

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI SrTiO₃ DENGAN METODE
LELEHAN GARAM NaCl-KCl TERHADAP AKTIVITAS ANTIBAKTERI
*Staphylococcus aureus***

SKRIPSI

**Oleh:
AMALIA SAVIRA ANDIKA
NIM. 19630060**



**PROGRAM STUDI KIMIA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2023**

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI SrTiO₃ DENGAN METODE
LELEHAN GARAM NaCl-KCl TERHADAP AKTIVITAS ANTIBAKTERI
*Staphylococcus aureus***

SKRIPSI

**Oleh:
AMALIA SAVIRA ANDIKA
NIM: 19630060**

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

**PROGRAM STUDI KIMIA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2023**

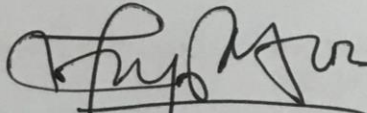
**SINTESIS DAN KARAKTERISASI SrTiO₃ DENGAN METODE
LELEHAN GARAM NaCl-KCl TERHADAP AKTIVITAS ANTIBAKTERI
*Staphylococcus aureus***

SKRIPSI

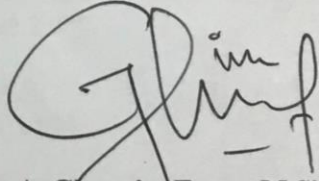
**Oleh:
AMALIA SAVIRA ANDIKA
NIM: 19630060**

**Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji
Tanggal: 14 Desember 2023**

Pembimbing I


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

Pembimbing II


A. Ghanaim Fasya, M.Si
NIP. 19820616 200604 1 002

Mengetahui,
Ketua Program Studi Kimia

Rachmawati Ningsih, M.Si
NIP. 19811119 200801 2 010

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI SrTiO₃ DENGAN METODE
LELEHAN GARAM NaCl-KCl TERHADAP AKTIVITAS ANTIBAKTERI
*Staphylococcus aureus***

SKRIPSI

Oleh:
AMALIA SAVIRA ANDIKA
NIM: 19630060

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

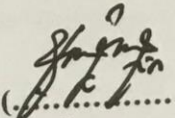
Tanggal: 22 Desember 2023

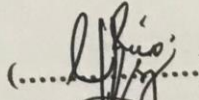
Penguji Utama : Dr. Anik Maunatin, S.T., M.P
NIDT. 19760105 20180201 2 248

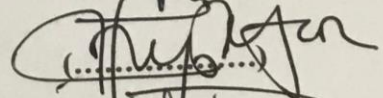
Ketua Penguji : Lilik Miftahul Khoiroh, M.Si
NIP. 19831226 2019203 2 008

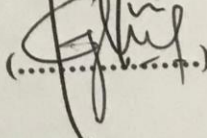
Sekretaris Penguji : Dr. Anton Prasetyo, M.Si
NIP. 19770925 200604 1 003

Anggota Penguji : A. Ghanaim Fasya, M.Si
NIP. 19820616 200604 1 002


(.....)


(.....)


(.....)


(.....)

Mengetahui,
Ketua Program Studi Kimia



Rachmawati Ningsih, M.Si
NIP. 19811119 200801 2 010

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Amalia Savira Andika
NIM : 19630060
Program Studi : Kimia
Fakultas : Sains dan Teknologi
Judul Penelitian : Sintesis dan Karakterisasi SrTiO₃ dengan Metode Lelehan
Garam NaCl-KCl Terhadap Aktivitas Antibakteri
Staphylococcus aureus

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

Malang, 02 Desember 2023

Yang membuat pernyataan,



Amalia Savira Andika
NIM. 19630060

MOTTO

“...Jika kamu berbuat baik kepada orang lain (berarti) kamu berbuat baik pada dirimu sendiri...”

-Q.S. Al-Isra' [17]: 7-

“Kita selalu mengeluh tentang tidak adilnya dunia, tanpa kita sadari sebenarnya banyak hal yang adil. Seperti jam semua orang adalah 24 jam. Perbedaannya adalah bagaimana setiap orang menghabiskan waktu mereka:

-Zhong Chenle-

HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillahirabbil 'alamin,

dengan segala kerendahan hati, penulis menyampaikan rasa syukur kepada Allah Swt. atas segala nikmat dan Rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang masih jauh dari kata sempurna ini dengan baik. Saya persembahkan karya ini kepada:

Kedua orang tua saya, Mama Robiha Rahmawati dan Papa Sandi Lachman yang selalu memberikan doa dan dukungan. Kedua adik saya May Leva dan Mirza Mahira yang selalu memotivasi dan mendoakan saya. Serta seluruh keluarga besar saya Opa Hasan, Oma Yetty, Kakung Imam, Uti Siti, Abi Deni, Bunda Nieke, Mama Mila, Mama Nani, Mama Ula, dan semua keluarga yang penulis tidak bisa sebutkan yang selalu memberikan doa dan dukungan untuk segera menyelesaikan tugas akhir ini.

Terima kasih yang tak terhingga kepada Bapak Dr. Anton Prasetyo, M.Si selaku pembimbing utama dan Bapak A. Ghanaim Fasya, M.Si selaku pembimbing agama yang telah sabar dalam membimbing dan memberikan dukungan serta arahan kepada saya untuk menyelesaikan tugas akhir ini. Ibu Dr. Anik Maunatin, S.T., M.P selaku konsultan dan penguji yang telah membimbing, memberikan arahan, dan masukan dalam proses menyelesaikan tugas akhir ini. Ibu Lilik Miftahul Khoiroh, M.Si selaku penguji yang telah membimbing dan memberi arahan dalam proses menyelesaikan tugas akhir ini. Ibu Susi Nurul Khalifah M.Si selaku dosen wali yang telah membimbing dan memberikan arahan selama masa perkuliahan dan penelitian. Para dosen dan seluruh laboran Program Studi Kimia UIN Malang yang telah membantu saya dalam menyelesaikan penelitian.

Saya ucapkan terima kasih kepada teman seperbimbingan “Anak Abah” yaitu Nuril, Ima, Ussy, Vio, dan Bima yang memberikan doa, dukungan, saling bertukar pikiran dan saling membantu dalam proses penyelesaian tugas akhir ini. Terima kasih sahabat saya Thata dan Dinda yang memberikan doa, semangat dan dukungan. Terima kasih juga teman-teman “EPS” dan kakak-kakak “amilase” yang berjuang bersama di laboratorium. Terima kasih kepada teman-teman terdekat yang tidak bisa disebutkan satu per satu, serta teman-teman “Uranium” yang memberikan kenangan selama masa perkuliahan dan mendukung penulis dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Terakhir, saya ucapkan terima kasih kepada diri saya sendiri yang telah bertahan dan berjuang melewati banyak hal. Terima kasih dan selamat Amalia.

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Syukur alhamdulillah atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan Rahmat dan Hidayah-Nya, yang telah menunjukkan kepada kita jalan yang lurus dan diridhoi Allah. Shalawat serta salam senantiasa kami haturkan kepada Nabi Muhammad SAW, sehingga penulis dapat menyelesaikan naskah skripsi dengan judul **“Sintesis dan Karakterisasi SrTiO₃ dengan Metode Lelehan Garam NaCl-KCl Terhadap Aktivitas Antibakteri *Staphylococcus aureus*”**. Dengan segala kerendahan hati penulis ingin mengucapkan terima kasih banyak kepada semua pihak yang telah membantu menyelesaikannya tugas akhir ini. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih ini kepada:

1. Kedua orang tua dan seluruh keluarga tercinta yang telah memberikan doa dan dukungan moral serta materi sehingga penyusunan naskah skripsi ini dapat terselesaikan
2. Prof. Dr. M. Zainudin, MA selaku rektor Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Dr. Sri Harini, M.Si selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Ibu Rachmawati Ningsih, M.Si selaku Ketua Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang.
5. Bapak Dr. Anton Prasetyo, M.Si selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan dan pengarahan dalam penulisan proposal ini.
6. Bapak A. Ghanaim Fasya, M.Si selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan arahan dan nasihat dalam penulisan proposal ini.
7. Seluruh Dosen Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang.
8. Teman-teman “anak Abah” yang telah menemani, memberikan dukungan, dan semangat, dalam mengerjakan skripsi ini.
9. Para sahabat yang telah memberikan doa dan dukungan sehingga penyusunan proposal ini dapat terselesaikan.

10. Teman-teman Kimia Angkatan 2019 yang telah menemani dan berjuang bersama.
11. Seluruh pihak yang berkontribusi dalam penulisan proposal ini yang penulis tidak mampu menyebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan ini masih terdapat kekurangan. Penulis hanya berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat kepada para pembaca khususnya penulis secara pribadi.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Malang, 02 Desember 2023

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSETUJUAN	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
HALAMAN PENGESAHAN	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
MOTTO	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR LAMPIRAN	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR PERSAMAAN	xiv
ABSTRAK	xv
ABSTRACT	xvi
ملخص البحث	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	6
1.5 Manfaat Penelitian	6
BAB II PINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Bakteri <i>Staphylococcus aureus</i>	7
2.2 Fotokatalis	9
2.3 Fotokatalis sebagai Antibakteri.....	10
2.4 Senyawa Perovskit sebagai Fotokatalis	11
2.5 Sintesis Senyawa dengan Metode Lelehan Garam	14
2.6 Sintesis Senyawa SrTiO ₃ dengan Metode Lelehan Garam	15
BAB III METODE PENELITIAN	18
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	18
3.2 Alat dan Bahan.....	18
3.2.1 Alat.....	18
3.2.2 Bahan	18
3.3 Rancangan Penelitian.....	19
3.4 Prosedur Kerja	19
3.4.1 Preparasi Bahan	19
3.4.2 Sintesis SrTiO ₃ dengan Metode Lelehan Garam	20
3.4.3 Karakterisasi Hasil Sintesis SrTiO ₃ dengan <i>X-Ray Diffraction</i>	20
3.4.4 Karakterisasi Hasil Sintesis SrTiO ₃ dengan <i>Scanning Electron Microscopy</i>	21
3.4.5 Karakterisasi Hasil Sintesis SrTiO ₃ dengan <i>UV-Vis Diffuse Reflectance Spectroscopy</i>	21
3.3 Analisis Data	21

3.5.1 Analisis Data <i>X-Ray Diffraction</i>	21
3.5.2 Analisis Data <i>Scanning Electron Microscopy</i>	22
3.5.3 Analisis Data UV-Vis <i>Diffuse Reflectance Spectroscopy</i>	22
3.4 Uji Antibakteri	22
3.6.1 Pembuatan Media <i>Nutrient Agar (NA)</i>	22
3.6.2 Pembuatan Media <i>Nutrient Broth (NB)</i>	23
3.6.3 Peremajaan Bakteri	23
3.6.4 Pembuatan Inokulum <i>Staphylococcus aureus</i>	23
3.6.5 Uji Aktivitas Antibakteri Senyawa SrTiO ₃ terhadap Bakteri <i>Staphylococcus aureus</i>	24
3.6.5.1 Uji Aktivitas Antibakteri dalam Keadaan Ruang Terbuka.....	24
3.6.5.2 Uji Aktivitas Antibakteri dalam Keadaan Gelap.....	24
3.6.5.3 Uji Aktivitas Antibakteri dengan Radiasi Sinar UV	24
3.6.5.4 Uji Aktivitas Antibakteri Senyawa SrTiO ₃ dalam Keadaan Gelap.....	24
3.6.5.5 Uji Aktivitas Antibakteri Senyawa SrTiO ₃ dengan Radiasi Sinar UV	24
3.6.5.6 Perhitungan Jumlah Sel Bakteri	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Sintesis Senyawa SrTiO ₃ dengan Metode Lelehan garam.....	27
4.2 Karakterisasi Hasil Sintesis SrTiO ₃ dengan XRD	28
4.3 Karakterisasi Hasil Sintesis SrTiO ₃ dengan SEM.....	29
4.4 Karakterisasi Hasil Sintesis SrTiO ₃ dengan UV-Vis DRS	29
4.5 Uji Aktivitas Antibakteri Senyawa SrTiO ₃ terhadap Bakteri <i>Staphylococcus aureus</i>	30
4.6 Sintesis, Karakterisasi, dan Uji Aktivitas Antibakteri Senyawa SrTiO ₃ Fotokatalis dalam Perspektif Islam.....	32
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	35
5.1 Kesimpulan	35
5.2 Saran	35
DAFTAR PUSTAKA	36
LAMPIRAN	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1. Rencana penelitian **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Lampiran 2. Diagram alir **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Lampiran 3. Perhitungan **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Lampiran 4. Gambar hasil karakterisasi **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Lampiran 5. Data uji aktivitas antibakteri **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Lampiran 6. Dokumentasi **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Staphylococcus aureus.....	7
Gambar 2.2	Membran sel Staphylococcus aureus.....	8
Gambar 2.3	Mekanisme fotokatalis.....	10
Gambar 2.4	Kemungkinan mekanisme aktivitas antibakteri yang ditunjukkan oleh semikonduktor fotokatalik yang berbeda.....	10
Gambar 2.5	Struktur kristal perovskit SrTiO ₃	12
Gambar 2.6	Difraktogram sampel produk SrTiO ₃	12
Gambar 2.7	Mikrograf (a) SrTiO ₃ -150, (b) SrTiO ₃ -175, (c) SrTiO ₃ -200, dan (d) SrTiO ₃ -225.....	13
Gambar 2.8	Spektra UV-Vis DRS SrTiO ₃	13
Gambar 2.9	Tahapan metode lelehan garam.....	14
Gambar 2.10	Pola XRD (a) tanpa menggunakan NaCl-KCl eutektik dan (b) dengan menggunakan NaCl-KCl eutektik.....	15
Gambar 2.11	Gambar SEM (a) TiO ₂ submicron crystallites dan (b) SrTiO ₃	16
Gambar 2.12	UV-Vis DRS sampel SrTiO ₃ (a) dan Pot ($\alpha h\nu$) ¹² versus energi foton $h\nu$ untuk sampel SrTiO ₃ ; (b) SrTiO ₃ tabung; (c) SrTiO ₃ lembaran; dan (d) SrTiO ₃ bola.....	17
Gambar 2.13	Gambar SEM SrTiO ₃ yang disintesis menggunakan berbagai morfologi TiO ₂ sebagai prekursor.....	17
Gambar 4.1	(a) Sampel SrTiO ₃ sebelum kalsinasi; (b) Sampel SrTiO ₃ setelah kalsinasi.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Gambar 4.2	Difraktogram senyawa SrTiO ₃	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Gambar 4.3	Plot data hasil <i>refinement</i> senyawa SrTiO ₃	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Gambar 4.4	Gambar SEM SrTiO ₃ ...	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Gambar 4.5	Distribusi partikel senyawa SrTiO ₃	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Gambar 4.6	Spektrum UV-Vis DRS senyawa SrTiO ₃	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Gambar 4.7	Plot Tauc energi celah pita senyawa SrTiO ₃	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Gambar 4.8	Uji aktivitas antibakteri senyawa SrTiO ₃ terhadap pertumbuhan bakteri Staphylococcus aureus.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Komposisi prekursor senyawa SrTiO ₃	20
Tabel 4.1	Data kristalografi SrTiO ₃ hasil <i>refinement</i> Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.	
Tabel 4.2	Hasil uji aktivitas antibakteri terhadap bakteri Staphylococcus aureus	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.

