotokatalitik menunjukkan bahwa mekanisme fotokatalitik telah terjadi, namun kontribusi terbesar terhadap penurunan konsentrasi ciprofloxacin diduga lebih dominan berasal dari proses adsorpsi. Indikasi ini diperkuat oleh masih terdeteksinya gugus-gugus fungsional khas dari ciprofloxacin yang menunjukkan bahwa molekul ciprofloxacin belum mengalami degradasi sempurna, melainkan telah berinteraksi dengan permukaan fotokatalis melalui mekanisme adsorpsi. Interaksi ini kemungkinan difasilitasi oleh ikatan hidrogen, gaya elektrostatis, serta interaksi $\pi-\pi$ *stacking* antara sistem aromatik ciprofloxacin dan permukaan $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. Silva, dkk., (2016) melaporkan bahwa ciprofloxacin mengalami peningkatan pita FTIR pada awal fotokatalisis UVA dengan TiO_2 , sebelum akhirnya menghilang akibat degradasi sempurna. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa senyawa Aurivillius $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ mampu berperan ganda sebagai adsorben yang efektif dan fotokatalis yang aktif dalam mendegradasi ciprofloxacin (Silva dkk., 2016).



Gambar 4. 14 Spektre IR $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (a) sebelum fotokatalis dan (b) setelah fotokatalis

4.5.7 Pengujian Sinergistik Adsorpsi-Fotokatalitik Ciprofloxacin dalam Perspektif Islam

Dalam Islam, Upaya pengembangan metode degradasi ciprofloxacin menggunakan material fotokatalis $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ tidak hanya menjadi solusi ilmiah terhadap pencemaran lingkungan, tetapi juga mencerminkan tanggung jawab manusia sebagai khalifah di bumi. Dalam perspektif islam, manusia dianjurkan untuk merenungi dan memahami keteraturan ciptaan Allah sebagai bentuk penguatan iman dan dorongan untuk menjaga keseimbangan alam. Hal ini ditegaskan dalam firman Allah dalam QS. al-Imron ayat 190 yang menyebutkan bahwa pencipta langit dan bumi serta pergantian siang dan malam merupakan tanda-tanda kebesaran Allah bagi orang-orang yang menggunakan akalnya untuk berpikir dan hatinya untuk berdzikir (ulul albab).

هُوَ أَنْشَأَكُمْ مِنَ الْأَرْضِ وَاسْتَعْمَرَكُمْ فِيهَا فَاسْتَغْفِرُوهُ ثُمَّ تُوبُوا إِلَيْهِ إِنَّ رَبِّي قَرِيبٌ مُجِيبٌ

Artinya: “Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi, dan pergantian malam dan siang terdapat tanda-tanda (kebesaran Allah) bagi orang-orang yang berakal (ulul albab)” (QS. Al-Imron ayat 190).

Shihab (2005) menjelaskan dalam tafsir Al-Misbah bahwa Allah SWT tidak hanya menyeru manusia untuk mengamati fenomena alam, tetapi juga mendorongnya untuk menggali hikmah dan bertindak menjaga keteraturan ciptaan-Nya. Pentingnya perenungan terhadap penciptaan langit dan bumi serta pergantian siang dan malam sebagai tanda-tanda

kekuasaan Allah bagi *ulul albab*, yaitu orang-orang yang menggunakan akalinya untuk berpikir dan hatinya untuk berdzikir. Tafsir al-Jalalayn memaknai ayat ini sebagai ajakan kepada orang-orang berakal untuk memperhatikan secara mendalam kebesaran Allah yang tercermin dalam keseimbangan alam semesta, sebagai dasar moral untuk tidak merusak tatanan yang telah ditetapkan-Nya.

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

Artinya: “Telah tampak kerusakan di darat dan di laut disebabkan perbuatan tangan manusia. (Melalui hal itu) Allah membuat mereka merasakan sebagian dari (akibat) perbuatan mereka agar mereka kembali (ke jalan yang benar).” (QS. Ar-Rum (30):41).

Shihab (2005) menjelaskan dalam tafsir al-Misbah menjelaskan bahwa ayat ini menunjukkan bahwa berbagai bentuk degradasi lingkungan, termasuk pencemaran air dan tanah, merupakan dampak langsung dari aktivitas manusia yang tidak selaras dengan prinsip keseimbangan alam yang telah ditetapkan Allah SWT. Ayat ini sekaligus menegaskan peran manusia sebagai khalifah yang bertanggung jawab menjaga bumi, bukan merusaknya. Oleh karena itu, upaya ilmiah untuk menanggulangi pencemaran seperti pengembangan fotokatalis $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang mampu mendegradasi senyawa polutan ciprofloxacin dapat dipahami sebagai bentuk pelaksanaan nilai-nilai al-Qur’an dalam menjaga kelestarian ciptaan. Inovasi ramah lingkungan ini tidak hanya memiliki nilai fungsional dalam dunia sains, tetapi juga mencerminkan kesadaran moral dan spiritual manusia terhadap tanggung jawab ekologis yang diamanahkan oleh Allah SWT.

Dalam konteks penelitian ini, penerapan teknologi sinergistik adsorpsi-fotokatalis dalam degradasi ciprofloxacin merupakan bentuk nyata dari penggunaan akal dalam menjaga bumi dari kerusakan yang disebabkan oleh limbah farmasi. Hal ini menunjukkan bahwa *sains* dan iman dapat berjalan beriringan dalam membentuk solusi yang tidak hanya tepat secara teknis, tetapi juga bernilai etis dan spiritual. Hal ini juga sejalan dengan sabda Rasulullah SAW:

إِنَّ الدُّنْيَا حُلْوَةٌ خَضِرَةٌ، وَإِنَّ اللَّهَ مُسْتَخْلِفُكُمْ فِيهَا، فَيَنْظُرُ كَيْفَ تَعْمَلُونَ

Artinya: “Sesungguhnya dunia itu indah dan hijau, dan sesungguhnya Allah menjadikan kalian sebagai khalifah di dalamnya, maka Dia akan melihat bagaimana kalian berbuat”. (HR. Muslim no. 2742).

Salah satu ilmuwan kimia yang berjiwa *ulul albab*, yakni seorang yang menggunakan akalinya untuk memahami ciptaan Allah dan berkontribusi nyata bagi kemaslahatan umat, adalah Jabir ibn Hayyan, tokoh muslim yang dikenal sebagai bapak ilmu kimia. Ia dikenal sebagai pelopor ilmu kimia modern berkat pengembangan metode ilmiah yang sistematis dan berbasis eksperimen. Dalam karya-karyanya, Jabir menjelaskan berbagai proses kimia seperti

sublimasi, distilasi, kristalisasi, dan kalsinasi, yang berkaitan erat dengan transformasi zat pada permukaan material. Meskipun teknologi fotokatalisis belum dikenal pada masanya, pendekatan Jabir ibn Hayyan terhadap perubahan struktur zat dan interaksi antar materi di permukaan menjadi dasar penting dalam perkembangan ilmu kimia permukaan (surface chemistry) yang mendukung teknologi adsorpsi dan fotokatalitik saat ini, khususnya dalam bidang pengolahan limbah dan pelestarian lingkungan.

Dalam konteks penelitian degradasi ciprofloxacin menggunakan material fotokatalis berbasis senyawa Aurivillius $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$, prinsip-prinsip yang dikembangkan oleh Jabir ibn Hayyan sangat relevan. Proses fotodegradasi senyawa organik diawali dengan penyerapan molekul polutan ke permukaan fotokatalis, dilanjutkan dengan reaksi oksidatif yang dipicu oleh eksitasi elektron akibat iradiasi cahaya. Mekanisme ini mencerminkan konsep yang selaras dengan ajaran ulul albab dalam QS. al-Imran ayat 190, yaitu mengamati, memahami, dan merespons keteraturan ciptaan Allah melalui aktivitas ilmiah yang berorientasi pada kebermanfaatan. Maka, seorang seperti Jabir ibn Hayyan menjadi inspirasi bahwa ilmu pengetahuan dan nilai-nilai spiritual dapat berjalan beriringan dalam upaya menjaga kelestarian bumi dan menghadirkan solusi atas persoalan lingkungan global. Oleh sebab itu, dilakukan uji degradasi dengan fotokatalis ini, bertujuan untuk mengurangi pencemaran lingkungan akibat antibiotik ciprofloxacin.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian mengenai efek sinergistik adsorpsi-fotokatalis senyawa Aurivillius $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ untuk mendegradasi ciprofloxacin telah berhasil dilakukan melalui metode sintesis lelehan garam NaCl-KCl pada suhu kalsinasi 750°C dan 820°C . Diffraktogram menunjukkan bahwa fasa utama $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ berhasil terbentuk, meskipun masih teridentifikasi beberapa fasa pengotor seperti SrCO_3 , $\text{Na}_2\text{Ti}_7\text{O}_{15}$, $\text{K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{12}$, $\text{Bi}_{12}\text{Cl}_{14}$, dan $\text{K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$. Morfologi partikel yang dihasilkan berupa plate-like dengan distribusi ukuran partikel yang tidak seragam sebesar 1–2 mikrometer serat terdapat aglomerasi parsial, sebagaimana ditunjukkan oleh hasil analisis SEM, yang berkontribusi terhadap peningkatan luas permukaan aktif untuk reaksi adsorpsi dan fotokatalitik. Nilai energi celah pita sebesar 3,14 eV berdasarkan analisis UV-Vis DRS menunjukkan potensi aktivitas fotokatalitik senyawa ini di bawah paparan sinar UV. Pengujian terhadap ciprofloxacin menunjukkan efisiensi penghilangan sebesar 64,73% melalui proses adsorpsi, dan meningkat menjadi 67,57% melalui mekanisme sinergistik adsorpsi-fotokatalis dalam waktu 90 menit. Nilai adsorpsi terbilang lebih besar dibandingkan aktivitas fotokatalitiknya yang menunjukkan nilai yang kecil karena pengaruh material. Berdasarkan analisis FTIR, terdeteksi perubahan intensitas serta masih tampaknya pita-pita khas ciprofloxacin, yang mengindikasikan bahwa proses adsorpsi tetap berlangsung selama reaksi fotokatalitik terjadi. Hal ini menandakan bahwa kontribusi terbesar dalam penelitian ini terdapat pada proses adsorpsi. Penelitian ini mengukuhkan peran sains sebagai bagian dari amanah ekologis dalam Islam. Q.S. al-A'raf ayat 56, Q.S. al-Ahzab ayat 72 dan QS. ar-Rum ayat 41 menekankan larangan perusakan bumi dan tanggung jawab manusia sebagai khalifah. Tafsir al-Misbah dan al-Jalalayn menjelaskan pentingnya menjaga keseimbangan ciptaan. Jabir ibn Hayyan menjadi contoh ilmuwan serta ulama ulul albab yang mengintegrasikan akal dan iman dalam memahami reaksi permukaan, sebagaimana relevan dengan mekanisme adsorpsi-fotokatalis dalam penelitian ini. Dengan demikian, pendekatan ini mendukung pengembangan teknologi ramah lingkungan yang berlandaskan etika keislaman.

