

**UJI AKTIVITAS SENYAWA AURIVILLIUS $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ DALAM MENDEGRADASI
ANTIBIOTIK CIPROFLOXACIN**

SKRIPSI

Oleh:
JUWITA KHANIF FORTUNA JAMILI
NIM. 200603110082



**PROGRAM STUDI KIMIA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2025**

**UJI AKTIVITAS SENYAWA AURIVILLIUS $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ DALAM MENDEGRADASI
ANTIBIOTIK CIPROFLOXACIN**

SKRIPSI

**Oleh:
JUWITA KHANIF FORTUNA JAMILI
200603110082**

**Diajukan Kepada:
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri (UIN) 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
2025**

**UJI AKTIVITAS SENYAWA AURIVILLIUS $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ DALAM MENDEGRADASI
ANTIBIOTIK CIPROFLOXACIN**

SKRIPSI

Oleh:
JUWITA KHANIF FORTUNA JAMILI
200603110082

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji
Tanggal: 01 Juli 2025

Pembimbing I



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

Pembimbing I



Oky Bagas Prasetyo, M.Pd.I
NIP. 19890113 202321 1 028

Mengetahui,
Ketua Program Studi



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

**UJI AKTIVITAS SENYAWA AURIVILLIUS $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ DALAM MENDEGRADASI
ANTIBIOTIK CIPROFLOXACIN**

SKRIPSI

Oleh:
JUWITA KHANIF FORTUNA JAMILI
200603110082

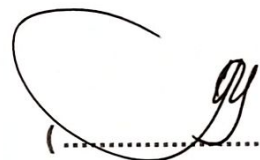
**Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi
Dan Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Tanggal: 01 Juli 2025**

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

Anggota Penguji I : Vina Nurul Istighfarini, M.Si
NIP. LB 63025

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

Anggota Penguji III : Oky Bagas Prasetyo, M.Pd.I
NIP. 19890113 202321 1 028

()

()

()

()

Mengetahui,
Ketua Program Studi

()

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

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Juwita Khanif Fortuna Jamili

NIM : 200603110082

Program Studi : Kimia

Fakultas : Sains dan Teknologi

Judul Penelitian : Uji Aktivitas Senyawa Aurivillius $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Dalam Mendegradasi Antibiotik Ciprofloxacin

Malang, 01 Juli 2025

Yang membuat pernyataan,



Juwita Khanif Fortuna Jamili

NIM. 200603110082

MOTTO

Jalan terus, terobos aja — nggak usah banyak tengok kanan-kiri. Namanya juga manusia, kalau salah ya maaf. Yang penting gue udah coba, udah usaha, hasilnya biar semesta yang atur. etap melangkah, tetap petantang-petenteng.

HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillahirabbil 'alamin, puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah SWT yang selalu memberi kekuatan, kemudahan, dan tak henti-hentinya menunjukkan jalan terbaik-Nya. Setelah melalui proses panjang yang penuh cerita, akhirnya skripsi ini bisa selesai juga. Karya sederhana ini saya persembahkan untuk:

- Ayahku tersayang, Slamet Jumal, terima kasih sudah jadi support system utama dalam hidupku. Terima kasih karena selalu mendoakan, mendengarkan semua ceritaku tanpa bosan, percaya padaku bahkan di saat aku meragukan diriku sendiri, dan selalu ada meskipun mungkin tak selalu dengan kata-kata. Doa dan dukungan Ayah adalah energi terbesarku.
- Adikku tercinta, Mizwar Akbar Jamili, meskipun jarak memisahkan, tapi doa dan dukunganmu selalu sampai. Makasih karena selalu jadi penyemangat dan tempat pulang yang nyaman.
- Sahabat-sahabatku, Pinky dan Fauziah, walaupun kalian udah lulus duluan, tapi nggak pernah lelah bantuin aku saat kebingungan. Terima kasih udah jadi tempat bertanya, tempat curhat, dan tempat berbagi semangat. Nggak tahu deh bakal kayak gimana kalau nggak ada kalian.
- Untuk diriku sendiri, terima kasih karena sudah berani memulai dan terus bertahan, meskipun kadang pengen nyerah. Terima kasih karena terus percaya dan nggak menyerah walau jalan terasa berat. Kamu hebat, kamu layak bangga. Yuk, terus melangkah dan jangan lupa bahagia.

KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah penulis haturkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat, taufik, serta hidayah-Nya kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan proposal penelitian dengan judul **“Uji Aktivitas Senyawa Aurivillius $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dalam Mendegradasi Antibiotik Ciprofloxacin”** ini. Shalawat dan salam tetap terlimpahkan kepada Nabi Muhammad SAW, yang telah membawa cahaya Islam. Penulis menyadari dalam proses penyusunan proposal penelitian ini tak lepas dari peran berbagai pihak, dengan ini penulis sampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, yaitu Slamet Jumali dan almarhum Siti Royatun, serta kedua saudara kandung saya Mizwar Akbar Jamili dan Muhammad Faqih Al-Gifari Jamili yang selalu mendukung secara moril dan materil kepada penulis.
2. Bapak Prof Dr. H. M. Zainuddin, MA, selaku rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Ibu 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. Bapak Dr. Anton Prasetyo, M.Si, selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktunya dalam membimbing dan memberi masukan sehingga skripsi untuk seminar proposal ini dapat terselesaikan.
6. Bapak Oky Bagas Prasetyo, M.Pd. I, selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan arahan dan perbaikan dalam penulisan skripsi ini.
7. Seluruh dosen Jurusan Kimia Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang atas ilmu yang telah diberikan.
8. Teman-teman seperjuangan Kimia 2020 khususnya Pinky dan Fauziah yang selalu memberikan penulis motivasi dalam menyelesaikan skripsi ini.

Penulis menyadari penelitian ini jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik, saran, serta bimbingan yang sifatnya membangun sangat penulis harapkan.

Malang, 01 Juli 2025

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	v
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	vii
MOTTO	ix
HALAMAN PERSEMBAHAN	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR PERSAMAAN	xxiii
ABSTRAK	xxv
ABSTRACT	xxvii
مستخلص البحث	xxix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Ciprofloxacin	5
2.2 Fotokatalis	6
2.3 Degradasi Senyawa Antibiotik dengan Teknologi Fotokatalis	6
2.4 Pengaruh Morfologi Partikel pada Aktivitas Fotokatalis	8
2.5 Senyawa Aurivillius $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	9
2.6 Senyawa Fotokatalis Aurivillius Lapis Empat	10
2.7 Metode Sintesis Lelehan Garam	11
2.8 Sintesis Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan Metode Lelehan Garam	13
2.9 Material Fotokatalis	14
BAB III METODE PENELITIAN	17
3.1 Pelaksanaan Penelitian	17
3.2 Alat dan Bahan	17
3.2.1 Alat	17
3.2.2 Bahan	17
3.3 Rancangan Penelitian	17
3.4 Prosedur Kerja	18
3.4.1 Sintesis $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan Metode Lelehan Garam	18
3.4.2 Karakterisasi dan Analisis Data Hasil Sintesis dengan <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	19
3.4.3 Karakterisasi dan Analisis Data Hasil Sintesis dengan <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	20
3.4.4 Karakterisasi dan Analisis Data Hasil Sintesis dengan Spektroskopi UV-Vis DRS	20
3.4.5 Uji Fotokatalis Hasil Sintesis dengan <i>Spectroscopy Ultraviolet-Visible</i> (UV-Vis)	20
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	23
4.1 Sintesis $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan Metode Lelehan Garam	23
4.2 Karakterisasi dan Analisis $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Menggunakan XRD	24
4.3 Karakterisasi dan Analisis $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Menggunakan SEM	25

4.4	Karakterisasi dan Analisis $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Menggunakan UV-Vis DRS	26
4.5	Uji Fotokatalitik $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Terhadap Ciprofloxacin Menggunakan Spektroskopi Uv -Vis.....	28
4.6	Analisis Spektrum FTIR Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Setelah Adsorpsi-Desorpsi dan Fotokatalis	35
BAB IV PENUTUP		39
5.1	Kesimpulan	39
5.2	Saran	39
DAFTAR PUSTAKA		41
LAMPIRAN		47

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Rancangan Penelitian.....	47
Lampiran 2 Diagram Alir	48
Lampiran 3 Perhitungan	51
Lampiran 4 Hasil Karakterisasi Menggunakan XRD	62
Lampiran 5 Hasil Karakterisasi Menggunakan SEM	64
Lampiran 6 Hasil Karakterisasi Menggunakan UV-Vis DRS	65
Lampiran 7 Analisis Spektrum IR $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Setelah Proses Adsorpsi-Degradasi.....	66
Lampiran 8 Dokumentasi.....	66

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Struktur kimia ciprofloxacin	5
Gambar 2.2	Spektrum IR senyawa ciprofloxacin	5
Gambar 2.3	Mekanisme umum fotokatalis pada degradasi antibiotik	6
Gambar 2.4	Degradasi fotokatalitik antibiotik OTC oleh senyawa BiVO_4	7
Gambar 2.5	Degradasi fotokatalitik antibiotik CIP oleh senyawa Mn/Co	7
Gambar 2.6	Degradasi fotokatalitik Rhodamin-B oleh senyawa BiOCl	8
Gambar 2.7	Degradasi fotokatalitik Rhodamin-B oleh senyawa BTO	9
Gambar 2.8	Struktur kristal senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	9
Gambar 2.9	Degradasi fotokatalitik Rhodamin-B oleh senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	10
Gambar 2.10	Degradasi fotokatalitik metilen biru oleh senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	11
Gambar 2.11	Prosedur sintesis metode lelehan garam	11
Gambar 2.12	Ilustrasi skematis tahapan utama metode lelehan garam	12
Gambar 2.13	Difraktogram XRD $\text{CaBi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan metode lelehan garam campuran $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{SO}_4$	13
Gambar 2.14	Gambar SEM $\text{CaBi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (a) $x = 0$ (b) $x = 0,5$ (c) $x = 2$	13
Gambar 2.15	Difraktogram XRD $\text{Ca}_{1-x}\text{Bi}_{3+x}\text{LaTi}_{4-x}\text{Mn}_x\text{O}_{15}$ dengan metode lelehan garam campuran $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{SO}_4$	14
Gambar 2.16	Gambar SEM $\text{Ca}_{1-x}\text{Bi}_{3+x}\text{LaTi}_{4-x}\text{Mn}_x\text{O}_{15}$ dengan metode lelehan garam campuran $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{SO}_4$	14
Gambar 4.1	Perubahan warna sampel (a) sebelum tahap kalsinasi, (b) setelah tahap kalsinasi	24
Gambar 4.2	Difraktogram senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	24
Gambar 4.3	Hasil SEM dengan perbesaran 10.000x	26
Gambar 4.4	Spektra DRS hubungan % reflektansi dengan panjang gelombang senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	27
Gambar 4.5	Plot Tauc Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	27
Gambar 4.6	Spektra ciprofloxacin 8 ppm	28
Gambar 4.7	Spektra absorbansi UV-Vis pada larutan standar ciprofloxacin	29
Gambar 4.8	Hasil pembuatan kurva standar	29
Gambar 4.9	Spektra absorbansi UV-Vis uji kestabilan tanpa sinar UV	30
Gambar 4.10	Spektra absorbansi UV-Vis uji kestabilan dengan sinar UV	30
Gambar 4.11	Spektra absorbansi UV-Vis uji adsorpsi senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	30
Gambar 4.12	Grafik hasil uji adsorpsi senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ terhadap larutan ciprofloxacin	31
Gambar 4.13	Spektra absorbansi UV-Vis uji aktivitas fotokatalitik	33
Gambar 4.14	Spektrum FTIR senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ setelah adsorpsi-desorpsi dan fotokatalis	36

DAFTAR TABEL

Table 2.1 Perbandingan beberapa metode sintesis	112
Table 3.1 Komposisi prekursor senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	19
Tabel 4.1 Ukuran partikel senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	26
Tabel 4.2 Nilai energi celah pita dan panjang gelombang $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	27
Tabel 4.3 Hasil uji kestabilan larutan ciprofloxacin tanpa dan dengan sinar UV	31
Tabel 4.4 Hasil adsorpsi senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ terhadap larutan ciprofloxacin	31
Tabel 4.5 Hasil uji aktivitas fotokatalitik	33
Tabel 4.6 Perbandingan hasil uji adsorpsi dengan uji degradasi	33
Tabel 4.7 Identifikasi gugus fungsi sampel setelah adsorpsi dan fotokatalis	37

DAFTAR PERSAMAAN

Persamaan 3.1 Kubelka-Munk	20
Persamaan 3.2 Degradasi (%).	21

ABSTRAK

Jamili, Juwita K. F. 2025. **Uji Aktivitas Senyawa Aurivillius $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dalam Mendegradasi Antibiotik Ciprofloxacin**. Prodi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing I: Dr. Anton Prasetyo, M.Si; Pembimbing II: Oky Bagas Prasetyo, M.Pd. I.

Kata kunci: $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$, metode lelehan garam, fotokatalis, ciprofloxacin

Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ merupakan senyawa Aurivillius yang memiliki potensi sebagai material fotokatalis yang dapat digunakan untuk mendegradasi senyawa antibiotik. Morfologi partikel memiliki peran penting dalam material fotokatalis karena ukuran partikel dan luas permukaan mempengaruhi aktivitas fotokatalitik. Metode lelehan garam diketahui menghasilkan morfologi dan ukuran partikel yang seragam sehingga dapat memberikan keuntungan pada material fotokatalis. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang diperoleh dari metode lelehan garam dalam mendegradasi senyawa antibiotik ciprofloxacin dengan menggunakan metode fotokatalis. Difraktogram senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ menunjukkan bahwa sampel berhasil disintesis dan ditemukan fasa pengotor. Hasil karakterisasi SEM menunjukkan morfologi senyawa berbentuk *plate-like*. Hasil perhitungan menggunakan persamaan Kubelka-Munk menunjukkan senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ memiliki energi celah pita sebesar 3,19 eV. Hasil uji degradasi terhadap ciprofloxacin dengan melibatkan adsorpsi dan juga fotokatalitik menggunakan lampu UV rata-rata memiliki kemampuan mendegradasi sebesar 15,92% pada menit ke-30, 12,59% pada menit ke-60, dan 14,46% pada menit ke-90.

ABSTRACT

Jamili, Juwita K. F. 2025. **Activity Test of Aurivillius $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Senywa in Degrading Ciprofloxacin Antibiotics**. Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Maulana Malik Ibrahim State Islamic University Malang. Supervisor: Dr. Anton Prasetyo, M.Si. Supervisor II: Oky Bagas Prasetyo, M.Pd. I.

Keywords: $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$, salt melt method, photocatalyst, ciprofloxacin

The compound $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ is an Aurivillius compound with potential as a photocatalytic material for degrading antibiotic compounds. Particle morphology plays a crucial role in photocatalytic materials, as particle size and surface area influence photocatalytic activity. The salt melt method is known to produce uniform particle morphology and size, thereby offering advantages for photocatalytic materials. This study aims to investigate the ability of $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ obtained from the salt melt method to degrade the antibiotic compound ciprofloxacin using a photocatalytic method. The X-ray diffraction pattern of $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ indicates that the sample was successfully synthesized and impurity phases were detected. SEM characterization results showed that the compound had a plate-like morphology. Calculations using the Kubelka-Munk equation showed that $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ had a bandgap energy of 3,19 eV. The degradation test results for ciprofloxacin, involving adsorption and photocatalysis using an average UV lamp, showed a degradation capacity of 15.92% at 30 minutes, 12.59% at 60 minutes, and 14.46% at 90 minutes.

مستخلص البحث

جميل، ج. ك. ف. ٢٠٢٥. اختبار نشاط مركب أوريفيليوس $CaBi_4Ti_4O_{15}$ في تحليل المضاد الحيوي سيروفلوكساسين. أطروحة. برنامج دراسة الكيمياء، كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة الإسلامية الحكومية مولانا مالك إبراهيم مالانج. المشرف الأول: الدكتور أنطون براسيتيو، الماجستير في العلوم. المشرف الثاني: أوكي باجاس براسيتيو، الماجستير في التربية الإسلامية.

الكلمات الرئيسية: $CaBi_4Ti_4O_{15}$ ، طريقة ذوبان الملح، المحفز الضوئي، سيروفلوكساسين

المركب $CaBi_4Ti_4O_{15}$ هو مركب أوريفيليوس لديه القدرة على أن يكون بمثابة مادة محفزة ضوئياً يمكن استخدامها لتحليل المركبات المضادة للبكتيريا. يلعب شكل الجسيمات دوراً مهماً في المواد المحفزة ضوئياً لأن حجم الجسيمات ومساحة السطح يؤثران على النشاط المحفز ضوئياً. ومن المعروف أن طريقة الملح المنصهر تنتج شكل وحجم جسيمات موحدتين، مما قد يوفر مزايا لمواد المحفز الضوئي. هدفت هذه الدراسة إلى تحديد قدرة مركب $CaBi_4Ti_4O_{15}$ المتحصل عليه بطريقة ذوبان الملح على تحليل مركب المضاد الحيوي سيروفلوكساسين باستخدام طريقة المحفز الضوئي. يوضح مخطط حيود المركب $CaBi_4Ti_4O_{15}$ أن العينة تم تصنيعها بنجاح وتم العثور على مراحل الشوائب. تظهر نتائج توصيف SEM أن مورفولوجيا المركب تشبه اللوحة. تظهر نتائج الحساب باستخدام معادلة $Kubelka-Munk$ أن مركب $CaBi_4Ti_4O_{15}$ له طاقة فجوة نطاق تبلغ 3.19 eV . أظهرت نتائج اختبار تحليل السيروفلوكساسين باستخدام الامتزاز والتحفيز الضوئي باستخدام مصابيح UV فوق البنفسجية قدرة تحليل متوسطة بلغت 10.92% في الدقيقة ٣٠، و 12.59% في الدقيقة ٦٠، و 14.46% في الدقيقة ٩٠.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Obat antibiotik memiliki peran yang sangat penting dalam proses penyembuhan penyakit pada manusia. Tetapi, penggunaan antibiotik yang meluas telah menghasilkan limbah yang tidak bisa diabaikan di perairan (Sharma, 2008) (Cleuvers, 2005). Salah satu contoh antibiotik generasi ketiga yang sering digunakan adalah ciprofloxacin (CIP), yang dikenal karena kemampuannya dalam mengatasi bakteri gram negatif dan bakteri gram positif seperti *Staphylococcus aureus* (Pan dan Chu, 2018) (Johansson, dkk., 2014). Banyak pihak yang telah melaporkan keberadaan limbah CIP di perairan (Zhang, dkk., 2015) (Munoz, dkk., 2008) (Wang, dkk., 2018). Keberadaan limbah CIP ini berbahaya karena sulit untuk diurai oleh mikroorganisme alami (Wang, dkk., 2016). Selain itu, keberadaannya dapat menimbulkan bahaya bagi lingkungan karena dapat menyebabkan perkembangan strain bakteri yang resisten terhadap antibiotik. Oleh karena itu, upaya efektif dalam mengatasi limbah antibiotik diperlukan.

Beberapa metode telah dikembangkan untuk mengatasi limbah antibiotik diantaranya penghilangan komponen biotik dan non-biotik yang melibatkan proses adsorpsi, hidrolisis, biodegradasi oleh bakteri, oksidasi dan reduksi (Yang, dkk., 2021). Salah satu metode yang dilaporkan berpotensi untuk mendegradasi limbah antibiotik adalah menggunakan teknologi fotokatalis. Teknologi fotokatalis telah mendapatkan perhatian dalam mendegradasi limbah antibiotik karena efisiensi yang tinggi, biaya rendah, teknologi ramah lingkungan, dan tidak menimbulkan polusi sekunder (Boxi, dkk., 2015) (Kuswaha, dkk., 2015). Fotokatalis merupakan suatu proses kombinasi reaksi fotokimia yang memerlukan cahaya dan katalis untuk mempercepat terjadinya transformasi kimia. Fotokatalisis dapat mendegradasi limbah antibiotik melalui beberapa langkah utama. Ketika fotokatalis menyerap foton dengan energi yang lebih tinggi dari celah pita, fotokatalis menjadi tereksitasi dan menghasilkan pasangan *elektron-hole*. Pasangan elektron dan *hole* yang tereksitasi ini kemudian dapat bereaksi dengan molekul air atau oksigen untuk menghasilkan spesies oksigen reaktif (ROS), seperti radikal hidroksil, yang memiliki sifat oksidatif yang kuat dan dapat efektif mendegradasi limbah antibiotik (Bai, dkk., 2022).

Manusia diangkat sebagai khalifah Allah di bumi harus mampu memenuhi tanggung jawabnya terhadap alam semesta. Ini mencakup merawat, melindungi, dan memulihkan jika terjadi kerusakan, sesuai dengan ajaran agama yang disebutkan dalam Surat al-Hud ayat 61 sebagai berikut:

﴿وَالِى ثَمُودَ أَخَاهُمْ صَالِحًا قَالَ يَاقَوْمِ اعْبُدُوا اللَّهَ مَا لَكُمْ مِنْ إِلَهٍ غَيْرُهُ هُوَ أَنْشَأَكُمْ مِنَ الْأَرْضِ وَاسْتَعْمَرَكُمْ فِيهَا فَاسْتَغْفِرُوهُ ثُمَّ تَوْبُوا إِلَيْهِ إِنَّ رَبِّي قَرِيبٌ مُجِيبٌ ۝٦١﴾

Artinya: *"Dia telah menciptakanmu dari bumi (tanah) dan menjadikanmu pemakmurnya, karena itu mohonlah ampunan kepada-Nya, kemudian bertobatlah kepada-Nya. Sesungguhnya Tuhanku sangat dekat (rahmat-Nya) dan memperkenankan (doa hamba-Nya)."*

Dalam tafsir al-Misbah, Shihab, (2002) menjelaskan bahwa Allah SWT menciptakan manusia dari tanah dan menugaskannya untuk mengembangkan dan mengurus bumi. Terdapat interpretasi yang menganggap bahwa huruf *sin* dan *ta'* dalam kata *"ista'mara"* dapat diartikan sebagai perintah sehingga Allah memerintahkan manusia untuk mengelola bumi. Pendekatan lain, seperti yang dijelaskan oleh Thabataba'i, memahami kata tersebut sebagai mengolah bumi sehingga membuatnya menjadi tempat yang dapat memberikan manfaat. Salah satu cara interpretasi konsep "memakmurkan bumi" dalam konteks ilmu kimia adalah dengan mengatasi pencemaran lingkungan melalui penggunaan materi fotokatalis seperti senyawa Aurivillius untuk mendegradasi air limbah, khususnya antibiotik.

