

**ISOLASI DAN KARAKTERISASI BAKTERI DARI SAMPEL ABU
TERBANG (Fly Ash) DAN AIR DI PLTU TARAHAH LAMPUNG
SELATAN YANG POTENSIAL UNTUK MENGEKSTRAKSI LOGAM
TANAH JARANG (LTJ) YTTRIUM (Y) SEBAGAI AGEN BIOREMEDIASI**

(Skripsi)

Oleh

**AFIFAH SIFAK APRILIA
NPM 2117021009**



**JURUSAN BIOLOGI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

ISOLASI DAN KARAKTERISASI BAKTERI DARI SAMPEL ABU TERBANG (*Fly Ash*) DAN AIR DI PLTU TARAHAN LAMPUNG SELATAN YANG POTENSIAL UNTUK MENGEKSTRAKSI LOGAM TANAH JARANG (LTJ) YTTRIUM (Y) SEBAGAI AGEN BIOREMEDIASI

Oleh

AFIFAH SIFAK APRILIA

Kegiatan pada lokasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), terutama selama proses pembakaran batubara, menghasilkan residu seperti *fly ash* dan *bottom ash*. *Fly ash* merupakan polutan berupa abu halus yang berbahaya bagi lingkungan apabila tidak ditangani dengan baik, namun memiliki potensi kandungan LTJ yang berharga. Sehingga diperlukan cara penanganan yang sesuai untuk dapat memaksimalkan potensi yang terkandung pada *fly ash*. Penelitian ini bertujuan untuk mengisolasi dan mengkarakterisasi bakteri dari sampel *fly ash* dan air di lokasi PLTU Tarahan Lampung Selatan yang potensial untuk mengekstraksi logam tanah jarang (LTJ) sebagai agen bioremediasi. Dalam penelitian ini dilakukan studi eksperimental dengan pendekatan eksploratif, meliputi pengambilan sampel dari lokasi penimbunan *fly ash*, isolasi dan kultivasi bakteri, karakterisasi secara makroskopik dan mikroskopik, serta uji optimasi kinerja bakteri terhadap logam yttrium untuk mengetahui batas toleransi bakteri terhadap salah satu jenis logam yang terkandung dalam *fly ash*. Hasil penelitian menunjukkan terdapat total 11 isolat dengan 5 isolat (FA1.1, FA1.2, FA2.1, FA2.2, FA3.2) hasil isolasi dari sampel *fly ash* dan 6 lainnya (W1.1, W1.2, W2.1, W2.2, W3.1, W3.2) dari sampel air disekitar *fly ash dump*. Kesebelas isolat yang diamati memiliki karakteristik beragam dari bentuk (*circular*, *irregular*, dan *rhizoid*), elevasi (*flat*, *raised*, *umbonate*, dan *convex*), tepi (*undulate*, *curled*, *entire*, dan *filiform*), hingga warna koloni (*putih* dan *putih transparan*). Hasil pewarnaan Gram mengindikasikan terdapat 3 isolat (FA2.1, W1.1, W3.2) yang merupakan bakteri Gram positif dengan keberadaan spora yang juga teramat pada ketiganya. Sedangkan untuk nilai uji optimasi kinerja bakteri terhadap logam Y dengan absorbansi tertinggi ditunjukkan oleh isolat FA1.1, FA3.2, W1.1, W2.2, dan W3.2.

Kata Kunci: bakteri, bioremediasi, *fly ash*, isolasi, Logam Tanah Jarang (LTJ), PLTU.

ABSTRACT

ISOLATION AND CHARACTERIZATION OF BACTERIA FROM FLY ASH AND WATER SAMPLES AT THE TARAHAN SOUTH LAMPUNG THERMAL POWER PLANT WITH POTENTIAL FOR EXTRACTING THE RARE EARTH METAL (REM) YTTRIUM (Y) AS A BIOREMEDIAL AGENT

By

AFIFAH SIFAK APRILIA

Activities at coal-fired power plants (PLTU), particularly during the coal combustion process, generate residues such as fly ash and bottom ash. Fly ash is a fine particulate pollutant that poses environmental risks if not properly managed, yet it also contains valuable rare earth elements (REEs). Therefore, proper management strategies are required to mitigate its negative impacts while maximizing its potential. This study aimed to isolate and characterize bacteria from fly ash and water samples collected at the Tarahan PLTU, South Lampung, which have potential as bioremediation agents for extracting REEs. An experimental exploratory approach was employed, including sampling from fly ash disposal sites, bacterial isolation and cultivation, macroscopic and microscopic characterization, and optimization assays to evaluate bacterial tolerance to Yttrium as a representative REE. The results yielded a total of 11 isolates, consisting of five isolates (FA1.1, FA1.2, FA2.1, FA2.2, FA3.2) from fly ash samples and six isolates (W1.1, W1.2, W2.1, W2.2, W3.1, W3.2) from water samples surrounding the fly ash dump. The isolates exhibited diverse macroscopic characteristics in terms of colony shape (circular, irregular, and rhizoid), elevation (flat, raised, umbonate, and convex), margin (undulate, curled, entire, and filiform), and colony color (white and translucent white). Gram staining revealed three isolates (FA2.1, W1.1, W3.2) as Gram-positive bacteria with observable spore formation, while the others were Gram-negative. Optimization assays demonstrated that the highest absorbance values in the presence of Yttrium were shown by isolates FA1.1, FA3.2, W1.1, W2.2, and W3.2, indicating their strong potential as bioleaching and bioremediation agents.

Keywords: bacteria, bioremediation, coal-fired power plant, fly ash, isolation, rare earth elements (REEs).

**ISOLASI DAN KARAKTERISASI BAKTERI DARI SAMPEL ABU
TERBANG (*Fly Ash*) DAN AIR DI PLTU TARAHAH LAMPUNG
SELATAN YANG POTENSIAL UNTUK MENGEKSTRAKSI LOGAM
TANAH JARANG (LTJ) YTTRIUM (Y) SEBAGAI AGEN BIOREMEDIASI**

Oleh
AFIFAH SIFAK APRILIA

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada
Jurusank Biologi
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



**JURUSAN BIOLOGI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

Judul Skripsi

: **Isolasi dan Karakterisasi Bakteri dari Sampel Abu Terbang (Fly Ash) dan Air di PLTU Tarahan Lampung Selatan yang Potensial untuk Mengekstraksi Logam Tanah Jarang (LTJ) Yttrium (Y) sebagai Agen Bioremediasi**

Nama Mahasiswa

: **Afifah Sifak Aprilia**

NPM

: 2117021009

Program Studi

: S-1 Biologi

Jurusan

: Biologi

Fakultas

: Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Pembimbing I

Dr. Kusuma Handayani, S.Si., M.Si.