5.2 Saran

Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk lebih memperhatikan proses pengeringan, pemanasan, dan penambahan garam agar tidak bereaksi dengan prekursor lain, serta meningkatkan kontrol terhadap parameter sintesis dan menjaga konsistensi teknis guna memperoleh hasil yang lebih stabil dan murni. Kelemahan dalam penelitian ini terletak pada ketidakkonsistenan hasil sintesis, yang kemungkinan besar disebabkan oleh faktor teknis manusia, seperti ketidakaturan suhu pemanasan dan pencampuran prekursor yang kurang homogen. Meskipun demikian, penelitian ini memiliki kelebihan pada analisis uji adsorpsi yang

dilakukan secara lebih mendalam dibandingkan sebagian besar penelitian sebelumnya yang hanya fokus pada degradasi fotokatalitik, tanpa membedakan kontribusi proses adsorpsi. Selain itu, penggunaan spektrum FTIR dalam penelitian ini menjadi keunggulan tersendiri, karena masih sangat terbatas studi yang secara khusus mengkaji perubahan gugus fungsional ciprofloxacin pada permukaan senyawa Aurivillius seperti $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ menggunakan pendekatan spektroskopi inframerah.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdurahman, M. H., Abdullah, A. Z., & Shoparwe, N. F. (2021). A comprehensive review on sonocatalytic, photocatalytic, and sonophotocatalytic processes for the degradation of antibiotics in water: Synergistic mechanism and degradation pathway. *Chemical Engineering Journal*, 413, 127412.
- Ajduković, M., Stevanović, G., Marinović, S., Mojović, Z., Banković, P., Radulović, K., & Jović-Jovičić, N. (2023). Ciprofloxacin Adsorption onto a Smectite–Chitosan-Derived Nanocomposite Obtained by Hydrothermal Synthesis. *Water*, 15(14), 2608.
- Al-Abror, M. L., Hastuti, E., & Prasetyo, A. (2023). Molten Salt Synthesis of Photocatalyst Material $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ for Methylene Blue Degradation. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, 17(2), 182–189.
- Alam, A., Rahman, W. U., Rahman, Z. U., Khan, S. A., Shah, Z., Shaheen, K., Suo, H., Qureshi, M. N., Khan, S. B., Bakhsh, E. M., & Akhtar, K. (2022). Photocatalytic degradation of the antibiotic ciprofloxacin in the aqueous solution using Mn/Co oxide photocatalyst. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(7), 4255–4267.
- An, T., Yang, H., Li, G., Song, W., Cooper, W. J., & Nie, X. (2010). Kinetics and mechanism of advanced oxidation processes (AOPs) in degradation of ciprofloxacin in water. *Applied Catalysis B: Environmental*, 94(3–4), 288–294.
- Bai, X., Chen, W., Wang, B., Sun, T., Wu, B., & Wang, Y. (2022). Photocatalytic Degradation of Some Typical Antibiotics: Recent Advances and Future Outlooks. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(15), 8130.
- Banerjee, S., Debnath, A., Allam, B. K., & Musa, N. (2021). Adsorptive and photocatalytic performance of perovskite material for the removal of food dye in an aqueous solution. *Environmental Challenges*, 5, 100240.
- Borg, S., Svensson, G., & Bovin, J.-O. (2002). Structure Study of $\text{Bi}_{2.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ta}_2\text{O}_9$ and $\text{Bi}_{2.5}\text{N}_{am-1.5}\text{Nb}_m\text{O}_{3m+3}$ ($m=2-4$) by Neutron Powder Diffraction and Electron Microscopy. *Journal of Solid State Chemistry*, 167(1), 86–96.
- Chan, S. H. S., Yeong Wu, T., Juan, J. C., & Teh, C. Y. (2011). Recent developments of metal oxide semiconductors as photocatalysts in advanced oxidation processes (AOPs) for treatment of dye waste-water. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 86(9), 1130–1158.
- Chang, Y., Wu, J., Yang, B., Zhang, S., Lv, T., & Cao, W. (2014). Synthesis and properties of high aspect ratio $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ microplatelets. *Materials Letters*, 129, 126–129.
- Chen, D., Cheng, Y., Zhou, N., Chen, P., Wang, Y., Li, K., Huo, S., Cheng, P., Peng, P., Zhang, R., Wang, L., Liu, H., Liu, Y., & Ruan, R. (2020). Photocatalytic degradation of organic pollutants using TiO_2 -based photocatalysts: A review. *Journal of Cleaner Production*, 268, 121725.
- Chen, J., Xiong, Y., Duan, M., Li, X., Li, J., Fang, S., Qin, S., & Zhang, R. (2020). Insight into the Synergistic Effect of Adsorption–Photocatalysis for the Removal of Organic Dye Pollutants by Cr-Doped ZnO. *Langmuir*, 36(2), 520–533.
- Chen, Z., Jiang, H., Jin, W., & Shi, C. (2016). Enhanced photocatalytic performance over $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ nanosheets with controllable size and exposed $\{0\ 0\ 1\}$ facets for Rhodamine B degradation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 180, 698–706.

- Chokejaroenrat, C., Sakulthaew, C., Angkaew, A., Pattanateeradetch, A., Raksajit, W., Teingtham, K., Phansak, P., Klongvessa, P., Snow, D. D., Harris, C. E., & Comfort, S. D. (2023). Adsorptive–Photocatalytic Performance for Antibiotic and Personal Care Product Using $\text{Cu}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$. *Antibiotics*, 12(7), 1151.
- Cui, Z. M., Yang, H., Zhang, M., Zhang, H. M., Su, J. Y., & Li, R. S. (2016). Adsorption and Photocatalysis Performance of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ Nanoparticles Synthesized via a Polyacrylamide Gel Route. *Materials Transactions*, 57(10), 1766–1770.
- De Graaff, M. S., Vieno, N. M., Kujawa-Roeleveld, K., Zeeman, G., Temmink, H., & Buisman, C. J. N. (2011). Fate of hormones and pharmaceuticals during combined anaerobic treatment and nitrogen removal by partial nitritation-anammox in vacuum collected black water. *Water Research*, 45(1), 375–383.
- Dewi, R. F., & Prasetyo, A. (2023). Eco-friendly Synthesis of $\text{SrBi}_4\text{Ti}_{3.95}\text{Fe}_{0.05}\text{O}_{15}$ via Molten Salt Method. Dalam E. Susanti, J. Juhari, & M. N. Jauhari (Ed.), *Proceedings of the 12th International Conference on Green Technology (ICGT 2022)* (Vol. 221, hlm. 118–126). Atlantis Press International BV.
- Fei, Y., Li, Y., Han, S., & Ma, J. (2016). Adsorptive removal of ciprofloxacin by sodium alginate/graphene oxide composite beads from aqueous solution. *Journal of Colloid and Interface Science*, 484, 196–204.
- Feng, J., Ran, X., Wang, L., Xiao, B., Lei, L., Zhu, J., Liu, Z., Xi, X., Feng, G., Dai, Z., & Li, R. (2022). The Synergistic Effect of Adsorption-Photocatalysis for Removal of Organic Pollutants on Mesoporous $\text{Cu}_2\text{V}_2\text{O}_7/\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_8/\text{g-C}_3\text{N}_4$ Heterojunction. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(22), 14264.
- Fujishima A, Honda K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. *Nature*. 1972;238:37–8.
- Gonzalez-Martinez, A., Rodriguez-Sanchez, A., Martinez-Toledo, M. V., Garcia-Ruiz, M.-J., Hontoria, E., Osorio-Robles, F., & Gonzalez-Lopez, J. (2014). Effect of ciprofloxacin antibiotic on the partial-nitritation process and bacterial community structure of a submerged biofilter. *Science of The Total Environment*, 476–477, 276–287.
- Gupta, V. K., Ali, I., Saleh, T. A., Nayak, A., & Agarwal, S. (2012). Chemical treatment technologies for waste-water recycling—An overview. *RSC Advances*, 2(16), 6380.
- Haikal, F., & Prasetyo, A. (2021). Uji Aktivitas Fotokatalis Senyawa Aurivillius Lapis Empat $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dalam Mendegradasi Rhodamine-B. *al-Kimiya*, 8(1), 37–41.
- Hao, H., Liu, H., Liu, Y., Cao, M., & Ouyang, S. (2007). Lead-Free $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ and $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ Material Fabrication Using the Microwave-Assisted Molten Salt Synthesis Method. *Journal of the American Ceramic Society*, 90(5), 1659–1662.
- Hassaan, M. A., El-Nemr, M. A., Elkatory, M. R., Ragab, S., Niculescu, V.-C., & El Nemr, A. (2023). Principles of Photocatalysts and Their Different Applications: A Review. *Topics in Current Chemistry*, 381(6), 31.
- He, H., Yin, J., Li, Y., Zhang, Y., Qiu, H., Xu, J., Xu, T., & Wang, C. (2014). Size controllable synthesis of single-crystal ferroelectric $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ nanosheet dominated with $\{0\ 0\ 1\}$ facets toward enhanced visible-light-driven photocatalytic activities. *Applied Catalysis B: Environmental*, 156–157, 35–43.
- Himmah, S. N., Sari, P., & Prasetyo, A. (2022). Characterization of Vanadium-Doped $\text{BaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Prepared by Molten KCl Salt Method. *JKPK (Jurnal Kimia Dan Pendidikan Kimia)*, 7(1), 1.

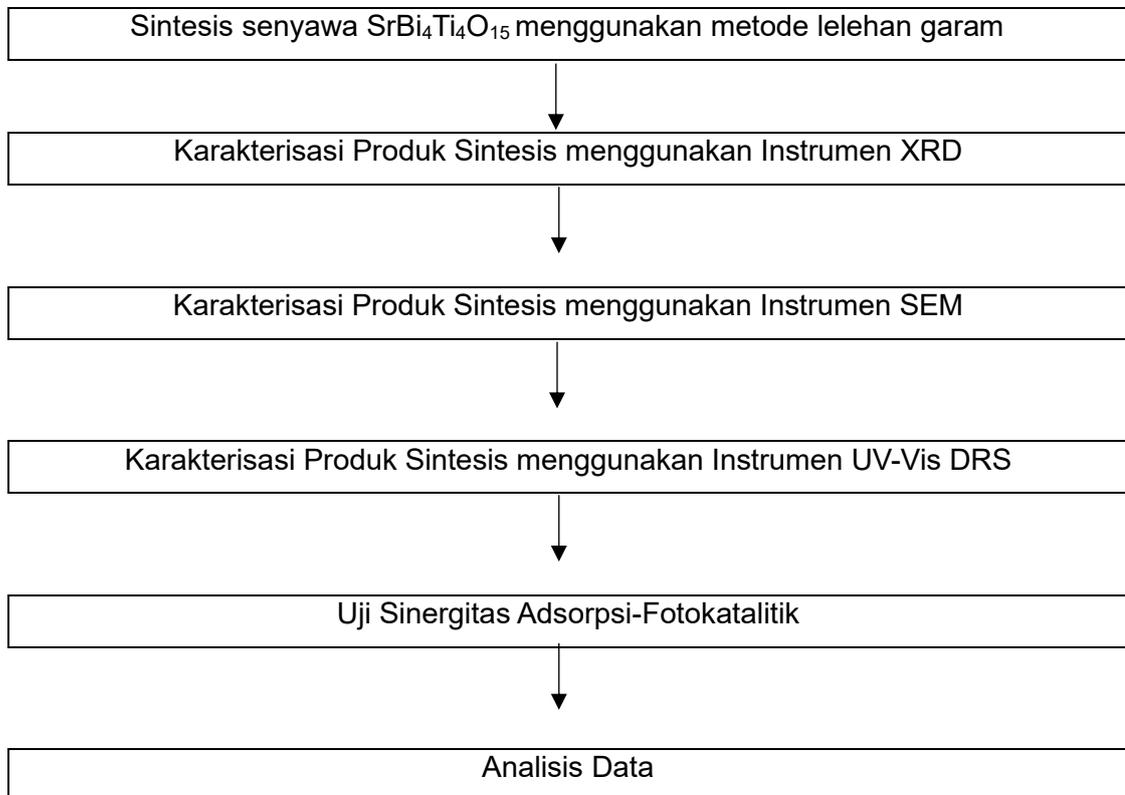
- Kowalczyk, D., Woźniak, A., Jarosz, M., Królicka, A., & Milanowski, J. (2020). FTIR Characterization of the Development of Antimicrobial Catheter Coatings Loaded with Fluoroquinolones. *Coatings*, 10(9), 818
- Kumari, H., Sonia, Suman, Ranga, R., Chahal, S., Devi, S., Sharma, S., Kumar, S., Kumar, P., Kumar, S., Kumar, A., & Parmar, R. (2023). A Review on Photocatalysis Used For Wastewater Treatment: Dye Degradation. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(6), 349.
- Kustiningsih, I., Putri, B. T., Putri, M. R., Kurniawan, T., Sari, D. K., Adiwibowo, M. T., & Slamet, S. (2023). Kinetics Studies of Ciprofloxacin Waste Degradation Using TiO₂ Nanotubes from The Anodization Process. *EduChemia (Jurnal Kimia dan Pendidikan)*, 8(2), 209.
- Li, D., Song, H., Meng, X., Shen, T., Sun, J., Han, W., & Wang, X. (2020). *Effects of Particle Size on the Structure and Photocatalytic Performance by Alkali-Treated TiO₂*.
- Liu, W., He, T., Wang, Y., Ning, G., Xu, Z., Chen, X., Hu, X., Wu, Y., & Zhao, Y. (2020). Synergistic adsorption-photocatalytic degradation effect and norfloxacin mechanism of ZnO/ZnS@BC under UV-light irradiation. *Scientific Reports*, 10(1), 11903.
- Liu, Z., Sun, P., Pavlostathis, S. G., Zhou, X., & Zhang, Y. (2013). Adsorption, inhibition, and biotransformation of ciprofloxacin under aerobic conditions. *Bioresource Technology*, 144, 644–651.
- Muhammad, A. (t.t.). Urgensi Pelestarian Lingkungan Hidup Dalam Al Quran.
- Nguyen, L. T., Nguyen, H. T., Nguyen, K. M., Pham, T. T., & Bruggen, B. V. D. (2021). Combined Adsorption and Photocatalytic Degradation for Ciprofloxacin Removal Using Sugarcane Bagasse/N,S-TiO₂ Powder Composite. *Water*, 13(16), 2300.
- Nkrumah, I., Ampong, F. K., Britwum, A., Paal, M., Kwakye-Awuah, B., Nkum, R. K., & Boakye, F. (2023). Determining the majority charge carrier, optical and structural properties of electrochemically deposited lead tin sulfide (PbSnS) thin films. *Chalcogenide Letters*, 20(3), 205–213.
- Parsa, J. B., Panah, T. M., & Chianeh, F. N. (2016). Removal of ciprofloxacin from aqueous solution by a continuous flow electro-coagulation process. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 33(3), 893–901.
- Qin, K., Zhao, Q., Yu, H., Xia, X., Li, J., He, S., Wei, L., & An, T. (2021). A review of bismuth-based photocatalysts for antibiotic degradation: Insight into the photocatalytic degradation performance, pathways and relevant mechanisms. *Environmental Research*, 199, 111360.
- Sakkas, V. A., Giokas, D. L., Albanis, T. A., & Lambropoulou, D. A. (2011). Photochemical treatment of organic pollutants in aqueous systems. In *Photochemical behavior of multicomponent systems* (pp. 135–182). Springer.
- Saputra, B. A., Aeni, S. Q., Hikmah, N., & Prasetyo, A. (2024). *Removal Ciprofloxacin Through Adsorption- Photocatalyst Properties of CaBi₄Ti₄O₁₅*. Paper presented at the 14th International Conference on Green Technology, Faculty of Science & Technology, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang, Indonesia.
- Sari, P., Himmah, S. N., Hardian, A., Aini, N., & Prasetyo, A. (2022). Synthesis and characterization of plate-like vanadium doped SrBi₄Ti₄O₁₅ prepared via KCl molten salt method. *Communications in Science and Technology*.