Banyak pihak telah melaporkan bahwa material semikonduktor seperti TiO_2 , CdS , ZnO , WO_3 mempunyai kemampuan sebagai material fotokatalis. Salah satu golongan material yang dilaporkan berpotensi sebagai material fotokatalis adalah senyawa berstruktur Aurivillius dan material ini memiliki kemampuan fotokatalitik yang lebih tinggi dibandingkan senyawa lain karena Aurivillius dikenal sebagai bahan feroelektrik yang dilaporkan dapat menghambat laju rekombinasi *elektron-hole* (e^-/h^+). Senyawa Aurivillius memiliki rumus umum $\text{Bi}_2\text{O}_2[\text{A}_{n-1}\text{B}_n\text{O}_{3n+1}]$, yang merupakan kombinasi antara lapisan bismuth dengan lapisan perovskit. Kation *A* adalah jenis kation dengan muatan +1, +2, atau +3, dan biasanya memiliki koordinasi *dodecahedral*, seperti Na^+ , Mg^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} , dan Bi^{3+} . Sementara itu, kation *B* adalah logam transisi dengan muatan tinggi yang memiliki koordinasi octahedral dengan *n* yang merupakan bilangan bulat ($1 \leq n \leq 8$) yang mengindikasikan jumlah oktahedral pada lapisan perovskit. Contoh kation *B* termasuk Nb^{5+} , Ti^{4+} , Ta^{6+} , V^{5+} , dan W^{6+} (Borg, dkk., 2002; Aurivillius, 1949). Beberapa material golongan senyawa Aurivillius yang dilaporkan mempunyai sifat fotokatalis yang baik adalah $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ dengan energi celah pita sebesar 2,9 eV (Agustina, dkk., 2020), $\text{PbBi}_2\text{Nb}_2\text{O}_9$ dengan energi celah pita sebesar 2,88 eV, Bi_2MO_6 ($M = \text{W}$ dan Mo) dengan energi celah pita masing-masing sebesar 2,8 dan 3,0 eV (Zhang, dkk., 2016), $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan energi celah pita sebesar 3,0 eV (Tu, dkk., 2019).

$\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ merupakan salah satu senyawa dalam keluarga Aurivillius yang memiliki struktur lapis empat. Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ banyak diteliti karena beberapa sifatnya seperti feroelektrik, dan piezoelektrik (Ma, dkk., 2015; Sim, dkk., 2019). Namun, sifat fotokatalis masih sangat jarang dilaporkan potensinya. Emani, dkk., (2016) melaporkan telah mengukur energi celah pita dan ukuran kristal senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. Dalam laporan tersebut dilaporkan bahwa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ memiliki energi celah pita sebesar 3,53 eV serta memiliki struktur perovskit berlapis bismut polikristalin dengan ukuran kristal sebesar 19,4 nm.

Aktivitas fotokatalis dipengaruhi oleh beberapa hal seperti energi celah pita laju rekombinasi, dan morfologi partikel. Morfologi partikel dapat mempengaruhi aktivitas fotokatalitik karena struktur dan bentuk partikel tersebut memengaruhi luas permukaan spesifik, efisiensi penyerapan cahaya, dan kemampuan pemisahan serta penggunaan pembawa muatan yang dihasilkan. Partikel dengan morfologi tertentu seperti struktur hierarkis, struktur tipis, dan struktur berongga dapat meningkatkan luas permukaan spesifik, mempercepat migrasi pembawa muatan ke permukaan, dan mengurangi dosis fotokatalis yang diperlukan (He, dkk., 2013). Mei Yu, dkk., (2021) mensintesis senyawa Bi_2WO_6 menggunakan metode hidrotermal. Bi_2WO_6 yang diperoleh memiliki morfologi partikel nanorods dan menunjukkan aktivitas fotokatalitik yang baik, yaitu mampu mendegradasi antibiotik tetrasiklin sebesar 85% setelah radiasi selama 2 jam. Berbeda dengan penelitian Lei Xiang, dkk., (2018) yang mensintesis senyawa Bi_2WO_6 terdoping nikel (Ni) menghasilkan morfologi partikel berupa lembaran (*nanosheet*) yang tipis. Ni- Bi_2WO_6 menunjukkan kinerja fotokatalitik yang baik dalam mendegradasi Rhodamin-B (98%) dan ciprofloxacin (95%) di bawah radiasi sinar tampak.

Metode sintesis yang dilaporkan berhasil untuk sintesis senyawa Aurivillius adalah metode *solid-state* (Ferreira, dkk., 2020), metode hidrotermal (Pookmanee, dkk., 2004), metode *sol-gel* (Kim, dkk., 2003), dan metode lelehan garam (Zhao, dkk., 2014). Metode sintesis yang dilaporkan dapat menghasilkan partikel dengan morfologi *sheet* atau *plate-like* adalah metode lelehan garam. Metode lelehan garam merupakan metode sintesis yang melibatkan pencampuran lelehan garam ke dalam prekursor pada suhu sintesis yang lebih rendah dibandingkan dengan metode konvensional lainnya. Garam-garam yang paling umum digunakan adalah NaCl, KCl, Na_2SO_4 , dan K_2SO_4 (Kan, dkk., 2003). Metode lelehan garam memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan metode lainnya, seperti penggunaan suhu yang lebih rendah, meningkatkan laju reaksi dan difusi ion, meningkatkan derajat homogenitas (distribusi konstituen elemen dalam larutan padat), mengontrol ukuran dan bentuk partikel, serta meminimalkan aglomerasi. Selain itu, metode ini juga mampu menghasilkan produk yang relatif murni, stabil, dan bersifat ramah lingkungan (Ke, dkk., 2007; Zuniga, dkk., 2018; Porob dan Maggard, 2006; Wendari, dkk., 2020). Zulhadjri, dkk., (2021) melaporkan telah berhasil mensintesis $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ terdoping La^{3+} ($\text{CaBi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ ($x = 0, 0.5, 1, 1.5$, dan 2) dengan menggunakan metode lelehan garam $\text{K}_2\text{SO}_4/\text{Na}_2\text{SO}_4$ dan menghasilkan morfologi partikel berbentuk *plate-like/sheet* yang mengecil seiring peningkatan kandungan La^{3+} . Penelitian lain dilaporkan Zulhadjri, dkk., (2020) yang mensintesis $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ terdoping La^{3+} dan Mn^{3+} ($\text{Ca}_{1-x}\text{Bi}_{3+x}\text{LaTi}_{4-x}\text{Mn}_x\text{O}_{15}$ ($x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$, and 1) dengan menggunakan metode lelehan garam $\text{K}_2\text{SO}_4/\text{Na}_2\text{SO}_4$ dan menghasilkan morfologi partikel berbentuk *plate-like/sheet*. Hal ini menunjukkan bahwa metode lelehan garam berpotensi digunakan untuk menghasilkan senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan morfologi *plate-like/sheet* yang diharapkan mempunyai aktivitas fotokatalis yang bagus.

Berdasarkan kajian di atas maka dalam penelitian ini dilakukan uji degradasi antibiotik ciprofloxacin menggunakan senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. Senyawa disintesis menggunakan metode lelehan garam NaCl/KCl pada suhu 750, dan 820 °C selama 6 jam. Sampel yang diperoleh akan dikarakterisasi dengan teknik: (a) *X-ray diffraction* (XRD) untuk mengetahui senyawa dan kemurnian fasa, (b) *scanning electron microscopy energy* (SEM) untuk mengetahui morfologi, dan ukuran partikel, dan (c) *Ultraviolet-Visible diffuse reflectance spectroscopy* (UV-Vis DRS) untuk menentukan daerah serapan cahaya dan energi celah pita. Kemudian, dilakukan uji aktivitas fotokatalitiknya dalam mendegradasi ciprofloxacin dengan variasi waktu 30, 60, dan 90 menit menggunakan *spectroscopy Ultraviolet-Visible* (UV-Vis).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Bagaimana struktur kristal, morfologi partikel, dan energi celah pita senyawa Aurivillius lapis empat $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang disintesis dengan metode lelehan garam NaCl/KCl ?
- Bagaimana aktivitas fotokatalitik senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang disintesis dengan metode lelehan garam dalam mendegradasi antibiotik ciprofloxacin?

1.3 Tujuan

Tujuan masalah dalam penelitian ini adalah:

- Mengetahui struktur kristal, morfologi partikel, dan energi celah pita senyawa Aurivillius lapis empat $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang disintesis dengan metode lelehan garam NaCl/KCl .
- Mengetahui aktivitas fotokatalitik senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang diperoleh melalui metode lelehan garam dalam mendegradasi antibiotik ciprofloxacin.

1.4 Batasan Masalah

- Lelehan garam yang digunakan adalah NaCl/KCl dengan perbandingan rasio mol $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dan NaCl adalah 1:7:7.
- Suhu sintesis yang digunakan adalah 750, dan 820 °C selama 6 jam.

1.5 Manfaat

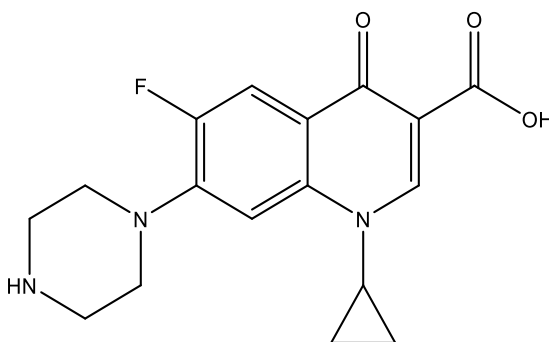
Manfaat dalam penelitian ini adalah memberikan informasi ilmiah kepada masyarakat tentang pengolahan limbah antibiotik ciprofloxacin menggunakan senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang disintesis melalui metode lelehan garam NaCl/KCl .

BAB II

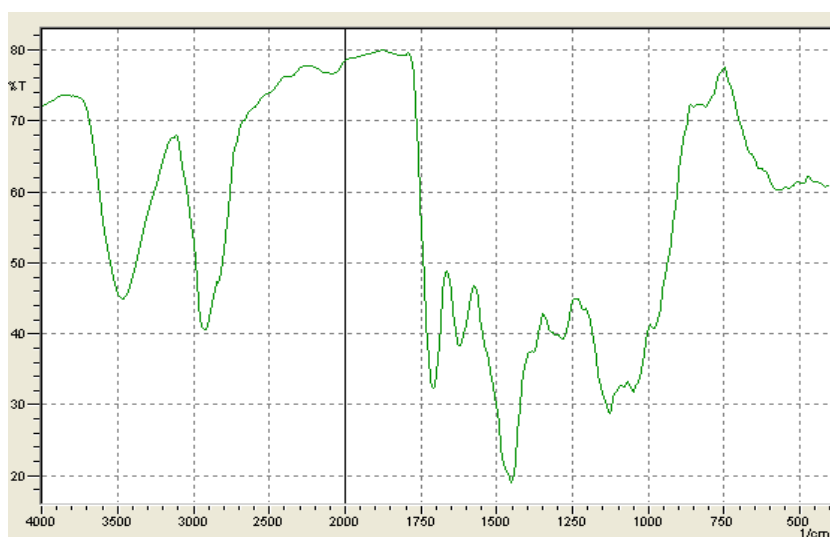
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Ciprofloxacin

Ciprofloxacin adalah antibiotik *fluoroquinolone* generasi kedua yang memiliki struktur kimia mirip dengan asam nalidiksik. Ciprofloxacin bekerja dengan cara menghambat *Deoxyribonucleic acid* (DNA) gyrase bakteri yang menyebabkan kerusakan DNA bakteri dan kematian sel bakteri. Ciprofloxacin memiliki spektrum aktivitas antibakteri yang luas, termasuk bakteri Gram negatif seperti *Pseudomonas aeruginosa* dan *Escherichia coli*, dan bakteri Gram positif seperti *Staphylococcus aureus* (Bai, dkk., 2022) (Campoli-Richards, dkk., 1988). Struktur kimia dan spektrum IR ciprofloxacin ditunjukkan pada Gambar 2.1 dan 2.2.



Gambar 2. 1 Struktur kimia ciprofloxacin (Abdurahman, dkk., 2021)



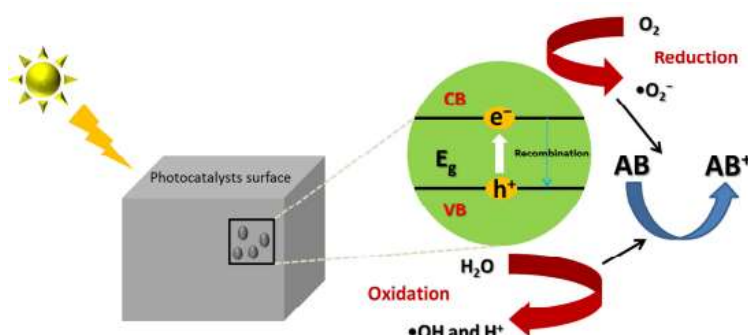
Gambar 2. 2 Spektrum IR senyawa ciprofloxacin (Sahoo, dkk., 2011)

Ciprofloxacin efektif untuk mengobati infeksi pencernaan, infeksi saluran kemih yang kompleks, penyakit menular seksual, penyakit paru-paru dan infeksi kulit. Namun, keberadaan limbah ciprofloxacin di perairan dapat mengganggu jalur fotosintesis dan menyebabkan kelainan morfologi pada tanaman serta kerusakan kesehatan manusia (Bai, dkk., 2022).

2.2 Fotokatalis

Fotokatalis adalah proses pemanfaatan energi cahaya untuk mengaktifkan suatu zat pada permukaan katalis. Fotokatalis banyak digunakan karena memiliki beberapa keunggulan di antaranya, biaya yang murah, efisiensi tinggi, dan ramah lingkungan (Bai, dkk., 2022). Teknologi fotokatalis dapat diterapkan dalam berbagai aspek seperti pengolahan limbah zat warna, produksi hidrogen dari *water splitting*, fotoreduksi CO₂, dan proses disinfeksi air minum (Niu, dkk., 2020) (Bard, dkk., 1995) (Li, dkk., 2014) (Malato, dkk., 2009).

Mekanisme utama dari proses fotokatalis yaitu, penyerapan foton, eksitasi dan reaksi. Secara rinci, ketika fotokatalis menyerap foton dari sumber cahaya buatan (lampu fluoresen, dioda pemancar cahaya (LED), dan lain-lain.) atau sinar matahari dengan energi foton ($h\nu$) sama dengan atau lebih besar dari energi celah pita (E_g) fotokatalis, maka elektron pada pita valensi (VB) dapat tereksitasi ke pita konduksi (CB) dan *hole* pita valensi positif (h^+_{VB}) terbentuk (*persamaan 1*). Selanjutnya, elektron dan *hole* yang dihasilkan oleh cahaya dipisahkan secara efisien dan berpindah ke permukaan fotokatalis yang memicu reaksi sekunder dengan bahan yang teradsorpsi. Kemudian, *hole* ini dapat langsung menyerang antibiotik yang menyebabkan degradasi yang signifikan terhadap antibiotik (*persamaan 2*) (Bai, dkk., 2022) (Hassaan, dkk., 2023). Mekanisme fotokatalis ditampilkan pada Gambar 2.3.

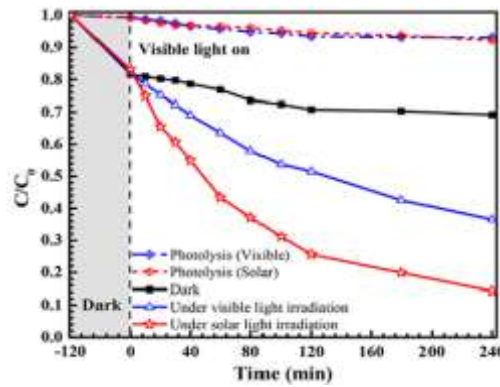


Gambar 2. 3 Mekanisme umum fotokatalis pada degradasi antibiotik (Bai, dkk., 2022).

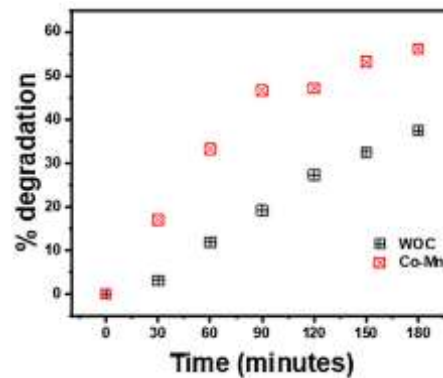
2.3 Degradasi Senyawa Antibiotik dengan Teknologi Fotokatalis

Salah satu aplikasi fotokatalis adalah digunakan untuk mendegradasi limbah antibiotik. Banyak pihak telah melaporkan teknologi fotokatalis untuk mendegradasi senyawa antibiotik. Senasu, dkk., (2021) melaporkan bahwa senyawa BiVO₄ mampu mendegradasi senyawa antibiotik oksitetrasiklin hidroklorida (OTC) sebesar 15% dalam keadaan gelap, 55% dengan iradiasi cahaya tampak (lampu siang hari Panasonic, 15W), dan 83% dengan iradiasi cahaya matahari selama 240 menit dan datanya ditampilkan pada Gambar 2.4.

Penelitian lain dilaporkan oleh Alam, dkk., (2022) yang mendegradasi antibiotik ciprofloxacin (CIP) dengan senyawa Mn/Co dan melaporkan bahwa senyawa ini mampu mendegradasi sebesar 56,3% dengan penambahan senyawa Mn/Co dan 39% tanpa penambahan senyawa Mn/Co selama 180 menit yang datanya ditampilkan pada Gambar 2.5.

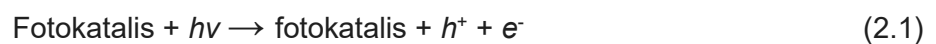


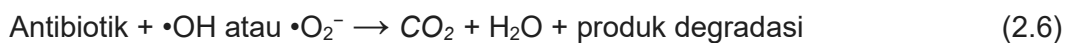
Gambar 2. 4 Degradasi fotokatalitik antibiotik OTC oleh senyawa BiVO_4 (Senasu, dkk., 2021)



Gambar 2. 5 Degradasi fotokatalitik antibiotik CIP oleh senyawa Mn/Co (Alam, dkk., 2022)

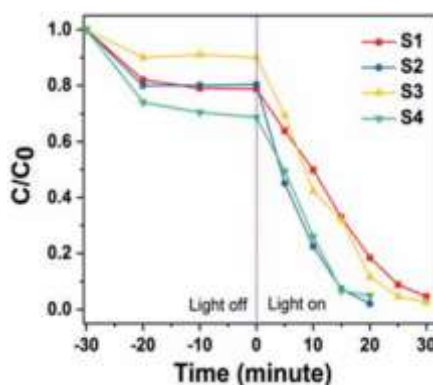
Mekanisme degradasi senyawa antibiotik dapat dijelaskan sebagai berikut: ketika fotokatalis menyerap foton dengan energi yang lebih tinggi dari energi celah pita, maka elektron dalam pita valensi (VB) tereksitasi ke pita konduksi (CB) menghasilkan *hole* di pita konduksi (CB) (*persamaan 1*). Elektron dan *hole* yang dihasilkan akan bermigrasi ke permukaan fotokatalis. *Hole* (h^+) akan bereaksi dengan molekul antibiotik yang teradsorpsi pada permukaan fotokatalis menyebabkan degradasi langsung dari molekul antibiotik yang menghasilkan H_2O dan CO_2 (*persamaan 2*). Selain itu, ada dua jalur degradasi yang diakui, yaitu jalur reduktif dan oksidatif. Jalur reduktif terjadi ketika elektron tereksitasi (e^-) bereaksi dengan O_2 pada permukaan katalis atau yang terlarut dalam air menghasilkan anion radikal superoksida ($\bullet\text{O}_2^-$) (*persamaan 3*). Jalur oksidatif dimulai ketika *hole* (h^+) yang bermigrasi ke permukaan fotokatalis kemudian bereaksi dengan $\text{H}_2\text{O}/\text{OH}^-$ menghasilkan radikal hidrosil ($\bullet\text{OH}$) dan ion hidrogen (H^+) (*persamaan 4*). Setelah tereksitasi, ion hidrogen (H^+) dapat bergabung kembali dengan elektron (e^-) dan menghasilkan panas (*persamaan 5*) yang akan menurunkan efisiensi degradasi fotokatalitik. Selanjutnya, radikal bebas $\bullet\text{OH}$ dan $\bullet\text{O}_2^-$ secara efektif mendegradasi semua antibiotik dan zat antara di bawah paparan radiasi UV berenergi tinggi yang berkepanjangan dan akhirnya terurai menjadi karbon dioksida (CO_2) dan air (H_2O) (*persamaan 6*) (Bai, dkk., 2022) (Hassan, dkk., 2023).





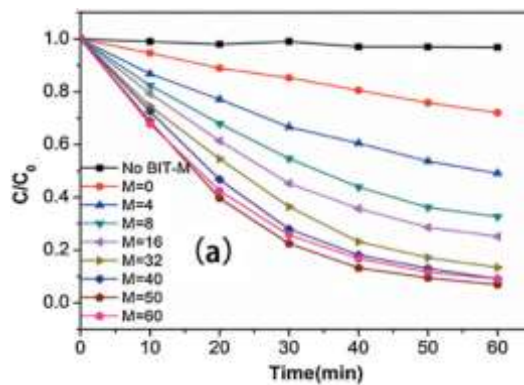
2.4 Pengaruh Morfologi Partikel pada Aktivitas Fotokatalis

Aktivitas fotokatalitik semikonduktor dipengaruhi oleh beberapa faktor dan salah satunya adalah morfologi dan ukuran partikel. Luas permukaan yang besar, ketebalan yang rendah serta struktur hierarki dan berongga dapat meningkatkan penyerapan cahaya dan aksesibilitas fotokatalis (He, dkk., 2018). Hal ini memungkinkan percepatan migrasi zat pembawa ke permukaan dan mengurangi jumlah penggunaan fotokatalis. Li, dkk., (2017) melaporkan bahwa *nanosheets* BiOCl berbentuk persegi dengan ketebalan 4-11 nm (sampel 2) menunjukkan kinerja fotokatalitik yang lebih baik dibandingkan *nanosheets* yang lebih tebal dalam degradasi Rhodamin-B (RhB). Hal ini disebabkan karena luas permukaan yang lebih besar sehingga semakin banyak ruang yang tersedia untuk menangkap cahaya, transpor muatan dan berdifusi. Data kemampuan degradasi *nanosheets* ditampilkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Degradasi fotokatalitik Rhodamin-B oleh senyawa BiOCl (Li, dkk., 2017)

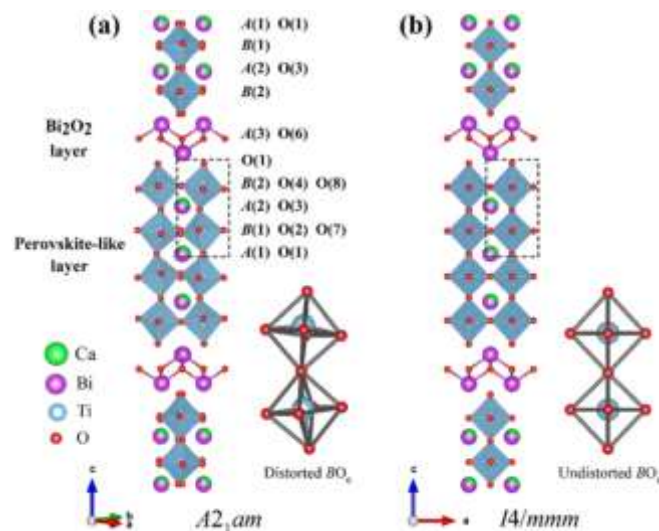
Laporan lain disampaikan oleh He, dkk., (2014) yang mensintesis senyawa $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ dengan menggunakan metode lelehan garam NaCl-KCl dengan variasi konsentrasi garam NaCl-KCl dan metode sintesis padatan. Hasil menunjukkan bahwa $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ yang disintesis dengan metode lelehan garam memiliki morfologi *plate-like* sedangkan $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ yang disintesis dengan metode padatan memiliki bentuk *irregular shape*. $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ hasil sintesis metode lelehan garam menunjukkan aktivitas fotokatalitik yang lebih baik dalam mendegradasi Rhodamin-B (RhB) dibandingkan dengan $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ hasil sintesis metode padatan. Hal ini disebabkan oleh keteraturan bentuk kristal morfologi dan luas permukaan yang dihasilkan. Data ditampilkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Degradasi fotokatalitik Rhodamin-B oleh senyawa $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (He, dkk., 2014).