DAFTAR PERSAMAAN

Persamaan (3.1) Kubelka-Munk	22
Persamaan (3.2) Perhitungan jumlah bakteri	26

ABSTRAK

Andika, Amalia Savira. 2023. **Sintesis dan Karakterisasi SrTiO₃ dengan Metode Lelehan Garam NaCl-KCl Terhadap Aktivitas Antibakteri *Staphylococcus aureus***. Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing I: Dr. Anton Prasetyo, M.Si; Pembimbing II: A. Ghanaim Fasya, M.Si.

Kata Kunci: SrTiO₃, Antibakteri, Fotokatalis, Lelehan Garam

Senyawa perovskit memiliki sifat fotokatalis yang berpotensi digunakan sebagai antibakteri. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan senyawa SrTiO₃ hasil sintesis metode lelehan garam NaCl-KCl terhadap aktivitas antibakteri *Staphylococcus aureus*. Uji aktivitas antibakteri menggunakan metode *Total Plate Counting* (TPC) dengan variasi konsentrasi 2,5; 5; dan 10 mg. Hasil sintesis dikarakterisasi menggunakan instrumen difraksi sinar-X (XRD) yang digunakan untuk mengidentifikasi fasa dan struktur yang terbentuk; instrumen *Scanning Electron Microscopy* (SEM) yang digunakan untuk mengetahui struktur morfologi dan komposisi unsur serta ukuran partikel; dan instrumen UV-VIS *Diffuse Reflectance Spectroscopy* (DRS) yang digunakan untuk mengetahui energi celah pita dari material. Difraktogram sampel menunjukkan bahwa senyawa SrTiO₃ berhasil disintesis dan didapatkan puncak khas dari SrTiO₃ pada 2θ : 22,7; 32,4; 39,9; 46,5; 52,4; 57,9; 68,0; 72,6; 77,3; 81,7; dan 86,2° dan tidak ditemukan adanya pengotor. Morfologi senyawa yang didapatkan morfologi yang tidak sama dan beragam. Didapatkan energi celah pita senyawa SrTiO₃ dengan sebesar 3,08 eV. Hasil uji aktivitas antibakteri senyawa SrTiO₃ dengan variasi konsentrasi 2,5; 5; dan 10 mg menggunakan cahaya masing-masing sebesar 8,88; 5,34; dan 12,10 CFU/mL dan tanpa cahaya masing-masing sebesar 11,45; 4,73; dan 6,18 CFU/mL menunjukkan bahwa senyawa SrTiO₃ kurang memiliki potensi sebagai antibakteri yang dapat menghambat pertumbuhan bakteri.

ABSTRACT

Andika, Amalia Savira. 2023. **Synthesis and Characterization of SrTiO₃ by NaCl-KCl Molten Salt Method against *Staphylococcus aureus* Antibacterial Activity.** Chemistry Study Program, Faculty of Science and Technology, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Supervisor I: Dr. Anton Prasetyo, M.Si; Supervisor II: A. Ghanaim Fasya, M.Si.

Keywords: SrTiO₃, Antibacterial, Photocatalyst, Molten Salt

Perovskite compounds possess photocatalytic properties that could potentially be used as antibacterial agents. This study investigated the potential of SrTiO₃ compounds synthesized through the NaCl-KCl molten method to act as antibacterial agents against *Staphylococcus aureus*. To do so, the antibacterial activity of the compounds was tested using the Total Plate Counting (TPC) method at concentrations of 2.5, 5, and 10 mg. The synthesis results were characterized using an X-ray diffraction (XRD) instrument to identify the phase and structure formed, a scanning electron microscopy (SEM) instrument to determine the morphological structure, elemental composition, and particle size, and a UV-VIS diffuse reflectance spectroscopy (DRS) instrument to determine the band gap energy of the material. The results showed that the SrTiO₃ compound was successfully synthesized, typical peaks of SrTiO₃ were obtained at 2θ: 22.7; 32.4; 39.9; 46.5; 52.4; 57.9; 68.0; 72.6; 77.3; 81.7; 86.2°, and its purity was confirmed with no impurities detected. The morphology of the obtained compounds was different. The band gap energy of the SrTiO₃ compound was 3.08 eV. However, the results of the antibacterial activity test of SrTiO₃ compounds with concentrations of 2.5, 5, and 10 mg with and without light showed that they had limited potential as antibacterial agents that can inhibit the growth of bacteria. The CFU/mL values were 8.88, 5.34, and 12.10 with light and 11.45, 4.73, and 6.18 without light, respectively.

ملخص البحث

أنديكا، أماليا سافيرا. ٢٠٢٣. تخليق وتوصيف $SrTiO_3$ بواسطة طريقة ذوبان الملح $NaCl-KCl$ ضد النشاط المضاد للبكتيريا للمكورات العنقودية الذهبية. بحث جامعي. قسم الكيمياء، كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرف الأول: الدكتور أنطون براسيتيو، الماجستير؛ المشرف الثاني: أ. غنائم فسيا، الماجستير

الكلمات الرئيسية: $SrTiO_3$ ، مضاد للبكتيريا، محفز ضوئي، ملح مذاب

مركبات البيروفسكايت لها خصائص محفزة ضوئيا يمكن استخدامها كمضادات للبكتيريا. يهدف هذا البحث إلى تحديد قدرة مركبات $SrTiO_3$ من تخليق طريقة ذوبان ملح $NaCl-KCl$ ضد النشاط المضاد للبكتيريا للمكورات العنقودية الذهبية. اختبار النشاط المضاد للبكتيريا باستخدام طريقة العد الكلي للوحة (TPC) مع اختلاف تركيز 2.5؛ 5؛ و 10 ملغ. توصيف نتائج التوليف باستخدام أدوات حيود الأشعة السينية (XRD) المستخدمة لتحديد المراحل والهياكل المتكونة. أداة المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) المستخدمة لتحديد التركيب المورفولوجي والتركيب الأولي وكذلك حجم الجسيمات؛ وأدوات التحليل الطيفي للانعكاس المنتشر للأشعة المرئية وفوق البنفسجية (DRS) المستخدمة لتحديد طاقة فجوة النطاق للمواد. أظهرت عينات ديفراكتوجورم أن مركب $SrTiO_3$ تم تصنيعه بنجاح وحصل على قمة نموذجية من $SrTiO_3$ عند $\theta = 22,7$ ؛ $32,4$ ؛ $39,9$ ؛ $46,5$ ؛ $52,4$ ؛ $57,9$ ؛ $68,0$ ؛ $72,6$ ؛ $77,3$ ؛ $81,7$ ؛ و $86,2$ درجة ولم يتم العثور على شوائب. مورفولوجية المركبات التي تم الحصول عليها ليست متجانسة وغير موحدة. يتم الحصول على طاقة فجوة النطاق للمركب $SrTiO_3$ بحجم 3.08 فولت. نتائج اختبار النشاط المضاد للبكتيريا لمركبات $SrTiO_3$ مع اختلاف تركيز 2.5؛ 5؛ و 10 ملغ باستخدام الضوء في 8.88؛ 5,34؛ و 12.10 CFU/mL ولا يوجد ضوء عند 11.45؛ 4,73؛ و 6.18 CFU/mL وهذا يدل على أن مركب $SrTiO_3$ يفتقر إلى القدرة المضادة للبكتيريا والتي تكون قادرة على تثبيط نمو البكتيريا.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kerusakan lingkungan akibat air limbah yang tidak terkontrol dari berbagai industri, rumah sakit, dan laboratorium yang tidak terencana dengan baik di negara-negara berkembang (Regmi, dkk., 2018; Kusuma, dkk., 2022). Pembuangan limbah yang mengandung banyak bahan kimia, bahan pewarna, racun dari industri dan obat-obatan yang memiliki sifat genotoksik dan karsinogenik. Terdapat beberapa kasus dimana air dan makanan terkontaminasi sehingga menyebabkan epidemi dan pandemi yang parah mengakibatkan bakteri yang kebal terhadap hampir semua obat (Kurniawan & Mariadi, 2019; Shang, dkk., 2022; Chomcheon, dkk., 2019). Beberapa bakteri seperti *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella typhimurium*, *Bacillus cereus*, dan *Staphylococcus aureus* dapat menyebabkan penyakit pada manusia, pembusukan pada makanan, dan penurunan kualitas air (Regmi, dkk., 2018; Wahab, dkk., 2020; Shang, dkk., 2022; Gulati, dkk., 2022).

Staphylococcus aureus merupakan bakteri yang dapat menyebabkan infeksi kulit, endokarditis bakteremia, pneumonia, meningitis, osteomyelitis, sepsis dan *toxic shock syndrome* (Rianti, dkk., 2022). *Staphylococcus aureus* merupakan bakteri Gram-positif, yang tidak membentuk spora, fakultatif anaerob, dan berbentuk bulat dengan diameter 0,7-1,2 μm (Rini, Chylen Setio & Rochmah, 2020; Wahab, dkk., 2020). Allah SWT berfirman dalam QS. al Baqarah ayat 26:

إِنَّ اللَّهَ لَا يَسْتَحْيِي أَنْ يَضْرِبَ مَثَلًا مَا بَعُوضَةٌ 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 (٢٦)

Artinya:

“*Sesungguhnya Allah tidak segan membuat perumpamaan seekor nyamuk atau yang 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.*”

Pada ayat ini dapat kita tahu bahwa perkara nyamuk bukanlah perkara kecil.

Lalat pun juga bukan lagi perkara kecil. Demikian pula dengan bakteri *Staphylococcus aureus* yang memiliki ukuran yang sangat kecil sehingga tidak dapat dilihat dengan mata secara langsung. Namun, dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan. *Staphylococcus aureus* dapat menyebabkan masalah kesehatan ringan maupun serius (Rini, Chylen Setio & Rochmah, 2020; Doron & Gorbach, 2008).

Dalam bidang kesehatan, menekan jumlah bakteri dengan cepat dan efisien baik pada makhluk hidup dan lingkungan sangatlah dibutuhkan. Salah satunya dengan penggunaan teknologi fotokatalik dapat digunakan untuk memulihkan lingkungan yang tercemar dan memiliki potensi untuk menghancurkan mikroorganisme (sebagai antibakteri) (Podporska-Carroll, dkk., 2017). Teknologi fotokatalis dapat digunakan untuk menghambat pertumbuhan bakteri (*antibacterial material*). Ketika material fotokatalis diberikan foton dengan energi di atas energi celah pitanya maka akan menghasilkan *superoxide radicals* ($\cdot\text{O}_2^-$) atau *hydroperoxide radicals* ($\cdot\text{HO}_2$) dan *hydroxyl radicals* ($\cdot\text{OH}$). Spesies tersebut yang akan menghambat pertumbuhan bakteri (Ganguly, dkk., 2018). Beberapa material

yang dilaporkan berfungsi sebagai antibakteri adalah TiO_2 , ZnO , Ag_2O , Au_2O_3 , dan CuO NPs (Singh, dkk., 2017; Ren, dkk., 2009; Zhang, dkk., 2014).