- Sharma, P. C., Jain, A., Jain, S., Pahwa, R., & Yar, M. S. (2010). Ciprofloxacin: Review on developments in synthetic, analytical, and medicinal aspects. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, 25(4), 577–589.
- Sholikhah, N. F., & Prasetyo, A. (2023). Eco-Friendly Synthesis and Characterization of $\text{SrBi}_4\text{Ti}_{3.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_{15}$ via Molten Salt Method. Dalam E. Susanti, J. Juhari, & M. N. Jauhari (Ed.), *Proceedings of the 12th International Conference on Green Technology (ICGT 2022)* (Vol. 221, hlm. 255–263). Atlantis Press International BV.
- Shrinagar, A., Garg, A., Prasad, R., & Auluck, S. (2008). Phase stability in ferroelectric bismuth titanate: A first-principles study. *Acta Crystallographica Section A Foundations of Crystallography*, 64(3), 368–375.
- Silva, A. R., Martins, P. M., Teixeira, S., Carabineiro, S. A. C., Kuehn, K., Cuniberti, G., Alves, M. M., Lanceros-Mendez, S., & Pereira, L. (2016). Ciprofloxacin wastewater treated by UVA photocatalysis: Contribution of irradiated TiO_2 and ZnO nanoparticles on the final toxicity as assessed by *Vibrio fischeri*. *RSC Adv.*, 6(98), 95494–95503.
- Sliem, M. A., Salim, A. Y., & Mohamed, G. G. (2019). Photocatalytic degradation of anthracene in aqueous dispersion of metal oxides nanoparticles: Effect of different parameters. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 371, 327–335.
- Tu, S., Zhang, Y., Reshak, A. H., Auluck, S., Ye, L., Han, X., Ma, T., & Huang, H. (2019). Ferroelectric polarization promoted bulk charge separation for highly efficient CO_2 photoreduction of $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. *Nano Energy*, 56, 840–850.
- Veres, Á., Ménesi, J., Janáky, C., Samu, G. F., Karl, M., Xu, Q., Salahioglu, F., Garland, M. V., Dékány, I., & Zhong, Z. (2012). New Insights into the Relationship between Structure and Photocatalytic Properties of TiO_2 Catalysts. *RSC Advances*.
- Wang, K., Zhang, G., Li, J., Li, Y., & Wu, X. (2017). 0D/2D Z-Scheme Heterojunctions of Bismuth Tantalate Quantum Dots/Ultrathin $\text{g-C}_3\text{N}_4$ Nanosheets for Highly Efficient Visible Light Photocatalytic Degradation of Antibiotics. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(50), 43704–43715.
- Wang, Y., Zhang, M., Wu, J., Hu, Z., Zhang, H., & Yan, H. (2021). Ferroelectric and photocatalytic properties of Aurivillius phase $\text{Ca}_2\text{Bi}_4\text{Ti}_5\text{O}_{18}$. *Journal of the American Ceramic Society*, 104(1), 322–328.
- Wei, Z., Endo-Kimura, M., Wang, K., Colbeau-Justin, C., & Kowalska, E. (2019). Influence of Semiconductor Morphology on Photocatalytic Activity of Plasmonic Photocatalysts: Titanate Nanowires and Octahedral Anatase Nanoparticles. *Nanomaterials*, 9(10), 1447.
- Wei, Z., Liu, J., & Shangguan, W. (2020). A review on photocatalysis in antibiotic wastewater: Pollutant degradation and hydrogen production. *Chinese Journal of Catalysis*, 41(10), 1440–1450.
- Yahya, N., Aziz, F., Jamaludin, N. A., A. Mutalib, M., Ismail, A. F., W. Salleh, W. N., Jaafar, J., Yusof, N., & A. Ludin, N. (2018). A review of integrated photocatalyst adsorbents for wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(6), 7411–7425.
- Zhang, H., Fan, Z., Chai, Q., & Li, J. (2023). Facile Synthesis of a $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{BiO}_{2-x}$ Heterojunction for Efficient Photocatalytic Degradation of Ciprofloxacin under Visible Light Irradiation. *Catalysts*, 13(3), 469.

- Zhao, W., Jia, Z., Lei, E., Wang, L., Li, Z., & Dai, Y. (2013). Photocatalytic degradation efficacy of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ micro-scale platelets over methylene blue under visible light. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 74(11), 1604–1607.
- Zhong, C., Kato, D., Takeiri, F., Fujii, K., Yashima, M., Nishiwaki, E., Fujii, Y., Koreeda, A., Tassel, C., Abe, R., & Kageyama, H. (2018). Single Crystal Growth of Sillén–Aurivillius Perovskite Oxyhalides $\text{Bi}_4\text{NbO}_8\text{X}$ ($X = \text{Cl}, \text{Br}$). *Inorganics*, 6(2), 41.

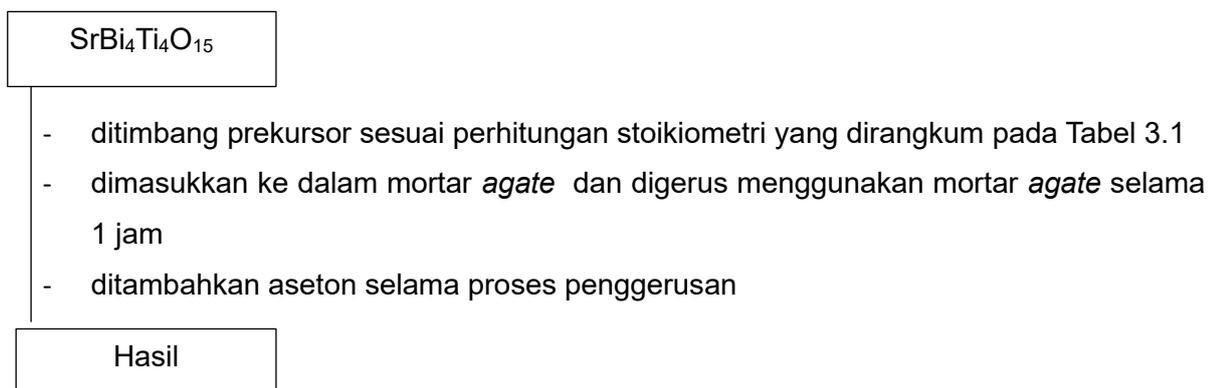
LAMPIRAN

Lampiran 1. Alur Penelitian

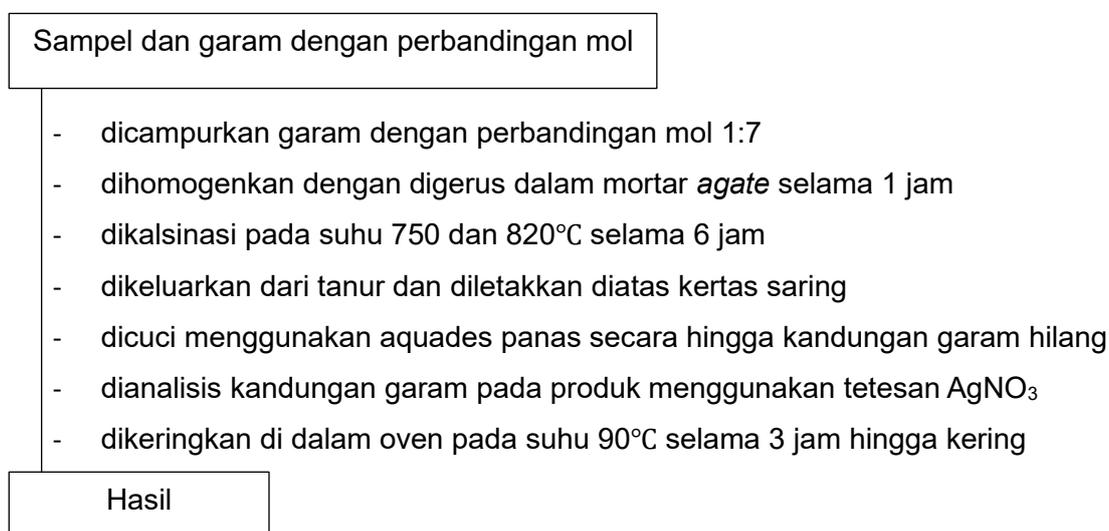


Lampiran 2. Diagram Alir

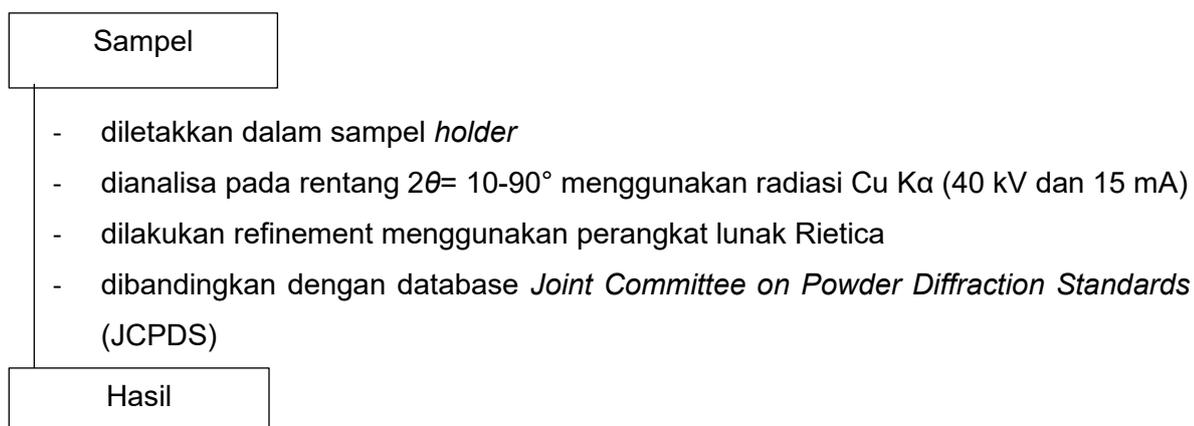
L.2.1 Preparasi Bahan dan Pemanasan Awal