2.5 Senyawa Aurivillius $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

Senyawa Aurivillius memiliki rumus molekul $\text{Bi}_2\text{A}_{m-1}\text{B}_m\text{O}_{3m+3}$ yang tersusun atas lapisan perovskit $(\text{A}_{m-1}\text{B}_m\text{O}_{3m+3})^{2-}$ dan lapisan $(\text{Bi}_2\text{O}_2)^{2+}$, dengan A sebagai kation logam monovalen, divalen, atau trivalen yang besar, dan B sebagai kation logam tetravalen, pentavalen, atau heksavalen yang kecil. $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ merupakan salah satu golongan senyawa Aurivillius lapis empat. Sel satuan $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ terdiri dari kation Ca^{2+} dan $\frac{1}{2} \text{Bi}^{3+}$ yang tersebar di situs A , sementara kation $\frac{1}{2} \text{Bi}^{3+}$ berada di $(\text{Bi}_2\text{O}_2)^{2+}$, dan kation Ti^{4+} menempati situs B (Emani, dkk., 2016). Senyawa ini dilaporkan memiliki struktur ortorombik dengan grup ruang $A2_1am$ pada suhu rendah dan tetragonal dengan grup ruang $I4/mmm$ pada suhu tinggi (Zulhadjri, dkk., 2021). Struktur senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan struktur ortorombik dan tetragonal ditampilkan pada Gambar 2.8.



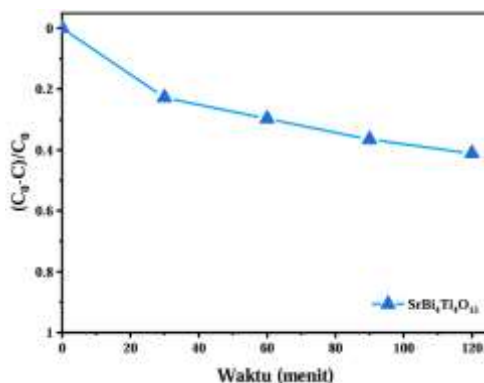
Gambar 2. 8 Struktur kristal senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (Zulhadjri, dkk., 2021).

Struktur berlapis bismut memiliki karakteristik yang menarik, antara lain memiliki temperatur transisi yang tinggi (T_c), konstanta dielektrik moderat (ϵ), dan faktor kualitas mekanik yang tinggi (Q_m) yang memberikan keuntungan untuk aplikasi temperatur tinggi pada sensor dan perangkat gelombang mikro. Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dilaporkan memiliki sifat piezoelektrik dan feroelektrik. Hal ini membuat $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ memiliki aplikasi yang cukup luas

diantaranya adalah sebagai aplikasi memori, kapasitor super, dan perangkat optoelektronik (Emani, dkk., 2016). Selain itu, senyawa Aurivillius $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dapat digunakan sebagai material fotokatalis untuk aplikasi fotokatalitik. Hal ini disebabkan oleh beberapa sifat penting, seperti memiliki struktur berlapis (dapat menyediakan permukaan yang luas), band gap yang rendah, dan stabilitas kimia yang tinggi sehingga memberikan senyawa Aurivillius $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ aktivitas fotokatalitik yang baik

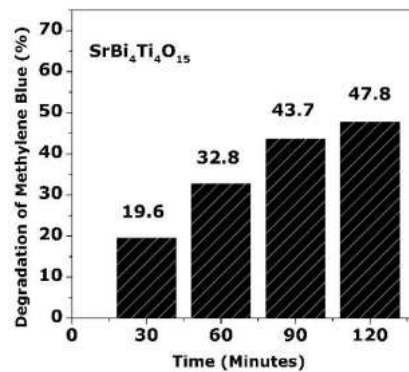
2.6 Senyawa Fotokatalis Aurivillius Lapis Empat

Sifat fotokatalis Aurivillius lapis empat telah dilaporkan beberapa pihak. Haikal dan Prasetyo. (2021) telah mendegradasi larutan Rhodamin-B menggunakan senyawa Aurivillius lapis empat $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang disintesis menggunakan metode lelehan garam campuran $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{K}_2\text{SO}_4$. Produk yang diperoleh adalah senyawa murni $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ tanpa adanya pengotor dan mempunyai energi celah pita sebesar 3,02 eV. Hasil uji aktivitas fotokatalis menunjukkan bahwa senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ mampu mendegradasi larutan Rhodamin-B di bawah iradiasi lampu ultraviolet sebanyak 22,76% pada 30 menit, 29,75% pada 60 menit, 36,57% pada 90 menit, dan 41,10% pada 120 menit. Data kemampuan degradasi ditampilkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Degradasi fotokatalitik Rhodamin-B oleh senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (Haikal & Prasetyo. 2021)

Laporan lain disampaikan oleh al-Abror, dkk., (2022) yang mendegradasi larutan metilen biru dengan senyawa Aurivillius lapis empat $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang disintesis menggunakan metode lelehan garam campuran NaCl/KCl . Hasil sintesis menunjukkan $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang diperoleh memiliki morfologi *plate-like* dengan banyak aglomerasi dan mempunyai energi celah pita sebesar 3,14 eV serta terdapat pengotor $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$. Hasil penelitian melaporkan bahwa senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ mampu mendegradasi larutan metilen biru di bawah iradiasi lampu ultraviolet sebanyak 19,6% pada 30 menit, 32,8% pada 60 menit, 43,7% pada 90 menit, dan 47,8% pada 120 menit yang ditampilkan pada Gambar 2.10.

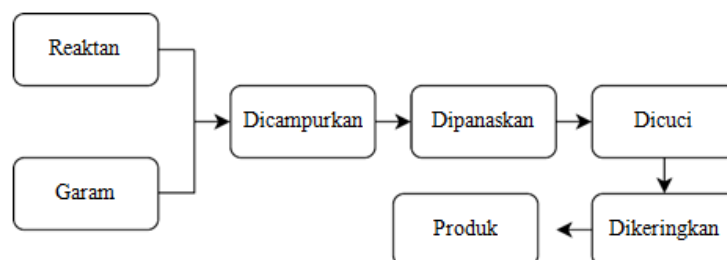


Gambar 2. 10 Degradasi fotokatalitik metilen biru oleh senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (al-Abror, dkk., 2022)

2.7 Metode Sintesis Lelehan Garam

Metode lelehan garam adalah metode sintesis yang menggunakan garam anorganik yang dilelehkan sebagai medium reaksi untuk membentuk oksida kompleks dari prekursor. Metode lelehan garam merupakan modifikasi dari metode padatan yaitu garam dengan titik leleh rendah ditambahkan ke reaktan kemudian campuran dipanaskan di atas titik leleh garam (Kimura, 2011). Garam yang mencair akan bertindak sebagai pelarut untuk reaktan, sehingga mempermudah proses sintesis. Garam cair memungkinkan terjadinya transfer massa yang lebih cepat dalam fasa cair melalui konveksi dan difusi. Hal ini menghasilkan produk dengan kristalinitas yang lebih baik dan kemampuan untuk mengontrol morfologi produk. Morfologi partikel dapat mempengaruhi aktivitas fotokatalitik karena reaksi fotokatalitik terjadi pada permukaan partikel (Dong, dkk., 2016). Metode lelehan garam memiliki beberapa keunggulan dibandingkan metode sintesis lainnya, yaitu biaya bahan murah, tekanan uap rendah, rentang suhu pengoperasian yang luas, stabil pada suhu tinggi, sederhana, dan menghasilkan limbah yang minimal sehingga ramah lingkungan. Perbandingan beberapa metode sintesis ditampilkan pada Tabel 2.1.

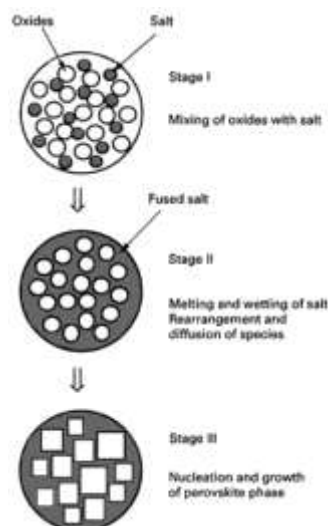
Garam tunggal yang umum digunakan adalah NaCl , K_2SO_4 , KCl , NaNO_3 , dan Na_2SO_4 , sedangkan garam campuran adalah NaCl-KCl , $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{SO}_4$, dan $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$ (Kuchibhotla, dkk., 2020). Garam cair berfungsi untuk mengontrol ukuran dan bentuk partikel, mengontrol keadaan aglomerasi, meningkatkan derajat homogenitas, dan meningkatkan laju reaksi dan menurunkan suhu reaksi (Kimura, 2011).



Gambar 2. 11 Prosedur sintesis metode lelehan garam

Table 2. 1 Perbandingan beberapa metode sintesis

Aspek	Lelehan Garam	Solid State	Hydrothermal
Suhu	Rendah (500-1000°C) karena garam cair mempercepat difusi sehingga menghemat energi.	Sangat tinggi (> 1000°C) sehingga boros energi dan berisiko merusak material yang tidak tahan panas.	Rendah (100-300°C) tetapi memerlukan tekanan tinggi.
Waktu Reaksi	Cepat karena media cair memudahkan transportasi ion.	Lama karena mekanisme difusi padat lambat.	Tergantung kondisi.
Kontrol Morfologi	Menghasilkan kristal berukuran seragam dan ukuran partikel dapat diatur.	Partikel cenderung besar, tidak homogen dan mudah teragglomerasi.	Baik terhadap ukuran, bentuk, dan kristalinitas (nanopartikel, kristal tunggal)
Kemurnian	Tinggi jika garam sisa dihilangkan sempurna	Rentan terhadap pengotor karena reaksi tidak sempurna dan kontaminasi dari grinding (penghalusan).	Tinggi jika menggunakan pelarut murni dan autoclave bersih.

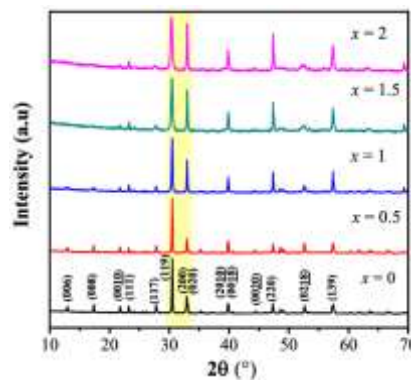
**Gambar 2. 12** Ilustrasi skematis tahapan utama metode lelehan garam (Xue, dkk., 2018)

Prosedur sintesis menggunakan metode lelehan garam diilustrasikan pada Gambar 2.11. Sintesis menggunakan metode lelehan garam terdiri dari 3 tahap utama yang diilustrasikan pada Gambar 2.12. Tahap pertama adalah pencampuran dan oksidasi yaitu prekursor dicampur dengan garam dalam perbandingan garam yang lebih besar dan campuran ini dioksidasi untuk memicu reaksi. Tahap kedua adalah pemanasan dan pelelehan yaitu campuran prekursor dan garam dipanaskan di atas titik leleh garam untuk membentuk *molten flux*. Di dalam *molten flux* terjadi beberapa proses fisik, seperti dispersi seragam molekul, disosiasi, penataan ulang, dan difusi. Tahap ketiga adalah nukleasi dan pertumbuhan partikel produk yang dimulai dengan proses pengendapan larutan. Partikel yang jauh lebih kecil akan larut ke dalam lelehan garam untuk membentuk partikel yang lebih besar. Pada tahap ini, *molten flux* didinginkan pada suhu ruang untuk membentuk partikel produk

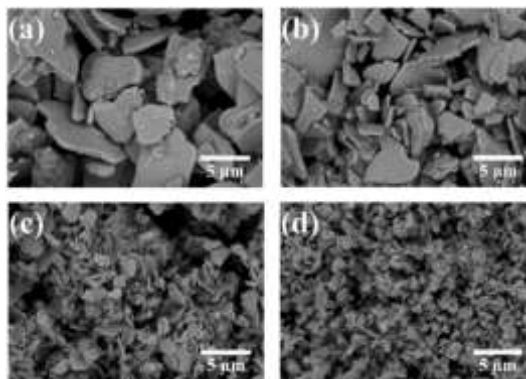
kemudian produk dicuci dengan air hangat untuk menghilangkan garam. Selanjutnya, produk dikeringkan dalam oven untuk menghasilkan produk akhir (Xue, dkk., 2018).

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

Sintesis senyawa Aurivillius dengan metode lelehan garam telah banyak dilakukan berbagai pihak. Zulhadjri, dkk. (2021) telah mensintesis $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ terdoping La^{3+} ($\text{CaBi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ ($x = 0, 0.5, 1, 1.5, \text{ dan } 2$)) menggunakan garam campuran $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{SO}_4$ pada suhu 750, 850, dan 950°C selama 5 jam. Difraktogram senyawa produk ditampilkan pada Gambar 2.13 yang menunjukkan telah diperoleh senyawa $\text{CaBi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang memiliki struktur kristal *orthorombik* dengan grup ruang $A2_1am$. Hasil difraktogram juga menunjukkan tidak ditemukan pengotor pada $\text{CaBi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dan sesuai dengan standar. Hasil karakterisasi menggunakan SEM yang ditampilkan pada Gambar 2.14 menunjukkan bahwa partikel yang diperoleh mempunyai morfologi partikel khas *plate-like*.



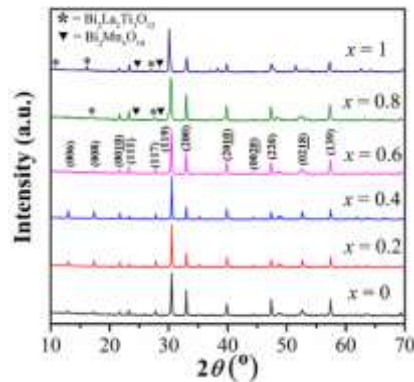
Gambar 2. 13 Difraktogram $\text{CaBi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan metode lelehan garam campuran $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{SO}_4$



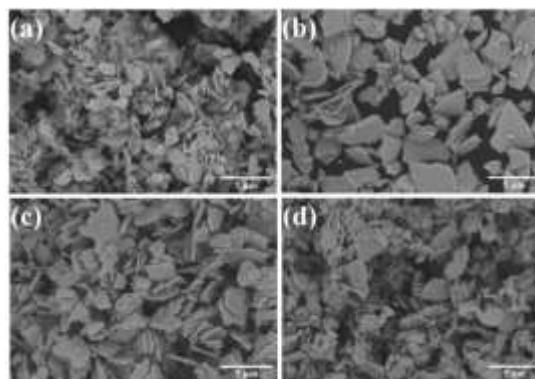
Gambar 2. 14 Gambar SEM $\text{CaBi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (a) $x = 0$ (b) $x = 0,5$ (c) $x = 2$

Penelitian lain dilaporkan Zulhadjri, dkk., (2020) yang mensintesis $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ terdoping La^{3+} dan Mn^{3+} ($\text{Ca}_{1-x}\text{Bi}_{3+x}\text{LaTi}_{4-x}\text{Mn}_x\text{O}_{15}$ ($x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, \text{ and } 1$)) dengan menggunakan metode lelehan dengan memanfaatkan garam campuran $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{SO}_4$. Difraktogram senyawa produk ditampilkan pada Gambar 2.15 dan menunjukkan bahwa pada sampel dengan $x = 0, 0.2, 0.4, \text{ dan } 0.6$ memiliki pola difraksi yang dapat diindeks

menggunakan pola difraksi standar $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan struktur *orthorombik* dan grup ruang $A2_1am$. Sampel-sampel ini menghasilkan fase Aurivillius tunggal empat lapisan. Namun, untuk sampel dengan $x = 0,8$ dan 1 terdapat impuritas yang diidentifikasi sebagai $\text{Bi}_2\text{La}_2\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ dan $\text{Bi}_2\text{Mn}_4\text{O}_{10}$ yang menunjukkan adanya fase pengotor dalam sampel tersebut. Hasil karakterisasi dengan menggunakan SEM dengan morfologi *plate-like* dan ditampilkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2. 15 Difraktogram $\text{Ca}_{1-x}\text{Bi}_{3+x}\text{LaTi}_{4-x}\text{Mn}_x\text{O}_{15}$ dengan metode lelehan garam campuran $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{SO}_4$



Gambar 2. 16 Gambar SEM $\text{Ca}_{1-x}\text{Bi}_{3+x}\text{LaTi}_{4-x}\text{Mn}_x\text{O}_{15}$ dengan metode lelehan garam campuran $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{SO}_4$

2.9 Material Fotokatalis

Pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh limbah antibiotik merupakan suatu permasalahan yang mampu diatasi melalui proses degradasi oleh material fotokatalis. Proses fotokatalis memanfaatkan energi foton dari cahaya, salah satunya dari sinar matahari untuk mengurai limbah antibiotik. Hal ini menegaskan pentingnya peran sinar matahari dalam proses fotokatalisis dan kehidupan sehari-hari. Dalam al-Qur'an surat asy-Syams ayat 1, Allah SWT berfirman:

وَالشَّمْسُ وَضُحَاهَا ۝

Artinya: “Demi matahari dan sinarnya pada pagi hari.”

Tafsir Al-Misbah, Shihab, (2002) menjelaskan bahwa Allah bersumpah demi matahari yang memancarkan cahaya dan menunjukkan keindahan bumi. Segala sesuatu yang berhubungan dengan sumpah Allah SWT merupakan perkara yang agung dan memiliki manfaat besar bagi kehidupan. Matahari sebagai sumber utama cahaya dapat dimanfaatkan dalam proses fotodegradasi limbah antibiotik. Hal ini dipertegas dalam al-Qur'an surat Yunus ayat 5 sebagai berikut:

هُوَ الَّذِي جَعَلَ الشَّمْسُ ضِيَاءً وَالْقَمَرَ نُورًا وَقَدَرَهُ مَنَازِلَ لِتَعْلَمُوا عَدَدَ السِّنِينَ وَالْحِسَابَ ۚ مَا خَلَقَ
اللَّهُ ذَلِكَ إِلَّا بِالْحَقِّ يُفَصِّلُ الْآيَاتِ لِقَوْمٍ يَعْلَمُونَ ﴿٥﴾

Artinya: *"Dialah yang menjadikan matahari bersinar dan bulan bercahaya, dan ditetapkan-Nya manzilah-manzilah (tempat-tempat) bagi perjalanan bulan itu, supaya kamu mengetahui bilangan tahun dan perhitungan (waktu). Allah tidak menciptakan yang demikian itu melainkan dengan hak. Dia menjelaskan tanda-tanda (kebesaran-Nya) kepada orang-orang yang mengetahui."*

Berdasarkan tafsir Al-Misbah, Shihab, (2002) ayat ini menjelaskan bahwa Allah menciptakan matahari yang bersinar, dan bulan yang bercahaya sebagai bukti kebesaran dan kekuasaan-Nya dengan tujuan yang penuh hikmah. Matahari dengan sinarnya merupakan sumber kehidupan, sumber panas dan tenaga yang dapat menggerakkan makhluk-makhluk Allah yang diciptakan-Nya. Ayat ini membedakan antara cahaya yang dipancarkan oleh matahari dan cahaya yang dipantulkan oleh bulan. Cahaya matahari disebut *dhiya'* (sinar yang berasal dari dirinya sendiri), sementara cahaya bulan disebut *nur* (cahaya yang tidak berasal dari dirinya sendiri).

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan pada bulan Februari-Mei 2025 di Laboratorium Anorganik, Jurusan Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

Alat-alat yang digunakan antara lain seperangkat alat gelas, neraca analitik, aluminium foil, krus alumina, tanur, oven, *hotplate*, *mortar agate*, kertas saring, fotoreaktor, seperangkat instrumen XRD, seperangkat instrumen SEM, seperangkat instrumen UV-Vis, dan seperangkat instrumen UV-Vis DRS.

3.2.2 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan antara lain adalah CaCO_3 (Sigma-Aldrich, 99.9% serbuk), Bi_2O_3 (Sigma-Aldrich, 99.9% serbuk), TiO_2 (Sigma-Aldrich, 99.9% serbuk), NaCl (Merck, 995% serbuk), KCl (Merck, 99,5%), AgNO_3 (Merck, larutan 2,5%), aseton, dan akuades.

3.3 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dirancang dalam tiga tahap sebagai berikut:

a. Tahapan sintesis senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan metode lelehan garam.

Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ disintesis menggunakan metode lelehan garam dengan rasio garam campuran $\text{NaCl}:\text{KCl} = 1:1$, sedangkan rasio antara prekursor oksida dan campuran garam adalah 1:7. Sintesis dilakukan dengan mencampurkan prekursor dan garam secara stoikometrik selama 45 menit kemudian dikalsinasi pada suhu 750, dan 820 °C masing-masing selama 6 jam. Produk yang dihasilkan kemudian didinginkan pada suhu ruang, dicuci menggunakan akuades panas untuk menghilangkan garam dan diuji dengan larutan AgNO_3 (terbentuknya endapan putih menandakan garam larut dalam filtrat) (Bima, dkk., 2024). Kemudian produk dikeringkan dalam oven pada suhu 90 °C selama 3 jam.

b. Tahapan karakterisasi

Karakterisasi dalam penelitian ini bertujuan untuk mengetahui apakah senyawa hasil sintesis terbentuk secara murni, memiliki bentuk dan ukuran partikel yang diinginkan, serta mampu menyerap cahaya dengan baik untuk mengaktifkan proses degradasi ciprofloxacin. Proses karakterisasi meliputi: (a) Karakterisasi menggunakan XRD untuk mengetahui senyawa dan kemurnian fasa, (b) Karakterisasi menggunakan SEM untuk

mengetahui morfologi dan ukuran partikel dari senyawa hasil sintesis, dan (c) Karakterisasi menggunakan UV-Vis DRS untuk menentukan daerah serapan cahaya dan energi celah pita dari senyawa hasil sintesis.

c. Tahapan uji fotokatalis

Pengujian aktivitas fotokatalis dilakukan menggunakan spektroskopi UV-Vis untuk mengukur kemampuan senyawa hasil sintesis dalam mendegradasi antibiotik ciprofloxacin di bawah paparan sinar ultraviolet. Rangkaian uji fotokatalis meliputi:

(a) Pengujian kestabilan larutan ciprofloxacin

Uji kestabilan dilakukan untuk mengetahui pengaruh paparan cahaya terhadap kestabilan ciprofloxacin tanpa kehadiran katalis selama waktu uji. Larutan 100 mL ciprofloxacin 8 ppm diuji pada kondisi terang (dengan UV) dan gelap (tanpa UV) dalam fotoreaktor selama 120 menit, lalu absorbansinya diukur dengan spektrofotometer UV-Vis.