NIP. 197808192008012018

Pembimbing II

Fika Rofiek Mufakhir, S.T., M.T.

NIP. 198304052008011008

Mengetahui,
Ketua Jurusan Biologi

FMIPA Unila

Dr. Jani Master, S.Si., M.Si.

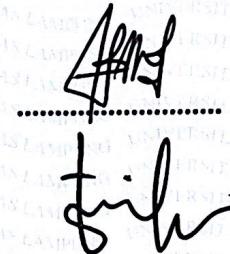
NIP. 19830131200812100

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

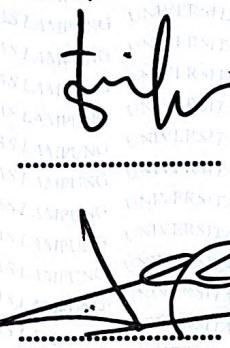
Ketua

: Dr. Kusuma Handayani, S.Si, M.Si.



Sekretaris

: Fika Rofiek Mufakhir, S.T., M.T.



Anggota

: Prof. Tugiyono, Ph.D.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si, M.Si.

NIP 197110012005011002

Tanggal

: 3 November 2025

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Afifah Sifak Aprilia
NPM : 2117021009
Jurusan : Biologi
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejurnya, bahwa skripsi saya berjudul:

“Isolasi dan Karakterisasi Bakteri dari Sampel Abu Terbang (*Fly Ash*) dan Air di PLTU Tarahan Lampung Selatan yang Potensial untuk Mengekstraksi Logam Tanah Jarang (LTJ) Yttrium (Y) sebagai Agen Bioremediasi”

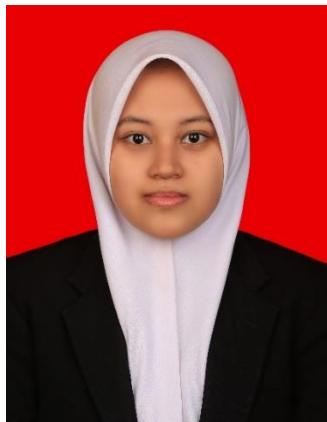
Baik gagasan dan pembahasannya merupakan karya saya sendiri yang saya susun dengan mengikuti norma dan etika akademik yang berlaku. Jika di kemudian hari terbukti pernyataan saya ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi akademik baik berupa pencabutan gelar sarjana maupun tuntutan hukum.

Bandar Lampung, 06 Januari 2025
Penulis,



Afifah Sifak Aprilia
NPM 2117021009

RIWAYAT HIDUP



Penulis merupakan anak pertama dari Bapak Nanang M. Sifak (Alm) dan Ibu Yuniarti yang dilahirkan di Bandar Lampung pada hari Minggu, 27 April 2003.

Penulis menempuh pendidikan dasar di Sekolah Dasar (SD) Negeri 2 Rawa Laut Bandar Lampung pada tahun 2009 – 2015 dan pada tingkat menengah pertama di Sekolah Menengah Pertama (SMP) Negeri 1 Bandar

Lampung pada tahun 2015 – 2018. Penulis melanjutkan pendidikan tingkat menengah atas di Madrasah Aliyah Negeri (MAN) 1 Bandar Lampung pada tahun 2018 – 2021. Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung melalui jalur masuk Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) pada tahun 2021.

Selama menjalankan pendidikan akademik di Jurusan Biologi, penulis pernah menjadi asisten praktikum mikrobiologi umum, botani tumbuhan tinggi, dan fisiologi tumbuhan. Penulis melakukan praktik kerja lapangan (PKL) sekaligus magang di Pusat Riset Lingkungan dan Teknologi Bersih, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), KST BJ Habibie, Serpong pada tahun 2023 dengan judul “Uji Resistensi Isolat Bakteri dari Sampel Tanah Papua terhadap Cemaran Logam Berat Kobalt (Co), Tembaga (Cu), dan Seng (Zn) di Tanah”. Penulis juga

melakukan kuliah kerja nyata (KKN) di Desa Karya Basuki, Kecamatan Waway Karya, Kabupaten Lampung Timur pada Juni – Agustus 2024.

Selama menjalankan kegiatan magang penulis juga telah berhasil menyelesaikan publikasi artikel ilmiah pertamanya pada laman kompas.com dengan judul “Efektifkah Tanaman Hias untuk Remediasi Polusi Udara?”. Selain menjalankan kegiatan akademik, penulis aktif mengikuti organisasi, yaitu Himpunan Mahasiswa Biologi sebagai anggota Bidang Kominhum pada periode 2022. Selama mengikuti organisasi, penulis berkontribusi dalam berbagai kepanitian kegiatan jurusan, universitas, nasional, dan mengikuti pelatihan keterampilan.

Hasil penelitian ini telah dipublikasikan pada Jurnal GSC *Biological and Pharmaceutical Science* (2025) 33 (01): 223 - 229, pada tanggal 22 Oktober 2025 dengan judul “Isolasi dan Karakterisasi Bakteri dari Sampel Abu Terbang (Fly Ash) dan Air di PLTU Tarahan Lampung Selatan yang Potensial untuk Mengekstraksi Logam Tanah Jarang (LTJ) Yttrium (Y) sebagai Agen Bioremediasi”.

.

PERSEMBAHAN

Bismillaahirrahmaanirraahiim.

Dengan mengucap Alhamdulillaahirabbil'alamiiin.

Saya persembahkan hasil karya ini dengan penuh kasih sayang kepada:

Ayah, Ibu, dan keluarga yang telah memberikan dukungan, kasih, sayang, menjadi motivasi, dan mengiringi langkah saya dengan do'a.

Bapak dan Ibu dosen yang telah memberikan bimbingan, ilmu, arahan, dan pengalaman.

Teman-teman yang telah berjuang bersama dan saling memberikan dukungan dan semangat.

Almamater tercinta, Jurusan Biologi, Universitas Lampung.

MOTTO

"Diwajibkan atasmu berperang, padahal itu kamu benci. Boleh jadi kamu membenci sesuatu, padahal itu baik bagimu dan boleh jadi kamu menyukai sesuatu, padahal itu buruk bagimu. Allah mengetahui, sedangkan kamu tidak mengetahui."