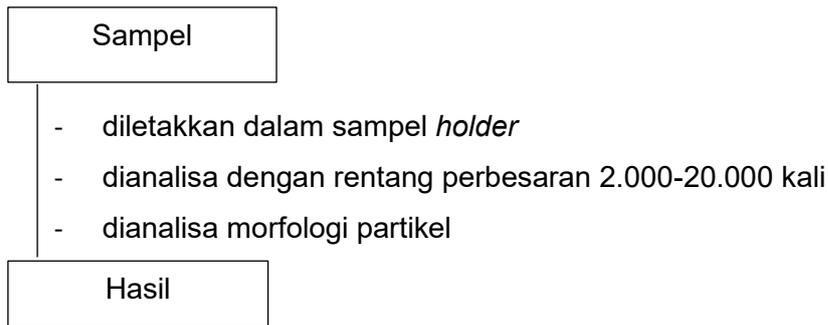
L.2.2 Sintesis SrBi₄Ti₄O₁₅ menggunakan metode lelehan garam



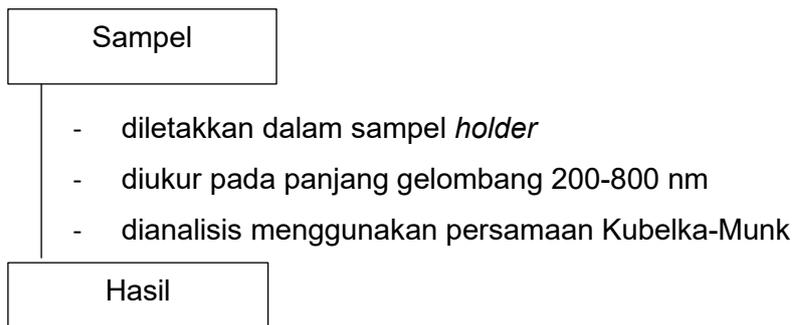
L.2.3 Karakterisasi dan Analisis SrBi₄Ti₄O₁₅ menggunakan Instrumen XRD



L.2.4 Karakterisasi dan Analisis SrBi₄Ti₄O₁₅ menggunakan Instrumen SEM

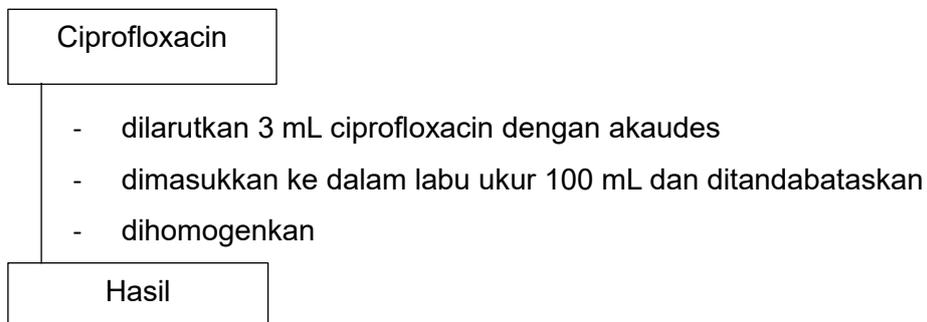


L.2.5 Karakterisasi dan Analisis SrBi₄Ti₄O₁₅ menggunakan Instrumen UV-Vis DRS

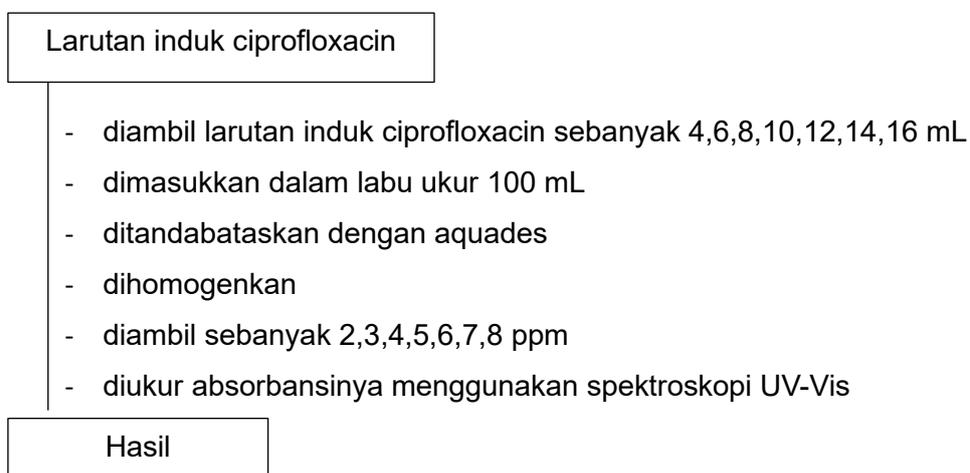


L.2.6 Uji Sinergitas Adsorpsi-Fotokatalitik

L.2.6.1 Pembuatan Larutan Induk Ciprofloxacin



L.2.6.2 Pembuatan Kurva Standar Ciprofloxacin



L.2.6.3 Pembuatan Uji Kestabilan di Daerah Gelap Larutan Ciprofloxacin

100 mL Larutan ciprofloxacin 8 ppm

- diletakkan dalam reaktor fotokatalis
- diuji selama 120 menit tanpa sinar UV
- diukur absorbansinya menggunakan spektroskopi UV-Vis
- diulangi sebanyak 3 kali

Hasil

L.2.6.4 Pembuatan Uji Kestabilan Terpapar Sinar UV Larutan Ciprofloxacin

100 mL Larutan *Ciprofloxacin* 8 ppm

- diletakkan dalam reaktor fotokatalis
- diuji selama 120 menit dengan sinar UV
- diukur absorbansinya menggunakan spektroskopi UV-Vis
- diulangi sebanyak 3 kali

Hasil

L.2.6.5 Pengujian Kestimbangan Adsorpsi-Desorpsi Senyawa SrBi₄Ti₄O₁₅

100 mL Larutan *Ciprofloxacin* 8 ppm + 100 mg serbuk SrBi₄Ti₄O₁₅

- diletakkan di dalam reaktor fotokatalis
- distirer selama 0; 30; 60; 120; 140; dan 160 menit tanpa cahaya untuk mengetahui kondisi kesetimbangan adsorpsi-desorpsi
- disaring menggunakan kertas saring

Larutan *Ciprofloxacin*

Endapan

- dipindahkan ke dalam kuvet untuk diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis
- diperiksa pH dengan indikator universal
- diulangi sebanyak 3 kali

Hasil

L.2.6.6 Uji Adsorpsi-Fotokatalitik Larutan Ciprofloxacin menggunakan Fotokatalis $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Hasil Sintesis Menggunakan Lampu UV

100 mL Larutan Ciprofloxacin 8 ppm + 100 mg serbuk $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

- diletakkan di dalam reaktor fotokatalis selama waktu kesetimbangan yang diperoleh dalam hasil pengujian adsorpsi-desorpsi
- diletakkan di bawah lampu UV dengan penyinaran selama 30; 60; dan 90 menit
- disaring menggunakan kertas saring

Larutan Ciprofloxacin

Endapan

- dipindahkan ke dalam kuvet untuk diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis
- diperiksa pH dengan indikator universal
- diulangi sebanyak 3 kali

Hasil

L.2.6.8 Tahapan Analisis Menentukan Nilai Band Gap

Data DRS

- diinput data (panjang gelombang dan %Reflektan) ke Worksheet
- dibuat kolom R (Reflektan) dan dihitung menggunakan rumus $\%R/100$
- dibuat kolom $2R$ dan dihitung menggunakan rumus $2 \cdot R$
- dibuat kolom $1-R$ dan dihitung menggunakan rumus $1-R$
- dibuat kolom $(1-R)^n$ dan dihitung menggunakan rumus $(1-R)^n$
- dibuat kolom $F(R)$ dan dihitung menggunakan rumus $(1-R)^2/2R$
- dibuat kolom $(1-R)^n$ dan dihitung menggunakan rumus $(1-R)^2$
- dibuat kolom h (tetapan planck)
- dibuat kolom c (kecepatan cahaya)
- dibuat kolom λ (panjang gelombang) dan diubah menjadi m
- dibuat kolom E (J) dengan rumus $h \cdot c$
- dibuat kolom E (eV) dengan rumus E (J) $\cdot 1.6E-19$
- dihitung seluruh data dengan cara blok semua kolom hingga ke data paling akhir
- diplot $F(R)$ sebagai sumbu y dan e (eV) sebagai sumbu x
- diklik Insert dan pilih Chart
- diklik kanan dan select data
- diisi sesuai data sumbu X dan Y
- diklik kanan kemudian select data untuk menentukan nilai energi celah pita
- didapat persamaan $y = ax - b$
- ditentukan nilai E_g dengan rumus b/a

Hasil

L.2.6.9 Tahapan Pengolahan Data Uji Adsorpsi

Data DRS

- diinput data (panjang gelombang dan absorbansi) ke Workbook di Origin
- diplotkan semua data menjadi spektra
- diklik analysis pada menu bar
- diklik peaks and baseline
- diklik peak analyzer
- dipilih subtract baseline
- diklik next
- diubah constant menjadi user defined
- dipilih B spline
- diklik modify/del
- diatur titik hingga $y = 0$
- diklik next
- diklik subtract
- diklik finish

Hasil

Lampiran 3.Perhitungan

Diketahui :

- Target massa produk adalah 4 gram
- Perbandingan mol prekursor $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$: NaCl/KCl adalah 1:7

Mr SrCO_3	= 147,6289 g/mol
Mr Bi_2O_3	= 465,96 g/mol
Mr TiO_2	= 79,8658 g/mol
Mr $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	= 1355,0096 g/mol
Ar Sr	= 87,62 g/mol
Ar Bi	= 208,9804 g/mol
Ar Ti	= 47,867 g/mol
Ar O	= 16 g/mol
Mr NaCl	= 58,34 g/mol
Mr KCl	= 74,555 g/mol

L.3.1 $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$



$$\begin{aligned} \text{Mol SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15} &= \frac{\text{Massa SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}}{\text{Mr SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}} \\ &= \frac{4 \text{ gram}}{1355,0096 \text{ g/mol}} \\ &= 0,0029 \text{ mol} \end{aligned}$$

- SrCO_3
 Mol SrCO_3 = $1 \times \text{mol SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$
 = $1 \times 0,0029 \text{ mol}$
 = $0,0029 \text{ mol}$

 Massa SrCO_3 = Mol $\text{SrCO}_3 \times \text{Mr SrCO}_3$
 = $0,0029 \text{ mol} \times 147,6289 \text{ g/mol}$
 = $0,42812381 \text{ gram}$
- Bi_2O_3
 Mol Bi_2O_3 = $2 \times \text{mol SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$
 = $2 \times 0,0029 \text{ mol}$
 = $0,0058 \text{ mol}$

 Massa Bi_2O_3 = Mol $\text{Bi}_2\text{O}_3 \times \text{Mr Bi}_2\text{O}_3$
 = $0,0058 \text{ mol} \times 465,96 \text{ g/mol}$
 = $2,702568 \text{ gram}$
- TiO_2
 Mol TiO_2 = $4 \times \text{mol SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$
 = $4 \times 0,0029 \text{ mol}$
 = $0,0116 \text{ mol}$

 Massa TiO_2 = Mol $\text{TiO}_2 \times \text{Mr TiO}_2$
 = $0,0116 \text{ mol} \times 79,8658 \text{ g/mol}$
 = $0,92644328 \text{ gram}$
- NaCl
 Mol NaCl = $7 \times \text{mol SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$
 = $7 \times 0,0029 \text{ mol}$
 = $0,0203 \text{ mol}$