(b) Pengujian adsorpsi senyawa hasil sintesis

Pengujian ini dilakukan untuk mengukur kemampuan senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dalam menyerap ciprofloxacin dan membedakan antara proses adsorpsi dan fotodegradasi. Sebanyak 80 mg katalis dicampur dengan 80 mL larutan ciprofloxacin 8 ppm, lalu distirer selama 30, 60, 90, 120, dan 150 menit dalam kondisi gelap. Setelah itu, larutan disaring untuk memisahkan katalis, dan supernatan diukur absorbansinya menggunakan UV-Vis. Proses ini diulang sebanyak dua kali.

(c) Pengujian aktivitas fotokatalis senyawa hasil sintesis dalam mendegradasi ciprofloxacin

Uji fotokatalis dilakukan untuk mengetahui kemampuan $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dalam mendegradasi ciprofloxacin. Sebanyak 80 mL larutan ciprofloxacin 8 ppm dicampur dengan 80 mg katalis. Campuran disinari lampu UV selama 30, 60, dan 90 menit. Setelah penyinaran, larutan disaring, lalu supernatan dianalisis menggunakan UV-Vis untuk menghitung persentase degradasi berdasarkan perubahan absorbansi. Proses ini diulang sebanyak dua kali.

3.4 Prosedur Kerja

3.4.1 Sintesis $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan Metode Lelehan Garam

Sintesis senyawa Aurivillius $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ diawali dengan proses preparasi bahan, yaitu mencampurkan prekursor sesuai data Tabel 3.1 dengan massa target sebanyak 4 gram. Campuran prekursor kemudian ditambahkan garam NaCl dan KCl dengan rasio molar antara prekursor dan campuran garam adalah 1:7. Selanjutnya, campuran digerus menggunakan *mortar agate* selama 45 menit untuk memastikan homogenitas. Campuran kemudian dipindahkan ke krus alumina dan dikalsinasi pada suhu 750, dan 820°C masing-masing selama 6 jam. Setelah proses kalsinasi selesai, produk dikeluarkan dari tanur dan didinginkan pada suhu ruang. Hasil kalsinasi kemudian disaring menggunakan kertas saring. Sampel

dicuci dengan aquades hangat hingga garam hilang kemudian dianalisis dengan larutan AgNO_3 ke dalam filtratnya (Bima, dkk., 2024). Terbentuknya endapan putih menandakan bahwa garam telah larut dalam filtrat. Terakhir, produk dikeringkan menggunakan oven pada suhu 90°C selama 3 jam.

Dalam sintesis metode lelehan garam, suhu reaksi perlu melebihi titik leleh garam yang digunakan. Untuk menurunkan suhu reaksi dapat digunakan campuran garam eutektik, seperti NaCl-KCl yang memiliki titik leleh lebih rendah (657°C) dibandingkan garam tunggal NaCl (801°C) dan KCl (770°C) (Gupta dan Mao, 2021). Keunggulan campuran eutektik adalah kemampuannya memperluas rentang suhu reaksi sekaligus memungkinkan sintesis pada suhu lebih rendah. Penggunaan 2 tahap kalsinasi (750 dan 820°C) bertujuan untuk memastikan reaksi berjalan sempurna dan mengoptimalkan sifat material yang dihasilkan. Tahap pertama memungkinkan garam meleleh dan prekursor mulai bereaksi, namun reaksi mungkin belum sepenuhnya selesai karena hambatan kinetik seperti difusi ion yang lambat atau dekomposisi prekursor yang tidak sempurna. Oleh karena itu, tahap kedua dilakukan pada suhu lebih tinggi untuk menyediakan energi tambahan guna menyelesaikan reaksi dan memperoleh fasa yang diinginkan. Prinsip ini berhasil diaplikasikan oleh Bima, dkk., (2024) dalam sintesis $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ menggunakan campuran NaCl-KCl , dimana hasilnya menunjukkan pembentukan senyawa target tanpa pengotor dengan morfologi *plate-like* yang homogen dan tanpa aglomerasi.

Table 3. 1 Komposisi prekursor senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

Target Senyawa	Massa Target (gram)	Massa Pereaksi (gram)				
		CaCO_3	Bi_2O_3	TiO_2	NaCl	KCl
$\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	4	0,3061	2,8470	0,9767	1,2512	1,5961

3.4.2 Karakterisasi dan Analisis Data Hasil Sintesis dengan *X-Ray Diffraction* (XRD)

Sampel yang telah disiapkan ditempatkan dalam *holder* sampel dan diukur pada suhu kamar dengan menggunakan radiasi $\text{Cu-K}\alpha$ pada 40 kV dan 30 mA dalam rentang 2θ ($^\circ$) = 10-90. Karakterisasi ini bertujuan untuk mengetahui senyawa yang terbentuk dan kemurnian fasa dari senyawa yang dihasilkan. Analisis dilakukan dengan membandingkan difraktogram eksperimen dengan data standar *International Centre for Diffraction Data* (ICDS). Jika puncak-puncak pada difraktogram eksperimen sesuai dengan puncak-puncak standar *ICDS*, hal ini menunjukkan bahwa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ berhasil disintesis. Selain itu, tidak adanya puncak tambahan pada difraktogram mengindikasikan bahwa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang dihasilkan murni dan bebas dari senyawa pengotor.

3.4.3 Karakterisasi dan Analisis Data Hasil Sintesis dengan *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Karakterisasi menggunakan SEM dilakukan dengan meletakkan sampel pada sampel *holder*. Pengukuran dilakukan pada perbesaran 7.000, 10.000, dan 15.000 kali. Data yang dihasilkan kemudian dianalisis dengan program *Image J* untuk mengetahui ukuran partikel secara kualitatif. Karakterisasi menggunakan SEM bertujuan untuk mengetahui morfologi dan ukuran partikel.

3.4.4 Karakterisasi dan Analisis Data Hasil Sintesis dengan Spektroskopi UV-Vis DRS

Karakterisasi menggunakan spektroskopi UV-Vis DRS dimulai dengan meletakkan sampel pada *holder*. Pengukuran dilakukan pada rentang panjang gelombang 200-800 nm. Data spektrum yang diperoleh dianalisis menggunakan persamaan Kubelka-Munk yang ditunjukkan pada persamaan 3. 1.

$$F(R) = \frac{(1-R)^2}{2R} = \frac{K}{S} \dots\dots\dots (3.1)$$

dengan dengan $F(R)$ adalah faktor Kubelka-Munk, K adalah koefisien absorpsi molar, S adalah koefisien *scattering*, dan R adalah nilai reflektan yang diukur.

Karakterisasi ini bertujuan untuk mengetahui daerah serapan cahaya dan energi celah pita. Menentukan energi celah pita dilakukan melalui analisis *plot* $(F(R).hv)^2$ pada sumbu y terhadap energi foton (hv) pada sumbu x . Energi foton dihitung berdasarkan data panjang gelombang yang terukur dengan persamaan $hv = hc/\lambda$, dimana hv adalah energi foton, h adalah konstantan Planck, dan c adalah ketetapan cahaya. Selanjutnya energi celah pita dihitung melalui regresi liner pada nilai energi celah pita (sumbu x) ketika $y = 0$.

3.4.5 Uji Fotokatalitik $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Terhadap Ciprofloxacin Menggunakan *Spectroscopy Ultraviolet-Visible* (UV-Vis)

3.4.5.1 Pembuatan Larutan Induk Ciprofloxacin

Ciprofloxacin sebanyak 2,5 mL dimasukkan ke dalam labu ukur 100 mL dan ditambahkan akuades hingga tanda batas. Kemudian dikocok hingga homogen, sehingga didapat larutan induk ciprofloxacin 50 ppm.

3.4.5.2 Pembuatan Kurva Standar Ciprofloxacin

Larutan ciprofloxacin dengan variasi konsentrasi 2-8 ppm dengan interval 1 ppm (larutan dibuat dari pengenceran larutan induk ciprofloxacin 50 ppm dengan akuades) sebanyak 100 mL. Kemudian masing-masing variasi larutan diukur absorbansinya menggunakan spektroskopi UV-Vis pada rentang panjang gelombang 400-800 nm.

3.4.5.3 Uji Kestabilan Ciprofloxacin

Larutan ciprofloxacin sebanyak 100 mL dengan konsentrasi 8 ppm diuji kestabilannya pada dua kondisi, yaitu kondisi terang dengan radiasi sinar UV dan kondisi gelap tanpa radiasi UV. Pengujian dilakukan dengan menempatkan larutan dalam fotoreaktor selama 120 menit, kemudian absorbansinya diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh paparan cahaya terhadap kestabilan ciprofloxacin tanpa kehadiran katalis selama waktu uji.

3.4.5.4 Uji Adsorpsi-Desorpsi Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Terhadap Larutan Ciprofloxacin

Sampel katalis $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ sebanyak 80 mg dicampurkan dengan 80 mL larutan ciprofloxacin konsentrasi 8 ppm yang dimasukkan ke dalam gelas beaker 100 mL. Larutan tersebut kemudian dimasukkan ke dalam reaktor fotokatalis dan diaduk selama 30, 60, 90, 120, dan 150 menit dalam kondisi gelap untuk mengetahui waktu kesetimbangan adsorpsi-desorpsi. Selanjutnya, larutan disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan endapan katalis dari supernatan. Proses ini diulang sebanyak 2 kali. Supernatan yang terpisah kemudian dipindahkan ke dalam kuvet untuk diukur absorbansinya menggunakan spektroskopi UV-Vis. Uji adsorpsi-desorpsi bertujuan untuk mengukur kemampuan adsorpsi senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dalam menyerap ciprofloxacin serta membedakan kontribusi antara proses adsorpsi dan proses fotodegradasi.

3.4.5.5 Uji Adsorpsi-Degradasi Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Terhadap Larutan Ciprofloxacin

Uji aktivitas fotokatalitik sampel dilakukan untuk mengetahui kemampuan degradasi sampel terhadap larutan ciprofloxacin. Sebanyak 80 mL larutan ciprofloxacin 8 ppm dimasukkan dalam gelas kimia 100 mL kemudian ditambahkan 80 mg katalis $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. Selanjutnya, campuran dimasukkan dalam reaktor fotokatalis tanpa cahaya selama 120 menit kemudian disinari dengan sinar UV selama 30, 60, dan 90 menit. Proses ini diulang sebanyak 2 kali. Setelah proses penyinaran, larutan disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan larutan hasil degradasi dari katalis. Absorbansi larutan hasil degradasi kemudian diukur dengan spektroskopi UV-Vis untuk mengetahui banyaknya ciprofloxacin yang terdegradasi. Aktivitas fotodegradasi ciprofloxacin didapat dengan membandingkan absorbansi sebelum dan sesudah proses degradasi dengan menggunakan persamaan 3.2 sehingga didapat % degradasi.

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

Dengan C_0 adalah konsentrasi awal ciprofloxacin dan C_t adalah konsentrasi ciprofloxacin setelah proses degradasi.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini telah disintesis senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ menggunakan metode lelehan garam dengan campuran NaCl-KCl pada suhu 750, dan 820°C selama 6 jam. Produk hasil sintesis selanjutnya dikarakterisasi menggunakan: (a) XRD untuk mengidentifikasi senyawa dan kemurniaan fasanya, (b) SEM untuk mengetahui morfologi serta ukuran partikel, dan (c) UV-Vis DRS untuk menentukan rentang serapan cahaya serta energi celah pita. Setelah itu, dilakukan uji aktivitas fotokatalitik senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dalam mendegradasi ciprofloxacin dengan variasi waktu selama 30, 60, dan 90 menit.

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

Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ disintesis dengan mencampurkan prekursor CaCO_3 , Bi_2O_3 , dan TiO_2 serta campuran garam NaCl-KCl kemudian di gerus selama 45 menit. Selama proses penggerusan, ditambahkan aseton untuk meningkatkan homogenitas campuran. Campuran yang telah homogen kemudian dikalsinasi pada suhu 750 dan 820°C selama 6 jam. Pada tahap ini terjadi reaksi pembentukan senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$, sebagaimana ditunjukkan dalam Persamaan 4.1.

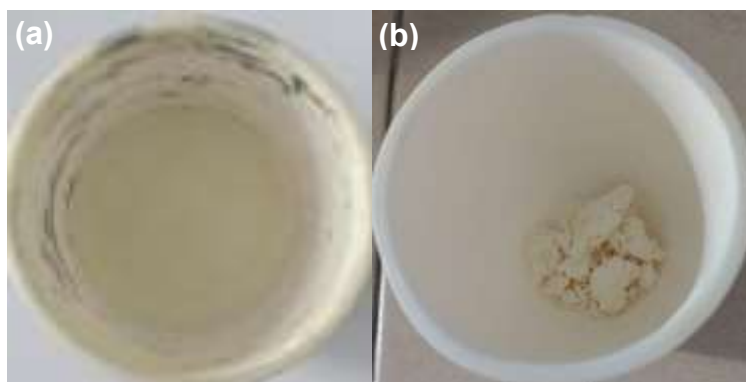


Reaksi di atas menunjukkan bahwa satu mol CaCO_3 bereaksi dengan dua mol Bi_2O_3 dan empat mol TiO_2 untuk membentuk satu mol $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$, dengan gas CO_2 sebagai produk samping. Proses ini terjadi saat kalsinasi berlangsung pada suhu tinggi. Hasil sintesis ditunjukkan pada Gambar 4.1 yang memperlihatkan perubahan warna dari hijau menjadi putih kehijauan yang menandakan terbentuknya senyawa baru.

Setelah kalsinasi, padatan dicuci menggunakan aquades panas untuk menghilangkan sisa garam NaCl dan KCl. Pencucian dilakukan dengan menuangkan aquades panas ke dalam sampel kemudian diaduk agar seluruh partikel kontak secara merata dengan aquades panas dan sisa garam dapat larut sempurna. Keberhasilan pencucian diuji dengan penambahan larutan AgNO_3 ke dalam filtrat. Jika ion Cl^- masih ada, akan terbentuk endapan putih AgCl , yang menandakan pencucian belum optimal. Reaksi yang terjadi ditunjukkan dalam Persamaan 4.2 dan 4.3.



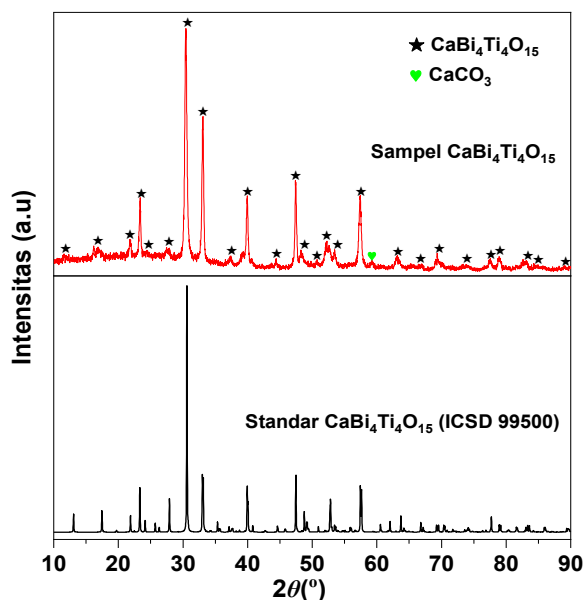
Reaksi di atas menunjukkan bahwa ion Cl^- dari NaCl atau KCl bereaksi dengan ion Ag^+ dalam larutan AgNO_3 , membentuk endapan AgCl berwarna putih. Endapan ini menjadi indikator adanya sisa garam yang belum tercuci sempurna.



Gambar 4. 1 Perubahan warna sampel (a) sebelum tahap kalsinasi, (b) setelah tahap kalsinasi

4.2 Karakterisasi dan Analisis $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Menggunakan XRD

Senyawa yang telah disintesis kemudian dikarakterisasi menggunakan metode *X-Ray Diffraction* (XRD), dan hasil difraktogramnya ditampilkan pada Gambar 4.2. Identifikasi dilakukan dengan membandingkan pola puncak difraksi hasil sintesis dengan data standar pada *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) untuk senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan No. 99500. Hasil perbandingan menunjukkan adanya kesesuaian pola puncak difraksi antara sampel dengan data standar, yang mengindikasikan bahwa proses sintesis senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ berhasil dilakukan. Beberapa puncak khas senyawa terdeteksi pada 2θ ($^\circ$) = 11,60; 16,20; 23,37; 27,86; 30,40; 33,05; 39,93; 47,39; 53,39; dan 57,42. Namun demikian, terdapat satu puncak tambahan pada 2θ ($^\circ$) = 59,16 yang diidentifikasi sebagai pengotor CaCO_3 .



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

Intensitas puncak CaCO_3 ($59,16^\circ$) sangat kecil, yang menunjukkan bahwa kadar pengotor dalam sampel sangat sedikit. Kehadiran pengotor yang berasal dari prekursor dan dalam jumlah yang sedikit menandakan bahwa reaksi sintesis belum berlangsung secara

sempurna. Meskipun demikian, karena intensitas puncaknya kecil, maka dapat disimpulkan bahwa konsentrasi pengotor sangat sedikit, sehingga tidak terlalu mempengaruhi kemurnian fasa utama senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. Penelitian sebelumnya oleh Bima, dkk., (2024) yang juga mensintesis senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ menggunakan metode lelehan garam campuran NaCl-KCl , berhasil memperoleh senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ murni tanpa adanya fasa pengotor.

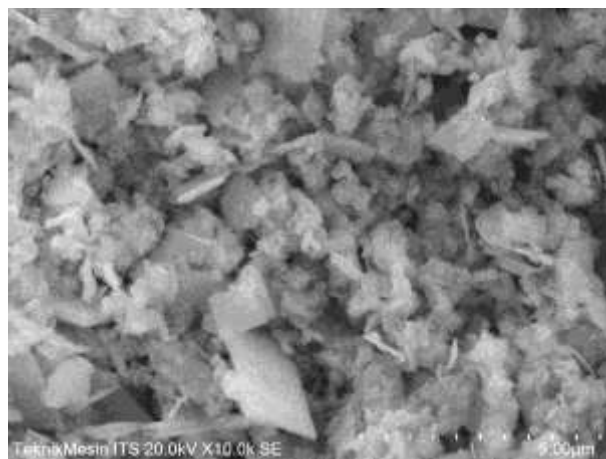
4.3 Karakterisasi dan Analisis $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Menggunakan SEM

Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ hasil sintesis dikarakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengetahui morfologi dan ukuran partikel. Mikrograf yang ditampilkan pada Gambar 4.3 menunjukkan bahwa sampel memiliki morfologi *plate-like* yang merupakan ciri khas senyawa Aurivillius (He, dkk., 2014). Morfologi ini berkaitan dengan struktur berlapis dalam kristal $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$, yaitu adanya lapisan $[\text{Bi}_2\text{O}_2]^{2+}$ dan oktahedron TiO_6 yang tersusun secara bergantian (Fan, dkk., 2020).

Morfologi *plate-like* umumnya diharapkan dalam aplikasi fotokatalis karena dapat meningkatkan luas permukaan dan memperbaiki mobilitas muatan pada permukaan partikel, sehingga mendukung kinerja fotokatalitik. Meskipun demikian, hasil SEM juga menunjukkan adanya aglomerasi (penggumpalan antar partikel), serta distribusi ukuran partikel yang tidak seragam, dengan rentang ukuran berkisar antara 0,68-2,13 μm , dan ukuran dominan berada pada kisaran 1,2–1,6 μm yang ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Ketidakteraturan ukuran partikel mengindikasikan bahwa proses pertumbuhan kristal tidak berlangsung secara seragam. Adanya partikel berukuran besar dan kecil dalam satu sampel menunjukkan bahwa kondisi sintesis, seperti suhu kalsinasi, jenis garam dan rasio reaktan dengan garam, belum sepenuhnya memfasilitasi pertumbuhan kristal yang merata. Dalam metode sintesis lelehan garam, proses pembentukan partikel terdiri atas dua tahap, yaitu tahap nukleasi dan pertumbuhan kristal. Ketika laju nukleasi lebih tinggi daripada laju pertumbuhan kristal, maka akan terbentuk partikel dalam jumlah banyak namun berukuran kecil (Kimura, 2011) (al-Abror, 2022).

Selain itu, proses aglomerasi juga dapat terjadi akibat pencampuran awal yang tidak homogen, penggunaan pelarut (seperti aseton) yang tidak optimal, serta waktu penggerusan yang kurang memadai. Aglomerasi tersebut dapat mengurangi luas permukaan aktif, menghambat difusi molekul target menuju permukaan katalis, serta meningkatkan kemungkinan rekombinasi pasangan elektron-*hole*, yang secara keseluruhan dapat menurunkan efisiensi fotokatalitik (Jassby, dkk., 2012).