Material berstruktur perovskit juga dilaporkan mempunyai potensi sebagai antibakteri. Material perovskit merupakan golongan senyawa dengan rumus molekul ABO_3 (Deswardani, 2013). Kation A adalah kation anorganik berupa ion logam monovalen, divalen, dan trivalen seperti Ba , K , Li , Na , Sr^{2+} , Ca^{2+} atau Pr^+ , La^{3+} , Nd , sedangkan kation B adalah kation anorganik berupa ion logam transisi seperti Ti , Fe^{3+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , atau Mn^+ (Roth, 1957; Holderman, dkk., 2017; Novianti, 2020). Material berstruktur perovskit yang dilaporkan mempunyai kemampuan antibakteri adalah (a) STFx ($x = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; \text{ dan } 1$) (Zhang, dkk., 2014); (b) LaCoO_3 terdoping Fe (Singh, dkk., 2017); dan (c) CaTiO_3 (Fatimah, dkk., 2018). Singh, dkk. (2017) melaporkan bahwa senyawa LaCoO_3 terdoping Fe mempunyai kemampuan hambat bakteri sebesar ~ 18 mm, mampu menghambat bakteri *Staphylococcus aureus* dan *Pseudomonas aeruginosa*. Zona hambat terlihat di sekitar pinggiran sumur yang menunjukkan terjadinya pengurangan konsentrasi bakteri yang efektif dan aktivitas maksimum terjadi pada senyawa $\text{LaCo}_{0,4}\text{Fe}_{0,6}\text{O}_3$. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Singh, dkk. (2017) juga menunjukkan bahwa nilai *Minimum Inhibitory Concentration* (MIC) yang berada pada kisaran 50-200 $\mu\text{g/mL}$ dan nilai MIC terkecil didapatkan pada nanopartikel perovskit $\text{LaCo}_{0,4}\text{Fe}_{0,6}\text{O}_3$, serta nilai *Minimum Bactericidal Concentration* (MBC) nanopartikel perovskit LaCoO_3 berada diatas 100 $\mu\text{g/mL}$.

Stronsium titanat (SrTiO_3) merupakan salah satu material oksida logam berstruktur perovskit yang dilaporkan mempunyai sifat fotokatalis. SrTiO_3 memiliki energi celah pita sebesar 3,25 eV. Oleh karena itu, SrTiO_3 dapat menyerap spektrum matahari pada daerah sinar ultraviolet (UV) (Kanhere & Chen, 2014; Li,

dkk., 2015). Zhang, dkk. (2014) melaporkan bahwa senyawa STF_x ($x = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; \text{ dan } 1$) yang telah disintesis dengan *high energy ball milling approach* cukup menjanjikan sebagai agen antimikroba untuk disinfeksi air. Senyawa ini memiliki potensi untuk membunuh bakteri *Escherichia coli*.

Metode sintesis yang banyak digunakan untuk sintesis padatan terutama material perovskit adalah metode sol-gel, hidrotermal, *solid state reaction*, dan *molten salt method*. Metode sintesis lelehan garam merupakan teknik sintesis senyawa oksida kompleks yang melibatkan lelehan garam sebagai media reaksi material awal yang terdiri dari oksida dan karbonat. Garam dengan titik leleh rendah ditambahkan ke dalam reaktan dan dipanaskan secara bertingkat diatas titik leleh garam tersebut, sehingga pada keadaan ini lelehan garam bersifat sebagai pelarut. Lelehan garam yang umum digunakan adalah garam klorida (KCl dan NaCl) dan garam sulfat (Li_2SO_4 , Na_2SO_4 dan K_2SO_4) (Putri, 2021). Teknik ini menggunakan suhu yang tinggi bahkan mencapai 1000 hingga $1500^\circ C$ (Febriani, dkk., 2018). Metode ini beberapa tahun terakhir banyak dikembangkan karena sederhana, fleksibel, dan ramah lingkungan untuk menghasilkan bubuk kristal murni pada suhu rendah (Xue, dkk., 2017). Keuntungan lain dari metode lelehan garam adalah secara keseluruhan waktu sintesis lebih singkat, dapat mengontrol morfologi, dan sisa pengotor yang dihasilkan lebih sedikit dibandingkan dengan sintesis menggunakan metode *Solid State Reaction* (Mao, dkk., 2007).

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mensintesis senyawa $BaTiO_3$ dengan metode lelehan garam. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Xue, dkk. (2017) mensintesis senyawa $BaTiO_3$ dengan metode lelehan garam campuran NaCl-KCl dikalsinasi pada suhu 700, 800, 900, dan $1000^\circ C$ diperoleh morfologi masing-masing *exhibit rectangular and sphere shapes* dengan ukuran 320 nm,

rectangular and cubic particles dengan ukuran 430 nm, *sphere and irregular shapes* dengan ukuran 510 nm, dan *spherical particles* dengan ukuran 900 nm. Dilain pihak, Novianti, dkk. (2022) mensintesis senyawa CaTiO_3 dengan garam tunggal NaCl dan diperoleh senyawa CaTiO_3 dengan morfologi *polyhedra*.

Berdasarkan uraian di atas, maka dalam penelitian ini akan dilakukan uji antibakteri senyawa SrTiO_3 yang diperoleh dengan metode lelehan garam NaCl-KCl. Hasil sintesis akan dikarakterisasi menggunakan (a) instrumen *X-Ray Diffraction* (XRD) yang digunakan untuk mengidentifikasi fasa dan struktur yang terbentuk; (b) instrumen *Scanning Electron Microscopy* (SEM) yang digunakan untuk mengetahui struktur morfologi dan komposisi unsur serta ukuran partikel; dan (c) instrumen UV-VIS *Diffuse Reflectance Spectroscopy* (DRS) yang digunakan untuk mengetahui energi celah pita dari material. Kemudian, dari hasil sintesis juga dilakukan uji aktivitas antibakterinya.

1.2 Rumusan Masalah

- a. Bagaimana struktur, morfologi, dan energi celah pita hasil sintesis dari senyawa SrTiO_3 dengan metode lelehan garam?
- b. Bagaimana aktivitas antibakteri dari senyawa SrTiO_3 terhadap *Staphylococcus aureus*?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini, yaitu:

- a. Mengetahui struktur, morfologi, dan energi celah pita hasil sintesis senyawa SrTiO_3 dengan metode lelehan garam.
- b. Mengetahui aktivitas antibakteri dari senyawa SrTiO_3 terhadap *Staphylococcus aureus*.

1.4 Batasan Masalah

- a. Rasio mol yang digunakan $\text{SrTiO}_3 : \text{NaCl} : \text{KCl}$ adalah 1 : 7 : 7.
- b. Suhu sintesis yang digunakan adalah 750 dilanjutkan 820°C.

1.5 Manfaat Penelitian

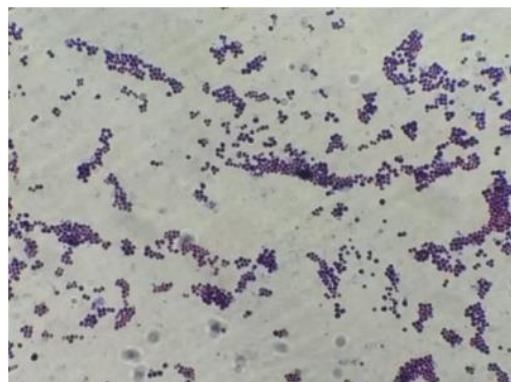
Hasil penelitian didapat memberikan informasi terkait struktur, morfologi, dan energi celah pita senyawa SrTiO_3 yang telah disintesis menggunakan metode lelehan garam campuran NaCl-KCl. Serta memberikan informasi terkait penerapan senyawa fotokatalis sebagai antibakteri.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bakteri *Staphylococcus aureus*

Bakteri *Staphylococcus aureus* merupakan bakteri Gram-positif yang tidak membentuk spora, tidak memiliki flagel, tidak motil, fakultatif anaerob, dan berbentuk bulat dengan diameter 0,7-1,2 μm dapat dilihat pada Gambar 2.1 (Wahab, dkk., 2020; Rini, Chylen Setio & Rochmah, 2020). Lapisan yang menyusun dinding sel bakteri yang dapat dilihat pada Gambar 2.2 terdiri dari lapisan makromolekul peptidoglikan yang tebal dan membran sel selapis yang tersusun atas protein, lipid dan asam *teichoic*. Asam *teichoic* memiliki fungsi sebagai pengatur fungsi elastisitas, porositas, kekuatan tarikan dan sifat elektrostatis dinding sel. Bakteri ini merupakan flora normal yang terdapat pada kulit dan selaput mukosa pada manusia. *Staphylococcus aureus* mengandung polisakarida dan protein yang memiliki fungsi sebagai antigen dan struktur dinding sel. Bakteri ini dapat tumbuh pada suhu 37°C dengan waktu inkubasi yaitu 1-8 jam. Bakteri *Staphylococcus aureus* juga dapat tumbuh pada rentang pH 4,5-9,3 dengan pH optimum 7,0-7,5 (Sihombing, Michelles & Mantiri, 2022).



Gambar 2.1 *Staphylococcus aureus*

Adapun klasifikasi dari bakteri *Staphylococcus aureus* adalah sebagai berikut:

Kingdom : Monera

Divisio : Firmicutes

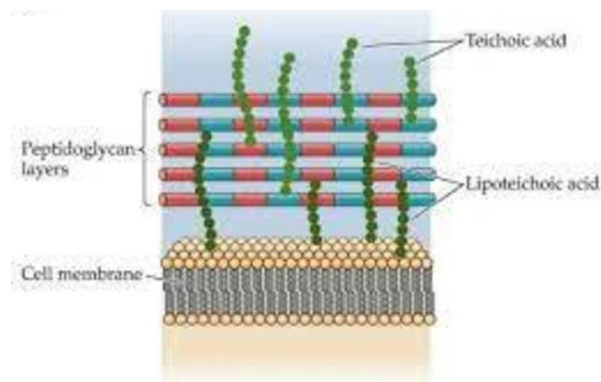
Classis : Bacilli

Ordo : Bacillales

Familia : *Staphylococcaceae*

Genus : *Staphylococcus*

Species : *Staphylococcus aureus* (Bergeys, 1998).



Gambar 2.2 Membran sel *Staphylococcus aureus*

Allah SWT berfirman dalam QS. al Qamar ayat 49:

إِنَّا كُلَّ شَيْءٍ خَلَقْنَاهُ بِقَدَرٍ

Artinya:

“Sungguh, Kami menciptakan segala sesuatu menurut ukuran”.

Amrullah (2001) dalam tafsir al-Azhar menjelaskan surah al Qamar ayat 49. Pada ayat sebelumnya menanyakan apakah manusia akan menyesali penderitaan yang pedih itu? Apakah manusia akan mengkritik bahwa Tuhan yang kejam dalam memberikan siksaan-Nya? Maka dalam surah al Qamar ayat 49 memberikan jawaban: "Sesungguhnya Kami menciptakan segala sesuatu dengan ukuran yang

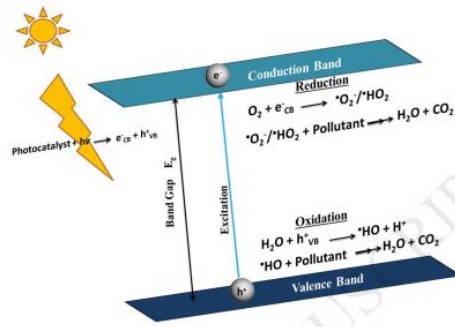
tepat". Hal tersebut memiliki arti bahwa siksaan yang diberikan oleh Allah SWT kepada hamba-Nya, baik itu disebut kejam, berat, atau sangat keras, sebenarnya adalah takdir karena manusia sendiri yang memilih jalan hidupnya. Pada ayat tersebut kata بِقَدْرٍ yang memiliki arti "menurut ukuran" dimana segala sesuatu memiliki ukuran. Termasuk bakteri yang memiliki ukuran sangat kecil, kurang lebih berukuran antara 0,12 mikron sampai ratusan mikron.