 Massa NaCl = Mr NaCl x mol NaCl
 = $58,34 \text{ gr/mol} \times 0,0203 \text{ mol}$
 = $1,1843 \text{ gr}$

- KCl
 Mol KCl = $7 \times \text{mol SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$
 = $7 \times 0,0029 \text{ mol}$
 = $0,0203 \text{ mol}$
- Massa KCl = $\text{Mr KCl} \times \text{Mol KCl}$
 = $74.555 \text{ g/mol} \times 0,0203 \text{ mol}$
 = $1,5135 \text{ gram}$

L.3.2 Uji Sinergitas Adsorpsi-Fotokatalis

L.3.2.1 Uji Kestabilan Larutan Ciprofloxacin

Persamaan regresi linier

$$y = 0,1128x + 0,0588$$

a. Kondisi gelap (tanpa sinar UV)

Absorbansi

Pengulangan 1	t = 0 menit	= 0,8609
	t = 120 menit	= 0,8223
Pengulangan 2	t = 0 menit	= 0,8609
	t = 120 menit	= 0,8333
Pengulangan 3	t = 0 menit	= 0,8609
	t = 120 menit	= 0,8543

konsentrasi

Pengulangan 1

0 menit

$$y = 0,1128x + 0,0588$$

$$0,8609 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 7,1108$$

120 menit

$$y = 0,1128x + 0,0588$$

$$0,8223 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 6,7686$$

Pengulangan 2

0 menit

$$y = 0,1128x + 0,0588$$

$$0,8609 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 7,1108$$

120 menit

$$y = 0,1128x + 0,0588$$

$$0,8333 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 6,8661$$

Pengulangan 3

0 menit

$$y = 0,1128x + 0,0588$$

$$0,8609 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 7,1108$$

$$120 \text{ menit} \quad y = 0,1128x + 0,0588$$

$$0,8543 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 7,0523$$

b. Kondisi terang (dengan sinar UV)

Absorbansi

Pengulangan 1 $t = 0 \text{ menit} = 0,8519$

$$t = 120 \text{ menit} = 0,8381$$

Pengulangan 2 $t = 0 \text{ menit} = 0,8519$

$$t = 120 \text{ menit} = 0,8355$$

Pengulangan 3 $t = 0 \text{ menit} = 0,8519$

$$t = 120 \text{ menit} = 0,8405$$

konsentrasi

Pengulangan 1

0 menit $y = 0,1128x + 0,0588$

$$0,8519 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 7,031$$

120 menit $y = 0,1128x + 0,0588$

$$0,8223 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 6,9086$$

Pengulangan 2

0 menit $y = 0,1128x + 0,0588$

$$0,8519 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 7,031$$

120 menit $y = 0,1128x + 0,0588$

$$0,8333 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 6,8856$$

Pengulangan 3

0 menit $y = 0,1128x + 0,0588$

$$0,8519 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 7,031$$

120 menit $y = 0,1128x + 0,0588$

$$0,8543 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 6,9299$$

L.3.2.2 Uji Kesetimbangan Adsorpsi-Desorpsi senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

Persamaan regresi linier

$$y = 0,1128x + 0,0588$$

Absorbansi

Pengulangan 1	t = 0 menit	= 0,8973
	t = 30 menit	= 0,4938
	t = 60 menit	= 0,4457
	t = 90 menit	= 0,3417
	t = 120 menit	= 0,4119
Pengulangan 2	t = 0 menit	= 0,8951
	t = 30 menit	= 0,5070
	t = 60 menit	= 0,4490
	t = 90 menit	= 0,3664
	t = 120 menit	= 0,4335

Konsentrasi

Pengulangan 1

0 menit	$y = 0,1128x + 0,0588$ $0,8973 = 0,1128x + 0,0588$ $x = 7,4335$
30 menit	$y = 0,1128x + 0,0588$ $0,4938 = 0,1128x + 0,0588$ $x = 3,8563$
60 menit	$y = 0,1128x + 0,0588$ $0,4457 = 0,1128x + 0,0588$ $x = 3,4299$
90 menit	$y = 0,1128x + 0,0588$ $0,3417 = 0,1128x + 0,0588$ $x = 2,5079$
120 menit	$y = 0,1128x + 0,0588$ $0,4119 = 0,1128x + 0,0588$ $x = 3,1303$
Pengulangan 2	
0 menit	$y = 0,1128x + 0,0588$ $0,8951 = 0,1128x + 0,0588$ $x = 7,4140$

$$30 \text{ menit} \quad y = 0,1128x + 0,0588$$

$$0,5070 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 3,9734$$

$$60 \text{ menit} \quad y = 0,1128x + 0,0588$$

$$0,4490 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 3,4592$$

$$90 \text{ menit} \quad y = 0,1128x + 0,0588$$

$$0,3664 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 2,7269$$

$$120 \text{ menit} \quad y = 0,1128x + 0,0588$$

$$0,4335 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 3,3218$$

%Adsorpsi

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

Pengulangan 1

$$30 \text{ menit} \quad (\%) = \frac{(7,4335) - (3,8563)}{7,4335} \times 100\% = 48,12\%$$

$$60 \text{ menit} \quad (\%) = \frac{(7,4335) - (3,4299)}{7,4335} \times 100\% = 53,85\%$$

$$90 \text{ menit} \quad (\%) = \frac{(7,4335) - (2,5079)}{7,4335} \times 100\% = 66,26\%$$

$$120 \text{ menit} \quad (\%) = \frac{(7,4335) - (3,1303)}{7,4335} \times 100\% = 57,88\%$$

Pengulangan 2

$$30 \text{ menit} \quad (\%) = \frac{(7,4140) - (3,9734)}{7,4140} \times 100\% = 46,40\%$$

$$60 \text{ menit} \quad (\%) = \frac{(7,4140) - (3,4592)}{7,4140} \times 100\% = 53,34\%$$

$$90 \text{ menit} \quad (\%) = \frac{(7,4140) - (2,7269)}{7,4140} \times 100\% = 63,21\%$$

$$120 \text{ menit} \quad (\%) = \frac{(7,4140) - (3,3218)}{7,4140} \times 100\% = 55,19\%$$

L.3.2.3 Uji Sinergistik Adsorpsi-Fotokatalitik menggunakan lampu UV

Persamaan regresi linier

$$y = 0,1128x + 0,0588$$

Absorbansi

$$\text{Pengulangan 1} \quad t = 0 \text{ menit} \quad = 0,8984$$

$$t = 30 \text{ menit} \quad = 0,3860$$

$$t = 60 \text{ menit} \quad = 0,3708$$

$$t = 90 \text{ menit} = 0,3195$$

Pengulangan 2

$$t = 0 \text{ menit} = 0,8984$$

$$t = 30 \text{ menit} = 0,3880$$

$$t = 60 \text{ menit} = 0,3716$$

$$t = 90 \text{ menit} = 0,3506$$

Konsentrasi

Pengulangan 1

0 menit

$$y = 0,1128x + 0,0588$$

$$0,8984 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 7,4432$$

30 menit

$$y = 0,1128x + 0,0588$$

$$0,3860 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 2,9007$$

60 menit

$$y = 0,1128x + 0,0588$$

$$0,3708 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 2,7659$$

90 menit

$$y = 0,1128x + 0,0588$$

$$0,3195 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 2,3111$$

Pengulangan 2

0 menit

$$y = 0,1128x + 0,0588$$

$$0,8984 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 7,4432$$

30 menit

$$y = 0,1128x + 0,0588$$

$$0,3880 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 2,9184$$

60 menit

$$y = 0,1128x + 0,0588$$

$$0,3716 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 2,7730$$

90 menit

$$y = 0,1128x + 0,0588$$

$$0,3506 = 0,1128x + 0,0588$$

$$x = 2,5868$$

%Degradasi

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

Pengulangan 1

30 menit $(\%) = \frac{(7,4432) - (2,9007)}{7,4432} \times 100\% = 60,81\%$

60 menit $(\%) = \frac{(7,4432) - (2,7659)}{7,4432} \times 100\% = 63,51\%$

90 menit $(\%) = \frac{(7,4432) - (2,3111)}{7,4432} \times 100\% = 68,94\%$

Pengulangan 2

30 menit $(\%) = \frac{(7,4432) - (2,9184)}{7,4432} \times 100\% = 60,81\%$

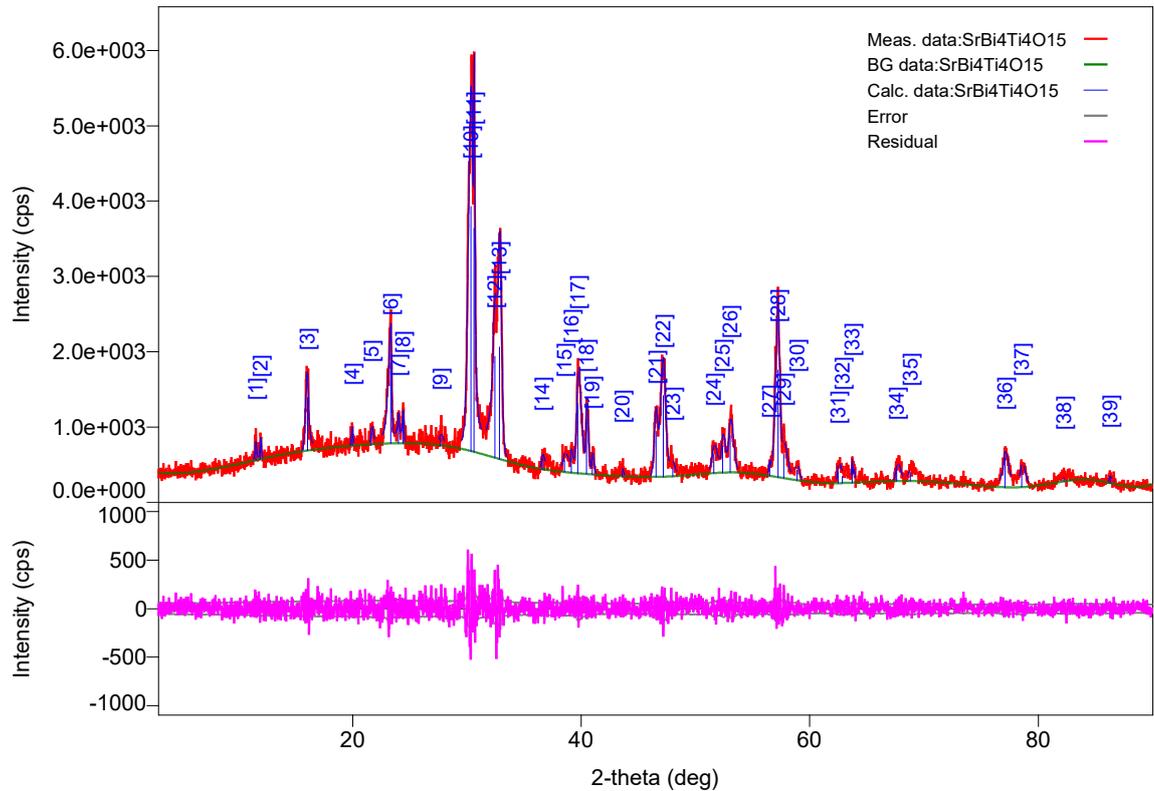
60 menit $(\%) = \frac{(7,4432) - (2,7730)}{7,4432} \times 100\% = 63,51\%$

90 menit $(\%) = \frac{(7,4432) - (2,5868)}{7,4432} \times 100\% = 66,21\%$

Lampiran 4. Data Hasil Karakterisasi

L.4.1 Data Hasil Karakterisasi Menggunakan XRD

L.4.1.1 Pola Difraksi Sinar-X dan Daftar Puncak Senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$