(QS. Al-Baqarah: 216)

"Umcomfortable is the comfortable itself"

"Growth is messy and full of stumbles. Stop trying to be perfect you cant anyway"

Hope is a verb, not a noun. So it is not something that can be given or taken. It is something that we do, we gotta work for it, we gotta fight for it. Live your life while believing that something better exist.

It's okay to be unsure, to be messy, to be a little strange. You are yourself, and that is already a quiet kind of beautiful. Your colors don't need to match anyone else — they were never meant to. Let them shine in their own way, at their own pace.

– EXO –

SANWACANA

Bismillaahirrahmaanirraahim.

Assalaamu'alaikum Warahmatullaahi Wabarakaaatuh.

Alhamdulillaahirabbil'alamien.

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allaah SWT. yang telah melimpahkan rahmat, hidayah, nikmat, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi sebagai syarat dalam mencapai gelar Sarjana Sains.

Skripsi dengan judul **“Isolasi dan Karakterisasi Bakteri dari Sampel Abu Terbang (Fly Ash) dan Air di PLTU Tarahan Lampung Selatan yang Potensial untuk Mengekstraksi Logam Tanah Jarang (LTJ) Yttrium (Y) sebagai Agen Bioremediasi”** telah dilaksanakan pada bulan Februari 2025 – Juni 2025, bekerja sama dengan Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Penulis menyadari bahwa selama proses penyusunan skripsi ini terdapat pihak-pihak yang berperan dalam memberikan dukungan dan bantuan kepada penulis. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IP., ASEAN Eng., sebagai Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si., sebagai Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.
3. Bapak Dr. Jani Master, S. Si., M. Si., sebagai Ketua Jurusan Biologi, FMIPA, Universitas Lampung.

4. Ibu Dr. Kusuma Handayani, M. Si., sebagai Ketua Program Studi S-1 Biologi, Jurusan Biologi, FMIPA, Universitas Lampung.
5. Bapak Prof. Sutyarso, M. Biomed., sebagai Dosen Pembimbing Akademik
6. Ibu Dr. Kusuma Handayani, M. Si., sebagai Dosen Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, dukungan, arahan, dan ilmu pembelajaran kepada penulis dalam proses penelitian hingga penyusunan skripsi.
7. Bapak Fika Rofiek Mufakhir, S.T., M.T., sebagai Dosen Pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, dukungan, dan arahan kepada penulis dalam proses penelitian hingga penyusunan skripsi.
8. Bapak Prof. Tugiyono, Ph.D., sebagai Dosen Penguji yang telah memberikan saran dan masukan kepada penulis dalam penyusunan skripsi.
9. Pihak PT. PLN Sektor Pembangkitan Tarahan, Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung yang telah memberikan izin untuk melakukan pengambilan sampel abu terbang.
10. Kedua orang tua penulis, Bapak Nanang M. Sifak (alm) dan Ibu Yuniarti, serta keluarga yang telah mencerahkan kasih sayang, do'a, dan dukungan penuh kepada penulis selama proses pendidikan hingga penyusunan skripsi.
11. Bapak Dr. Anggoro Tri Mursito., sebagai Kepala Satuan Kerja Badan Riset dan Inovasi Nasional, KS Iskandar Zulkarnain, Lampung Selatan yang telah memberikan izin kepada penulis untuk melakukan penelitian di BRIN.
12. Seluruh tenaga pendidik yang telah membantu selama masa perkuliahan.
13. Inne Dwi Inggita Sari sebagai sahabat penulis yang selama penelitian dan penyusunan skripsi telah memberikan dukungan, bantuan, serta motivasi dalam menyelesaikan skripsi.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat kekurangan dan kesalahan, sehingga diperlukan kritik dan saran yang membangun

Bandar Lampung, 06 Januari 2025
Penulis,

Afifah Sifak Aprilia
NPM 2117021009

DAFTAR ISI

| | halaman |
|---|-------------|
| DAFTAR GAMBAR..... | vii |
| DAFTAR TABEL..... | viii |
| I. PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Tujuan | 4 |
| 1.3 Manfaat Penelitian..... | 4 |
| 1.4 Kerangka Pemikiran | 5 |
| 1.5 Hipotesis | 6 |
| II. TINJAUAN PUSTAKA | 7 |
| 2.1 Batubara..... | 7 |
| 2.2 Residu Pembakaran Batubara di PLTU | 8 |
| 2.2.1 Cemaran Abu Terbang (<i>Fly Ash</i>) | 9 |
| 2.2.2 Cemaran Abu Terbang (<i>Bottom Ash</i>) | 10 |
| 2.3 Logam Tanah Jarang..... | 12 |
| 2.4 Bioremediasi <i>Fly Ash</i> | 14 |
| III. METODE PENELITIAN | 16 |
| 3.1 Waktu dan Tempat Penelitian..... | 16 |
| 3.2 Alat dan Bahan..... | 16 |
| 3.2.1 Alat | 16 |
| 3.2.2 Bahan | 17 |
| 3.3 Prosedur Penelitian..... | 17 |
| 3.3.1 Jenis Penelitian..... | 17 |
| 3.3.2 Pengambilan Sampel | 17 |
| 3.3.3 Persiapan Uji (Pembuatan Larutan Stok)..... | 19 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.3.4 | Kultivasi (Pembibitan) Bakteri | 20 |
| 3.3.5 | Isolasi Bakteri..... | 20 |
| 3.3.6 | Pemurnian (<i>Purity</i>) | 21 |
| 3.3.7 | Karakterisasi Isolat Bakteri..... | 21 |
| 3.3.8 | Optimasi Kinerja Bakteri terhadap Logam Tanah Jarang Yttrium (Y)..... | 23 |
| 3.3.9 | Diagram Alir..... | 24 |
| | 24 | |
| IV. | HASIL DAN PEMBAHASAN..... | 25 |
| 4.1 | Isolasi dan karakterisasi Bakteri dari Sampel <i>Fly Ash</i> dan Air | 25 |
| 4.1.1. | Hasil Pengamatan Makroskopik Isolat dari Sampel <i>Fly Ash</i> dan Air | 25 |
| 4.1.2. | Hasil Pengamatan Mikroskopik Isolat dari Sampel <i>Fly Ash</i> dan Air..... | 28 |
| 4.2 | Hasil Uji Optimasi Kinerja Bakteri (<i>Optical Density</i>) | 31 |
| V. | KESIMPULAN DAN SARAN..... | 39 |
| 5.1 | Kesimpulan | 39 |
| 5.2 | Saran | 40 |
| D | AFTAR PUSTAKA..... | 41 |