2.2 Fotokatalis

Fotokatalis merupakan reaksi kimia yang berjalan dengan bantuan katalis yang akan aktif apabila disinari cahaya (Tussa'adah & Astuti, 2015). Terdapat beberapa kelebihan dari metode fotokatalis yaitu cepat, efektif, efisien, ramah lingkungan dan ekonomis dalam proses pendegradasian limbah organik dan bakteri berbahaya di dalam air (Shivarahaju H.P., 2011). Teknologi fotokatalis dapat digunakan untuk menghambat pertumbuhan bakteri. Proses antibakteri fotokatalitik terjadi karena adanya reaksi antara bakteri dan *Reactive Oxygen Species* (ROS). ROS merupakan senyawa antara metabolisme oksigen yang sangat reaktif dan diproduksi dari reduksi gradual molekul oksigen (Susilawat, 2021).

Material fotokatalis diberikan foton dengan energi di atas energi celah pitanya maka akan menghasilkan e^-_{CB} dan h^+_{VB} . e^-_{CB} akan bereaksi dengan oksigen (O_2) dan akan menghasilkan *superoxide radicals* ($\cdot O_2^-$) atau *hydroperoxide radicals* ($\cdot HO_2$). Kemudian, polutan difotodegradasi oleh *superoxide radicals* ($\cdot O_2^-$) atau *hydroperoxide radicals* ($\cdot HO_2$) dan menghasilkan air (H_2O) dan karbon dioksida (CO_2). Disaat yang bersamaan terjadi oksidasi air, h^+_{VB} bereaksi dengan air (H_2O) dan akan menghasilkan *hydroxyl radicals* ($\cdot OH$) (Gambar 2.3). Setelah itu, polutan bereaksi dengan radikal hidroksil menghasilkan air (H_2O) dan karbon dioksida

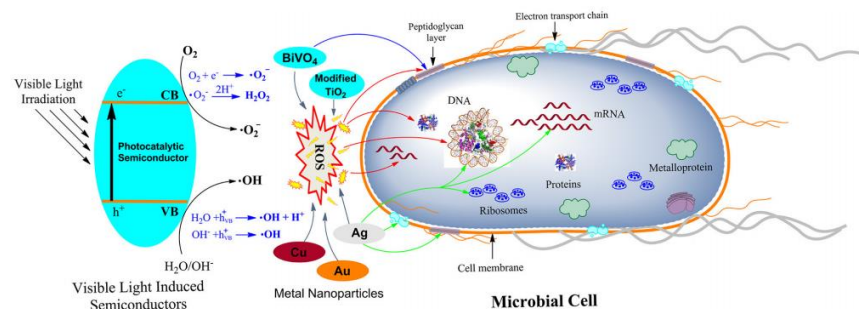
(CO₂). Spesies inilah yang akan menghambat pertumbuhan bakteri (Ganguly, dkk., 2018).



Gambar 2.3 Mekanisme fotokatalis (Ganguly, dkk., 2018).

2.3 Fotokatalis sebagai Antibakteri

Mikroorganisme seperti bakteri dapat menimbulkan penyakit karena mampu menginfeksi, mulai dari infeksi ringan hingga infeksi berat bahkan kematian. Oleh karena itu, pengendalian yang tepat perlu dilakukan agar mikroorganisme tidak menimbulkan kerugian (Locke, dkk., 2012). Antibakteri merupakan senyawa yang digunakan untuk mengendalikan pertumbuhan bakteri yang bersifat merugikan. Antibakteri digunakan untuk menghambat (bakteriostatik) dan/atau membunuh bakteri (bakteriosida) penyebab infeksi yang masuk ke dalam jaringan. Fotokatalis merupakan salah satu sifat pada material yang dapat digunakan untuk menghambat pertumbuhan bakteri.

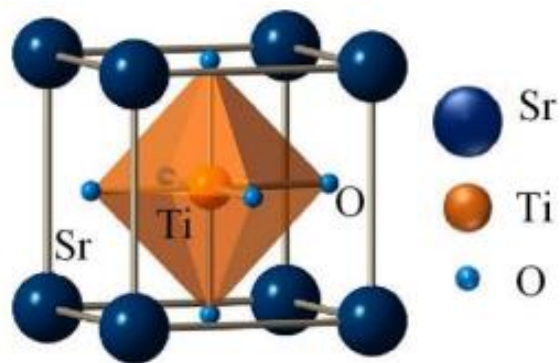


Gambar 2.4 Kemungkinan mekanisme aktivitas antibakteri yang ditunjukkan oleh semikonduktor fotokatalik yang berbeda (Regmi, dkk., 2018)

Fotokatalis semikonduktor pada iradiasi cahaya dengan energi yang sama atau lebih besar dari energi celah pitanya menghasilkan entitas oksidatif dan reduktif. Pada Gambar 2.4, Panah berwarna merah menunjukkan target ROS yang dihasilkan oleh berbagai semikonduktor. Panah warna biru menunjukkan target $BiVO_4$. Nanopartikel logam Ag, Cu, dan Au juga diketahui menghasilkan ROS dan menargetkan bagian yang berbeda di dalam sel. Panah warna hijau menunjukkan target nanopartikel Ag. Target yang berbeda dalam sel mikroba diberi label di dalam sel (Regmi, dkk., 2018).

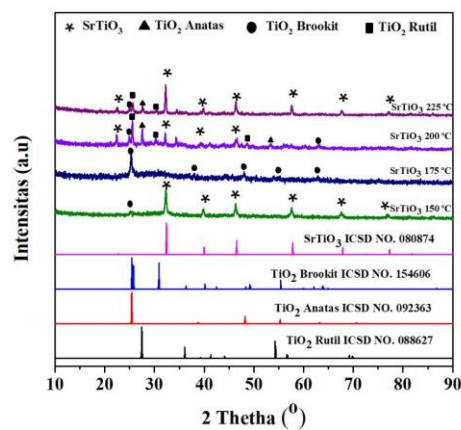
2.4 Senyawa Perovskit sebagai Fotokatalis

Senyawa $SrTiO_3$ merupakan salah satu senyawa yang memiliki struktur perovskit. Struktur kristal Senyawa $SrTiO_3$ dapat dilihat pada Gambar 2.5. Perovskit merupakan kelas senyawa yang memiliki rumus ABO_3 yang umumnya berstruktur kristal, pada kation A akan ditempati oleh kation yang lebih besar daripada pada posisi B yang akan ditempati oleh kation lebih kecil (Kanhere & Chen, 2014). Kation A adalah kation anorganik berupa ion logam monovalen, divalen, dan trivalen, seperti ion K^+ , Na^+ , Li^+ , Ba^{2+} , Ca^{2+} , Sr^{2+} . Sedangkan, kation B adalah kation anorganik berupa ion logam transisi yang dapat berupa ion Ti^{4+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Mn^{4+} , Fe^{3+} (Roth, 1957). $SrTiO_3$ (Kanhere & Chen, 2014). $SrTiO_3$ memiliki energi celah pita tidak langsung (*indirect band gap*) sebesar 3,25 eV dan energi celah pita langsung (*direct band gap*) sebesar 3,75 eV sehingga dapat menyerap spektrum matahari pada daerah sinar ultraviolet (UV) (Kanhere & Chen, 2014; Li, dkk., 2015; Putri, 2021). Pada suhu ruang, struktur perovskit $SrTiO_3$ memiliki sel unit kubus dengan grup ruang $Pm3m$ dan panjang parameter kisi sebesar 3,905 Å (Muhamad, dkk., 2017; Putri, 2021).

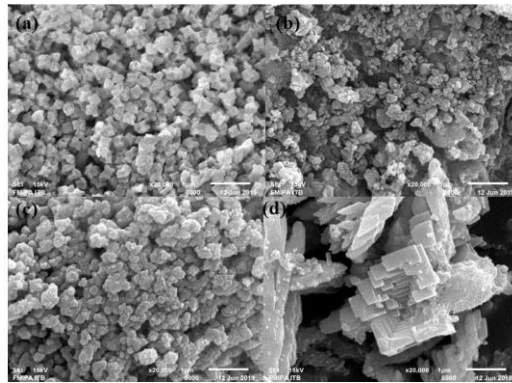


Gambar 2.5 Struktur kristal perovskit SrTiO_3 (Putri, 2021)

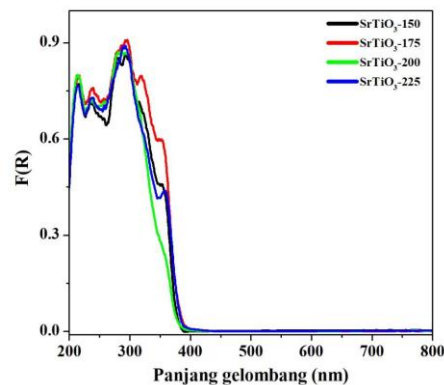
Pada penelitian yang dilakukan oleh Thoif, dkk. (2020) dengan mensintesis senyawa SrTiO_3 menggunakan metode hidrotermal dan diperoleh hasil karakterisasi XRD yang dapat dilihat pada Gambar 2.6. Hasil karakterisasi menggunakan SEM dapat dilihat pada Gambar 2.7, morfologi partikel sampel SrTiO_3 -150, SrTiO_3 -175 dan SrTiO_3 -200 berbentuk poligonal dan mempunyai ukuran yang seragam, sedangkan morfologi partikel sampel SrTiO_3 -225 berbentuk kubus. Hasil karakterisasi menggunakan UV-Vis DRS dapat dilihat pada Gambar 2.8 nilai energi celah pita (eV) SrTiO_3 -150 sebesar 3,20; SrTiO_3 -175 sebesar 3,17; SrTiO_3 -200 sebesar 3,16; dan SrTiO_3 -225 sebesar 3,14.



Gambar 2.6 Difraktogram sampel produk SrTiO_3



Gambar 2.7 Mikrograf (a) SrTiO₃-150, (b) SrTiO₃-175, (c) SrTiO₃-200, dan (d) SrTiO₃-225



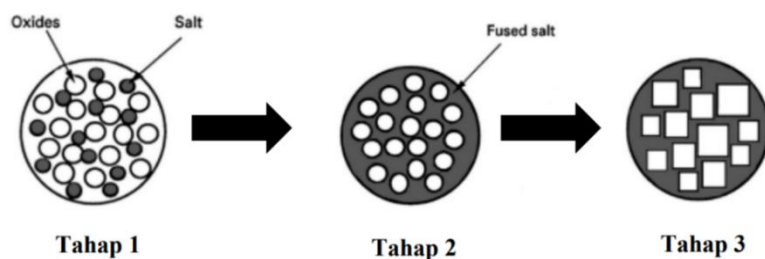
Gambar 2.8 Spektra UV-Vis DRS SrTiO₃

Material yang memiliki struktur perovskit telah dilaporkan memiliki sifat antibakteri. Salah satunya dilaporkan oleh Zhang, dkk. (2014) yang menunjukkan bahwa oksida logam perovskit STF_x ($x = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; \text{ dan } 1$) yang telah disintesis cukup menjanjikan sebagai agen antimikroba untuk disinfeksi air. Pada penelitian ini, oksida logam STF_{0.8} menunjukkan efek bakterisida yang meningkat dengan membunuh semua bakteri *Escherichia coli* sekitar 10^5 CFU/mL dalam waktu 15 menit. Kepadatan bakteri *Escherichia coli* ditingkatkan hingga 10^7 CFU/mL untuk pengujian dalam kondisi terang dan gelap dan dihasilkan efek bakterisida STF_{0.8} yang sangat baik dalam kondisi terang dan gelap.

2.5 Sintesis Senyawa dengan Metode Lelehan Garam

Metode lelehan garam atau *molten salt method* merupakan teknik sintesis senyawa oksida kompleks yang melibatkan lelehan garam sebagai media reaksi material awal yang terdiri dari oksida dan karbonat. Pada metode ini garam yang umum digunakan adalah garam klorida (KCl dan NaCl) dan garam sulfat (Li_2SO_4 , Na_2SO_4 dan K_2SO_4) (Putri, 2021). Metode lelehan garam merupakan metode sederhana dan hijau yang biasa digunakan untuk mensintesis oksida logam dengan kemurnian tinggi serta penyesuaian komposisi dan morfologi, dan mengurangi aglomerasi (Gupta dan Mao, 2021; Kimura, 2011).

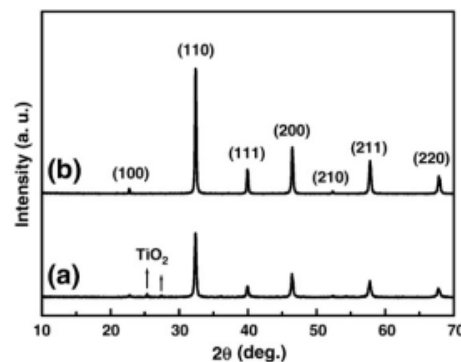
Prosedur sintesis metode lelehan garam digambarkan dalam Gambar 2.9. Pada tahap I, reaktan oksida atau prekursor yang sesuai dengan senyawa yang diinginkan dicampur dengan garam misalnya, NaCl, KCl atau campuran eutektik dari garam misalnya, NaCl-KCl. Pada tahap II, campuran dipanaskan pada suhu di atas titik leleh dari media garam untuk membentuk lelehan garam. Pada suhu ini, molekul prekursor akan menyebar, berdisosiasi, menyusun ulang, dan kemudian akan berdifusi dengan cepat ke seluruh garam. Pada tahap III, mulai muncul inti-inti kristal dan tumbuh melalui proses pengendapan larutan. Massa yang telah bereaksi didinginkan hingga suhu kamar dan dicuci dengan pelarut yang sesuai untuk menghilangkan garam, biasanya menggunakan air (Xue, dkk., 2017).