Gambar 4. 3 Hasil SEM senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan perbesaran 10.000 kali

Tabel 4. 1 Ukuran partikel senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

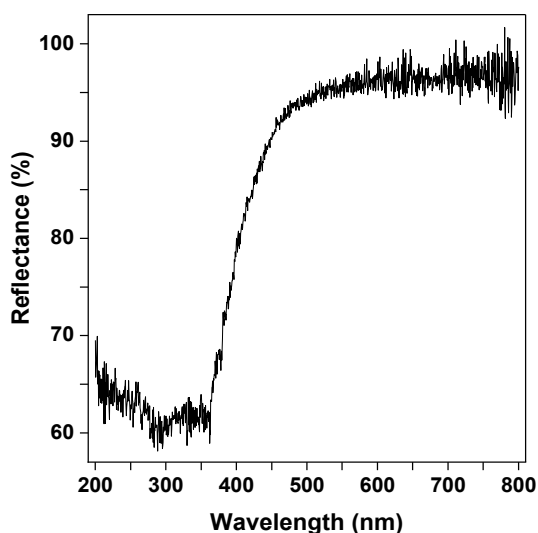
Partikel	Panjang (μm)	Lebar (μm)	Luas Ukuran (μm)
1	1,13	1,08	1,22
2	1,61	1,32	2,13
3	1,16	1,11	1,29
4	1,05	1,05	1,10
5	1,37	1,26	1,73
6	0,85	0,80	0,68
7	10,7	1,16	1,24
8	0,97	1,00	0,97
9	1,58	1,07	1,69
10	1,07	0,85	0,91
11	1,26	1,07	1,35
12	1,61	0,99	1,59
13	1,30	0,82	1,07

4.4 Karakterisasi dan Analisis $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Menggunakan UV-Vis DRS

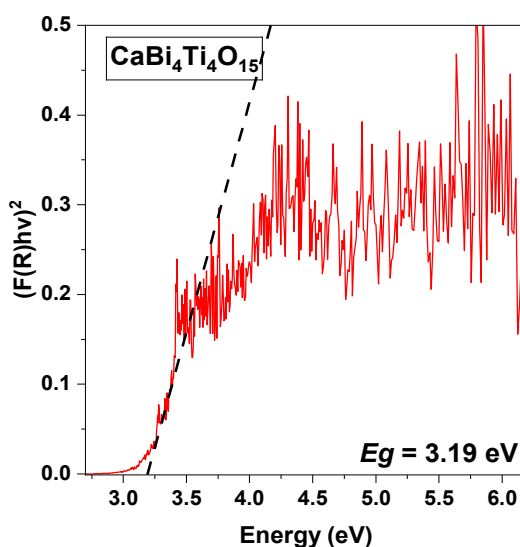
Pada Gambar 4.4 ditampilkan spektrum reflektan hasil karakterisasi senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ menggunakan instrumen UV-Vis DRS. Tujuan dari pengukuran ini adalah untuk mengetahui kemampuan penyerapan cahaya oleh material fotokatalis dan menentukan nilai energi celah pita dari material tersebut. Spektrum reflektan yang diperoleh kemudian diolah menggunakan persamaan Kubelka-Munk dan hasil plot Tauc ditampilkan pada Gambar 4.5 yang menunjukkan bahwa senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ memiliki energi celah pita sebesar 3,19 eV yang setara dengan panjang gelombang 388,97 nm. Nilai ini menunjukkan bahwa material $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ aktif dalam wilayah sinar ultraviolet (UV) dengan panjang gelombang berkisar 100-400 nm (Suhartati, 2017). Data ini sangat penting dalam menentukan aktivitas fotokatalitik suatu material. Energi celah pita menentukan jenis cahaya yang dibutuhkan untuk mengeksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Dalam hal ini, eksitasi terjadi dari orbital O-2p dan Bi-6s (VB) menuju orbital Ti-3d (CB) (Haikal, dkk., 2021). Artinya, agar

material ini aktif sebagai fotokatalis, ia memerlukan foton dengan energi $\geq 3,19$ eV, yang hanya bisa diperoleh dari sinar UV.

Hasil yang diperoleh tidak banyak berbeda dengan penelitian Bima, dkk., (2024), yang melaporkan bahwa senyawa Aurivillius lapis empat $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ memiliki energi celah pita sebesar 3,14 eV yang setara dengan panjang gelombang 394 nm. Perbedaan kecil antara nilai yang diperoleh dalam penelitian ini dan hasil terdahulu kemungkinan disebabkan oleh perbedaan dalam morfologi, kristalinitas, dan kemurnian sampel.



Gambar 4. 4 Spektra DRS hubungan % reflektansi dengan panjang gelombang senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$



Gambar 4. 5 Plot Tauc Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

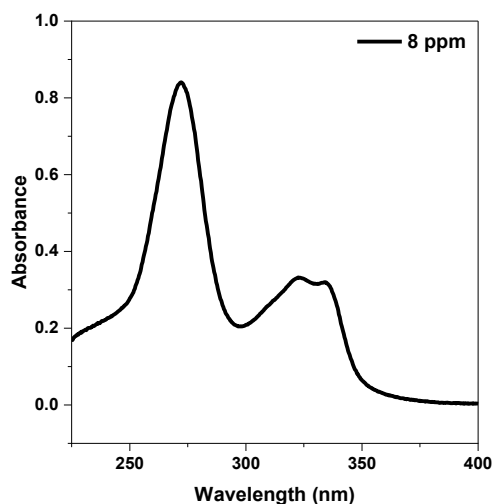
Tabel 4. 2 Nilai energi celah pita dan panjang gelombang $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

Senyawa	Energi Celah Pita (eV)	Panjang gelombang Maksimum (nm)
$\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	3,19	388,97

4.5 Uji Fotokatalitik $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Terhadap Ciprofloxacin Menggunakan Spektroskopi UV-Vis

4.5.1 Penentuan Panjang Gelombang Maksimum Ciprofloxacin

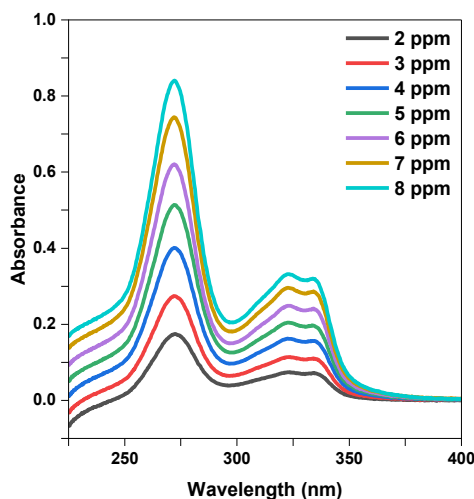
Penentuan panjang gelombang maksimum ciprofloxacin dilakukan menggunakan spektroskopi UV-Vis untuk mengetahui serapan tertinggi dari larutan standar ciprofloxacin. Berdasarkan spektrum yang ditunjukkan pada Gambar 4.6, diperoleh panjang gelombang maksimum sebesar 272 nm. Serapan pada panjang gelombang ini disebabkan oleh transisi elektron dari orbital nonbonding (n) ke orbital antibonding (π^*) (transisi $n \rightarrow \pi^*$) dan ($\pi \rightarrow \pi^*$) yang merupakan karakteristik umum senyawa organik aromatik. Transisi tersebut melibatkan perpindahan elektron dari orbital yang memiliki pasangan elektron bebas menuju orbital antibonding yang memiliki tingkat energi lebih tinggi. Menurut Suhartati (2017), transisi $n \rightarrow \pi^*$ umumnya terjadi dalam rentang panjang gelombang 200–400 nm, yang sesuai dengan data ciprofloxacin pada pengujian ini.



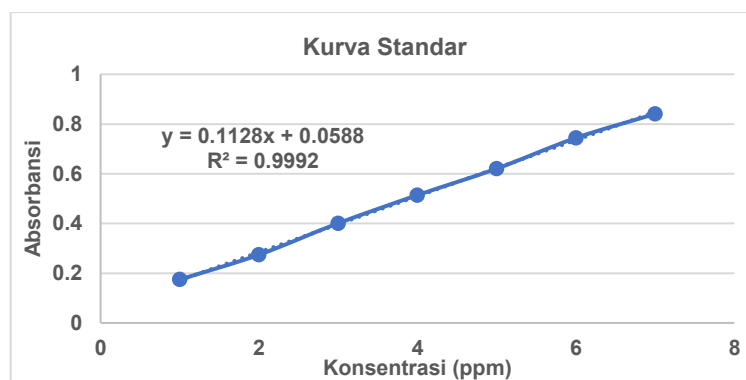
Gambar 4. 6 Spektra ciprofloxacin 8 ppm

4.5.2 Pembuatan Kurva Standar Larutan Ciprofloxacin

Pembuatan kurva standar larutan ciprofloxacin bertujuan untuk mengetahui hubungan antara konsentrasi dan absorbansi menggunakan spektroskopi UV-Vis, sehingga konsentrasi sampel uji dapat dihitung dari persamaan regresi. Larutan disiapkan dengan konsentrasi 2–8 ppm dan diukur nilai absorbansinya yang ditampilkan pada Gambar 4.7, lalu diplot ke dalam kurva standar pada Gambar 4.8. Data yang diperoleh menunjukkan hubungan linier antara konsentrasi (x) dan absorbansi (y), dengan persamaan regresi $y = 0,1128x + 0,0058$ dan nilai $R^2 = 0,9992$. Nilai R^2 yang mendekati 1 mengindikasikan bahwa model regresi memiliki akurasi tinggi dan hubungan yang sangat kuat antara variabel konsentrasi dan absorbansi. Persamaan ini digunakan untuk menentukan konsentrasi ciprofloxacin selama uji fotodegradasi. Hasil ini sesuai dengan Hukum Lambert-Beer, yang menyatakan bahwa absorbansi berbanding lurus dengan konsentrasi larutan, sehingga peningkatan konsentrasi ciprofloxacin diikuti oleh kenaikan nilai absorbansi.



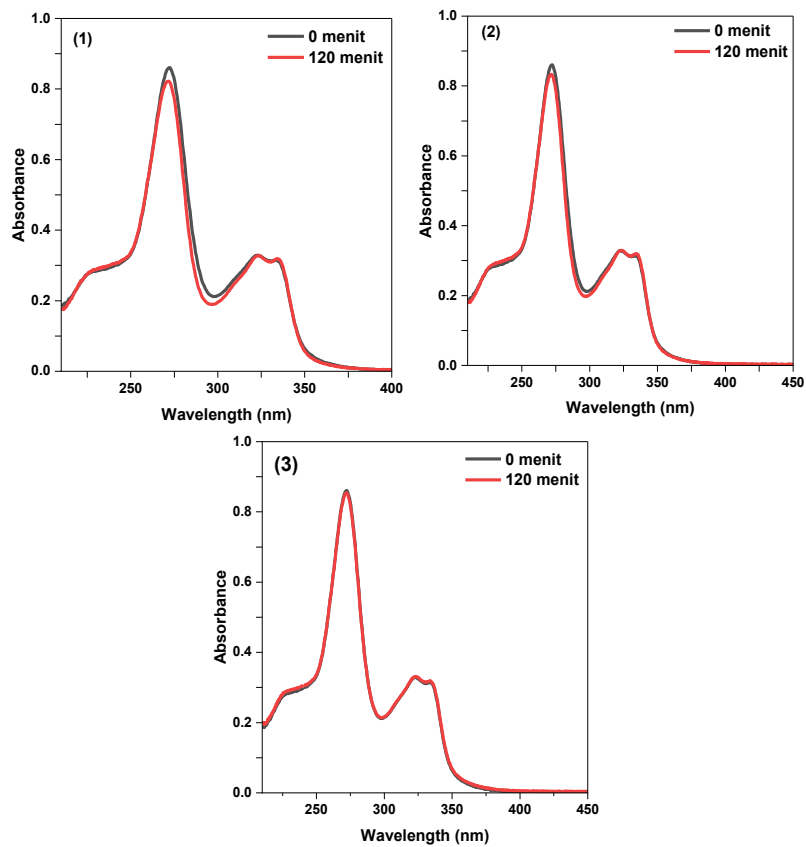
Gambar 4. 7 Spektra absorbansi UV-Vis pada larutan standar ciprofloxacin



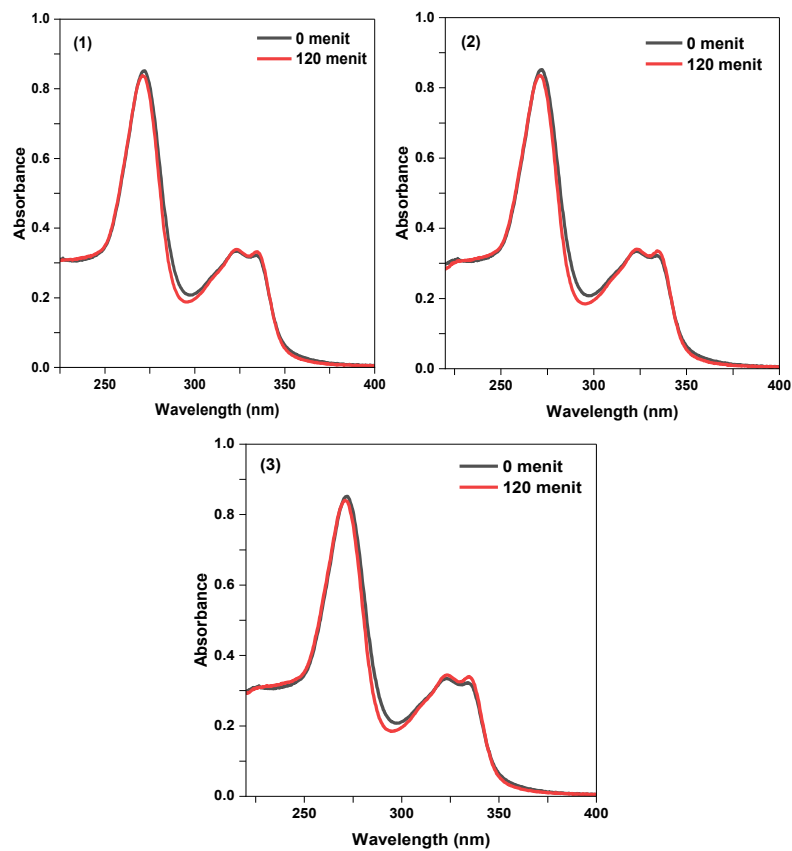
Gambar 4. 8 Hasil pembuatan kurva standar larutan ciprofloxacin

4.5.3 Uji Kestabilan Larutan Ciprofloxacin

Sebelum dilakukan uji aktivitas fotokatalitik senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dalam mendegradasi larutan ciprofloxacin, terlebih dahulu dilakukan pengujian kestabilan ciprofloxacin dengan konsentrasi 8 ppm. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan apakah ciprofloxacin mengalami degradasi secara alami, baik dengan atau tanpa radiasi sinar UV, sehingga proses degradasi yang akan diamati disebabkan oleh aktivitas fotokatalitik. Pengujian dilakukan dengan memaparkan larutan ciprofloxacin tanpa material fotokatalis $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ selama 0 hingga 120 menit pada dua kondisi: (1) tanpa pencahayaan (gelap), dan (2) dengan paparan sinar UV, serta dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali untuk memastikan validitas data. Berdasarkan spektrum yang ditunjukkan pada Gambar 4.9 dan 4.10 tidak ditemukan penurunan absorbansi yang signifikan baik dalam kondisi tanpa sinar UV maupun setelah terpapar sinar UV selama 120 menit. Hal ini menunjukkan bahwa ciprofloxacin stabil dalam kedua kondisi tersebut tanpa adanya material fotokatalis. Ringkasan hasil uji kestabilan ciprofloxacin dalam kedua kondisi tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.3.



Gambar 4. 9 Spektra absorbansi UV-Vis uji kestabilan tanpa sinar UV, pengulangan (1), (2), dan (3)



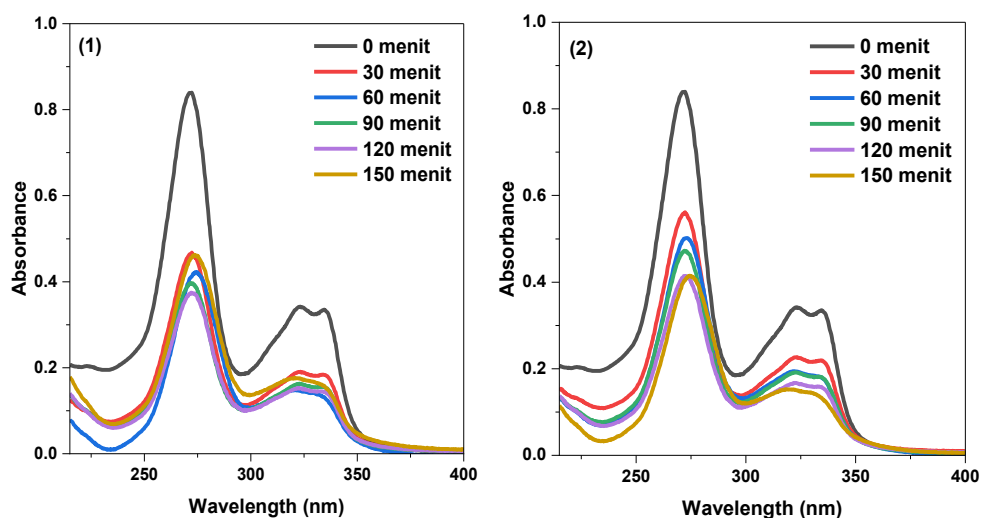
Gambar 4. 10 Spektra absorbansi UV-Vis uji kestabilan dengan sinar UV, pengulangan (1), (2), dan (3)

Tabel 4. 3 Hasil uji kestabilan larutan ciprofloxacin tanpa dan dengan sinar UV

Pengulangan	Kondisi Tanpa Sinar UV			Kondisi Terpapar Sinar UV		
	Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi (ppm)	Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi (ppm)
1	0	0,86091	7,1109	0	0,85199	7,0318
	120	0,82234	6,7689	120	0,83813	6,9089
2	0	0,86091	7,1109	0	0,85199	7,0318
	120	0,83331	6,8622	120	0,83558	6,8863
3	0	0,86091	7,1109	0	0,85199	7,0318
	120	0,85439	7,0531	120	0,84052	6,9301

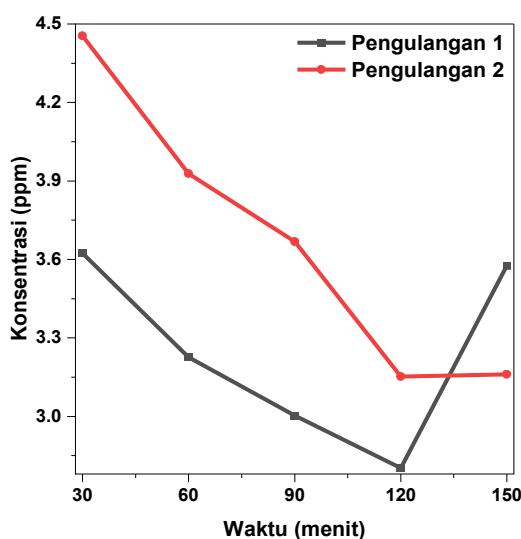
4.5.4 Uji Adsorpsi-Desorpsi Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Terhadap Larutan Ciprofloxacin

Uji adsorpsi-desorpsi dilakukan untuk mengetahui kemampuan senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ sebagai adsorben terhadap ciprofloxacin sebelum dilakukan proses fotodegradasi. Pengujian dilakukan dalam kondisi tanpa paparan sinar UV dengan variasi waktu 0, 30, 60, 90, 120, dan 150 menit. Tujuan dari kondisi ini adalah untuk menghindari aktivasi fotokatalitik, sehingga penurunan konsentrasi ciprofloxacin hanya disebabkan oleh proses adsorpsi. Hasil spektrum UV-Vis dari uji adsorpsi ditampilkan pada Gambar 4.11, sedangkan data konsentrasi dan persentase adsorpsi dirangkum dalam Tabel 4.4.

**Gambar 4. 11** Spektra absorbansi UV-Vis uji adsorpsi senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$, pengulangan (1), dan (2)**Tabel 4. 4** Hasil adsorpsi senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ terhadap larutan ciprofloxacin

Waktu (menit)	Pengulangan 1		Pengulangan 2		Standar Deviasi	Rata-rata % Adsorpsi
	Konsentrasi ciprofloxacin (ppm)	Adsorpsi (%)	Konsentrasi ciprofloxacin (ppm)	Adsorpsi (%)		
30	3,62426	47,63	4,45488	35,64	0,5874±	41,64
60	3,2259	54,94	3,92816	45,14	0,4966±	50,05
90	3,00371	58,64	3,66769	49,51	0,4696±	54,08
120	2,80251	61,42	3,15255	56,60	0,2475±	59,01
150	3,57624	50,76	3,16051	56,49	0,2939±	53,63

Berdasarkan hasil pengukuran, terjadi penurunan nilai absorbansi yang cukup signifikan seiring bertambahnya waktu kontak antara larutan ciprofloxacin dengan senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. Hal ini menunjukkan bahwa ciprofloxacin berhasil teradsorpsi ke permukaan material. Semakin lama waktu kontak, maka interaksi antara molekul ciprofloxacin dan permukaan katalis semakin meningkat, sehingga jumlah ciprofloxacin yang menempel pada permukaan juga semakin besar (Febriani, dkk., 2022). Penurunan absorbansi mencapai titik maksimum pada menit ke-120, yaitu 61,42% (pengulangan 1) dan 56,60% (pengulangan 2). Namun, pada menit ke-150, nilai absorbansi mengalami peningkatan yang ditunjukkan pada Gambar 4.12. Hal ini menunjukkan bahwa sistem telah mencapai kesetimbangan adsorpsi-desorpsi, di mana sebagian ciprofloxacin yang telah menempel mulai terlepas kembali ke larutan melalui proses desorpsi. Desorpsi ini terjadi karena permukaan material yang dapat mengikat ciprofloxacin telah jenuh, sehingga kekuatan ikatan antara ciprofloxacin dan permukaan menjadi lemah dan menyebabkan pelepasan molekul ke fasa cair.



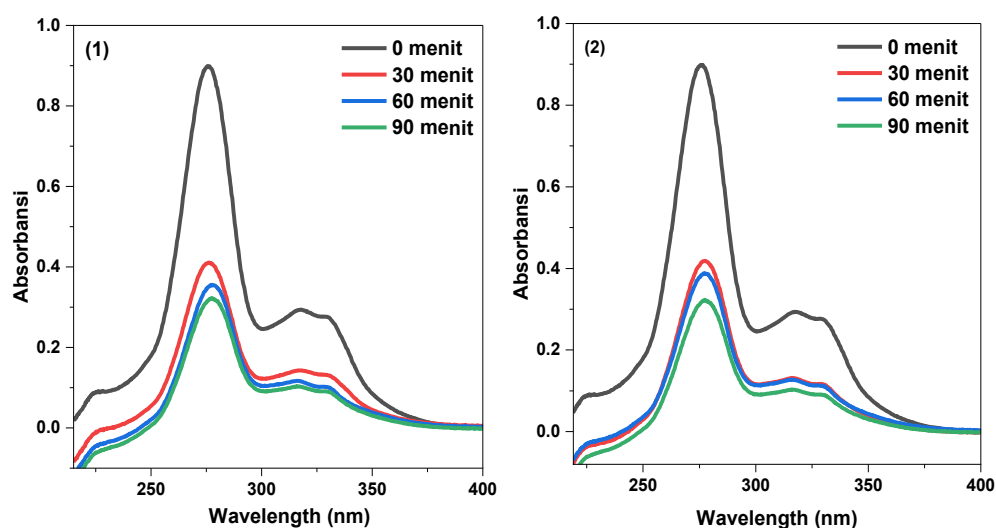
Gambar 4. 12 Grafik hasil uji adsorpsi senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ terhadap larutan ciprofloxacin

Kemampuan senyawa Aurivillius sebagai adsorben telah dibuktikan melalui beberapa penelitian. Bima, dkk., (2024) melaporkan bahwa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ mampu mengadsorpsi ciprofloxacin sebesar 17,61% dalam 30 menit. Selain itu al-Abror, dkk., (2022) juga melaporkan bahwa senyawa $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang merupakan senyawa Aurivillius lapis empat mampu mengadsorpsi *methylene blue* sebesar 8,7% dalam 30 menit.