DAFTAR GAMBAR

| Gambar | Halaman |
|---|---------|
| 1. Lokasi Pengambilan Sampel | 18 |
| 2. Ilustrasi Pengenceran Bertingkat | 20 |
| 3. Bentuk Koloni..... | 21 |
| 4. Elevasi Koloni, dan Tepi Koloni..... | 22 |
| 5. Kurva Hasil Uji Optimasi Isolat FA 1.1 | 34 |
| 6. Kurva Uji Optimasi Isolat FA 3.2 | 35 |
| 7. Kurva Uji Optimasi Isolat W 1.1 | 36 |
| 8. Kurva Uji Optimasi Isolat W 2.2 | 36 |
| 9. Kurva Uji Optimasi Isolat W 3.2 | 37 |

DAFTAR TABEL

| Tabel | Halaman |
|--|---------|
| 1. Hasil Pengamatan Makroskopik Isolat dari <i>Fly Ash</i> | 26 |
| 2. Hasil Pengamatan Makroskopik Isolat dari Sampel Air. | 26 |
| 3. Hasil Pengamatan Mikroskopik Isolat dari Sampel FA | 28 |
| 4. Hasil Pengamatan Mikroskopik Isolat dari Sampel Air | 29 |
| 5. Hasil Pengamatan Kualitatif dengan Indikator Kekeruhan Tabung Isolat dari Sampel Fly Ash..... | 32 |
| 6. Hasil Pengamatan Kualitatif dengan Indikator Kekeruhan Tabung Isolat dari Sampel Air | 33 |

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu sumber listrik utama yang memanfaatkan batubara sebagai sumber energi. Hingga saat ini, PLTU memberikan kontribusi besar terhadap kebutuhan energi listrik di dunia, termasuk Indonesia. Namun, dampak dari aktivitas ini terhadap lingkungan tidak dapat diabaikan, terutama terkait dengan residu hasil pembakaran seperti, *fly ash* dan *bottom ash*. *Fly ash* adalah produk sampingan dari proses pembakaran batubara yang terdiri dari partikel halus yang terangkat bersama gas buang dan menyebar di udara. Sebaliknya, *bottom ash* adalah residu lebih besar dan lebih berat, sehingga tidak terbawa oleh aliran gas dan mengendap di dasar tungku pembakaran. Kedua jenis residu ini dapat menimbulkan masalah serius bagi lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik, terutama karena volume dan komposisi kimianya yang beragam (Kinasti dkk., 2018).

Dalam penelitian ini, abu terbang atau *fly ash* diangkat menjadi topik utama karena dengan ukuran partikel nya yang lebih halus memungkinkan residu ini untuk terus beterbang di udara, menyebar lebih jauh, kemudian terus terakumulasi di tanah apabila tidak segera diremediasi. Tahap selanjutnya tentu akan menimbulkan berbagai masalah baik bagi kesehatan manusia, maupun lingkungan dalam skala yang lebih besar. Sedangkan *bottom ash* dengan residu yang lebih besar cenderung mengendap di dasar tungku. Abu terbang hasil dari kegiatan industri pertambangan biasanya dimitigasi

dengan memanfaatkan filter pengendali emisi, namun sebagian abu ringan ini bahkan dapat terus menyebar di udara sehingga masih banyak partikel yang tidak tertangkap oleh filter (Semenov dan Vasil'ev, 2020).

Fly ash atau abu terbang memiliki karakteristik fisik yang kompleks, dengan ukuran partikel yang sangat kecil (0,5 – 200 μm) mampu menyebar dan terombang-ambing di udara (Alterary dan Marei, 2021). Kandungan mineral dalam *fly ash* termasuk silika, alumina, dan besi, namun juga sering kali mengandung logam berat seperti arsenik, kadmium, dan timbal, yang dapat berbahaya bagi kesehatan manusia dan ekosistem (Kumar *et al.*, 2018). Pencemaran akibat *fly ash* dapat berdampak pada kualitas tanah, air, dan udara. Partikel halus yang terhirup dapat menyebabkan gangguan pernapasan dan penyakit kronis pada manusia, sementara penyerapan logam berat oleh tanaman dapat merusak rantai makanan (Zhang *et al.*, 2021).

Walaupun demikian, di sisi lain *fly ash* juga memiliki potensi yang belum dimanfaatkan sepenuhnya. Salah satu aspek penting adalah kandungan logam tanah jarang (LTJ) yang terdapat di dalamnya. Logam tanah jarang, termasuk neodimium, europium, dan terbium, adalah elemen kritis untuk berbagai aplikasi teknologi modern, seperti perangkat elektronik, baterai lithium-ion, dan energi terbarukan (Gao *et al.*, 2020). Menurut Puspita dkk., (2020), logam tanah jarang merupakan sekelompok unsur langka berlapis yang terdapat di kerak bumi dalam jumlah kurang dari 0,1%. Logam tanah jarang juga diketahui terdapat pada batubara hasil tambang dalam bentuk mineral dan abu batu bara sebagai abu sisa pembakaran batubara di pembangkit listrik tenaga uap (PLTU).

Keberadaan logam tanah jarang di bumi sebenarnya cukup melimpah, namun mengingat bahwa negara kita masih memiliki keterbatasan dalam pengolahan mineral hasil tambang, hingga hari ini Indonesia masih banyak bergantung dari hasil impor yang tentunya mengeluarkan biaya besar, diperlukan pencarian alternatif dengan terus menggali dan memanfaatkan

potensi besar yang ada di dalam negeri (Effendi dkk., 2020). Selain itu juga, logam tanah jarang yang biasa diperoleh dari pertambangan mineral bastnaesite dan monazit juga berdampak buruk untuk lingkungan yang pada akhirnya akan kembali membutuhkan proses remediasi sebagaimana yang juga menjadi dampak kegiatan pembakaran batubara (Supriadi dkk., 2021).

Dengan adanya berbagai masalah di atas, pendekatan bioremediasi banyak digunakan sebagai solusi atas berbagai masalah pencemaran lingkungan termasuk untuk lingkungan yang rusak akibat terdampak oleh residu kegiatan PLTU. Bioremediasi adalah metode pengelolaan lingkungan yang menggunakan organisme hidup, seperti bakteri, untuk mengurangi atau menghilangkan kontaminan dari lingkungan. Bakteri memiliki kemampuan unik untuk mengubah atau mengurangi logam berat menjadi bentuk yang kurang beracun atau bahkan mengubahnya menjadi senyawa yang tidak berbahaya (Fadhila dan Purwanti, 2022).