Tabel L.4.1.1 Pola Difraksi Sinar-X dan Daftar Puncak Senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Int. W(deg)	Asym. factor
1	11.516(18)	7.678(12)	168(37)	0.17(3)	35(5)	0.21(8)	0.8(3)
2	11.934(16)	7.410(10)	199(41)	0.15(3)	37(5)	0.19(6)	0.8(3)
3	16.04(2)	5.520(7)	707(77)	0.30(2)	278(13)	0.39(6)	1.8(6)
4	19.97(3)	4.442(7)	171(38)	0.14(4)	31(8)	0.18(8)	2.0(17)
5	21.654(19)	4.101(4)	146(35)	0.22(6)	35(11)	0.24(13)	0.5(7)
6	23.344(4)	3.8075(7)	1067(94)	0.333(17)	495(15)	0.46(6)	4.2(19)
7	24.00(2)	3.705(4)	262(47)	0.17(4)	72(14)	0.28(10)	1.1(5)
8	24.41(2)	3.643(3)	331(52)	0.15(4)	80(13)	0.24(8)	1.1(5)
9	27.70(6)	3.218(6)	94(28)	0.37(17)	46(17)	0.5(3)	0.5(15)
10	30.360(15)	2.9417(14)	3250(165)	0.50(3)	2092(58)	0.64(5)	1.4(3)
11	30.636(4)	2.9158(4)	2973(157)	0.083(10)	316(47)	0.11(2)	1.4(3)
12	32.43(3)	2.758(2)	1347(106)	0.66(4)	1148(70)	0.85(12)	0.56(10)
13	32.856(11)	2.7237(9)	1492(112)	0.26(2)	495(73)	0.33(7)	0.56(10)
14	36.61(7)	2.453(5)	144(35)	0.30(10)	77(11)	0.5(2)	0.5(2)
15	38.54(2)	2.3340(12)	163(37)	0.52(7)	99(11)	0.6(2)	0.50(9)
16	39.123(14)	2.3006(8)	195(40)	0.13(4)	31(6)	0.16(7)	0.50(9)
17	39.713(5)	2.2678(3)	930(88)	0.467(16)	513(16)	0.55(7)	0.50(9)
18	40.465(5)	2.2274(3)	722(78)	0.222(14)	189(8)	0.26(4)	0.50(9)
19	40.956(12)	2.2018(6)	233(44)	0.20(3)	55(7)	0.24(7)	0.50(9)
20	43.59(4)	2.0747(17)	73(25)	0.41(11)	33(10)	0.5(3)	4(9)
21	46.537(14)	1.9499(5)	606(71)	0.31(3)	223(24)	0.37(8)	1.7(4)
22	47.19(3)	1.9246(10)	1080(95)	0.50(2)	644(32)	0.60(8)	1.7(4)

23	48.01(5)	1.893(2)	108(30)	0.4(2)	52(29)	0.5(4)	1.7(4)
24	51.610(16)	1.7695(5)	255(46)	0.52(6)	163(12)	0.64(16)	0.7(2)
25	52.372(13)	1.7456(4)	353(54)	0.35(4)	151(12)	0.43(10)	0.7(2)
26	53.047(10)	1.7249(3)	498(64)	0.47(3)	286(18)	0.57(11)	0.7(2)
27	56.496(16)	1.6275(4)	130(33)	0.12(4)	17(6)	0.13(8)	2.3(3)
28	57.210(13)	1.6089(3)	1428(109)	0.371(15)	564(49)	0.39(6)	2.3(3)
29	57.73(5)	1.5957(13)	321(52)	1.04(12)	356(42)	1.1(3)	2.3(3)
30	58.90(3)	1.5666(6)	141(34)	0.55(8)	82(10)	0.6(2)	2.3(3)
31	62.482(19)	1.4852(4)	155(36)	0.22(6)	38(11)	0.25(13)	0.5(2)
32	62.86(10)	1.477(2)	95(28)	1.37(15)	147(16)	1.5(6)	0.5(2)
33	63.709(7)	1.45956(15)	233(44)	0.102(17)	27(5)	0.11(4)	0.5(2)
34	67.62(5)	1.3844(9)	177(38)	0.45(6)	85(9)	0.48(15)	0.5(2)
35	68.79(9)	1.3637(15)	114(31)	0.80(9)	97(9)	0.9(3)	0.5(2)
36	77.07(3)	1.2365(3)	392(57)	0.40(6)	279(9)	0.71(13)	0.8(3)
37	78.53(2)	1.2170(3)	228(44)	0.44(5)	148(8)	0.65(16)	0.6(2)
38	82.22(6)	1.1715(7)	56(22)	1.07(17)	63(13)	1.1(7)	0.9(7)
39	86.29(3)	1.1265(4)	97(28)	0.22(5)	23(5)	0.23(12)	0.8(5)

L.4.1.2 Standar JCPDS NO. 00-049-0973

Name and formula

Reference code: 00-043-0973

Compound name: Strontium Bismuth Titanium Oxide
 PDF index name: Strontium Bismuth Titanium Oxide

Empirical formula: $\text{Bi}_4\text{O}_{15}\text{SrTi}_4$
 Chemical formula: $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

Crystallographic parameters

Crystal system: Orthorhombic
 Space group: Bb21m
 Space group number: 36

a (Å): 5,4280
 b (Å): 5,4380
 c (Å): 40,9400
 Alpha (°): 90,0000
 Beta (°): 90,0000
 Gamma (°): 90,0000
 Calculated density (g/cm³): 7,99
 Volume of cell (10⁶ pm³): 1208,44
 Z: 4,00
 RIR: -

Subfiles and Quality

Subfiles: Corrosion
 Inorganic
 Quality: Star (S)

Comments

Creation Date: 01/01/1970
 Modification Date: 01/01/1970
 Additional Patterns: To replace 33-1320.

References

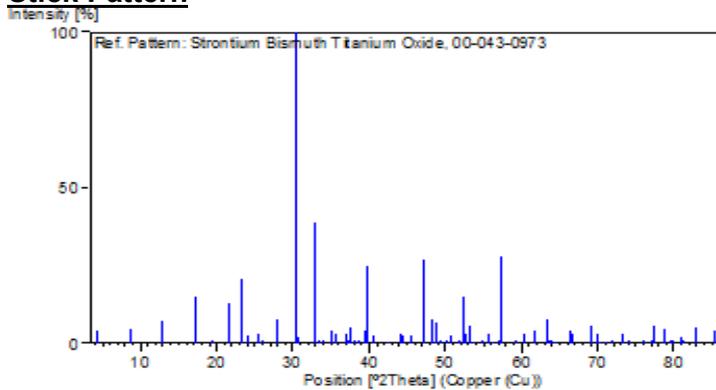
Primary reference: Guo, C.-L., Wu, Y.-Q., *Acta Phys. Sinica; Wuli Xuebao*, **29**, 1491, (1980)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	0	2	20,50000	4,307	4,0
2	0	0	4	10,20000	8,662	5,0
3	0	0	6	6,82000	12,970	7,0
4	0	0	8	5,12000	17,306	15,0
5	1	0	5	4,53000	19,581	1,0
6	0	0	10	4,09000	21,712	13,0
7	1	1	1	3,82000	23,267	21,0
8	1	1	3	3,70000	24,033	3,0
9	1	1	5	3,48000	25,577	3,0
10	0	0	12	3,41000	26,111	1,0
11	1	1	7	3,21000	27,769	8,0
12	1	1	9	2,93500	30,431	100,0
13	0	0	14	2,92000	30,591	2,0
14	0	2	0	2,72000	32,902	39,0
15	1	1	11	2,67500	33,472	1,0
16	2	0	4	2,62700	34,102	1,0
17	0	0	16	2,56000	35,023	4,0
18	2	0	6	2,52400	35,539	3,0
19	1	1	13	2,43700	36,853	3,0
20	2	1	2	2,41500	37,201	1,0
21	0	2	8	2,39900	37,458	5,0
22	2	1	4	2,36500	38,017	1,0
23	1	2	5	2,32900	38,628	1,0
24	0	0	18	2,27500	39,582	4,0
25	0	2	10	2,26500	39,765	25,0
26	1	1	15	2,22500	40,510	3,0
27	2	0	12	2,12500	42,507	1,0
28	0	0	20	2,04800	44,187	3,0
29	1	1	17	2,04100	44,347	3,0
30	2	0	14	1,99100	45,522	3,0
31	2	2	0	1,92100	47,280	27,0
32	2	2	4	1,88800	48,158	1,0
33	1	1	19	1,88000	48,376	8,0
34	2	0	16	1,86200	48,874	7,0
35	2	2	6	1,85000	49,212	1,0
36	1	2	15	1,81600	50,197	1,0
37	2	2	8	1,79900	50,705	3,0
38	3	0	5	1,76700	51,690	1,0
39	2	0	18	1,74400	52,423	15,0
40	2	2	10	1,74000	52,553	3,0
41	1	3	1	1,71700	53,312	6,0
42	0	0	24	1,70500	53,717	1,0
43	2	2	12	1,67500	54,759	1,0
44	3	1	7	1,64800	55,733	3,0
45	2	0	20	1,63500	56,216	1,0
46	1	1	23	1,61500	56,975	1,0
47	3	1	9	1,60600	57,324	28,0
48	3	1	11	1,56000	59,179	1,0
49	2	2	16	1,53500	60,242	3,0
50	3	2	1	1,50500	61,571	4,0
51	2	2	18	1,46700	63,348	8,0
52	1	0	27	1,46000	63,687	1,0
53	3	1	15	1,45400	63,981	1,0
54	2	0	24	1,44400	64,478	1,0
55	1	1	27	1,41000	66,229	4,0

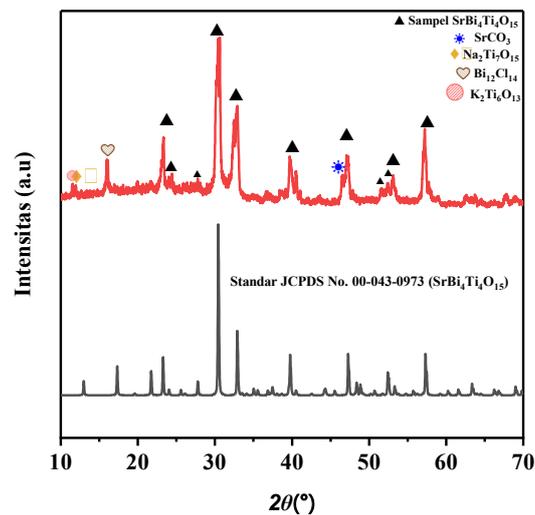
56	1	3	17	1,39900	66,817	3,0
57	0	4	0	1,36000	68,999	6,0
58	4	0	4	1,34600	69,820	3,0
59	2	3	14	1,33900	70,238	1,0
60	3	0	21	1,32600	71,031	1,0
61	4	1	2	1,31400	71,779	1,0
62	0	4	10	1,29000	73,330	3,0
63	3	3	1	1,28000	73,997	1,0
64	2	1	28	1,25200	75,941	1,0
65	1	3	23	1,23600	77,103	1,0
66	3	3	9	1,23300	77,326	6,0
67	2	4	0	1,21500	78,690	5,0
68	0	0	34	1,20500	79,472	1,0
69	4	1	14	1,20000	79,870	1,0
70	1	3	25	1,18600	81,007	2,0
71	4	2	8	1,18200	81,339	1,0
72	4	0	18	1,16500	82,783	5,0
73	3	1	27	1,13700	85,295	4,0