4.5.5 Uji Adsorpsi-Degradasi Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Terhadap Larutan Ciprofloxacin

Uji degradasi dilakukan untuk menguji aktivitas fotokatalitik senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dalam mendegradasi antibiotik ciprofloxacin. Proses diawali dengan mencampurkan katalis dan larutan ciprofloxacin kemudian diaduk selama 120 menit dalam kondisi gelap (tanpa paparan sinar UV) untuk mencapai kesetimbangan adsorpsi. Setelah itu, campuran dipaparkan menggunakan lampu bohlam LED UV spotlight bulb 80 LEDs 220 V E27 selama

0, 30, 60, dan 90 menit. Hasil uji degradasi ditampilkan pada Gambar 4.13 dan dirangkum pada Tabel 4.5.



Gambar 4. 13 Spektra absorbansi UV-Vis uji aktivitas fotokatalitik, pengulangan (1), dan (2)

Tabel 4. 5 Hasil uji aktivitas fotokatalitik senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ terhadap larutan ciprofloxacin

Waktu (menit)	Pengulangan 1		Pengulangan 2		Standar Deviasi	Rata-rata % Adsorpsi- Degradasi
	Konsentrasi ciprofloxacin (ppm)	Adsorpsi- Degradasi (%)	Konsentrasi ciprofloxacin (ppm)	Adsorpsi- Degradasi (%)		
30	3,12194	58,01	3,18856	57,11	0,0471±	57,56
60	2,63128	64,61	2,92349	60,68	0,2066±	62,64
90	2,3425	68,49	2,33475	68,59	0,0055±	68,54

Berdasarkan Tabel. 4.5, terjadi penurunan konsentrasi ciprofloxacin seiring bertambahnya waktu iradiasi. Rata-rata hasil uji adsorpsi-degradasi adalah sebesar 57,56% pada menit ke-30, 62,64% pada menit ke-60, dan 68,54% pada menit ke-90. Jika dibandingkan dengan hasil uji adsorpsi yang ditunjukkan dalam Tabel 4.6, didapatkan hasil degradasi sebesar 15,92% pada menit ke-30 menit, 12,59% pada menit ke-60 menit, dan 14,46% pada menit ke-90 menit.

Tabel 4. 6 Perbandingan hasil uji adsorpsi dengan uji degradasi

Waktu (menit)	% Adsorpsi	% Adsorpsi-Degradasi	% Degradasi
30	41,64	57,56	15,92
60	50,05	62,64	12,59
90	54,08	68,54	14,46

Hasil adsorpsi yang lebih besar dibandingkan hasil degradasi menunjukkan bahwa proses adsorpsi memberikan kontribusi yang lebih dominan dibandingkan proses fotodegradasi. Artinya, meskipun material fotokatalis berperan dalam menurunkan konsentrasi

ciprofloxacin, sebagian besar ciprofloxacin kemungkinan hanya menempel pada permukaan katalis tanpa mengalami degradasi yang signifikan (Hikmah dan Prasetyo, 2025).

Beberapa faktor yang diduga menyebabkan proses adsorpsi lebih dominan dibandingkan proses fotodegradasi sebagai berikut: 1) Kapasitas adsorpsi yang tinggi menyebabkan banyak molekul ciprofloxacin yang menempel di permukaan katalis. Penumpukan ini dapat membentuk lapisan yang menghalangi cahaya UV untuk menembus permukaan katalis, sehingga reaksi fotokatalitik di bagian dalam tidak berlangsung secara optimal. 2) Adanya aglomerasi (penggumpalan partikel) pada katalis $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ yang menyebabkan berkurangnya luas permukaan aktif yang dapat terkena cahaya. Cahaya UV hanya mampu menyinari bagian luar gumpalan partikel, sementara bagian dalam tidak terjangkau. 3) Lampu LED UV yang digunakan dalam uji adsorpsi-degradasi tidak diketahui panjang gelombangnya secara pasti. Meskipun, panjang gelombang $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ berada pada 388,97 nm yang termasuk rentang cahaya UV tetapi tidak dapat dipastikan apakah cahaya yang dipancarkan menghasilkan intensitas pada panjang gelombang yang sesuai dengan kebutuhan material.

Hasil penelitian ini lebih tinggi dibandingkan penelitian Bima, dkk., (2024), yang melaporkan bahwa senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ mampu mengadsorpsi ciprofloxacin sebesar 17,16% dalam 30 menit dan mendegradasi ciprofloxacin sebesar 35% dalam 90 menit. Mekanisme degradasi ciprofloxacin oleh material fotokatalis $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ adalah ketika sinar UV dipaparkan pada senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ maka terjadi transisi elektronik yang melibatkan perpindahan elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Perpindahan ini membentuk h^+ pada pita konduksi dan e^- pada pita valensi. Selanjutnya h^+ bereaksi dengan $\text{OH}^-/\text{H}_2\text{O}$ sehingga membentuk radikal $\cdot\text{OH}$. Sementara itu e^- bereaksi dengan O_2 akan membentuk radikal $\cdot\text{O}_2^-$. Keberadaan radikal inilah yang selanjutnya akan bereaksi dengan ciprofloxacin sehingga terjadi degradasi pada ciprofloxacin (al-Abror, 2022).

Pencemaran lingkungan akibat limbah antibiotik merupakan permasalahan yang bisa diatasi melalui proses degradasi menggunakan material fotokatalis. Seperti firman Allah dalam al-Quran surat al-Baqarah (2) ayat 26.

﴿ إِنَّ اللَّهَ لَا يَسْتَحْيِي أَنْ يَضْرِبَ مَثَلًا مَّا بَعُوضَةً فَمَا فَوْقَهَا ۚ فَأَمَّا الَّذِينَ آمَنُوا فَيَعْلَمُونَ أَنَّهُ الْحَقُّ مِنْ رَبِّهِمْ ۚ وَأَمَّا الَّذِينَ كَفَرُوا فَيَقُولُونَ مَاذَا أَرَادَ اللَّهُ بِهَذَا مَثَلًا ۚ يُضِلُّ بِهِ كَثِيرًا وَيَهْدِي بِهِ كَثِيرًا ۚ وَمَا يُضِلُّ بِهِ إِلَّا الْفَاسِقِينَ ۚ ﴾

Artinya: “Sesungguhnya Allah tidak segan membuat perumpamaan seekor nyamuk atau lebih kecil dari itu. Adapun orang-orang yang beriman, mereka tahu bahwa itu kebenaran dari Tuhan. Tetapi mereka yang kafir berkata, “Apa maksud Allah dengan perumpamaan ini?” Dengan (perumpamaan) itu banyak orang yang dibiarkan-Nya

sesat, dan dengan itu banyak (pula) orang yang diberi-Nya petunjuk. Tetapi tidak ada yang Dia sesatkan dengan (perumpamaan) itu selain orang-orang fasik” (QS. al Baqarah (2):26).

Pada tafsir Al-Azhar, Hamka, (1992) dijelaskan bahwa *فَمَا فَوْقَهَا* memiliki arti yang lebih kecil dari pada nyamuk adalah sesuatu yang hanya bisa dilihat dengan alat pembesar. Orang-orang yang beriman akan mempercayai perumpamaan tersebut dan diberi petunjuk oleh Allah SWT. untuk mempelajari lebih lanjut sehingga dapat bermanfaat dalam kehidupan. Namun, orang yang berbuat kefasikan akan tersesat oleh apa yang mereka perbuat. Oleh karena itu, perumpamaan tersebut dapat diartikan sebagai unsur-unsur yang membentuk senyawa yang dapat digunakan sebagai material fotokatalis dalam mendegradasi limbah antibiotik.

Bumi dan seisinya diciptakan Allah SWT. untuk memenuhi kebutuhan manusia. Manusia sudah seharusnya memahami konsep ekologi yang baik tentang interaksi makhluk hidup dengan lingkungan, karena apa yang ada di dunia ini akan dikelola untuk dimiliki oleh manusia, seperti firman Allah dalam al-Quran surat al-Baqarah (2) ayat 30.

وَإِذْ قَالَ رَبُّكَ لِلْمَلٰٓئِكَةِ اِنِّیْ جَاعِلٌ فِی الْاَرْضِ خَلِیْفَةًۭ ۚ قَالُوْۤا اَتَجْعَلُ فِیْهَا مَنْ یُّفْسِدُ فِیْهَا وَیَسْفِكُ الدِّمَآءَ وَنَحْنُ نُسَبِّحُ بِحَمْدِكَ وَنُقَدِّسُ لَكَ ۗ قَالَ اِنِّیْۤ اَعْلَمُ مَا لَا تَعْلَمُوْنَ ﴿۳۰﴾

Artinya: *“Dan (ingatlah) ketika Tuhanmu berfirman kepada para malaikat, “Aku hendak menjadikan khalifah di bumi.” Mereka berkata, “Apakah Engkau hendak menjadikan orang yang merusak dan menumpahkan darah di sana, sedangkan kami bertasbih memuji-Mu dan menyucikan nama-Mu” Dia berfirman, “Sungguh, Aku mengetahui apa yang tidak kamu ketahui.” (QS. al-Baqarah (2):30).*

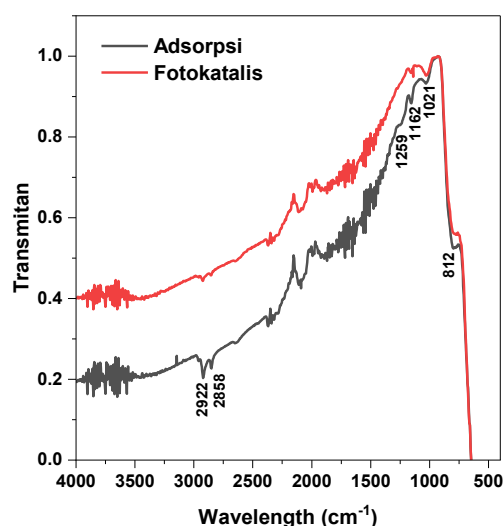
Dalam tafsir Al-Misbah, Shihab, (2002), menjelaskan bahwa Allah SWT. menciptakan segala sesuatu di muka bumi untuk dimanfaatkan oleh manusia. Sesungguhnya terdapat tanda-tanda yang jelas dan banyak bagi kaum yang selalu merenungkan kekuasaan Allah SWT. Keagungan ciptaan Allah SWT. dapat menjadi pelajaran bagi manusia, dan pemahaman tentang hikmah dari setiap ciptaan Allah SWT. dapat membuat manusia memahami bahwa seluruh ciptaan Allah SWT. di muka bumi tidak ada yang sia-sia.

4.6 Analisis Spektrum IR Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Setelah Adsorpsi dan Fotokatalisis

Analisis spektrum *Infrared Spectroscopy* (IR) dilakukan untuk mengidentifikasi keberadaan gugus fungsi dari senyawa ciprofloxacin maupun dari material fotokatalis $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ setelah proses adsorpsi dan fotokatalis. Hingga saat ini, data spektrum IR spesifik untuk senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ belum banyak dilaporkan dalam literatur. Oleh karena itu, pendekatan dilakukan dengan menggunakan spektrum IR senyawa Aurivillius berlapis tiga, $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ yang disintesis menggunakan metode lelehan garam sebagai model referensi.

Berdasarkan data pada spektrum IR $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ terdapat pita serapan pada bilangan gelombang 832 cm^{-1} yang dikaitkan dengan vibrasi ikatan logam-oksigen (Ti-O). Dalam spektrum $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ hasil adsorpsi dan fotokatalis, menunjukkan adanya vibrasi Ti-O pada bilangan gelombang 812 cm^{-1} (Yuan, dkk., 2020).

Sementara itu, spektrum IR ciprofloxacin mengacu pada laporan Sahoo, dkk., (2011) yang ditampilkan pada Gambar 2.2. serapan khas ciprofloxacin teridentifikasi pada beberapa bilangan gelombang, yaitu 1259 cm^{-1} yang menunjukkan vibrasi regangan gugus hidroksil (O-H); 2922 cm^{-1} untuk regangan C-H dari struktur aromatik dan alkena; 1162 cm^{-1} untuk *rocking vibration* metil ($-\text{CH}_3$); serta 1021 cm^{-1} yang mewakili regangan gugus fluor (C-F). Setelah proses adsorpsi dan fotokatalisis, spektrum IR yang ditampilkan pada Gambar 4.14 masih menunjukkan keberadaan pita serapan khas ciprofloxacin, menunjukkan bahwa molekul ciprofloxacin belum terdegradasi dari permukaan katalis. Namun, pada spektrum hasil fotokatalisis, pita 1259 cm^{-1} menghilang, yang menunjukkan bahwa gugus O-H ciprofloxacin kemungkinan mengalami degradasi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa mekanisme adsorpsi masih lebih dominan dibandingkan proses degradasi secara fotokatalitik.



Gambar 4. 14 Spektrum IR $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ setelah adsorpsi dan fotokatalisis

Hal ini sejalan dengan data pada Tabel 4.6, yang menunjukkan bahwa degradasi ciprofloxacin mencapai 15,92% pada menit ke-30; 12,59% pada menit ke-60; dan 14,46% pada menit ke-90. Penurunan konsentrasi yang terjadi secara bertahap menunjukkan bahwa reaksi fotodegradasi belum berlangsung secara maksimal, dan sebagian besar ciprofloxacin kemungkinan masih berada dalam dalam kondisi teradsorpsi.

Proses fotodegradasi idealnya berlangsung melalui pembentukan radikal aktif seperti $\cdot\text{OH}$ dan $\cdot\text{O}_2^-$ akibat eksitasi pasangan elektron-*hole* pada struktur $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (al-Abror, 2022), kemungkinan tidak terjadi secara maksimal. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti aglomerasi partikel dan tidak teridentifikasinya panjang gelombang pasti dari sumber cahaya UV yang digunakan. Meskipun Panjang gelombang $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ adalah 388,97

nm, efektivitas degradasi tetap tidak dapat dipastikan karena karakteristik spektral dari lampu UV tidak diketahui secara spesifik.

Tabel 4. 7 Identifikasi gugus fungsi sampel setelah adsorpsi dan fotokatalisis

Vibrasi	Posisi (cm ⁻¹)	
	Adsorpsi	Fotokatalis
Hidroksil (O-H <i>bending vibration</i>)	1259	-
Aromatik dan Alkena (C-H <i>stretching</i>)	2922	2922
Alifatik (C-H <i>stretching</i>)	2858	2858
Methyl (-CH ₃ <i>rocking vibration</i>)	1162	1162
Fluorin (C-F <i>stretching</i>)	1021	1021
Ti-O <i>stretching vibration</i>	812	812

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dapat diambil kesimpulan adalah sebagai berikut:

- a. Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ berhasil disintesis menggunakan metode lelehan garam NaCl-KCl dan ditemukan fasa pengotor berupa CaCO_3 . Bentuk partikel yang diperoleh dari karakterisasi menggunakan instrumen SEM berupa *plate-like* dan ukuran partikel memiliki rentang 0,68-2,13 μm dengan mayoritas ukuran partikel pada 1,2-1,6 μm . Hasil karakterisasi menggunakan instrumen UV-Vis DRS didapatkan energi celah pita sebesar 3,19 eV.
- b. Hasil uji aktivitas degradasi fotokatalis terhadap ciprofloxacin menggunakan lampu UV, rata-rata memiliki kemampuan mendegradasi sebesar 15,92% pada menit ke-30, 12,59% pada menit ke-60, dan 14,46% pada menit ke-90.

5.2 Saran

Pada uji aktivitas fotokatalitik perlu dilakukan uji pada waktu yang lebih lama serta menggunakan lampu UV yang sesuai dengan panjang gelombang material agar aktivitas fotokatalitik lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, R. 2015. Benarkah Matahari mengelilingi Bumi?. Jakarta: Erlangga.
- Abdurahman, M. H., Abdullah, A. Z., dan 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.
- Agustina, K. R. A., Suheriyanto, D., dan Prasetyo, A. (2020). Sintesis $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ terdoping vanadium dengan metode lelehan garam tunggal NaCl. *Jurnal Kartika Kimia*, 3(1), 19-24.
- Al-Abror, M. L., Hastuti, E., dan Prasetyo, A. (2022). Molten salt synthesis of photocatalyst material $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ for methylene blue degradation. *Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan (Journal of Chemical Engineering and Environment)*, 17(2), 182-189.
- Alam, A., Rahman, W. U., Rahman, Z. U., Khan, S. A., Shah, Z., Shaheen, K., Suo, H, dan 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.
- Amrullah, A. M. A. K. (2003). Tafsir al-azhar. Singapore: Kerjaya Printing Industries, 2.
- Bai, X., Chen, W., Wang, B., Sun, T., Wu, B., dan Wang, Y. (2022). Photocatalytic degradation of some typical antibiotics: Recent advances and future outlooks. *International journal of molecular sciences*, 23(15), 8130.
- Borg, S., Svensson, G., dan Bovin, J. O. (2002). Structure study of $\text{Bi}_{2.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ta}_2\text{O}_9$ and $\text{Bi}_{2.5}\text{Na}_{m-1.5}\text{Nb}_m\text{O}_{3m+3}$ ($m=2-4$) by neutron powder diffraction and electron microscopy. *Journal of solid state chemistry*, 167(1), 86-96.
- Boxi, S. S., dan Paria, S. (2015). Visible light induced enhanced photocatalytic degradation of organic pollutants in aqueous media using Ag doped hollow TiO_2 nanospheres. *RSC Advances*, 5(47), 37657-37668.
- Campoli-Richards, D. M., Monk, J. P., Price, A., Benfield, P., Todd, P. A., dan Ward, A. (1988). Ciprofloxacin: a review of its antibacterial activity, pharmacokinetic properties and therapeutic use. *Drugs*, 35, 373-447.
- Cleuvers, M. (2005). Initial risk assessment for three β -blockers found in the aquatic environment. *Chemosphere*, 59(2), 199-205.
- Dong, P., Xi, X., dan Hou, G. (2016). Typical non- TiO_2 -based visible-light photocatalysts. *Semicond. Photocatal. Mater. Mech. Appl*, 10, 62889.
- Emani, S. R., Joseph, A., dan Raju, K. C. (2016, May). Optical and microwave properties of $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ ferroelectric thin films deposited by pulsed laser deposition. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1731, No. 1). AIP Publishing.
- Fan, M., Wu, G., Yu, F., Li, L., Li, Y., Cheng, X., dan Zhao, X. (2020). Spontaneous growth of $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ piezoelectric crystal using mixed flux agents. *Crystals*, 10(8), 698.
- Febriani, A., Umara, S. A., Nursa'adah, E., dan Firdaus, M. L. (2022). Kapasitas adsorpsi zat warna malachite green dan violet dye menggunakan metal organic frameworks (Fe-BDC). *Hydrogen: Jurnal Kependidikan Kimia*, 10(2), 61-72.

- Ferreira, W. C., Rodrigues, G. L. C., Araujo, B. S., de Aguiar, F. A. A., de Abreu Silva, A. N. A., Fechine, P. B. A., Paschoal, C. W. A., dan Ayala, A. P. (2020). Pressure-induced structural phase transitions in the multiferroic four-layer Aurivillius ceramic $\text{Bi}_5\text{FeTi}_3\text{O}_{15}$. *Ceramics International*, 46(11), 18056-18062.
- Haikal, F., dan 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: Jurnal Ilmu Kimia dan Terapan*, 8(1), 37-41.
- Hassaan, M. A., El-Nemr, M. A., Elkatory, M. R., Ragab, S., Niculescu, V. C., dan 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., dan 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, 35-43.
- He, R., Xu, D., Cheng, B., Yu, J., dan Ho, W. (2018). Review on nanoscale Bi-based photocatalysts. *Nanoscale Horizons*, 3(5), 464-504.
- Hikmah, N., dan Prasetyo, A. (2025). Adsorption-photocatalysis Synergy of $\text{Bi}_4\text{Ti}_{2.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_{12}$ For Ciprofloxacin Removal. *Jurnal Neutrino: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 17(2).
- Hou, J., Kumar, R. V., Qu, Y., dan Krsmanovic, D. (2010). Controlled synthesis of photoluminescent $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ nanoparticles from metal-organic polymeric precursor. *Journal of Nanoparticle Research*, 12, 563-571.
- Jassby, D., Farner Budarz, J., & Wiesner, M. (2012). Impact of aggregate size and structure on the photocatalytic properties of TiO_2 and ZnO nanoparticles. *Environmental science & technology*, 46(13), 6934-6941.
- Johansson, C. H., Janmar, L., dan Backhaus, T. (2014). Toxicity of ciprofloxacin and sulfamethoxazole to marine periphytic algae and bacteria. *Aquatic toxicology*, 156, 248-258.
- Kan, Y., Jin, X., Wang, P., Li, Y., Cheng, Y. B., dan Yan, D. (2003). Anisotropic grain growth of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ in molten salt fluxes. *Materials Research Bulletin*, 38(4), 567-576.
- Ke, X., Cao, J., Zheng, M., Chen, Y., Liu, J., dan Ji, G. (2007). Molten salt synthesis of single-crystal Co_3O_4 nanorods. *Materials Letters*, 61(18), 3901-3903.
- Kim, C. Y., Sekino, T., dan Niihara, K. (2003). Synthesis of bismuth sodium titanate nanosized powders by solution/sol-gel process. *Journal of the American Ceramic Society*, 86(9), 1464-1467.
- Kimura, T. (2011). Molten salt synthesis of ceramic powders. *Advances in ceramics-synthesis and characterization, processing and specific applications*, 75-100.
- Kojin, H. 2020. Telaah Tafsir Al-Muyassar Jilid II (juz 6-10). Malang: Inteligensi Media.
- Kojin, H. 2020. Telaah Tafsir Al-Muyassar Jilid III (juz 11-15). Malang: Inteligensi Media
- Kojin, H. 2019. Telaah Tafsir Al-Muyassar Jilid V (juz 21-25). Malang: Inteligensi Media.
- Kojin, H. 2019. Telaah Tafsir Al-Muyassar Jilid VI (juz 26-30). Malang: Inteligensi Media.