Beberapa spesies bakteri diketahui memiliki kemampuan untuk mengekstraksi logam dari lingkungan, termasuk dari *fly ash*, melalui proses bioleaching. Proses ini tidak hanya dapat mengurangi dampak negatif *fly ash*, tetapi juga memungkinkan pemulihan logam tanah jarang yang terkandung di dalamnya (Mireles *et al.*, 2018). Bakteri tanah menjadi peran kunci dalam menjaga keseimbangan ekosistem tanah dan dapat memainkan peran penting dalam mereduksi tingkat cemaran logam tersebut. Bakteri yang memiliki kemampuan resisten terhadap polutan tertentu di suatu lingkungan diharapkan mampu meremediasi lingkungan tersebut kembali ke keadaan semula (Fatma dkk., 2023).

Menurut Oktavian dkk., (2024) mikroba yang hidup pada lingkungan tercemar cenderung lebih resisten dari pada yang hidup pada lingkungan tidak tercemar apapun. Oleh karena itulah, isolasi dan karakterisasi bakteri dari sampel *fly ash* dan air di PLTU Tarahan, Lampung Selatan yang mampu mengekstraksi Logam Tanah Jarang (LTJ) sebagai agen

bioremediasi ini perlu dilakukan untuk dapat mendapatkan bakteri yang potensial sebagai agen bioremediasi sekaligus mampu mengekstraksi kandungan logam tanah jarang (LTJ) dari *fly ash*.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berfokus pada mitigasi dampak negatif *fly ash* tetapi juga pada pengoptimalan sumber daya berharga yang ada di dalamnya, namun juga menjadikannya penting dalam hal keberlanjutan lingkungan dan ekonomi. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru dalam bidang bioteknologi dan pengelolaan lingkungan, serta memberikan kontribusi nyata dalam pemecahan masalah pencemaran yang dihadapi oleh masyarakat sekitar lokasi pertambangan.

1.2 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengisolasi dan mengkarakterisasi bakteri yang mampu bertahan dalam cemaran *fly ash* dan air di lokasi PLTU Tarahan, Lampung Selatan.
2. Untuk mengetahui potensi bakteri yang telah diisolasi dengan menguji ambang batas toleransinya terhadap LTJ jenis Yttrium.

1.3 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan dalam bidang bioremediasi polutan sebagai solusi untuk mengurangi dampak dari *fly ash* dengan tetap mengoptimalkan potensi logam tanah jarang (LTJ) yang terkandung di dalamnya, sehingga tidak hanya perbaikan dan pelestarian lingkungan, tetapi juga fokus pemanfaatan sumber daya yang juga akan membantu dalam bidang perekonomian.

Selain itu, dalam bidang akademis, hasil penelitian ini diharapkan dapat menambah bahan literatur mengenai isolasi dan karakterisasi bakteri, terutama yang potensial sebagai bioremediator terhadap *fly ash* yang juga mampu mengekstraksi logam tanah jarang yang terkandung dalam residu *fly ash* pembakaran batubara.

1.4 Kerangka Pemikiran

Aktivitas pembakaran batubara pada PLTU adalah kegiatan eksplorasi sumber daya yang tidak terbarukan, dimana aktivitas secara intensif akan berdampak langsung terhadap ekosistem. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tarahan, Lampung Selatan menjadi salah satu area yang menghasilkan akumulasi residu hasil pembakaran batubara seperti *fly ash*. Abu terbang (*fly ash*) adalah sisa polutan berupa partikel halus yang dapat terus tersebar di atmosfer sehingga dapat menimbulkan dampak negatif tidak hanya bagi lingkungan tetapi juga bagi kesehatan.

Walaupun memiliki berbagai dampak negatif, perlu diketahui bahwa *fly ash* juga mengandung potensi logam tanah jarang (LTJ) yang sangat berharga dan juga sangat penting dalam berbagai bidang industri. Sehingga, proses penghilangan polutan jenis ini dari lingkungan tidak bisa dilakukan secara sembarangan. Diperlukan mitigasi bioremediasi yang tepat untuk dapat meminimalisir atau bahkan menghilangkan polutan ini dari lingkungan, namun dengan tetap memaksimalkan potensi yang terkandung dalam *fly ash*.

Mikroorganisme seperti bakteri memiliki kemampuan untuk bertahan hidup dan berkembang biak dalam keadaan lingkungan yang terkontaminasi, mereka juga telah terbukti efektif untuk digunakan sebagai bioremediator. Dalam proses bioremediasi, bakteri memiliki kemampuan bioleaching yang dapat digunakan untuk meremediasi lingkungan dengan cara melarutkan

dan mengekstraksi logam dari mineralnya. Bioleaching merupakan proses ekstraksi logam dari mineral atau limbah yang mengandung logam dengan melalui metabolisme yang terjadi pada mikroorganisme tertentu. Oleh karena itu, isolasi dan karakterisasi bakteri dari polutan abu terbang ini perlu dilakukan untuk memperoleh bakteri yang potensial untuk digunakan sebagai agen bioremediasi sekaligus mampu mengekstraksi kandungan LTJ.

Pada penelitian ini dilakukan sampling *fly ash* dan air pada *dump area* di lokasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tarahan, Lampung Selatan untuk kemudian diisolasi dengan teknik kultur mikroba pada media selektif mengandung *fly ash*. Selanjutnya isolat bakteri yang diperoleh akan dikarakterisasi mencakup identifikasi morfologi dan pewarnaan Gram. Langkah selanjutnya adalah uji optimasi bakteri pada media selektif dengan konsentrasi bertingkat untuk mengetahui sejauh mana potensinya sebagai agen bioremediasi.