Gambar 2.9 Tahapan metode lelehan garam (Xue, dkk., 2017).

2.6 Sintesis Senyawa SrTiO₃ dengan Metode Lelehan Garam

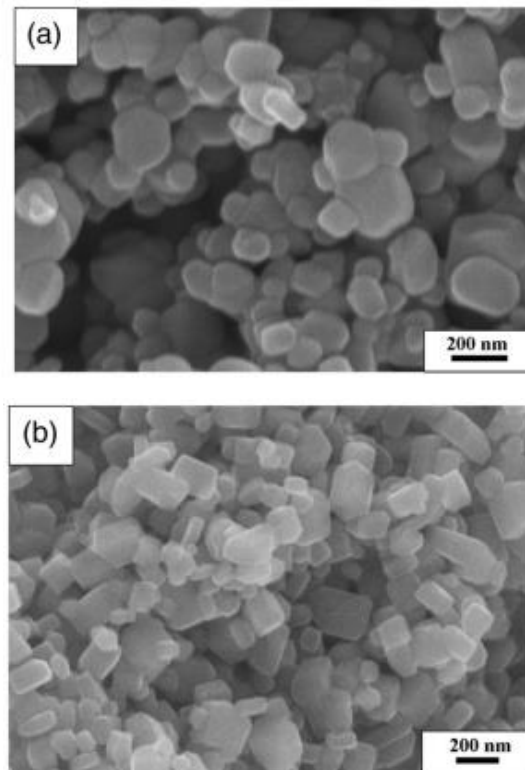
Sintesis senyawa SrTiO₃ dengan metode lelehan garam beberapa pihak. H. L. Li, dkk., 2010 mensintesis senyawa SrTiO₃ dengan metode lelehan garam campuran NaCl-KCl pada suhu 700°C selama 10 jam. Pola difraksi sinar-X sampel ditampilkan pada Gambar 2.10 menunjukkan pola khas XRD produk disintesis (a) tanpa menggunakan NaCl-KCl eutektik dan (b) dengan menggunakan NaCl-KCl eutektik. Ketika dilakukan sintesis tanpa adanya garam eutektik NaCl-KCl cair, campuran SrTiO₃ dan TiO₂ yang tidak bereaksi diperoleh seperti yang terlihat dari Gambar 2.10(a).



Gambar 2.10 Pola XRD (a) tanpa menggunakan NaCl-KCl eutektik dan (b) dengan menggunakan NaCl-KCl eutektik

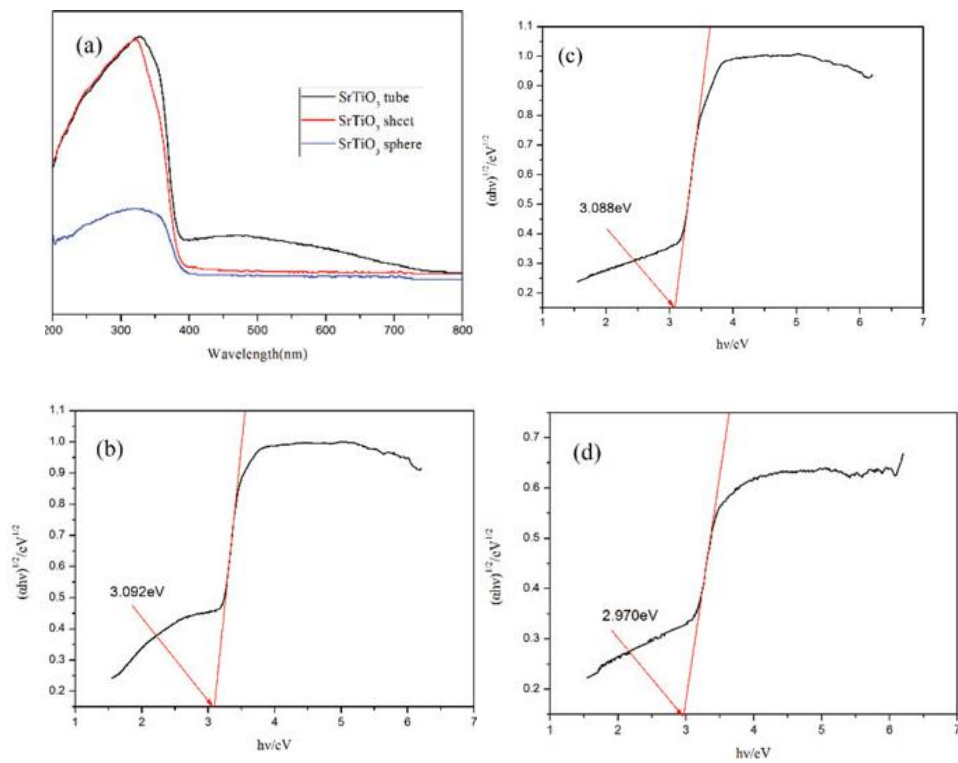
Sebaliknya, produk yang disintesis menggunakan garam eutektik NaCl-KCl cair hanya menampilkan puncak XRD yang dapat diindeks ke fasa perovskit SrTiO₃. Gambar 2.10(b) menyiratkan bahwa keberadaan garam eutektik NaCl-KCl cair memang dapat mempercepat kinetika dan memfasilitasi pembentukan SrTiO₃ pada 700°C. Gambar SEM ditunjukkan pada Gambar 2.11 (a) dan (b). diperoleh produk yang berasal dari *submicron crystallites* TiO₂ (sekitar 70-220 nm, Gambar 2.11(a))

terdiri dari *faceted submicron crystallites* dengan berukuran sekitar 95–184 nm
Gambar 2.11(b).

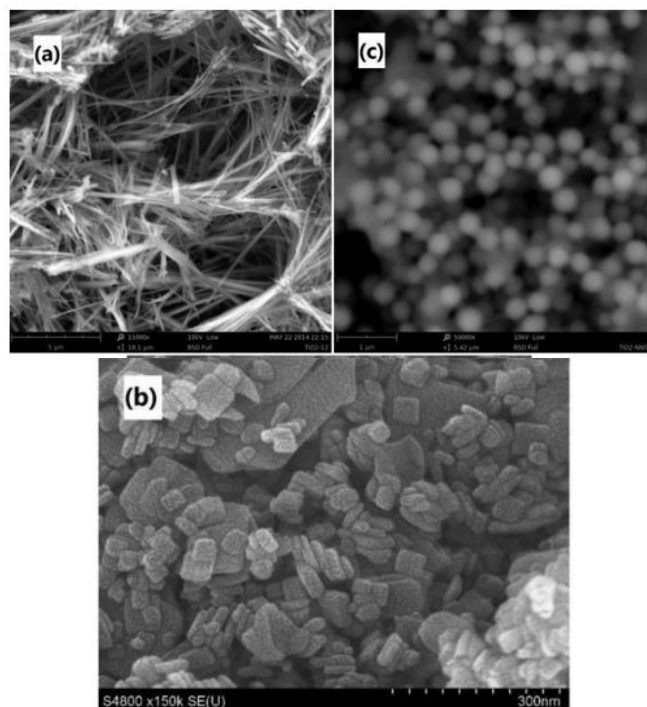


Gambar 2.11 Gambar SEM (a) TiO_2 *submicron crystallites* dan (b) SrTiO_3

Dilain pihak C. Li, dkk. (2015) dengan mensintesis senyawa SrTiO_3 menggunakan TiO_2 dengan morfologi yang berbeda sebagai prekursor dengan metode lelehan garam NaCl-KCl dengan suhu 700°C selama 6 jam. Dihasilkan energi celah pita yang berbeda setiap morfologinya. Didapatkan nilai energi celah pita sebesar 3,092 eV pada SrTiO_3 tabung, sebesar 3,088 eV pada SrTiO_3 lembaran, dan sebesar 2,790 eV pada SrTiO_3 bola (Gambar 2.12). Hasil SEM dapat dilihat pada Gambar 2.13 (a) SrTiO_3 tabung; (b) SrTiO_3 lembaran; dan (c) SrTiO_3 bola.



Gambar 2.12 UV-Vis DRS sampel SrTiO₃ (a) dan Pot $(\alpha h\nu)^{1/2}$ versus energi foton $h\nu$ untuk sampel SrTiO₃; (b) SrTiO₃ tabung; (c) SrTiO₃ lembaran; dan (d) SrTiO₃ bola



Gambar 2.13 Gambar SEM SrTiO₃ yang disintesis menggunakan berbagai morfologi TiO₂ sebagai prekursor

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Agustus-November 2023 yang bertempat di Laboratorium Kimia Fisik dan Laboratorium Biokimia Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi Malang, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

Alat yang digunakan antara lain seperangkat alat gelas, tanur, *mortar agate*, neraca analitik, *hot plate*, oven, cawan petri steril, pipet volume steril, mikropipet, *bluetip*, tabung reaksi steril, ose bulat, rak tabung reaksi, bunsen, vortex, inkubator, label, korek api, autoklaf, seperangkat instrumen XRD, seperangkat instrumen SEM, seperangkat instrumen UV-Vis DRS, dan reaktor fotokatalis dengan lampu *blacklight blue*.

3.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan antara lain SrCO_3 (Aldrich; 99,9%; serbuk), TiO_2 (Aldrich; 99,9%; serbuk), NaCl (Aldrich; 99,9%; serbuk), KCl (Aldrich; 99,9%; serbuk), aseton, larutan AgNO_3 (Aldrich; 2,5% larutan), akuades steril, akuabides, *Nutrient broth* (Nb), *Nutrient agar* (Na), aluminium foil, dan kapas.

3.3 Rancangan Penelitian

a. Sintesis

Proses ini mencakup pengadaan alat dan bahan, perhitungan jumlah bahan, penghalusan bahan, dan homogenisasi bahan. Serta tahapan sintesis dengan metode lelehan garam dengan suhu 750°C dilanjutkan dengan suhu 820°C menggunakan garam campuran NaCl-KCl dengan rasio mol prekursor dan garam adalah 1:7 selama 6 jam, kemudian dilakukan pendinginan hingga suhu ruang, pencucian garam menggunakan air panas, dan produk dikeringkan menggunakan oven pada suhu 80°C sampai kering.

b. Karakterisasi

Proses ini mencakup karakteristik dan analisis produk hasil sintesis menggunakan instrumen XRD yang berfungsi untuk mengidentifikasi struktur yang terbentuk, instrumen SEM berfungsi untuk mengetahui struktur morfologi unsur, dan instrumen UV-VIS DRS untuk mengetahui energi celah pita dari material.

c. Uji Aktivitas Antibakteri

Proses ini mencakup pemeliharaan bakteri, pembuatan inokulum, dan uji aktivitas antibakteri pada bakteri Gram-positif (*Staphylococcus aureus*) dengan metode *Total Plate Count* (TPC).

3.4 Prosedur Kerja

3.4.1 Preparasi Bahan

Dalam penelitian senyawa SrTiO₃ disintesis sebanyak 3 g. Banyaknya prekursor dan garam yang digunakan disesuaikan dengan perhitungan stoikiometri

yang dirangkum pada Tabel 3.1. Setiap bahan ditimbang sesuai dengan perhitungan stoikiometri.

Tabel 3.1 Komposisi prekursor senyawa SrTiO₃

Target Senyawa	Massa Target (g)	Massa Pereaksi (g)			
		SrCO ₃	TiO ₂	NaCl	KCl
SrTiO ₃	3	2,4136	1,3062	6,6766	8,5363

3.4.2 Sintesis SrTiO₃ dengan Metode Lelehan Garam

Bahan yang telah ditimbang dimasukkan ke dalam mortar agate. Campuran tersebut dihomogenkan dengan digerus dalam mortar agate selama 3 jam dan ditambahkan aseton tetes per tetes secukupnya. Kemudian campuran dipanaskan pada suhu 750°C dan dilanjutkan pada suhu 820°C, masing-masing dipanaskan selama 6 jam. Hasil produk dikeluarkan dari tanur dan diletakkan di atas kertas saring, kemudian disaring menggunakan corong Buchner. Sampel dicuci beberapa kali menggunakan akuades panas untuk melarutkan garam alkali. Untuk mengidentifikasi garam NaCl-KCl maka diuji dengan menggunakan larutan AgNO₃. Kemudian produk dikeringkan menggunakan oven pada suhu 80°C sampai kering (Al-Abror, dkk., 2023).