- Kuchibhotla, A., Banerjee, D., dan Dhir, V. (2020). Forced convection heat transfer of molten Salts: A review. *Nuclear Engineering and Design*, 362, 110591.
- Kushwaha, H. S., Halder, A., Jain, D., dan Vaish, R. (2015). Visible light-induced photocatalytic and antibacterial activity of Li-doped $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.45}\text{K}_{0.05}\text{TiO}_3\text{--BaTiO}_3$ ferroelectric ceramics. *Journal of Electronic Materials*, 44, 4334-4342.
- Lazarevic, Z., Stojanovic, B. D., dan Varela, J. A. 2005. An Approach to Analyzing Synthesis, Structure and Properties of Bismuth Titanate Ceramics. *Science of Sintering*, 37(3), 199–216.
- Li, X., Zhu, C., Song, Y., Du, D., dan Lin, Y. (2017). Solvent co-mediated synthesis of ultrathin BiOCl nanosheets with highly efficient visible-light photocatalytic activity. *RSC advances*, 7(17), 10235-10241.
- Ma, M., Jin, G., Zhang, D., dan Zheng, Q. (2015, November). Study on the textured $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ ceramics with Sc Modification. In *2015 International Symposium on Material, Energy and Environment Engineering* (pp. 166-169). Atlantis Press.
- Muñoz, I., Gómez, M. J., Molina-Díaz, A., Huijbregts, M. A., Fernández-Alba, A. R., dan García-Calvo, E. (2008). Ranking potential impacts of priority and emerging pollutants in urban wastewater through life cycle impact assessment. *Chemosphere*, 74(1), 37-44.
- Pan, M., dan Chu, L. M. (2018). Occurrence of antibiotics and antibiotic resistance genes in soils from wastewater irrigation areas in the Pearl River Delta region, southern China. *Science of the total environment*, 624, 145-152.
- Pookmanee, P., Uriwilast, P., dan Phanichpant, S. (2004). Hydrothermal synthesis of fine bismuth titanate powders. *Ceramics International*, 30(7), 1913-1915.
- Porob, D. G., dan Maggard, P. A. (2006). Synthesis of textured $\text{Bi}_5\text{Ti}_3\text{FeO}_{15}$ and $\text{LaBi}_4\text{Ti}_3\text{FeO}_{15}$ ferroelectric layered Aurivillius phases by molten-salt flux methods. *Materials research bulletin*, 41(8), 1513-1519.
- Prasetyo, A., Saputra, B. A., Aeni, S. Q., dan Hikmah, N. (2024, December). Removal Ciprofloxacin Through Adsorption-Photocatalyst Properties of $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. In *Proceedings of the International Conference on Green Technology* (Vol. 14, No. 1).
- Sahoo, S., Chakraborti, C. K., dan Behera, P. K. (2012). Spectroscopic investigations of a ciprofloxacin/hpmc mucoadhesive suspension. *Int. J. Appl. Pharm*, 4(3), 1-8.
- Senasu, T., Youngme, S., Hemavibool, K., dan Nanan, S. (2021). Sunlight-driven photodegradation of oxytetracycline antibiotic by BiVO_4 photocatalyst. *Journal of Solid State Chemistry*, 297, 122088.
- Sharma, V. K. (2008). Oxidative transformations of environmental pharmaceuticals by Cl_2 , ClO_2 , O_3 , and Fe (VI): kinetics assessment. *Chemosphere*, 73(9), 1379-1386.
- Shihab, M. Q. 2002. Tafsir Al-Misbah: Pesan, Kesan, dan Keserasian Al-Quran Volume 1. Jakarta: Lentera Hati.
- Shihab, M. Q. (2002). Tafsir al-misbah: Pesan, Kesan, dan Keserasian Al-Quran Volume 5. Jakarta: lentera hati.
- Shihab, M. Q. (2002). Tafsir al-misbah: Pesan, Kesan, dan Keserasian Al-Quran Volume 6. Jakarta: lentera hati

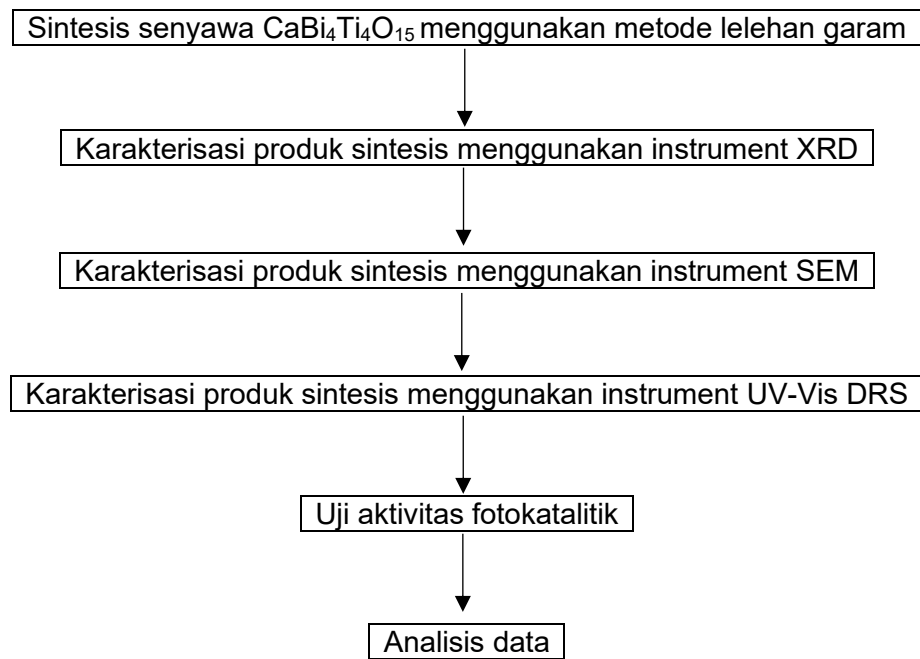
- Sim, M. H., Xue, J. M., dan Wang, J. (2004). Layer structured calcium bismuth titanate by mechanical activation. *Materials Letters*, 58(14), 2032-2036.
- Suhartati, T. (2017). Dasar-dasar spektrofotometri UV-Vis dan spektrometri massa untuk penentuan struktur senyawa organik. *Lampung: Anugrah Utama Raharja*.
- Tu, S., Zhang, Y., Reshak, A. H., Auluck, S., Ye, L., Han, X., Ma, T., dan Huang, H. (2019). Ferroelectric polarization promoted bulk charge separation for highly efficient CO₂ photoreduction of SrBi₄Ti₄O₁₅. *Nano Energy*, 56, 840-850.
- Wang, D., Qi, M., Yang, Q., Tong, R., Wang, R., Bligh, S. A., Yang, L., dan Wang, Z. (2016). Comprehensive metabolite profiling of Plantaginis Semen using ultra high performance liquid chromatography with electrospray ionization quadrupole time-of-flight tandem mass spectrometry coupled with elevated energy technique. *Journal of Separation Science*, 39(10), 1842-1852.
- Wang, Q., Wang, P., dan Yang, Q. (2018). Occurrence and diversity of antibiotic resistance in untreated hospital wastewater. *Science of the Total Environment*, 621, 990-999.
- Wendari, T. P., Arief, S., Mufti, N., Baas, J., dan Blake, G. R. (2020). Ratio effect of salt fluxes on structure, dielectric and magnetic properties of La, Mn-doped PbBi₂Nb₂O₉ Aurivillius phase. *Ceramics International*, 46(10), 14822-14827.
- Xiang, L., Chen, L., Mo, C. H., Zheng, L. M., Yu, Z. X., Li, Y. W., Cai, Q. Y., Li, H., Yang, W. D., Zhou, D. M., dan Wong, M. H. (2018). Facile synthesis of Ni-doping Bi₂WO₆ nano-sheets with enhanced adsorptive and visible-light photocatalytic performances. *Journal of materials science*, 53(10), 7657-7671.
- Xue, P., Wu, H., Lu, Y., dan Zhu, X. (2018). Recent progress in molten salt synthesis of low-dimensional perovskite oxide nanostructures, structural characterization, properties, and functional applications: a review. *Journal of Materials Science & Technology*, 34(6), 914-930.
- Yang, X., Chen, Z., Zhao, W., Liu, C., Qian, X., Zhang, M., Wei, G., Khan, E., Ng, Y. H., dan Ok, Y. S. (2021). Recent advances in photodegradation of antibiotic residues in water. *Chemical Engineering Journal*, 405, 126806.
- Yuan, G., Zhang, G., Li, K., Li, F., Cao, Y., He, J., Huang, Z., Jia, Q., Zhang, S., dan Zhang, H. (2020). Preparation and photocatalytic performance for degradation of rhodamine B of AgPt/Bi₄Ti₃O₁₂ composites. *Nanomaterials*, 10(11), 2206.
- Yu, M., Pu, Q., Liao, X., Yu, H., Lin, S., Li, Z., Yu, C., Wang, H., dan Zhong, X. (2021). Controllable synthesis of bismuth tungstate photocatalysts with different morphologies for degradation of antibiotics under visible-light irradiation. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(13), 17848-17864.
- Zhang, G., Liu, G., Wang, L., dan Irvine, J. T. (2016). Inorganic perovskite photocatalysts for solar energy utilization. *Chemical Society Reviews*, 45(21), 5951-5984.
- Zhao, Z., Li, X., Ji, H., dan Deng, M. (2014). Formation mechanism of plate-like Bi₄Ti₃O₁₂ particles in molten salt fluxes. *Integrated Ferroelectrics*, 154(1), 154-158.
- Zulhadjri, Z., Billah, A. A., Wendari, T. P., Emriadi, U. S., dan Arief, S. (2020). Synthesis of Aurivillius phase CaBi₄Ti₄O₁₅ doped with both La³⁺ and Mn³⁺ cations: Crystal structure and dielectric properties. *Materials Research*, 23(2), e20190521.
- Zulhadjri, Wendari, T. P., Ramadhani, R., Putri, Y. E., dan Imelda (2021). La³⁺ substitution induced structural transformation in CaBi₄Ti₄O₁₅ Aurivillius phases: Synthesis,

morphology, dielectric and optical properties. *Ceramics International*, 47(16), 23549-23557.

Zuniga, J. P., Abdou, M., Gupta, S. K., dan Mao, Y. (2018). Molten-salt synthesis of complex metal oxide nanoparticles. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, (140), e58482.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Rancangan Penelitian



Lampiran 2 Diagram Alir

L.2.1 Preparasi Bahan

Material fotokatalis Bi_2O_3 ; CaCO_3 dan Ti_2O_3 dengan perbandingan mol 1:1

- ditimbang material fotokatalis sesuai dengan perhitungan stoikiometri
- dimasukkan ke dalam mortar agate
- dihomogenkan dengan mortar agate selama 45 menit dan ditambahkan aseton selama proses penggerusan

Hasil

L.2.2 Sintesis $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ dengan Metode Lelehan Garam

Sampel dan garam dengan perbandingan mol 1:7

- Dicampurkan dengan garam sesuai dengan perhitungan stoikiometri
- dihomogenkan dengan mortar agate selama 45 menit
- dikalsinasi pada suhu 750, dan 820°C selama 6 jam
- dikeluarkan dari tanur dan didinginkan pada suhu ruang
- diletakkan di atas kertas saring dan disaring
- dicuci menggunakan akuades panas secara berulang-ulang hingga kandungan garam hilang
- dianalisis kandungan garam pada produk menggunakan tetapan AgNO_3
- dikeringkan di dalam oven pada suhu 90°C selama 3 jam

Hasil

L.2.3 Karakterisasi dan Analisis Data Hasil Sintesis dengan XRD

Sampel

- diletakkan dalam sample holder
- dianalisa pada rentang 2θ ($^\circ$) = 10-90° menggunakan radiasi Cu K α (40 kV dan 30 mA)
- dibandingkan dengan database *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS)

Hasil

L.2.4 Karakterisasi dan Analisis Data Hasil Sintesis dengan SEM

Sampel

- diletakkan dalam sample holder
- dianalisa dengan rentang perbesaran 7.000, 10.000, dan 15.000 kali
- dianalisa ukuran partikel menggunakan perangkat lunak *Image-J*

Hasil

L.2.5 Karakterisasi dan Analisis Data Hasil Sintesis dengan Spektroskopi UV-Vis DRS

Sampel

- diletakkan dalam sample holder
- diukur presentase reflektansinya pada 200–800 nm
- dianalisa menggunakan persamaan Kubelka-Munk

Hasil

L.2.6 Uji Fotokatalis Sintesis dengan Spektroskopi UV-Vis

L.2.6.1 Pembuatan Larutan Induk Ciprofloxacin 500 ppm

100 mL Ciprofloxacin 50 ppm

- Diambil larutan ciprofloxacin sebanyak 2,5 mL
- dimasukkan ke dalam labu ukur 100 mL dan ditandabatkan
- dihomogenkan

Hasil

L.2.6.2 Pembuatan Kurva Standar Ciprofloxacin

100 mL Ciprofloxacin dengan konsentrasi 2; 3; 4; 5; 6; 7; dan 8 ppm

- diambil larutan induk ciprofloxacin sebanyak 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 mL
- dimasukkan ke dalam labu ukur 100 mL dan ditandabatkan
- dihomogenkan
- diukur absorbansinya dengan spektroskopi UV-Vis

Hasil

L.2.6.3 Uji Kestabilan Ciprofloxacin Tanpa Radiasi Sinar UV

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

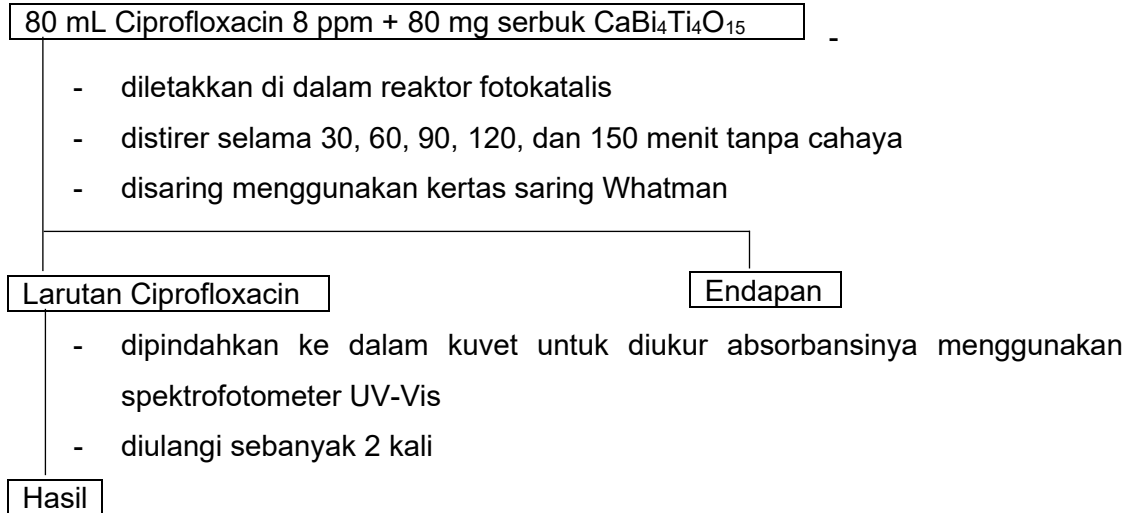
L.2.6.4 Uji Kestabilan Ciprofloxacin Terpapar Radiasi Sinar UV

100 mL Larutan Ciprofloxacin 8 ppm

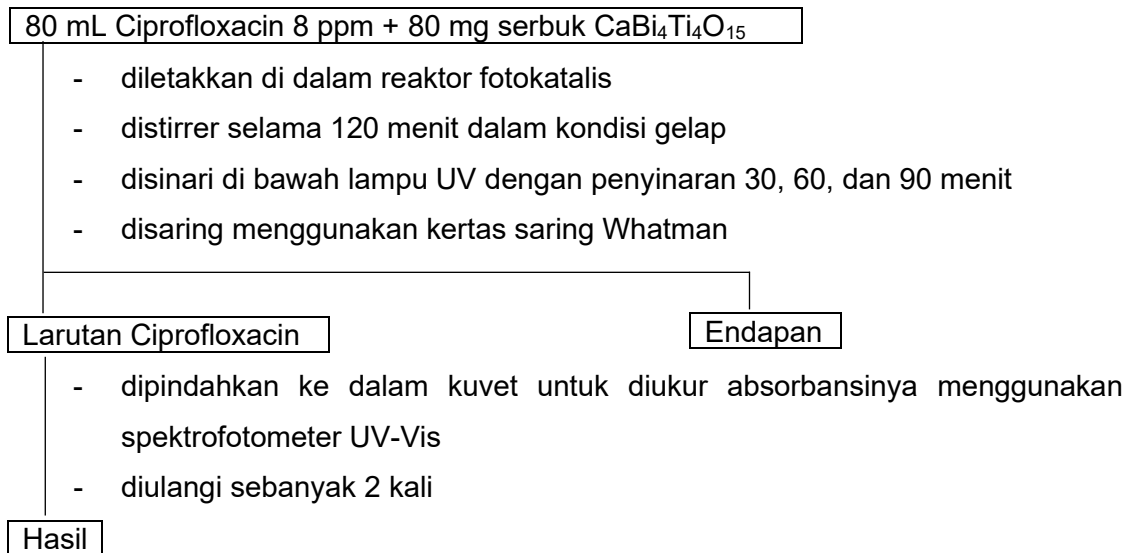
- diletakkan dalam reaktor fotokatalis
- diuji selama 120 menit dengan sinar UV
- diukur absorbansinya menggunakan spektroskopi UV-Vis
- diulangi sebanyak 3 kali

Hasil

L.2.6.5 Uji Kemampuan Adsorpsi Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$



L.2.6.6 Uji Aktivitas Fotokatalis dalam Degradasi Ciprofloxacin



Lampiran 3 Perhitungan

L.3.1 Sintesis Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Menggunakan Metode Lelehan Garam

Diketahui:

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

Mr CaCO_3	= 100, 087 gr/mol
Mr Bi_2O_3	= 465, 96 gr/mol
Mr TiO_2	= 79, 867 gr/mol
Mr NaCl	= 58,443 gr/mol
Mr KCl	= 74, 551 gr/mol
Mr $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	= 1307, 4526 gr/mol
Ar Ca	= 40, 078 gr/mol
Ar Bi	= 208, 904 gr/mol
Ar Ti	= 47, 867 gr/mol
Ar C	= 12, 009 gr/mol
Ar O	= 16 gr/mol

Persamaan reaksi:



$$\begin{aligned} \text{Mol } \text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15} &= \frac{\text{massa } \text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}}{\text{Mr } \text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}} \\ &= \frac{4 \text{ gram}}{1307,4526 \text{ gram/mol}} \\ &= 0,003059 \text{ mol} \end{aligned}$$

- CaCO_3

$$\begin{aligned} \text{Mol } \text{CaCO}_3 &= 1 \times \text{Mol } \text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15} \\ &= 1 \times 0,003059 \text{ mol} \\ &= 0,003059 \text{ mol} \\ \text{Massa } \text{CaCO}_3 &= \text{Mol } \text{CaCO}_3 \times \text{Mr } \text{CaCO}_3 \\ &= 0,003059 \text{ mol} \times 100,087 \text{ gr/mol} \\ &= 0,3061 \text{ gram} \end{aligned}$$

- Bi_2O_3

$$\begin{aligned} \text{Mol } \text{Bi}_2\text{O}_3 &= 2 \times \text{Mol } \text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15} \\ &= 2 \times 0,003059 \text{ mol} \\ &= 0,00611 \text{ mol} \\ \text{Massa } \text{Bi}_2\text{O}_3 &= \text{Mol } \text{Bi}_2\text{O}_3 \times \text{Mr } \text{Bi}_2\text{O}_3 \\ &= 0,00611 \text{ mol} \times 465,96 \text{ gr/mol} \\ &= 2,8470 \text{ gram} \end{aligned}$$

- TiO_2

$$\begin{aligned}
 \text{Mol TiO}_2 &= 4 \times \text{Mol CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15} \\
 &= 4 \times 0,003059 \text{ mol} \\
 &= 0,01223 \text{ mol}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Massa TiO}_2 &= \text{Mol TiO}_2 \times \text{Mr TiO}_2 \\
 &= 0,01223 \text{ mol} \times 79,867 \text{ gr/mol} \\
 &= 0,9767 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

- NaCl

$$\begin{aligned}
 \text{Mol NaCl} &= 7 \times \text{Mol CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15} \\
 &= 7 \times 0,003059 \text{ mol} \\
 &= 0,02141 \text{ mol}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Massa NaCl} &= \text{Mr NaCl} \times \text{Mol NaCl} \\
 &= 58,443 \text{ gr/mol} \times 0,02141 \text{ mol} \\
 &= 1,2512 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

- KCl

$$\begin{aligned}
 \text{Mol KCl} &= 7 \times \text{Mol CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15} \\
 &= 7 \times 0,003059 \text{ mol} \\
 &= 0,02141 \text{ mol}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Massa KCl} &= \text{Mr KCl} \times \text{Mol KCl} \\
 &= 74,551 \text{ gr/mol} \times 0,02141 \text{ mol} \\
 &= 1,5961 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

L.3.2 Uji Aktivitas Fotokatalitik

L.3.2.1 Uji Kestabilan Larutan Ciprofloxacin

Persamaan regresi linier

$$y = 0.1128x + 0.0588$$

a. Kondisi gelap (tidak teradiasi lampu UV)

Pengulangan	Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi (ppm)
1	0	0.86091	7.1109
	120	0.82234	6.7689
2	0	0.86091	7.1109
	120	0.83331	6.8622
3	0	0.86091	7.1109
	120	0.85439	7.0531

Konsentrasi

Pengulangan 1

0 menit $y = 0.1128x + 0.0588$
 $0.86091 = 0.1128x + 0.0588$
 $x = 7.1109$

120 menit $y = 0.1128x + 0.0588$
 $0.82234 = 0.1128x + 0.0588$
 $x = 6.7689$

Pengulangan 2

0 menit $y = 0.1128x + 0.0588$
 $0.86091 = 0.1128x + 0.0588$
 $x = 7.1109$

120 menit $y = 0.1128x + 0.0588$
 $0.83331 = 0.1128x + 0.0588$
 $x = 6.8622$

Pengulangan 3

0 menit $y = 0.1128x + 0.0588$
 $0.86091 = 0.1128x + 0.0588$
 $x = 7.1109$

120 menit $y = 0.1128x + 0.0588$
 $0.85439 = 0.1128x + 0.0588$
 $x = 7.0531$

b. Kondisi terang (teradiasi lampu UV)

Pengulangan	Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi (ppm)
1	0	0.85199	7.0318
	120	0.83813	6.9089
2	0	0.85199	7.0318
	120	0.83558	6.8863
3	0	0.85199	7.0318
	120	0.84052	6.9301

Konsentrasi**Pengulangan 1**

0 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.85199 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 7.0318$$

120 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.83813 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 6.9089$$

Pengulangan 2

0 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.85199 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 7.0318$$

120 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.83558 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 6.8863$$

Pengulangan 3

0 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.85199 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 7.0318$$

120 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.84052 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 6.9301$$

L.3.2.2 Uji Adsorpsi Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

Persamaan regresi linier

$$y = 0.1128x + 0.0588$$

Konsentrasi dan % Adsorpsi

Pengulangan 1

Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi (ppm)	Adsorpsi (%)
0	0.83956	6.92165	-
30	0.46762	3.62426	47.63
0	0.86653	7.16069	-
60	0.42268	3.2259	54.94
0	0.87815	7.26371	-
90	0.39762	3.00371	58.64
120	0.37492	2.80251	61.42
150	0.4622	3.57624	50.76

0 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.83956 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 6.92165$$

30 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.46762 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 3.62426$$

$$\begin{aligned} \% \text{ adsorpsi} &= \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100\% \\ &= \frac{6.92165 - 3.62426}{6.92165} \times 100\% \\ &= 47.63\% \end{aligned}$$