Stick Pattern

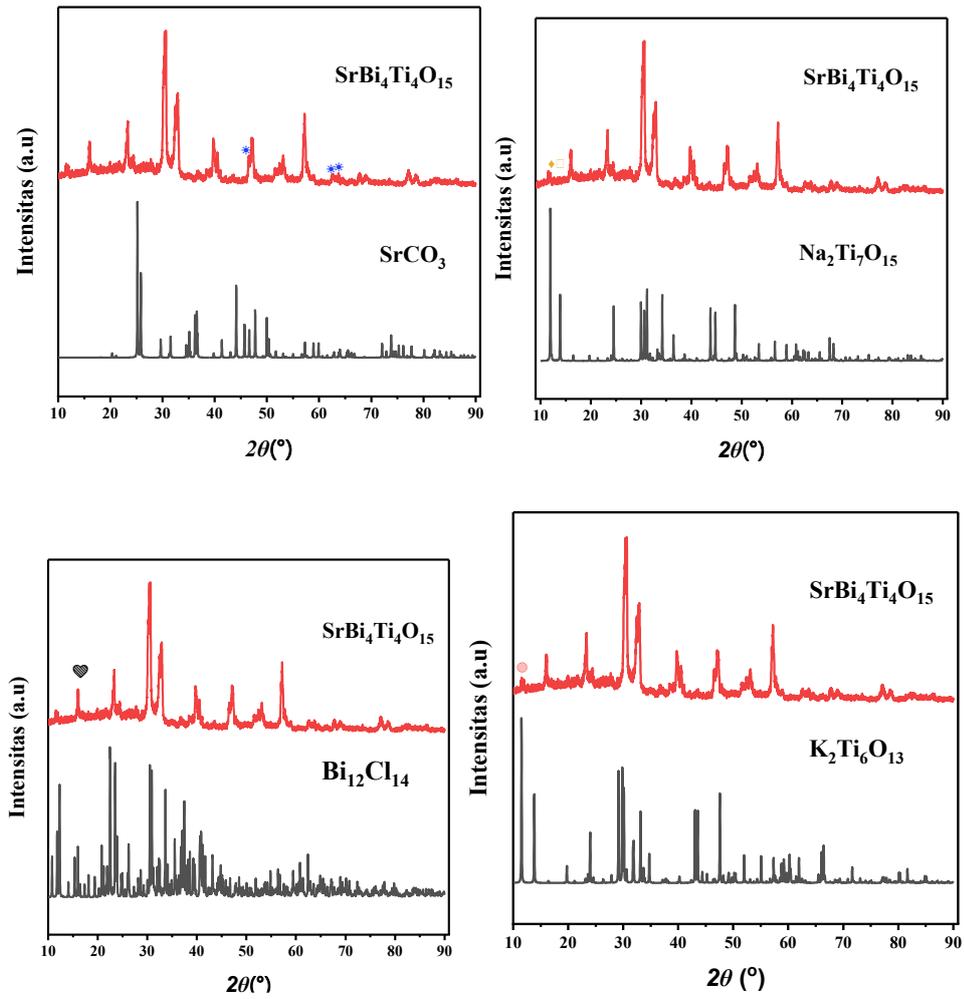


L.4.1.2 Analisis Pengotor menggunakan Senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

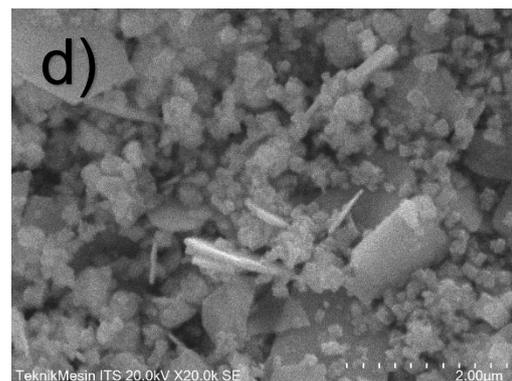
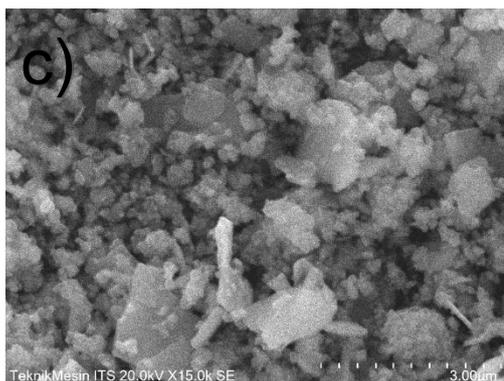
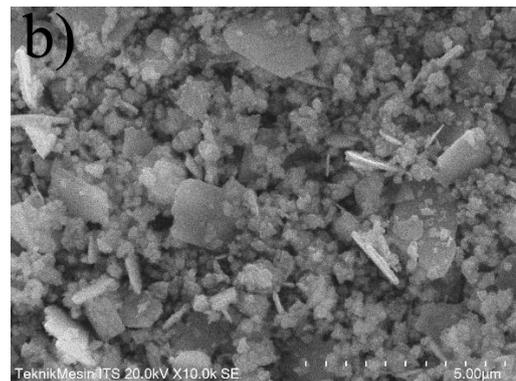
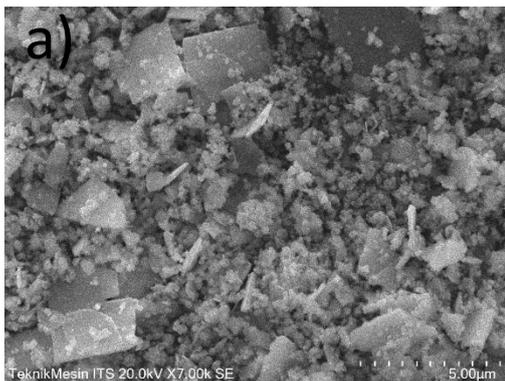
L.4.1.2.1 $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$



Gambar L.5.1 Difraktogram analisis pengotor senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan Standar JCPDS No. 00-040-0973

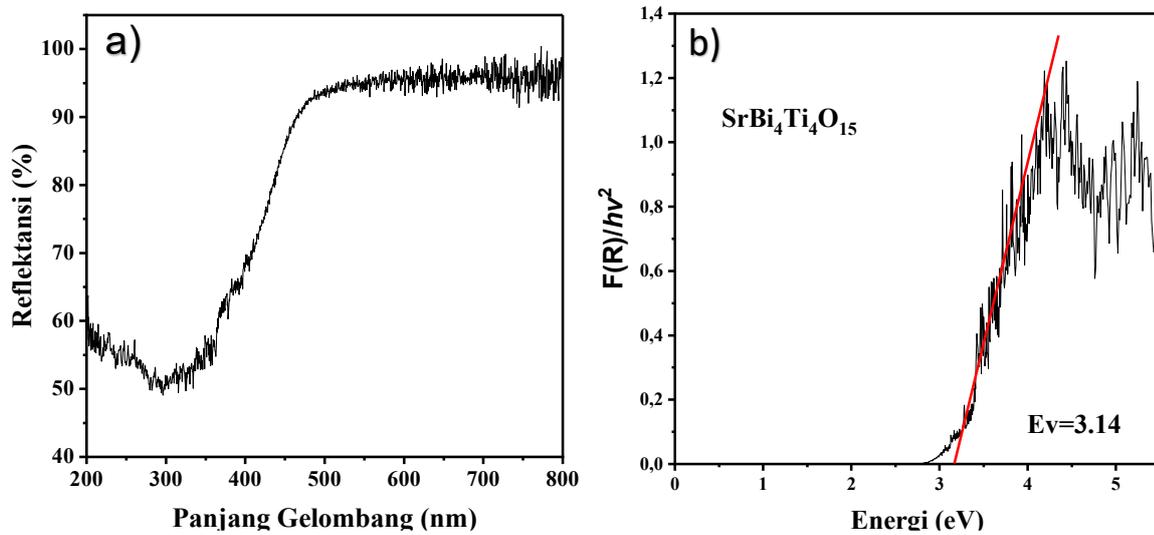


L4.2 Hasil Karakterisasi Menggunakan SEM



Gambar L.4.2 Hasil karakterisasi SEM perbesaran (a) 7.000x; (b) 10.000x; (c) 15.000x; dan (d) 20.000x

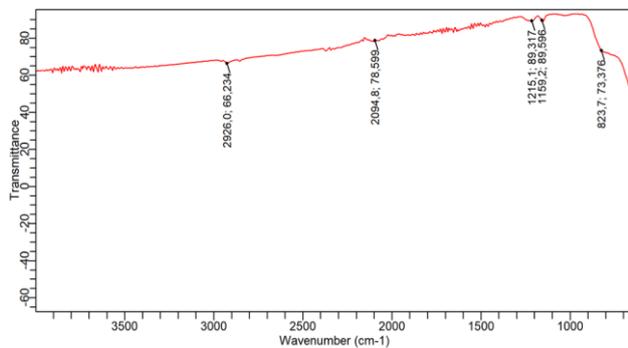
L.4.3 Hasil Karakterisasi UV-Vis DRS



Gambar L.4.3 (a) Spektrum reflektansi senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (b) Plot Tauc senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

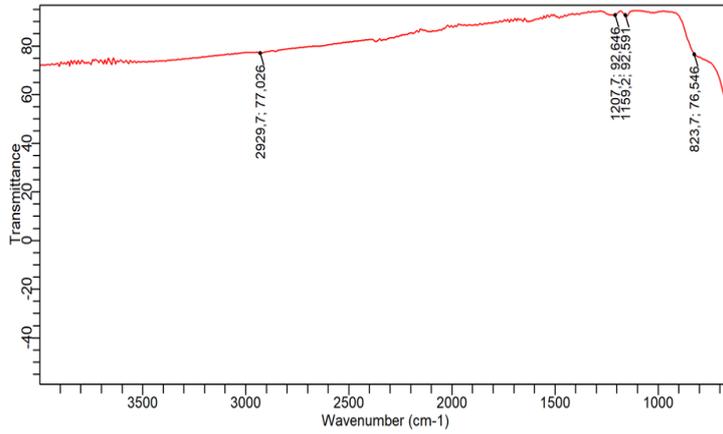
L.4.4 Hasil Karakterisasi IR

L.4.4.1 Adsorpsi-Desorpsi



Peak Number	Wavenumber (cm^{-1})	Intensity
1	823,7	73,376
2	1159,2	89,596
3	1215,1	89,317
4	2094,8	78,599
5	2926,0	66,234

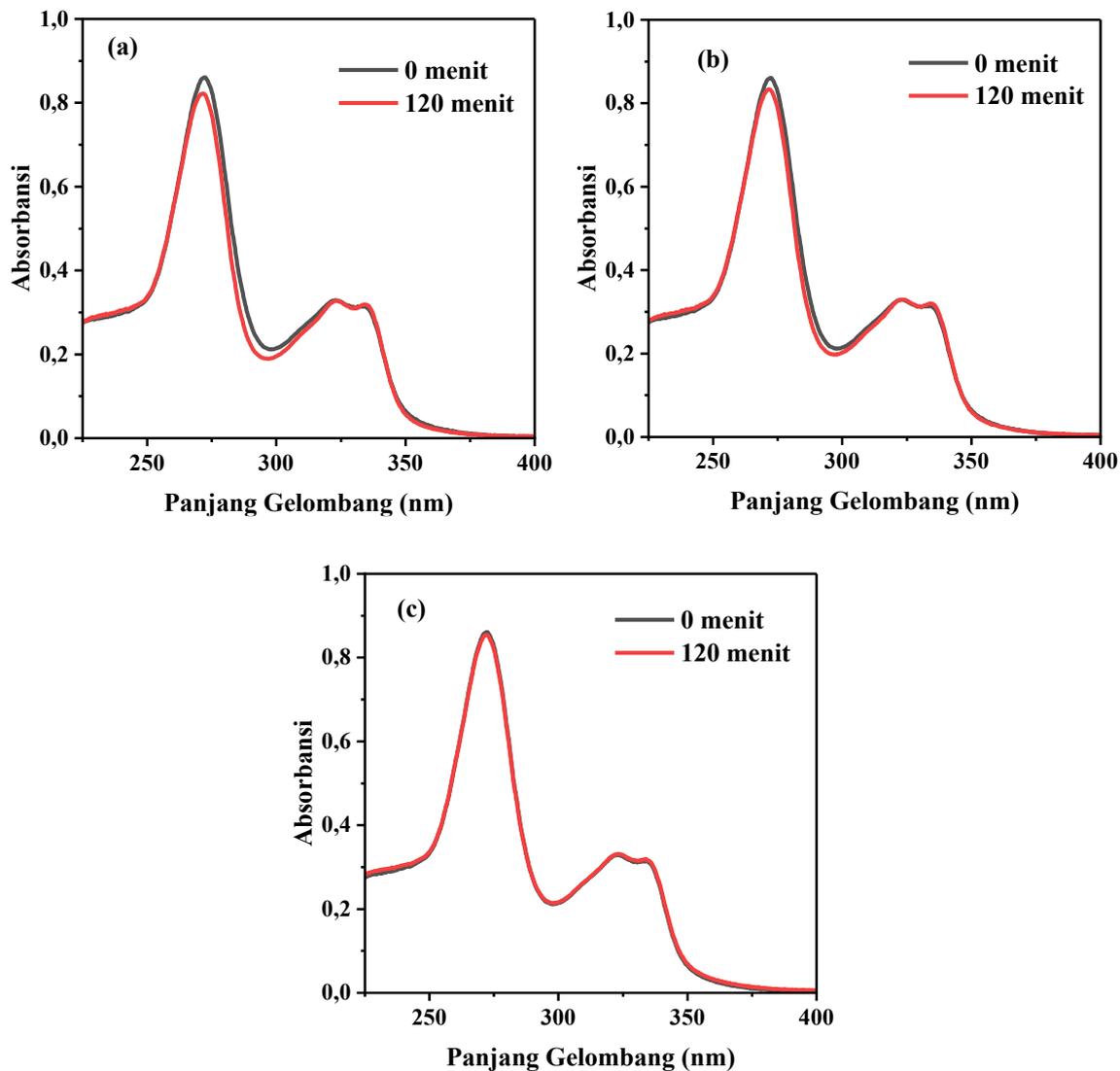
L.4.4.2 Adsorpsi-Fotokatalis



Peak Number	Wavenumber (cm ⁻¹)	Intensity
1	823,7	76,546
2	1159,2	92,591
3	1207,7	92,646
4	2929,7	77,026