1.5 Hipotesis

Hipotesis dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Ditemukan isolat bakteri yang toleran terhadap *fly ash* di lokasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tarahan, Lampung Selatan.
2. Bakteri yang berhasil diisolasi berpotensi digunakan untuk ekstraksi Logam Tanah Jarang (LTJ) sebagai agen bioremediasi untuk *fly ash*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Batubara

Batubara merupakan salah satu bahan tambang utama di Indonesia. Sebagai sumber energi primer, batubara memiliki peran penting dalam memenuhi kebutuhan energi nasional. Batubara juga merupakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui (*non-renewable resource*). Hal tersebut dapat diartikan bahwa apabila batubara habis akibat eksploitasi terus-menerus, maka tidak akan ada proses alami yang dapat mengembalikannya ke kondisi semula. Eksploitasi sumber daya alam ini juga dapat menyebabkan kerusakan ekosistem yang parah. Kerusakan ini meliputi hilangnya fungsi ekosistem seperti perlindungan tanah, pengaturan tata air, dan pengaturan cuaca. Selain itu, ekosistem yang rusak tidak dapat menjalankan fungsinya secara optimal, yang berdampak pada keseimbangan lingkungan dan kualitas hidup masyarakat di sekitarnya (Efendi dkk., 2023).

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu sumber utama energi di Indonesia, yang memanfaatkan batubara untuk digunakan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan listrik. Proses pembakaran batubara menghasilkan residu berupa abu batubara yang terbagi menjadi *fly ash* (abu terbang) dan *bottom ash* (abu dasar). Residu pembakaran batubara mengandung berbagai komponen yang dapat menjadi sumber kontaminasi bagi lingkungan, khususnya karena kandungan logam berat dan elemen langka yang terdapat dalam abu tersebut (Aji dkk., 2021).

Adapun kandungan yang ada di dalamnya antara lain yaitu, timbal (Pb), merkuri (Hg), dan kadmium (Cd), serta unsur logam tanah jarang (LTJ) seperti skandium (Sc), yttrium (Y), dan neodymium (Nd). Abu ini juga mengandung mineral seperti silika, alumina, dan oksida besi. Kandungan logam berat pada *fly ash* dapat menimbulkan risiko pencemaran lingkungan jika tidak dikelola dengan baik, mencemari air dan tanah yang berakibat merusak ekosistem sekitar PLTU (Ambia, 2020).

2.2 Residu Pembakaran Batubara di PLTU

Perkembangan dan pemanfaatan batubara sebagai sumber energi telah banyak dilakukan di seluruh dunia, terutama di pusat Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang juga hingga saat ini masih menjadi pembangkit listrik utama dan tersebar di Indonesia. Batubara yang telah diperoleh dari hasil kegiatan tambang umumnya akan digunakan sebagai bahan bakar di PLTU yang selanjutnya akan menghasilkan uap untuk menggerakkan turbin sebagai pembangkit listrik (Sahidi dkk., 2020).

Pembakaran batubara di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu metode utama dalam produksi energi listrik di banyak negara termasuk Indonesia. Proses ini melibatkan pembakaran batubara untuk menghasilkan uap, yang kemudian menggerakkan turbin dan menghasilkan listrik. Menurut Huda (2023), batubara masih menjadi sumber energi terbesar dengan kontribusinya yang signifikan terhadap pembangkitan listrik global. Namun, pembakaran batubara juga memiliki berbagai dampak lingkungan yang serius, salah satunya polutan udara, yang memerlukan perhatian khusus dalam pengelolaan dan regulasi.

Abu pembakaran batubara diproduksi sekitar 6,15 juta ton/ tahun hingga 8,5 juta ton/tahun dengan konsumsi batubara PLTU mencapai 85 juta ton/tahun yang akan terus meningkat seiring dengan keberlanjutan PLTU sebagai

sumber energi listrik utama (Firman dkk., 2020). Pembakaran batubara di PLTU menghasilkan polutan udara sebagai residu atau sisa dari proses pembakaran batubara, seperti *fly ash* dan *bottom ash* yang merupakan polutan berbahaya, dimana tidak hanya dapat mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik tetapi juga berdampak buruk bagi kesehatan.

2.2.1 Cemaran Abu Terbang (*Fly Ash*)

Terdapat dua jenis residu yang dihasilkan dalam proses pembakaran batubara. Salah satu material dikeluarkan dalam bentuk debu (abu) halus dari cerobong asap tungku pembakaran yang disebut *fly ash*. Polutan ini dihasilkan sebagai hasil sisa dari aktivitas pembakaran batubara di Pembangkit Listrik. *Fly ash* merupakan residu yang berbentuk bubuk halus dan sangat ringan yang diperoleh dari campuran gas buang tungku pembakaran batubara pada boiler di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) (Ali dkk., 2023).

Menurut Adebisi *et al.*, (2019) tercatat bahwa pelepasan residu *fly ash* dapat mencapai hingga 400 ton/hari, hal ini meningkatkan potensinya menjadi limbah berbahaya apabila tidak segera dilakukan penanggulangan ataupun mitigasi dengan baik. *Fly ash* termasuk sangat berbahaya dengan sifatnya yang ringan dan mudah tercuci, mampu menyebabkan kerusakan lingkungan yang kompleks dan meluas diakibatkan penyebarannya yang sangat mudah. Polutan *fly ash* dapat mencemari air dan tanah di lingkungan sekitar yang dapat merusak ekosistem. dan berpotensi menimbulkan berbagai ancaman serius terhadap mahluk hidup (manusia, hewan, dan tumbuhan) (Chen *et al.*, 2020).

2.2.2 Cemaran Abu Terbang (*Bottom Ash*)

Bottom ash merupakan residu yang diperoleh dari hasil pembakaran batubara di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dan juga proses industri. Dari total polutan yang dilepaskan dari pembakaran batubara, *bottom ash* mengambil bagian sebanyak 20% dengan 80% sisanya merupakan *fly ash* (Asof dkk., 2022). *Bottom ash* memiliki ukuran partikel yang lebih besar dan lebih berat dibandingkan dengan *fly ash*, sehingga umumnya cenderung akan jatuh ke dasar tungku pembakaran (boiler) dan terkumpul di penampung debu (*ash hopper*), kemudian dikeluarkan dengan cara disemprot udara untuk dibuang atau digunakan sebagai bahan tambahan dalam pengeras jalan (Ali dkk., 2023).