3.4.3 Karakterisasi Hasil Sintesis SrTiO₃ dengan X-Ray Diffraction

Karakterisasi senyawa perovskit menggunakan XRD digunakan untuk mengetahui struktur kristal dan mengidentifikasi fasa produk sintesis. Karakterisasi dilakukan dengan menempatkan sampel serbuk kurang lebih 0,5 g dalam bentuk pelet dan diletakkan pada sampel *holder*. Pengukuran dilakukan pada rentang 2θ : 20-90° (Thoif, dkk., 2020).

3.4.4 Karakterisasi Hasil Sintesis SrTiO₃ dengan *Scanning Electron Microscopy*

Karakterisasi senyawa perovskit menggunakan SEM untuk mengetahui morfologi, komposisi senyawa, distribusi pertumbuhan kristal, dan ukuran partikel produk hasil sintesis. Karakterisasi dilakukan dengan menempatkan sampel serbuk dalam bentuk pelet. Sampel diletakkan pada sampel *holder* dan dikarakterisasi dengan perbesaran 5.000-15.000 kali (Al-Abror, dkk., 2023).

3.4.5 Karakterisasi Hasil Sintesis SrTiO₃ dengan UV-Vis *Diffuse Reflectance Spectroscopy*

Karakterisasi senyawa perovskit menggunakan DRS untuk mengetahui besarnya energi celah pita dari produk hasil sintesis. Karakterisasi dilakukan dengan sampel dalam bentuk serbuk halus ditempatkan pada sampel *holder* dan diukur persentase reflektansinya pada rentang panjang gelombang 200-800 nm (Thoif, dkk., 2020).

3.3 Analisis Data

3.5.1 Analisis Data *X-Ray Diffraction*

Data yang diperoleh dari hasil karakterisasi menggunakan XRD merupakan pola difraksi sinar-X yang selanjutnya akan dibandingkan dengan standar yang terdapat pada *database Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS)* ataupun *The Inorganic Crystal Structure Database (ICSD)*. Dari data XRD dilakukan analisa (*refinement*) dengan perangkat lunak *Rietica* menggunakan metode *Le-Bail* yang bertujuan untuk mengidentifikasi data kristalografi. Selain itu dari data difraksi sinar-X juga dapat menunjukkan kristalinitas dan kemurnian hasil sintesis.

3.5.2 Analisis Data *Scanning Electron Microscopy*

Data yang diperoleh hasil karakterisasi dengan SEM adalah morfologi dan ukuran partikel, senyawa SrTiO₃. Hasil karakterisasi dianalisis menggunakan *software image-J*.

3.5.3 Analisis Data UV-Vis *Diffuse Reflectance Spectroscopy*

Data yang diperoleh dari hasil karakterisasi menggunakan DRS berupa data reflektansi. Data reflektansi dianalisa menggunakan persamaan Kubelka-Munk yang ditunjukkan pada Persamaan 3.1.

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

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

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

3.4 Uji Antibakteri

3.6.1 Pembuatan Media *Nutrient Agar* (NA)

Media dibuat dengan cara *Nutrient agar* ditimbang sebanyak 2 g. Kemudian, dilarutkan dalam 100 mL akuabides, lalu dimasukkan ke dalam erlenmeyer dan ditutup menggunakan aluminium foil. Selanjutnya, suspensi dipanaskan hingga mendidih. Setelah itu, *Nutrient agar* dipindahkan ke dalam 20

tabung reaksi dan ditutup dengan kapas. Kemudian media disterilkan menggunakan autoklaf pada suhu 121°C (Genoveva Preta Angelika, Agung Suprihadi, 2014).

3.6.2 Pembuatan Media *Nutrient Broth* (NB)

Media dibuat dengan cara *Nutrient Broth* ditimbang sebanyak 0,8 g, kemudian dilarutkan pada 100 mL akuabides, lalu dimasukkan kedalam erlenmeyer dan ditutup menggunakan aluminium foil. Kemudian suspensi dipanaskan hingga mendidih dan kemudian didinginkan pada suhu ruang. Media *Nutrient Broth* kemudian disterilkan dalam autoklaf pada suhu 121°C (Yanti & Mitika, 2017).

3.6.3 Peremajaan Bakteri

Peremajaan dilakukan menggunakan metode gores. Biakan *Staphylococcus aureus* diambil satu ose kemudian diinokulasi dengan digoreskan pada media *Nutrient Agar* secara aseptik. Kemudian diinkubasi pada suhu 37°C selama 24 jam (Yanti & Mitika, 2017).

3.6.4 Pembuatan Inokulum *Staphylococcus aureus*

Pembuatan inokulum ini dilakukan dengan memindahkan dua ose biakan *Staphylococcus aureus* ke dalam 50 mL *Nutrient Broth*, kemudian di-shaker dengan kecepatan 100 rpm pada suhu ruang dengan selama 18 jam sampai fase eksponensial. Kekeruhan inokulum sel *Staphylococcus aureus* yang digunakan disetarakan dengan *optical density* (OD) 0,1 pada panjang gelombang 600 nm (Yanti & Mitika, 2017).

3.6.5 Uji Aktivitas Antibakteri Senyawa SrTiO₃ terhadap Bakteri *Staphylococcus aureus*

3.6.5.1 Uji Aktivitas Antibakteri dalam Keadaan Ruang Terbuka

Inokulum *Staphylococcus aureus* dengan OD 0,1 sebanyak 10 mL dan *Nutrient Broth* steril 100 mL dimasukkan dalam *beaker glass*. Diletakkan dalam ruang terbuka didiamkan selama 120 menit.

3.6.5.2 Uji Aktivitas Antibakteri dalam Keadaan Gelap

Inokulum *Staphylococcus aureus* dengan OD 0,1 sebanyak 10 mL dan *Nutrient Broth* steril 100 mL dimasukkan dalam *beaker glass*. Diletakkan dalam tempat gelap dan didiamkan selama 120 menit.

3.6.5.3 Uji Aktivitas Antibakteri dengan Radiasi Sinar UV

Inokulum *Staphylococcus aureus* dengan OD 0,1 sebanyak 10 mL dan *Nutrient Broth* steril 100 mL dimasukkan dalam *beaker glass*. Kemudian dipapar dengan lampu UV 40 W dan dioptimasi selama 120 menit serta diaduk dengan menggunakan *stirrer* selama perlakuan.

3.6.5.4 Uji Aktivitas Antibakteri Senyawa SrTiO₃ dalam Keadaan Gelap

Inokulum *Staphylococcus aureus* dengan OD 0,1 sebanyak 10 mL dan *Nutrient Broth* steril 100 mL dimasukkan dalam *beaker glass*. kemudian ditambahkan SrTiO₃ sesuai perlakuan dioptimasi dengan variasi konsentrasi 2,5; 5; dan 10 mg. Dihomogenkan dengan menggunakan *stirrer* selama 120 menit.

3.6.5.5 Uji Aktivitas Antibakteri Senyawa SrTiO₃ dengan Radiasi Sinar UV

Inokulum *Staphylococcus aureus* dengan OD 0,1 sebanyak 10 mL dan *Nutrient Broth* steril 100 mL dimasukkan dalam *beaker glass*, kemudian

ditambahkan SrTiO₃ sesuai perlakuan dioptimasi dengan variasi konsentrasi 2,5; 5; dan 10 mg, kemudian dihomogenkan. Sampel dipapar dengan lampu UV 40 W dan dioptimasi selama 120 menit serta diaduk dengan menggunakan *stirrer* selama perlakuan. Dihitung bakteri *Staphylococcus aureus* yang mati dengan metode *total plate count* (TPC).

3.6.5.6 Perhitungan Jumlah Sel Bakteri

Tabung reaksi disiapkan sebanyak 7 buah diisi dengan NaCl 0,85% steril sebanyak 9 mL. Inokulum bakteri *Staphylococcus aureus* dalam media *Nutrient Broth* diambil sebanyak 1 mL, dimasukkan kedalam tabung reaksi, dihomogenkan dengan *vortex* dan dihitung sebagai pengenceran pertama (10^{-1}). Larutan pada tabung reaksi pertama dipipet sebanyak 1 mL dan dimasukkan kedalam tabung reaksi kedua, diperoleh pengenceran tingkat kedua (10^{-2}). Demikian seterusnya hingga pengenceran kesepuluh (10^{-10}) (Rizki dkk., 2022). Metode yang digunakan untuk menghitung jumlah sel bakteri adalah metode *total plate count* (TPC) (Genoveva Preta Angelika, Agung Suprihadi, 2014). Masing-masing larutan pengenceran diambil sebanyak 0,1 mL dan dimasukkan kedalam cawan petri yang berisi media NB. Cawan petri digoyangkan hingga merata dan didiamkan hingga memadat, kemudian diinkubasi dengan posisi terbalik pada suhu 37°C selama 24 jam. Cara menghitung, dipilih cawan petri yang memiliki koloni antar 30-300. Jika perbandingan antara kedua larutan pengenceran <2 , maka nilai yang diambil adalah rata-rata dari kedua nilai tersebut dengan memperhatikan nilai pengencerannya. Jika perbandingan >2 , maka diambil yang terbesar atau terkecil. Perhitungan jumlah bakteri dihitung berdasarkan persamaan 3.2.

Perhitungan jumlah bakteri = jumlah koloni tiap cawan $\times \frac{1}{fp} cfu.....(3.2)$

Dengan fp merupakan faktor pengenceran (Faktor pengenceran = pengenceran (x) jumlah yang diencerkan).

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dilakukan uji aktivitas antibakteri terhadap bakteri *Staphyococcus aureus* dengan menggunakan metode *Total Plate Count* (TPC) pada senyawa SrTiO₃ yang diperoleh dari hasil sintesis lelehan garam campuran NaCl-KCl dengan perbandingan mol prekursor dan garam 1:7:7, kemudian dikalsinasi pada suhu 750 °C selama 6 jam dan dilanjutkan pada suhu 820 °C selama 6 jam. Hasil sintesis dikarakterisasi menggunakan (a) XRD untuk mengidentifikasi fasa dan struktur yang terbentuk; (b) SEM untuk mengetahui struktur morfologi dan komposisi unsur serta ukuran partikel; dan (c) UV-Vis DRS untuk mengetahui energi celah pita.

4.1 Sintesis Senyawa SrTiO₃ dengan Metode Lelehan garam

Sintesis SrTiO₃ dengan metode lelehan garam dilakukan dengan menggerus Prekursor SrCO₃ dan titanium oksida (TiO₂) serta garam NaCl-KCl selama 3 jam yang bertujuan untuk memperluas interaksi antar prekursor. Selama proses penggerusan ditambahkan aseton yang bertujuan untuk meningkatkan homogenitas dari prekursor. Aseton digunakan karena tidak dapat bereaksi dengan prekursor dan mudah menguap pada suhu ruang. Selanjutnya, sampel dikalsinasi diatas titik leleh dari garam pada suhu 750 °C selama 6 jam dan dilanjutkan pada suhu 820 °C selama 6 jam.

Terlihat pada Gambar 4.1 (a) sampel SrTiO₃ sebelum proses kalsinasi berbentuk serbuk. Sedangkan, pada gambar 4.1 (b) setelah proses kalsinasi sampel

memadat yang dimungkinkan saat proses kalsinasi garam leleh dan memadat setelahnya. Reaksi yang terjadi ditampilkan pada persamaan 4.1.



Kemudian, dilakukan pencucian sampel menggunakan aquades yang dididihkan untuk menghilangkan garam dan diidentifikasi menggunakan larutan AgNO_3 pada filtrat hasil pencucian.

4.2 Karakterisasi Hasil Sintesis SrTiO_3 dengan XRD

Senyawa SrTiO_3 hasil sintesis dikarakterisasi menggunakan XRD. Difraktogram senyawa SrTiO_3 dibandingkan dengan data standar SrTiO_3 pada *The Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) No. A91889 dengan grup ruang $Pm\bar{3}m$ ditampilkan pada Gambar 4.2. Dari hasil perbandingan didapatkan kesesuaian antara sampel dan standar. Puncak-puncak khas SrTiO_3 ditemukan pada 2θ : 22,7; 32,4; 39,9; 46,5; 52,4; 57,9; 68,0; 72,6; 77,3; 81,7; dan 86,2°. Hal tersebut menunjukkan bahwa senyawa SrTiO_3 berhasil disintesis. Hasil perbandingan juga tidak ditemukan adanya puncak-puncak lain yang menunjukkan bahwa tidak adanya senyawa pengotor yang terbentuk. Data XRD selanjutnya dianalisis lebih lanjut (*refinement*) menggunakan program Rietica dengan metode *Le Bail* untuk memperoleh data kristalografi. *Refinement* difraktogram bertujuan untuk menentukan derajat kesesuaian antara difraktogram sampel dan data standar. Proses *refinement* menggunakan data standar SrTiO_3 .