0 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.86653 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 7.16069$$

60 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.42268 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 3.2259$$

$$\begin{aligned} \% \text{ adsorpsi} &= \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100\% \\ &= \frac{7.16069 - 3.2259}{7.16069} \times 100\% \end{aligned}$$

$$= 54,94\%$$

0 menit

$$y = 0.1128x + 0.0588$$

$$0.87815 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 7.26371$$

90 menit

$$y = 0.1128x + 0.0588$$

$$0.39762 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 3.00371$$

% adsorpsi

$$= \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100\%$$

$$= \frac{7.26371 - 3.00371}{7.26371} \times 100\%$$

$$= 58,64\%$$

0 menit

$$y = 0.1128x + 0.0588$$

$$0.87815 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 7.26371$$

120 menit

$$y = 0.1128x + 0.0588$$

$$0.37492 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 2.80251$$

% adsorpsi

$$= \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100\%$$

$$= \frac{7.26371 - 2.80251}{7.26371} \times 100\%$$

$$= 61,42\%$$

0 menit

$$y = 0.1128x + 0.0588$$

$$0.87815 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 7.26371$$

150 menit

$$y = 0.1128x + 0.0588$$

$$0.4622 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 3.57624$$

% adsorpsi

$$= \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100\%$$

$$= \frac{7.26371 - 3.57624}{7.26371} \times 100\%$$

$$= 50,76\%$$

Konsentrasi dan % Adsorpsi**Pengulangan 2**

Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi (ppm)	Adsorpsi (%)
0	0.83956	6.92165	-
30	0.56131	4.45488	35.64
0	0.86653	7.16069	-
60	0.5019	3.92816	45.14
0	0.87815	7.26371	-
90	0.47252	3.66769	49.51
120	0.41441	3.15255	56.60
150	0.41531	3.16051	56.49

0 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.83956 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 6.92165$$

30 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.56131 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 4.45488$$

$$\begin{aligned} \% \text{ adsorpsi} &= \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100\% \\ &= \frac{6.92165 - 4.45488}{6.92165} \times 100\% \\ &= 35,64\% \end{aligned}$$

0 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.86653 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 7.16069$$

60 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.5019 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 3.92816$$

$$\begin{aligned} \% \text{ adsorpsi} &= \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100\% \\ &= \frac{7.16069 - 3.92816}{7.16069} \times 100\% \\ &= 45,14\% \end{aligned}$$

0 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.87815 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 7.26371$$

58

90 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.47252 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 3.66769$$

% adsorpsi $= \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100\%$

$$= \frac{7.26371 - 3.66769}{7.26371} \times 100\%$$

$$= 49,51\%$$

0 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.87815 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 7.26371$$

120 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.41441 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 3.66769$$

% adsorpsi $= \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100\%$

$$= \frac{7.26371 - 3.66769}{7.26371} \times 100\%$$

$$= 56,60\%$$

0 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.87815 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 7.26371$$

150 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.41531 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 3.16051$$

% adsorpsi $= \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100\%$

$$= \frac{7.26371 - 3.16051}{7.26371} \times 100\%$$

$$= 56,49\%$$

L.3.2.3 Uji Degradasi Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Terhadap Larutan Ciprofloxacin

Persamaan regresi linier

$$y = 0.1128x + 0.0588$$

Konsentrasi dan % Degradasi

Pengulangan 1

Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi (ppm)	Degradasi (%)
0	0.89739	7.43426	-
30	0.41096	3.12194	58,01
60	0.35561	2.63128	64,61
90	0.32303	2.3425	68,49

0 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.89739 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 7.43426$$

30 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.41096 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 3.12194$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Degradasi} &= \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \\ &= \frac{7.43426 - 3.12194}{7.43426} \times 100\% \\ &= 58,01\% \end{aligned}$$

0 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.89739 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 7.43426$$

60 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.35561 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 2.63128$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Degradasi} &= \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \\ &= \frac{7.43426 - 2.63128}{7.43426} \times 100\% \\ &= 64,61\% \end{aligned}$$

0 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.89739 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 7.43426$$

60

90 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.32303 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 2.3425$$

$$\begin{aligned}\% \text{ Degradasi} &= \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100\% \\ &= \frac{7.43426 - 2.3425}{7.43426} \times 100\% \\ &= 68,49\%\end{aligned}$$

Konsentrasi dan % Degradasi

Pengulangan 2

Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi (ppm)	Degradasi (%)
0	0.89739	7.43426	-
30	0.41847	3.18856	57,11
60	0.38857	2.92349	60,68
90	0.32216	2.33475	68,59

0 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.89739 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 7.43426$$

30 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.41847 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 3.18856$$

$$\begin{aligned}\% \text{ Degradasi} &= \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100\% \\ &= \frac{7.43426 - 3.18856}{7.43426} \times 100\% \\ &= 57,11\%\end{aligned}$$

0 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.89739 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 7.43426$$

60 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.38857 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 2.92349$$

$$\begin{aligned}\% \text{ Degradasi} &= \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100\% \\ &= \frac{7.43426 - 2.92349}{7.43426} \times 100\%\end{aligned}$$

$$= 60,68\%$$

0 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.89739 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 7.43426$$

90 menit $y = 0.1128x + 0.0588$

$$0.32216 = 0.1128x + 0.0588$$

$$x = 2.33475$$

% Degradasi $= \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100\%$

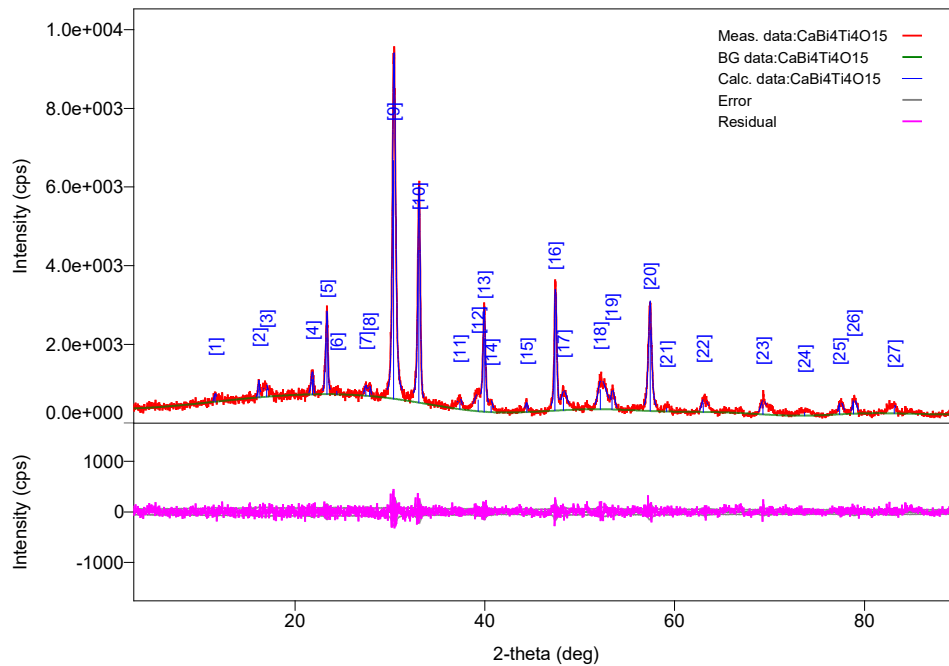
$$= \frac{7.43426 - 2.33475}{7.43426} \times 100\%$$

$$= 68,59\%$$

Lampiran 4 Hasil Karakterisasi Menggunakan XRD

L.4.1 Data Difraksi Sinar-X Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

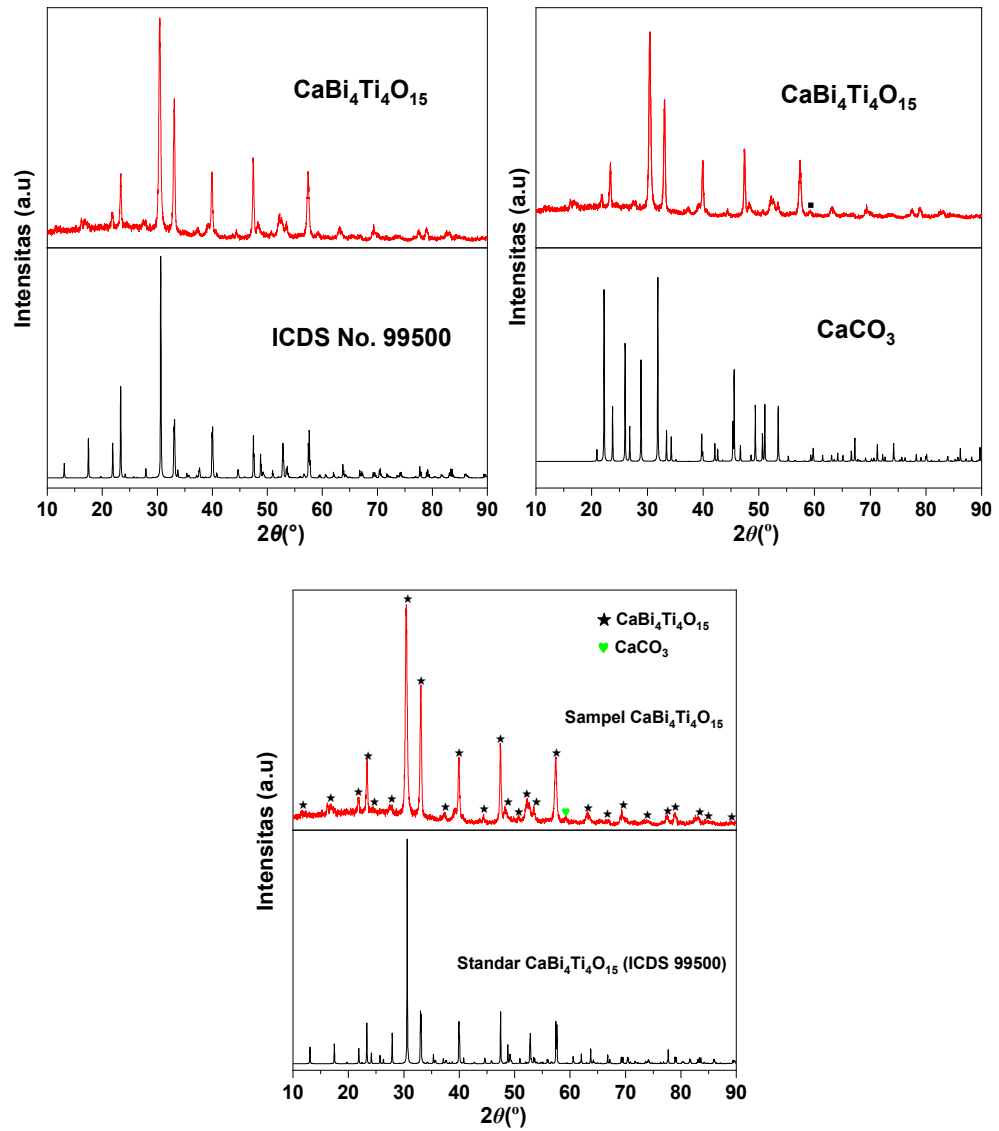
L.4.1.1 Pola Difraksi Sinar-X dan Daftar Puncak Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$



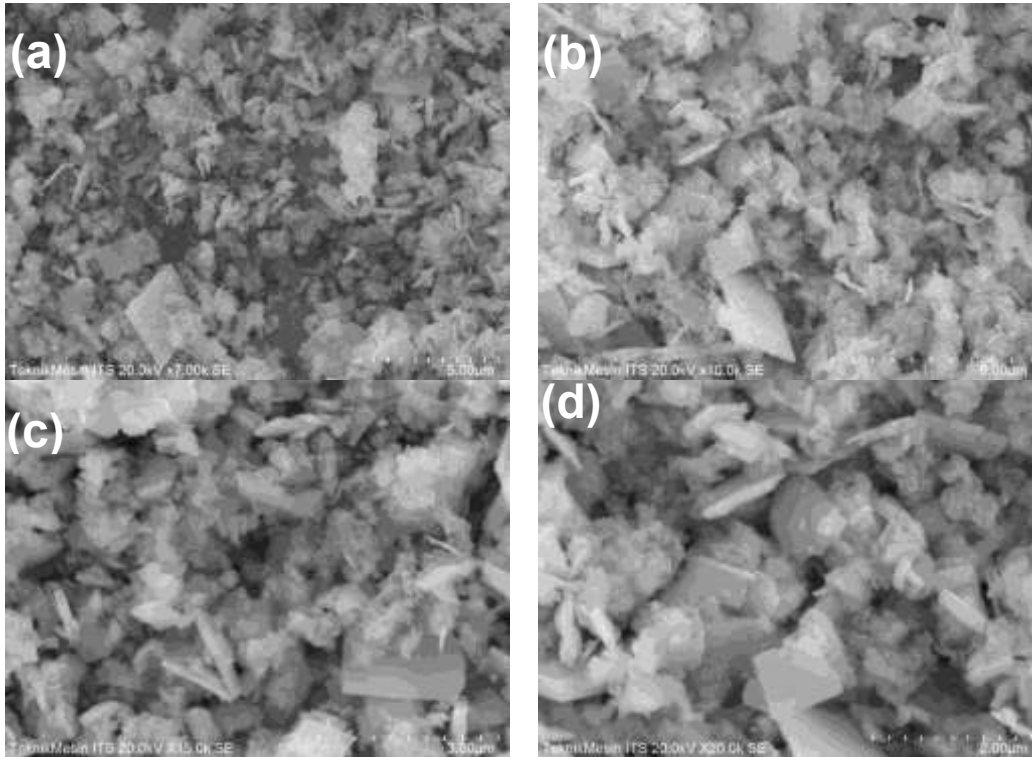
L.3.1.1 Tabel Data Difraksi Sinar-X Senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Int. W(deg)	Asym. factor
1	11.60(3)	7.623(18)	144(35)	0.30(5)	71(8)	0.49(18)	0.9(3)
2	16.206(12)	5.465(4)	282(48)	0.18(3)	67(12)	0.24(8)	2.8(9)
3	17.02(4)	5.207(11)	198(41)	0.60(8)	159(17)	0.8(2)	2.8(9)
4	21.83(3)	4.067(5)	383(56)	0.29(2)	129(11)	0.34(8)	1.6(6)
5	23.376(11)	3.8025(18)	1437(109)	0.259(9)	474(12)	0.33(3)	2.1(5)
6	24.41(5)	3.644(7)	83(26)	0.57(14)	60(11)	0.7(4)	2.1(5)
7	27.45(5)	3.246(5)	156(36)	0.25(6)	45(19)	0.29(19)	2(2)
8	27.86(7)	3.200(7)	163(37)	0.36(14)	69(21)	0.4(2)	2(2)
9	30.401(6)	2.9378(6)	6061(225)	0.378(5)	2953(24)	0.49(2)	0.84(5)
10	33.052(7)	2.7081(5)	3877(180)	0.287(5)	1419(16)	0.37(2)	1.12(11)
11	37.36(3)	2.4049(19)	176(38)	0.56(6)	134(9)	0.8(2)	1.6(4)
12	39.30(4)	2.291(2)	291(49)	0.79(7)	313(28)	1.1(3)	1.6(4)
13	39.936(12)	2.2557(6)	1855(124)	0.265(10)	672(29)	0.36(4)	1.6(4)
14	40.68(2)	2.2162(11)	150(35)	0.31(6)	63(9)	0.42(16)	1.6(4)
15	44.411(16)	2.0382(7)	180(39)	0.25(8)	81(8)	0.45(14)	3(4)
16	47.390(8)	1.9168(3)	2569(146)	0.221(10)	768(16)	0.30(2)	0.65(11)
17	48.27(3)	1.8837(11)	323(52)	0.66(5)	289(14)	0.89(19)	0.65(11)
18	52.178(11)	1.7516(3)	499(64)	1.01(4)	570(19)	1.14(18)	0.50(9)
19	53.392(12)	1.7146(4)	308(51)	0.37(3)	129(10)	0.42(10)	0.50(9)
20	57.422(10)	1.6035(3)	2058(131)	0.348(14)	1009(14)	0.49(4)	2.3(4)
21	59.16(13)	1.560(3)	87(27)	0.46(9)	43(10)	0.5(3)	1.0(11)
22	63.00(6)	1.4742(12)	240(45)	0.72(5)	194(14)	0.8(2)	0.50(18)
23	69.30(4)	1.3547(7)	262(47)	0.71(5)	306(14)	1.2(3)	0.82(15)
24	73.69(5)	1.2846(7)	85(27)	1.30(15)	149(14)	1.8(7)	1.0(6)
25	77.39(4)	1.2321(5)	233(44)	0.46(5)	135(8)	0.58(14)	0.6(2)
26	78.84(3)	1.2131(4)	301(50)	0.40(4)	150(7)	0.50(11)	0.6(2)
27	83.13(3)	1.1610(3)	148(35)	0.88(8)	145(14)	1.0(3)	5(4)

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

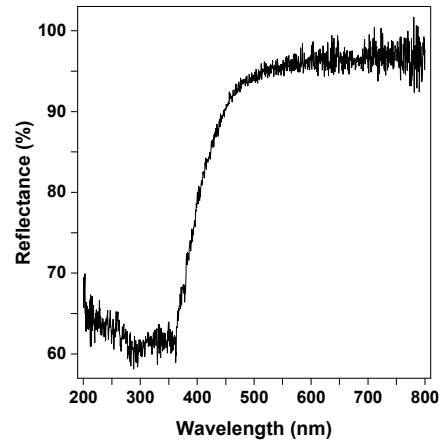


Gambar L.4.1 Difraktogram $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

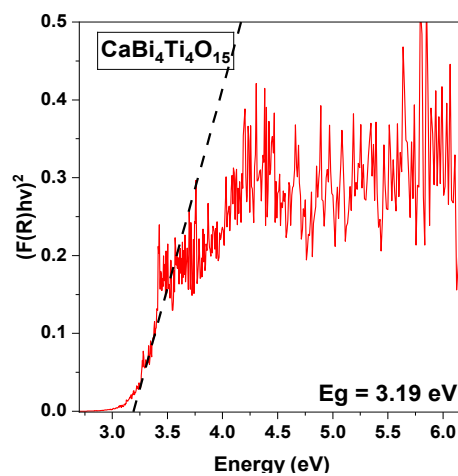
Lampiran 5 Hasil Karakterisasi Menggunakan SEM

Gambar L5.1 Morfologi $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ pada perbesaran (a) 5000x, (b) 10000x, (c) 15000x, dan (d) 20000x

Lampiran 6 Hasil Karakterisasi Menggunakan UV-Vis DRS



Gambar L.6.1 Spektra reflaktansi senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$



Gambar L.6.1 Spektra DRS energi celah pita $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

Diketahui:

$E_g = 3,19 \text{ eV}$

Ditanya: λ ?

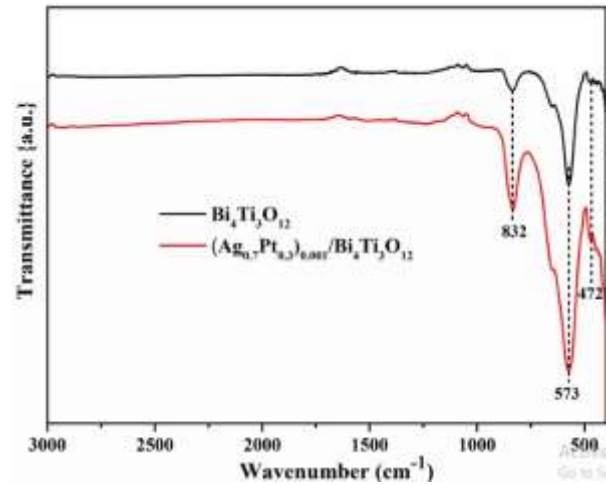
Jawab:

$$h = \frac{6,62 \times 10^{-42} \text{ Js}}{1,602 \times 10^{19} \text{ J}} \times 1 \text{ eV} = 4,1360 \times 10^{-15} \text{ eV.S}$$

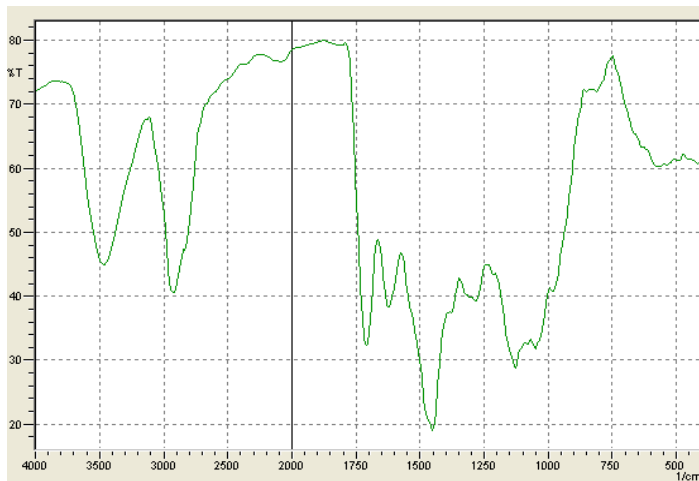
Panjang Gelombang pada $E_g = 3,19 \text{ eV}$

$$\lambda = \frac{h.c}{E_g} = \frac{4,1360 \times 10^{-15} \text{ eV.S} \times 3 \times 10^8 \text{ m/s}}{3,19 \text{ eV}} = 3,8896 \times 10^{-7} \text{ m} = 388,97 \text{ nm}$$

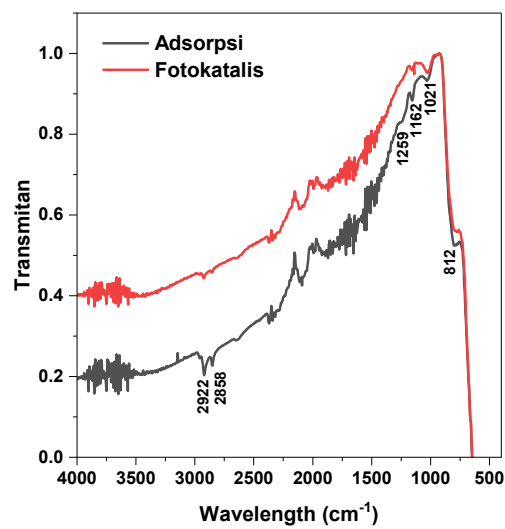
Lampiran 7 Analisis Spektrum IR $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Setelah Proses Adsorpsi-Degradasi



L.7.1 Spektrum IR senyawa $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$



L.7.2 Spektrum IR senyawa ciprofloxacin



L.7.3 Spektrum IR senyawa $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$

Lampiran 8 Dokumentasi



Proses penggerusan sampel



Uji Adsorpsi-Desorpsi



Sampel setelah dikalsinasi



Uji Aktivitas Fotokatalitik



Proses penyaringan sampel



Proses penyaringan larutan hasil fotodegradasi



Proses pengeringan sampel setelah disaring