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu kegiatan industri yang memanfaatkan batubara sebagai bahan bakar utama, kegiatan ini juga yang menjadi produsen polutan utama ke lingkungan sekitar. Hasil pembakaran, residu *fly ash* umumnya dihasilkan sebanyak 80-90% dengan 10-20% sisanya merupakan cemaran jenis abu dasar. Pencemaran telah menjadi kekhawatiran yang perlu segera dimitigasi secepat mungkin di seluruh bagian dunia termasuk Indonesia. *Fly ash* sebagai kontaminan utama dari hasil pembakaran batubara perlu menjadi perhatian utama, dalam pengelolaannya (Rajput *et al.*, 2021)

Dengan tingkat pencemaran yang tinggi, *fly ash* sangat berpotensi tinggi merusak lingkungan secara meluas ketika dilepaskan ke lingkungan. Partikelnya yang sangat halus dan berukuran kecil dapat mencemari air dan tanah di sekitarnya, bahkan sangat mungkin untuk terus berada di udara dalam beberapa waktu apabila tidak diatasi dengan baik. Pencemaran tanah oleh *fly ash* dapat menyebabkan perubahan struktur dan kesuburan tanah,

sedangkan pencemaran air dapat menimbulkan risiko toksisitas terhadap organisme perairan (Chen *et al.*, 2021).

Fly ash tidak hanya akan menurunkan kualitas lingkungan, tetapi juga dapat berdampak pada kesehatan seluruh ekosistem, termasuk manusia, hewan, dan tumbuhan. Menurut Wang dan Li (2022) menghirup partikel *fly ash* dapat menyebabkan penyakit pernafasan mulai dari peradangan, bronkitis, paru-paru kronis, asma, hingga kanker paru-paru. Bahkan, kandungan logam berat pada polutan ini dapat terus terakumulasi di dalam tubuh yang kemudian akan merusak organ vital seperti hati dan ginjal. Sedangkan pada hewan, akumulasi *fly ash* di air dan pakan ternak dapat berdampak pada penghambatan pertumbuhan, penurunan fungsi reproduksi, bahkan kematian akibat keracunan logam berat (Singh *et al.*, 2023).

Di lingkungan, pelepasan *fly ash* yang tidak terkontrol dan terus-menerus dapat merusak keanekaragaman hayati dan menurunkan produktivitas ekosistem. Kandungan logam berat dalam abu terbang bersifat toksik bagi tanaman dan mengganggu proses fisiologis tanaman, sehingga kemudian akan menghambat pertumbuhannya dan menurunkan produktivitas hasil panen. Sehingga suatu saat pasti akan sangat merugikan sektor pertanian dan meningkatkan resiko cemaran logam berat pada rantai makanan yang tentunya akan mempengaruhi keamanan pangan secara keseluruhan (Zhang *et al.*, 2020).

Walaupun demikian, residu hasil pembakaran batubara ini tidak hanya mengandung logam berat yang bersifat toksik, tetapi juga memiliki kandungan logam tanah jarang (LTJ) seperti skandium, yttrium, neodymium, dan lantanida lainnya yang sangat berharga dalam berbagai proses industri. Pemanfaatan *fly ash* sangat potensial sebagai sumber LTJ alternatif terutama dalam bidang industri dan teknologi seperti elektronik, energi bersih, dan pertahanan (Wang *et al.*, 2021). Peningkatan kebutuhan LTJ di berbagai sektor industri menjadi peluang baru untuk

mengembangkan teknik ekstraksi LTJ yang lebih efisien dari *fly ash*, yang sekaligus membantu mengurangi masalah lingkungan (Zhang *et al.*, 2022).

Sejauh ini, diketahui bahwa produksi abu batubara sisa pembakaran PLTU mulut tambang di Indonesia produksinya sangat besar dan masih belum termanfaatkan dengan baik. Padahal, beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa logam tanah jarang yang diperoleh dari *fly ash* mempunyai nilai ekonomis yang tinggi dan sangat berpotensi untuk mengurangi ketergantungan terhadap sumberdaya yang terbatas. Seperti contohnya yttrium, LTJ jenis ini dapat diperoleh dari *fly ash* dan sering digunakan sebagai bahan utama pembuatan lampu neon, warna pada televisi, hingga sel bahan bakar (Dimas dkk., 2024). Oleh karena itu, *fly ash* tidak hanya memerlukan penanganan khusus untuk mencegah dampak negatif yang luas terhadap kesehatan makhluk hidup dan keseimbangan lingkungan, tetapi juga memerlukan tatacara khusus untuk tetap dapat mengoptimalkan potensi yang ada.

2.3 Logam Tanah Jarang

Logam tanah jarang (LTJ) adalah sekelompok 17 unsur penting, terdiri dari 15 lantanida, skandium, dan yttrium, yang banyak digunakan dalam industri, teknologi modern, dan pertahanan. Unsur-unsur tersebut memiliki sifat unik seperti kekuatan mekanik yang tinggi, titik leleh yang relatif tinggi, dengan kapasitas serapan neutron yang besar sehingga menjadikannya sangat bernilai di berbagai industri. Kebutuhan LTJ terus meningkat seiring dengan perannya sebagai komponen kunci dalam teknologi seperti superkonduktor, magnet permanen untuk kendaraan listrik, laser, perangkat optik elektronik, hingga layar LED. Namun, rendahnya ketersediaan LTJ terutama dalam bentuk endapan primer, menyebabkan penelitian dan pengembangan masih perlu untuk terus dilakukan sehingga optimalisasi ekstraksi LTJ dari mineral pembawanya, dapat dilakukan (Supriadi *et al.*, 2021).

Hingga saat ini, Indonesia masih bergantung pada ekspor untuk memperoleh logam tanah jarang, padahal kita memiliki potensi besar yang dapat dimanfaatkan dari berbagai mineral hasil kegiatan industri pertambangan, bahkan residu dari kegiatan industri termasuk PLTU yang masih menjadi sumber listrik utama kita pun memiliki kandungan LTJ yang signifikan dan sangat berpotensi menjadi sumber energi alternatif jika kita mampu mengolah dan memanfaatkannya dengan baik. Meskipun dinamakan logam tanah jarang akan tetapi sebenarnya kelimpahan LTJ tidaklah jarang atau sedikit, melainkan cukup berlimpah di bumi, namun memang sukar diperoleh karena umumnya tidak ditemukan dalam bentuk deposit utama, melainkan hasil samping dari kegiatan tambang, sehingga perlu diolah lebih dulu untuk memperoleh LTJ murni (Effendi dkk., 2020).