Plot hasil *refinement* ditampilkan pada Gambar 4.3 dan data kristalografi hasil *refinement* ditampilkan pada tabel 4.1. Data hasil *refinement* senyawa SrTiO_3 ditampilkan menunjukkan bahwa terdapat kesesuaian dengan standar yang

dibuktikan dengan nilai *R-profile* (R_p) = 6,26%; *weight profile-R* (R_{wp}) = 6,35%; dan nilai GOF (X^2) = 0,4584%. Nilai $R_p < 10\%$ menunjukkan tingkat kesesuaian yang tinggi. Data *refinement Reiveld* yang bisa diterima jika mempunyai nilai $R_{wp} < 20\%$ dan $GOF < 4\%$ (Mukminin, 2019).

4.3 Karakterisasi Hasil Sintesis SrTiO₃ dengan SEM

Morfologi partikel dari senyawa SrTiO₃ hasil karakterisasi instrument SEM ditunjukkan pada Gambar 4.4. Morfologi senyawa SrTiO₃ yang telah disintesis menggunakan garam campuran NaCl-KCl memiliki morfologi yang tidak sama dan beragam, antara lain berbentuk bulat dan kubik. Maulidianingtiyas, dkk. (2021) mensintesis SrTiO₃ dengan metode lelehan garam NaCl menghasilkan morfologi berbentuk *nearly cubic*. Hasil pengukuran distribusi ukuran partikel dengan bentuk morfologi bulat menggunakan imageJ dapat dilihat pada Gambar 4.5. Hasil perhitungan distribusi partikel sampel SrTiO₃ yang disintesis menggunakan garam campuran NaCl-KCl yang memiliki bentuk bulat diperoleh rata-rata $\pm 0,23 \mu\text{m}$. Didapatkan distribusi partikel paling banyak pada rentang 0,15-0,30 μm .

4.4 Karakterisasi Hasil Sintesis SrTiO₃ dengan UV-Vis DRS

Karakterisasi menggunakan UV-Vis DRS untuk mengetahui energi celah pita dari senyawa SrTiO₃. Spektra UV-Vis DRS hubungan antara nilai reflektansi (% R) dan panjang gelombang ditampilkan pada Gambar 4.5. Dapat dilihat bahwa nilai reflektansi (% R) yang tinggi pada panjang gelombang 400-800 nm. Plot Tauc untuk menghitung energi celah pita ditampilkan pada Gambar 4.6. Hasil penentuan energi celah pita senyawa SrTiO₃ memiliki energi celah pita tidak langsung (*indirect*) sebesar 3,08 eV. Energi celah pita yang semakin kecil menyebabkan

semakin mudahnya eksitasi elektron dari tingkat rendah menuju tingkat yang lebih tinggi, eksitasi terjadi pada pita valensi ke pita konduksi (Olimpiani & Astuti, 2016). Serapan energi celah pita pada panjang gelombang tersebut disebabkan oleh transisi elektronik dari orbital 2p O ke orbital 3d Ti (Prasetiyo, 2020).

Pada penelitian yang dilakukan oleh Li, dkk. (2015) yang telah mensintesis SrTiO₃ dengan metode lelehan garam dengan morfologi TiO₂ yang berbeda didapatkan energi celah pita tidak langsung sebesar 3,092 eV pada SrTiO₃ tabung, sebesar 3,088 eV pada SrTiO₃ lembaran, dan sebesar 2,790 eV pada SrTiO₃ bola. Sedangkan, penelitian yang dilakukan Thoif, dkk. (2020) dengan mensintesis SrTiO₃ dengan metode hidrotermal dengan variasi suhu didapatkan nilai energi celah pita tidak langsung (eV) yaitu SrTiO₃-150 sebesar 3,20; SrTiO₃-175 sebesar 3,17; SrTiO₃-200 sebesar 3,16; dan SrTiO₃-225 sebesar 3,14.

4.5 Uji Aktivitas Antibakteri Senyawa SrTiO₃ terhadap Bakteri *Staphylococcus aureus*

Uji aktivitas antibakteri dilakukan dengan menggunakan metode *Total Plate Count* (TPC). Bakteri yang digunakan dalam uji antibakteri ini adalah *Staphylococcus aureus* dengan nilai OD 0,1 setara dengan kepadatan sel bakteri sebesar 10⁸ CFU/mL. Pengujian antibakteri dilakukan menggunakan senyawa SrTiO₃ dengan variasi konsentrasi 2,5; 5; dan 10 mg dalam kondisi gelap dan disinari cahaya dirangkum pada Tabel 4.2 dan ditampilkan pada Gambar 4.8.

Hasil uji aktivitas antibakteri terhadap bakteri *Staphylococcus aureus* ditampilkan pada Gambar 4.8 dan dirangkum pada Tabel 4.2. Gambar 4.8 menunjukkan jumlah koloni bakteri pada ruang terbuka didapatkan pertumbuhan bakteri tertinggi sebesar $42,0 \times 10^7$ CFU/mL. Hal ini dikarenakan bakteri tidak

mengalami hambatan, sehingga mengalami pertumbuhan yang maksimal. Dari Gambar 4.8 menunjukkan bahwa pertumbuhan bakteri dengan cahaya dan tanpa cahaya serta tanpa adanya penambahan SrTiO_3 mengalami pertumbuhan yang paling sedikit. Hal tersebut dapat dimungkinkan karena sterilisasi yang cukup baik ataupun faktor eksperimen sehingga tidak terjadi kontaminasi dan pertumbuhan bakteri yang cukup kecil. Dimungkinkan pula diakibatkan dengan kondisi lingkungan lain terkait pertumbuhan bakteri *Staphylococcus aureus* seperti suhu, pH, dan asupan nutrisi. Faktor lain yang juga berhubungan yaitu cahaya UV dapat berperan untuk mensterilkan, sehingga laju pertumbuhan menjadi lebih kecil.

Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa pertumbuhan bakteri mengalami penurunan pada saat ditambahkan senyawa SrTiO_3 dengan cahaya maupun tanpa cahaya. Hal tersebut menunjukkan bahwa senyawa SrTiO_3 dapat menghambat pertumbuhan bakteri. Penurunan pertumbuhan pada kondisi tanpa cahaya dengan variasi konsentrasi senyawa 2,5; 5; dan 10 mg menunjukkan bahwa senyawa SrTiO_3 dapat menghambat pertumbuhan bakteri tanpa adanya mekanisme fotokatalis. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Azam, dkk., (2012) bahwa material oksida logam ZnO , CuO , dan Fe_2O_3 berpotensi sebagai antimikroba yang baik, dimana senyawa ZnO yang menunjukkan hasil pertumbuhan yang paling sedikit. Pada penelitian yang dilakukan oleh Dizaj, dkk. (2014) dilaporkan bahwa nano partikel MgO menunjukkan efek antibakteri yang baik dan dapat terjadi tanpa adanya produksi ROS, yang mungkin disebabkan oleh kerusakan dari membran sel.

Hasil uji aktivitas antibakteri dengan penambahan senyawa SrTiO_3 pada kondisi gelap dan terang menghasilkan nilai yang tidak terlalu jauh. Namun nilai standar deviasi menunjukkan nilai fluktuasi yang cukup tinggi. Penurunan

pertumbuhan pada kondisi tanpa cahaya dengan variasi konsentrasi senyawa 2,5; 5; dan 10 mg menunjukkan bahwa senyawa SrTiO₃ dapat menghambat pertumbuhan bakteri. sehingga dapat dimungkinkan bahwa mekanisme penghambatan dengan fotokatalis juga berperan. Mekanisme penghambatan dengan fotokatalis didasarkan pada penyinaran senyawa fotokatalitik SrTiO₃ dengan lampu UV untuk menghasilkan senyawa radikal (ROS). Senyawa radikal yang dihasilkan selama proses penyinaran dapat merusak dinding sel dan menyebabkan reaksi oksidasi pada membran sitoplasma (Regmi, dkk., 2018).

Pertumbuhan bakteri dengan cahaya maupun tanpa cahaya dengan ditambahkan senyawa SrTiO₃ sebanyak 10 mg mengalami peningkatan pertumbuhan dibandingkan senyawa dengan konsentrasi 2,5 dan 5 mg. Hal tersebut dimungkinkan bahwa pada konsentrasi tertentu senyawa SrTiO₃ dapat menginduksi pertumbuhan bakteri *Staphylococcus aureus*. (Hosman dkk., 2009) melaporkan bahwa ion logam pada konsentrasi tertentu dapat menstimulasi pertumbuhan bakteri. Selain itu, dimungkinkan aktivitas antibakteri dipengaruhi oleh bentuk morfologi dan ukuran partikel. Menichetti dkk., (2023) melaporkan bahwa bentuk dan ukuran mempengaruhi aktivitas antibakteri.

4.6 Sintesis, Karakterisasi, dan Uji Aktivitas Antibakteri Senyawa SrTiO₃ Fotokatalis dalam Perspektif Islam

Allah SWT menciptakan segala sesuatu yang ada di langit dan bumi untuk kita jaga sebaik-baiknya. Namun, ada banyak kerusakan akibat penggunaan yang berlebih dan pembuangan sampah maupun limbah tidak pada tempatnya. Oleh karena itu, perlunya melakukan perubahan dan menjaga lingkungan. Seperti firman Allah dalam QS. ar Rad ayat 11:

لَهُمْ مُعَقَّبَاتٌ مِّنْ بَيْنِ يَدَيْهِ وَمِنْ خَلْفِهِ يَحْفَظُونَهُ مِنْ أَمْرِ اللَّهِ إِنَّ اللَّهَ لَا يُعَيِّرُ مَا بِقَوْمٍ حَتَّىٰ يُعَيِّرُوا مَا بِأَنْفُسِهِمْ وَإِذَا أَرَادَ اللَّهُ بِقَوْمٍ سُوءًا فَلَا مَرَدَّ لَهُ ۗ وَمَا لَهُمْ مِّنْ دُونِهِ مِنْ وَالٍ

Artinya:

“Baginya (manusia) ada malaikat-malaikat yang selalu menjaganya bergiliran, dari depan dan belakangnya. Mereka menjaganya atas perintah Allah. Sesungguhnya Allah tidak akan mengubah keadaan suatu kaum sebelum mereka mengubah keadaan diri mereka sendiri”.

Amrullah, (2001) menjelaskan bahwa malaikat-malaikat sengaja disediakan oleh Allah untuk menjaga kita seluruh makhluk ini dengan bergiliran. Dalam ayat tersebut terdapat bunyi bahwa Allah tidak akan merubah nasib suatu kaum kalau tidak kaum itu sendiri yang terlebih dahulu mengubah nasibnya. Di situ terdapat ikhtiar manusia. Dan ikhtiar itu terasa sendiri oleh masing-masing kita. Kekayaan jiwa yang terpendam dalam batin kita. tidaklah akan menyatakan dirinya keluar. kalau kita sendiri tidak berikhtiar dan berusaha. Salah satu bentuk ikhtiar manusia dalam menjaga bumi dari banyaknya kontaminasi bakteri pada limbah dan air yaitu dengan mensistesis senyawa SrTiO₃.

Demikian pula, Allah tidak akan mengubah nasib suatu bangsa dari susah menjadi bahagia ataupun dari kuat menjadi lemah. Melainkan adanya usaha dari mereka sendiri untuk mengubah keadaan. Selain itu, terdapat kata "gouma" yang bermakna perubahan. Suatu perubahan tidak dapat dilakukan sendiri (Shihab, 2012). Oleh sebab itu, penelitian ini merupakan salah satu bentuk usaha yang nantinya dapat memberikan informasi untuk mengatasi permasalahan lingkungan seperti pencemaran air oleh bakteri dengan penggunaan senyawa fotokatalis SrTiO₃.

Sebelum terjadinya infeksi penyakit yang disebabkan oleh kontaminasi bakteri *Stapylococcus aureus* dalam limbah dan air. Maka dilakukan pencegahan,

salah satunya dengan menghambat pertumbuhan bakteri agar bakteri tidak dapat tumbuh dengan maksimal. Seperti firman Allah dalam QS. asy Syuara ayat 80:

وَإِذَا مَرَضْتُ فَبُهِدْتُ فَهُوَ يَشْفِينِ

Artinya:

“Dan apabila aku sakit, Dialah Yang menyembuhkan aku”

Amrullah (2001) menafsirkan bahwa bukanlah berhala yang menyembuhkan manusia tatkala dia ditimpa sakit, tetapi Tuhan Sarwa Sekalian Alam. Manusia mencari obat, entah dari resep kimia tertentu, dari daun-daun yang tumbuh di bumi, ataupun dengan kekuatan doa. Sebelum ajal, segala penyakit dapat disembuhkan oleh Allah. memberikan pula ilham kepada manusia untuk mengobati sakitnya. Sedangkan kucing ataupun anjing kalau ditimpa sakit, kadang-kadang dapat kita lihat, dia mendapat ilham naluri buat memakan semacam rumput ataupun daun-daunan, dimamah dan dilulurnya, sehingga dia pun sembuh kembali.