Lampiran 5. Uji Sinergitas Adsorpsi-Fotokatalis

L.5.1 Uji Kestabilan Larutan Ciprofloxacin (kondisi Gelap)



Gambar 4. 15 Spektra absorbansi UV-Vis uji kestabilan tanpa sinar UV

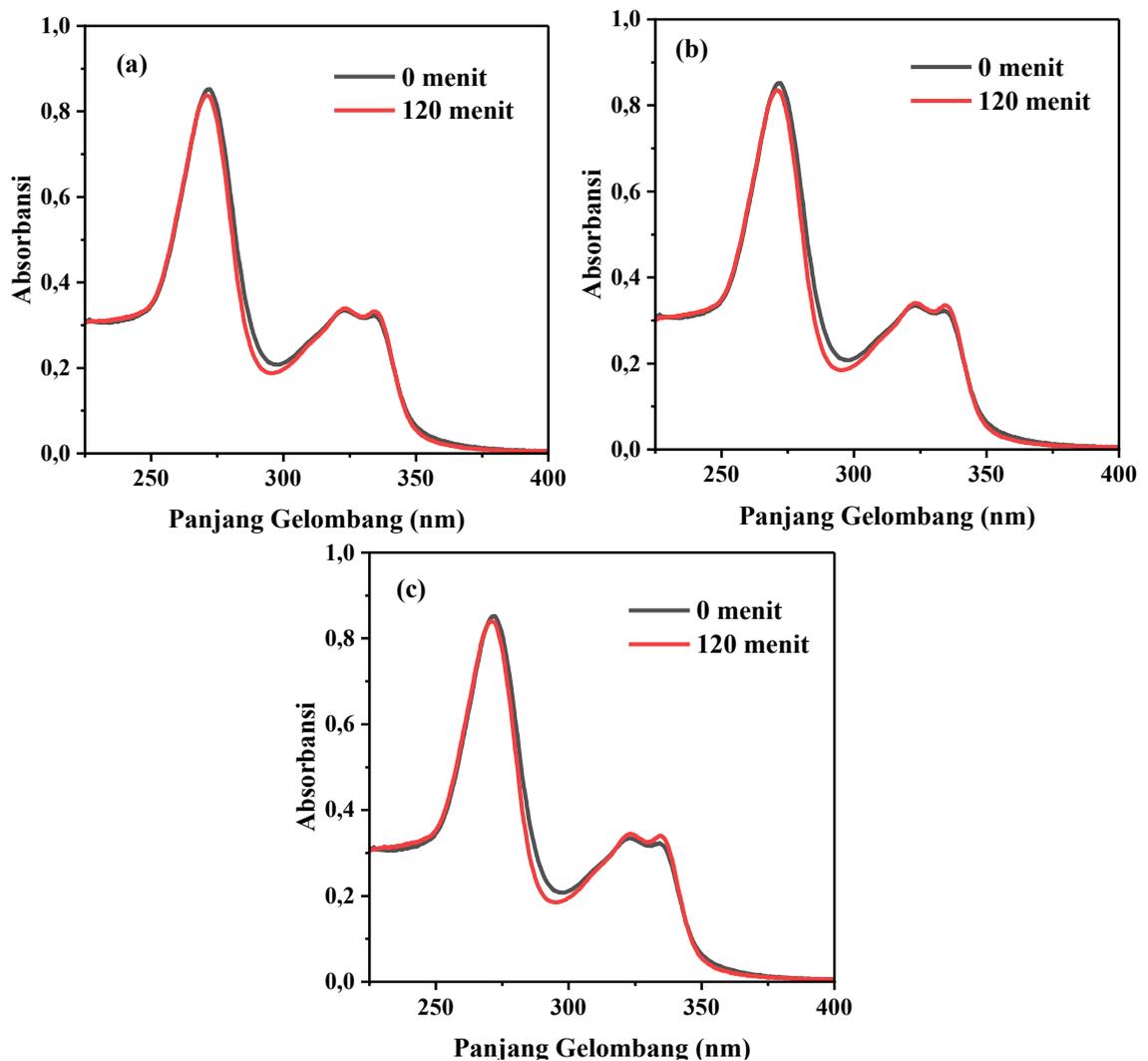
Tabel L.5.1 Hasil uji kestabilan larutan ciprofloxacin tanpa sinar UV

Pengulangan	Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi (ppm)
1	0	0,8609	7,1108
	120	0,8223	6,7686
2	0	0,8609	7,1108
	120	0,8333	6,8661
3	0	0,8609	7,1108
	120	0,8543	7,0523

L.5.2 Uji Kestabilan Larutan Ciprofloxacin (kondisi terang)

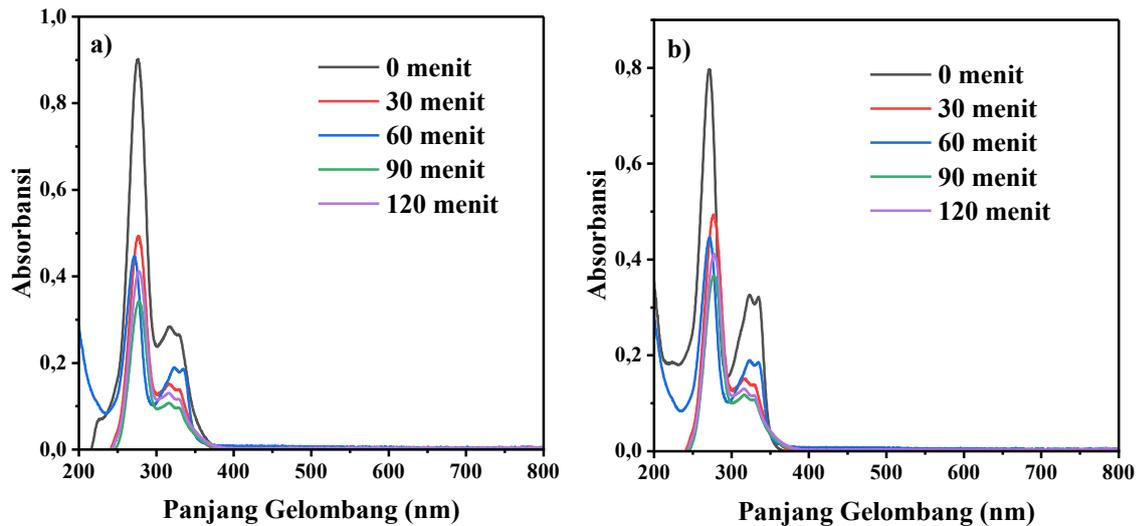
Tabel L.5.2. Hasil uji kestabilan larutan ciprofloxacin dengan sinar UV

Pengulangan	Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi (ppm)
1	0	0,8519	7,031
	120	0,8381	6,9086
2	0	0,8519	7,031
	120	0,8355	6,8856
3	0	0,8519	7,031
	120	0,8405	6,9299



Gambar L.5. 2. Spektra absorbansi UV-Vis uji kestabilan teradiasi sinar UV

L.5.3 Pengujian Kestimbangan Adsorpsi-Desorpsi senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

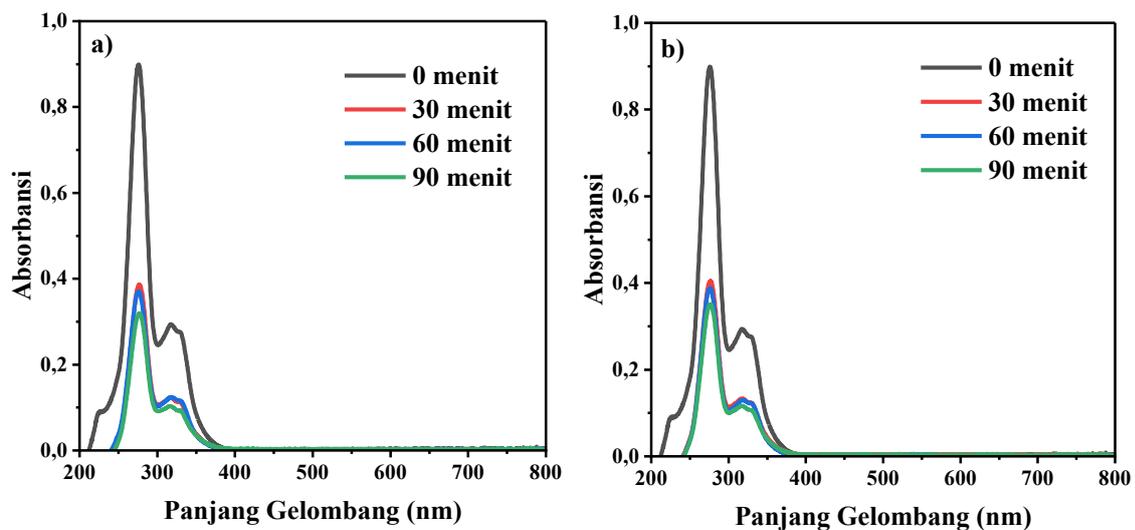


Gambar L.5.3. Spektra kesetimbangan adsorpsi-desorpsi senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (a) pengulangan 1, (b) pengulangan 2

Tabel L.5. 6 Hasil Uji Adsorpsi-Desorpsi

Waktu	Pengulangan 1		Pengulangan 2		Rata-rata	
	Konsentrasi (ppm)	Adsorpsi (%)	Konsentrasi (ppm)	Adsorpsi (%)	Konsentrasi (ppm)	Adsorpsi (%)
30	3,85	48,12	3,97	46,40	3,91	47,26
60	3,42	53,85	3,45	53,34	3,44	53,59
90	2,50	66,26	2,72	63,21	2,61	64,73
120	3,13	57,88	3,32	55,19	3,22	56,53

L.5.4 Pengujian Sinergistik Adsorpsi-Fotokatalisis



Gambar L.5.4 Spektra sinergistik adsorpsi-fotokatalitik senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. (a) pengulangan 1, dan (b) pengulangan 2

Tabel L.5. 7 Hasil Uji sinergistik adsorpsi-fotokatalitik

Waktu	Pengulangan 1		Pengulangan 2		Rata-rata	
	Konsentrasi (ppm)	Degradasi (%)	Konsentrasi (ppm)	Degradasi (%)	Konsentrasi (ppm)	Degradasi (%)
30	2,90	60,81	2,91	60,81	2,90	60,81
60	2,76	63,51	2,77	63,51	2,76	63,51
90	2,31	68,94	2,58	66,21	2,44	67,57

Lampiran 6. Dokumentasi**L.6.1 Preparasi Sampel****L.6.2 Sintesis $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$** **L.6.3 Uji Kestimbangan Adsorpsi-Desorpsi**

L.6.4 Uji Sinergitas Adsorpsi-Fotokatalis



L.6.5 Hasil Penyaringan untuk analisis IR