Salah satunya dengan senyawa fotokatalis SrTiO_3 yang dapat digunakan untuk menghambat pertumbuhan bakteri *Stapylococcus aureus*. Senyawa SrTiO_3 dengan energi celah pita sebesar 3,08 eV yang apabila disinari oleh cahaya UV dapat menghambat pertumbuhan bakteri yang cukup baik. Sehingga dapat digunakan untuk mengurangi bakteri yang terdapat pada limbah dan mengurangi angka infeksi penyakit akibat bakteri.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa senyawa SrTiO₃ berhasil disintesis dengan metode lelehan garam campuran NaCl-KCl dengan tidak ditemukan pengotor dan didapatkan puncak khas SrTiO₃ pada 2θ : 22,7; 32,4; 39,9; 46,5; 52,4; 57,9; 68,0; 72,6; 77,3; 81,7; dan 86,2°. Bentuk morfologi yang didapatkan morfologi yang tidak sama dan beragam. Senyawa SrTiO₃ hasil sintesis memiliki energi celah pita sebesar 3,08 eV.
2. Hasil uji aktivitas antibakteri senyawa SrTiO₃ mengalami penurunan pertumbuhan pada kondisi dengan cahaya maupun tanpa cahaya. Hasil uji aktivitas antibakteri senyawa SrTiO₃ dengan variasi konsentrasi 2,5; 5; dan 10 mg menggunakan cahaya sebesar 8,88; 5,34; dan 12,10 CFU/mL dan tanpa cahaya sebesar 11,45; 4,73; dan 6,18 CFU/mL menunjukkan bahwa senyawa SrTiO₃ kufang memiliki potensi sebagai antibakteri yang dapat menghambat pertumbuhan bakteri.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan penelitian uji aktivitas antibakteri sejenis dengan metode lain dan dengan bakteri patogen lain, seperti *Escherichia coli*.
2. Perlu dilakukan dopan untuk mendapatkan energi celah pita yang lebih kecil dan mengetahui aktivitas antibakteri yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Abror, M. L., Hastuti, E., & Prasetyo, A. (2023). Molten Salt Synthesis of Photocatalyst Material $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ for Methylene Blue Degradation. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, 17(2), 182–189.
- Amrullah, A. A. (2001a). *Tafsir Al-Azhar* (Vol. 1). Pustaka Nasional Pte Ltd.
- Amrullah, A. A. (2001b). *Tafsir Al-Azhar vol. 7* (Vol. 01). Pustaka Nasional Pte Ltd.
- Amrullah, A. A. (2001c). *Tafsir Al-Azhar Vol.8*. Kerjaya Printing Industries Pte Ltd.
- Azam, A., Ahmed, A. S., Oves, M., Khan, M. S., Habib, S. S., & Memic, A. (2012). Antimicrobial activity of metal oxide nanoparticles against Gram-positive and Gram-negative bacteria: A comparative study. *International Journal of Nanomedicine*, 7, 6003–6009.
- Chomcheon, S., Lenbury, Y., & Sarika, W. (2019). Stability, Hopf bifurcation and effects of impulsive antibiotic treatments in a model of drug resistance with conversion delay. *Advances in Difference Equations*, 2019(1).
- Dizaj, S. M., Lotfipour, F., Barzegar-Jalali, M., Zarrintan, M. H., & Adibkia, K. (2014). Antimicrobial activity of the metals and metal oxide nanoparticles. *Materials Science and Engineering C*, 44, 278–284.
- Doron, S., & Gorbach, S. L. (2008). Bacterial Infections: Overview. In *International Encyclopedia of Public Health* (pp. 273–282). Elsevier.
- Fatimah, I., Ilahi, R. N., & Pratami, R. (2018). Low Cost CaTiO_3 Perovskite Synthesized from Scallop (*Anadara granosa*) Shell as Antibacterial Ceramic Material. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 299(1), 0–5.
- Ganguly, P., Byrne, C., Breen, A., & Pillai, S. C. (2018). Antimicrobial activity of photocatalysts: Fundamentals, mechanisms, kinetics and recent advances. *Applied Catalysis B: Environmental*, 225, 51–75. 8
- Genoveva Preta Angelika, Agung Suprihadi, S. P. (2014). Uji Aktivitas Antibakteri Ekstrak Tumbuhan *Euphorbia hirta* L. Terhadap *Ralstonia solanacearum*, *Escherichia coli*, dan *Staphylococcus aureus* Secara in vitro. *Jurnal Biologi*, 3(2), 49–58.
- Gulati, R., Sharma, S., & Sharma, R. K. (2022). Antimicrobial textile: recent developments and functional perspective. *Polymer Bulletin*, 79(8), 5747–5771.
- Holderman, M. V., De Queljoe, E., & Rondonuwu, S. B. (2017). Identifikasi Bakteri Pada Pegangan Eskalator di Salah Satu Pusat Perbelanjaan di Kota Manado. *Jurnal Ilmiah Sains*, 17(1), 13.
- Hosman, A. H., Van Der Mei, H. C., Bulstra, S. K., Busscher, H. J., & Neut, D.

- (2009). Metal-on-metal bearings in total hip arthroplasties: Influence of cobalt and chromium ions on bacterial growth and biofilm formation. *Journal of Biomedical Materials Research - Part A*, 88(3), 711–716.
- Kanhere, P., & Chen, Z. (2014). A review on visible light active perovskite-based photocatalysts. *Molecules*, 19(12), 19995–20022.
- Kurniawan, I., & Mariadi, P. D. (2019). Analisis Potensi Cemaran Sisa Penggunaan Antibiotik di Perairan Umum (Studi Kasus : Badan Sungai Musi Kota Palembang). *Sainmatika: Jurnal Ilmiah Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam*, 16(2), 110.
- Kusuma, A. P., Rombot, D. V., & Palandeng, H. M. F. (2022). Gambaran Pencemaran Antibiotik pada Sistem Pembuangan Limbah Cair di RSUP Prof. Dr. R. D. Kandou Manado. *Jurnal Kedokteran Komunitas Dan Tropik*, 9, 329–333.
- Li, C., Liu, Z., Zhou, H., Haminhgoc, Zhu, F., Guo, Q., & Zhao, Z. (2015). Molten salt synthesis of SrTiO₃ using TiO₂ with different morphology as a precursor. *Integrated Ferroelectrics*, 162(1), 113–121.
- Li, H. L., Du, Z. N., Wang, G. L., & Zhang, Y. C. (2010). Low temperature molten salt synthesis of SrTiO₃ submicron crystallites and nanocrystals in the eutectic NaCl-KCl. *Materials Letters*, 64(3), 431–434.
- Locke, T., Keat, S., Walker, A., Mackinnon, R., & Read, R. C. (2012). Microbiology and infectious diseases on the move. *Microbiology and Infectious Diseases on the Move*, 1–242.
- Maulidianingtiyas, H., Prasetyo, A. D., Haikal, F., Cahyo, I. N., Istighfarini, V. N., & Prasetyo, A. (2021). Pengaruh Penggantian Kation-A/Sr oleh Ba pada Morfologi Partikel Ba_xSr_(1-x)TiO₃ ($x = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$) Hasil Sintesis dengan Metode Lelehan Garam. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 17(2), 211.
- Menichetti, A., Mavridi-Printezi, A., Mordini, D., & Montalti, M. (2023). Effect of Size, Shape and Surface Functionalization on the Antibacterial Activity of Silver Nanoparticles. *Journal of Functional Biomaterials*, 14(5).
- Muhamad, N. F., Maulat Osman, R. A., Idris, M. S., & Mohd Yasin, M. N. (2017). Physical and electrical properties of SrTiO₃ and SrZrO₃. *EPJ Web of Conferences*, 162, 2–5.
- Mukminin, A. (2019). Analisis Komposisi Fasa dan Parameter Unit Sel Kristal Hasil Kalsinasi Suhu Tinggi Abu Cangkang (Paguroidea) dengan Metode Rietveld. *JST (Jurnal Sains Terapan)*, 5(1), 1–5.
- Novianti, D. R. (2020). Sintesis Material CaTiO₃ Terdoping Fe³⁺ Dengan Menggunakan Metode Lelehan Garam Tunggal NaCl.
- Novianti, D. R., Haikal, F., Rouf, U. A., Hardian, A., & Prasetyo, A. (2022). Synthesis and Characterization of Fe-Doped CaTiO₃ Polyhedra Prepared by Molten NaCl Salt. *Science and Technology Indonesia*, 7(1), 17–21.

- Olimpiani, I., & Astuti. (2016). Efek Doping Senyawa Alkali Terhadap Celah Pita Energi Nanopartikel ZnO. *Jurnal Fisika Unand*, 5(2), 115–121.
- Prasetyo, A. D. (2020). *Sintesis SrTiO₃ Terdoping Fe dengan Metode Lelehan Garam*.
- Putri, Y. E. (2021). SrTiO₃ Nanokubus: Sintesis, Kontrol Morfologi dan Sifat Termoelektrik (Tinjauan). *Akta Kimia Indonesia*, 6(1), 83.
- Regmi, C., Joshi, B., Ray, S. K., Gyawali, G., & Pandey, R. P. (2018). Understanding Mechanism of Photocatalytic Microbial Decontamination of Environmental Wastewater. *Frontiers in Chemistry*, 6(February), 1–6.
- Ren, J., Wang, W., Zhang, L., Chang, J., & Hu, S. (2009). Photocatalytic inactivation of bacteria by photocatalyst Bi₂WO₆ under visible light. *Catalysis Communications*, 10(14), 1940–1943.
- Rianti, E. D. D., Tania, P. O. A., & Listyawati, A. F. (2022). Kuat medan listrik AC dalam menghambat pertumbuhan koloni Staphylococcus aureus dan Escherichia coli. *Bioma : Jurnal Ilmiah Biologi*, 11(1), 79–88.
- Rini, Chylen Setio & Rochmah, J. (2020). *Buku Ajar Bakteriologi Dasar* (M. Mushlih (ed.)). UMSIDA Press.
- Rizki, Z., Fitriana, F., & Jumadewi, A. (2022). Identifikasi jumlah angka kuman pada dispenser metode TPC (Total Plate Count). *Jurnal SAGO Gizi Dan Kesehatan*, 4(1), 38.
- Roth, R. S. (1957). Classification of perovskite and other ABO₃-type compounds. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 58(2), 75.
- Setyaningsih, E. P., Machfudzoh, M., Utomo, W. P., & Fansuri, H. (2016). Preparation of CaTiO₃ asymmetric membranes using polyetherimide as binder polymer. *Indonesian Journal of Chemistry*, 16(1), 20–24.
- Shang, C., Bu, J., & Song, C. (2022). Preparation, Antimicrobial Properties under Different Light Sources, Mechanisms and Applications of TiO₂: A Review. *Materials*, 15(17).
- Shivarahaju H.P. (2011). Removal of Organic Pollutants in the Municipal Sewage Water by TiO₂ based Heterogeneous Photocatalysis. *International Journal of Environmental Sciences*, 1(5).
- Sihombing, michelles & Mantiri, F. (2022). *Staphylococcus aureubahaya bakteri staphylococcus aureus pada jajanan anak sekolah dasar*.
- Singh, C., Wagle, A., & Rakesh, M. (2017). Doped LaCoO₃ perovskite with Fe: A catalyst with potential antibacterial activity. *Vacuum*, 146, 468–473.
- Susilawat, I. D. A. (2021). Kajian Pustaka: Sumber Reactive Oxygen Species (ROS) Vaskular (Review: Vascular sources of Reactive Oxygen Species). *Stomatognatic (J.K.G Unej)*, Vol. 18 No, 1–10.
- Thoif, M., Prasetyo, A., & Aini, N. (2020). Sintesis Material Fotokatalis Strontium

- titanat (SrTiO_3) dengan Metode Hidrotermal pada Variasi Suhu. *JC-T (Journal Cis-Trans): Jurnal Kimia Dan Terapannya*, 4(1), 8–13.
- Tussa'adah, R., & Astuti. (2015). Sintesis Material Fotokatalis TiO_2 untuk Penjernihan Limbah Tekstil. *Jurnal Fisika Unand*, 4(1), 91–96.
- Wahab, R., Khan, F., & Al-Khedhairi, A. A. (2020). Peanut-shaped ZnO nanostructures: A driving force for enriched antibacterial activity and their statistical analysis. *Ceramics International*, 46(1), 307–316.
- Xue, P., Hu, Y., Xia, W., Wu, H., & Zhu, X. (2017). Molten-salt synthesis of BaTiO_3 powders and their atomic-scale structural characterization. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 2870–2877.
- Yanti, Y. N., & Mitika, S. (2017). Uji Efektivitas Antibakteri Ekstrak Etanol Daun Sambiloto (*Andrographis paniculata* Ness) Terhadap Bakteri *Staphylococcus aureus*. *Jurnal Ilmiah Ibnu Sina*, 2(1), 158–168.
- Zhang, L., Tan, P. Y., Chow, C. L., Lim, C. K., Tan, O. K., Tse, M. S., & Sze, C. C. (2014). Antibacterial activities of mechanochemically synthesized perovskite strontium titanate ferrite metal oxide. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 456(1), 169–175.