Seiring dengan peningkatan kebutuhan terhadap LTJ, masalah pencemaran lingkungan akibat akumulasi limbah LTJ, termasuk yang diproduksi dalam bentuk *fly ash* sebagai hasil pembakaran batubara muncul dan menjadi kekhawatiran serius. *Fly ash* memiliki kandungan LTJ dan logam berat lainnya yang dapat mencemari tanah dan air, sehingga berdampak negatif bagi ekosistem dan menimbulkan ancaman bagi makhluk hidup. *Fly ash* dan berbagai jenis limbah yang mengandung unsur tanah jarang dapat mempengaruhi kualitas lingkungan, menciptakan habitat berbahaya, dan meningkatkan risiko kesehatan (Supriadi dkk., 2021). Sehingga, bioremediasi diperlukan sebagai solusi alternatif yang dinilai mampu untuk mengatasi pencemaran sekaligus tetap dapat mengekstraksi tanah jarang dari polutan pembawanya.

Firman dkk., (2020) dalam penelitiannya menyebutkan, bahwa abu batubara telah terbukti memiliki 16 dari total 17 unsur logam tanah jarang, yaitu La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y dan Sc, dengan kandungan dominan unsur Ce dan paling rendah unsur Tm. Sementara kandungan LTJ berdasarkan analisa menggunakan ICP-MS menunjukkan dominansi kandungan logam cerium (Ce), Neodinium (Nd), Yttrium (Y),

Latanum (La), dan Scandium (Sc) dengan konsentrasi tertinggi secara berurutan pada Ce hingga terendah pada Sc. Berdasarkan hasil analisa, kandungan yttrium (Y) pada *fly ash* tercatat 10,7 – 41,8 ppm atau 41,8 gr dalam 1 ton *fly ash* (kondisi ideal) (Sahidi dkk., 2020).

2.4 Bioremediasi *Fly Ash*

Dalam menghadapi krisis lingkungan akibat cemaran *fly ash*, berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa beberapa mikroorganisme mampu bertahan hidup di lingkungan yang terkontaminasi limbah, termasuk logam tanah jarang. Mikroorganisme seperti bakteri memiliki kemampuan mekanisme adaptasi yang unik dimana memungkinkan mereka untuk tetap bertahan hingga pada tahap tertentu dalam lingkungan tercemar polutan bahkan dalam konsentrasi yang tinggi. Mikroorganisme lokal yang terpapar limbah *fly ash* dapat menjadi agen potensial untuk bioremediasi karena mereka telah teradaptasi dengan lingkungan yang terkontaminasi. Selain itu, penelitian menunjukkan bahwa pemanfaatan mikroorganisme dalam bioremediasi bersifat ramah lingkungan dengan biaya yang relatif lebih rendah, dan tidak merusak ekosistem alami dibandingkan metode kimia maupun fisika lainnya (Lisafitri *et al.*, 2024).

Bioremediasi merupakan metode pemulihan lingkungan yang menggunakan organisme hidup untuk mengurangi atau bahkan menghilangkan kontaminan dari lingkungan yang terkontaminasi polutan. Salah satu proses dalam bioremediasi yang sangat cocok dan relevan untuk penanganan LTJ adalah *bioleaching*. *Bioleaching* merupakan proses ekstraksi logam dari mineral atau limbah padat melalui aktivitas mikroorganisme, seperti bakteri dan fungi, yang mengubah logam dari bentuk yang tidak larut menjadi bentuk larut sehingga lebih mudah diekstraksi. Teknik ini banyak dimanfaatkan dan dikembangkan karena dapat membantu menangani masalah logam berat dan LTJ dari limbah industri termasuk limbah *fly ash* (Niu *et al.*, 2021).

Aplikasi bioleaching dalam bioremediasi limbah seperti *fly ash* memiliki keunggulan dibandingkan metode tradisional, di antaranya efisiensi energi yang lebih tinggi, biaya operasi yang relatif rendah, serta risiko kerusakan lingkungan yang lebih rendah. Proses ini dapat dilakukan pada kondisi suhu dan tekanan yang normal sehingga tidak memerlukan fasilitas atau peralatan yang kompleks. Bioleaching juga menjadi metode yang ramah lingkungan dan berkelanjutan karena menggunakan mikroorganisme alami yang tidak menghasilkan residu berbahaya bagi lingkungan (Das *et al.*, 2022).

Mikroorganisme seperti bakteri *Acidithiobacillus ferrooxidans* dan *Leptospirillum ferrooxidans*, yang secara alami beradaptasi dalam lingkungan ekstrem, diketahui memiliki kemampuan untuk melarutkan logam melalui proses oksidasi yang mereka hasilkan (Johnson & Hallberg, 2020). Selain itu, beberapa penelitian juga telah membuktikan bahwa pemanfaatan proses bioleaching dalam ekstraksi LTJ dari abu terbang telah ditunjukkan oleh beberapa bakteri seperti *Pseudomonas putida* dan *Bacillus megaterium*. Kedua spesies bakteri tersebut telah teruji dan menunjukkan kemampuan yang cukup baik dalam melarutkan dan mengekstraksi unsur LTJ seperti cerium dan neodymium (Cánovas *et al.*, 2021).

Isolasi dan karakterisasi bakteri dari *fly ash* penting untuk meningkatkan potensi pemulihan lingkungan terkontaminasi LTJ. Bakteri memiliki peran dalam mekanisme bioremediasi seperti bioleaching, biosorpsi, bioakumulasi, biotransformasi, dan biominalisasi. Mekanisme ini melibatkan pengikatan logam pada dinding sel, mengubahnya menjadi bentuk kurang berbahaya, serta memisahkannya dari lingkungan tercemar. Sehingga diharapkan dapat mengurangi kandungan LTJ dan dampak negatifnya bagi lingkungan. Oleh karena itu, penelitian isolasi mikroorganisme dari *fly ash* dilakukan sebagai upaya untuk mengurangi dampak lingkungan LTJ serta meningkatkan potensi pemanfaatannya sebagai sumber alternatif (Jiang *et al.*, 2020).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Februari sampai dengan bulan Mei 2025 di Laboratorium Mineral Terpadu, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), KS Iskandar Zulkarnain, Tanjung Bintang, Lampung. Kegiatan sampling residu *fly ash* (abu terbang) dan air dilakukan pada bulan Januari 2025 di Kawasan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tarahan, Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu, (1) Peralatan pengambilan sampel tanah: sekop/ sendok, wadah steril, botol steril, penggaris. (2) Persiapan pembuatan larutan stok *fly ash*: timbangan analitik, erlenmeyer 100ml, spatula, autoclave, kulkas. (3) Peralatan isolasi bakteri: erlenmeyer 50ml, cawan petri, tabung reaksi, rak tabung reaksi, shaker, botol schott 500ml, autoclave, spatula, jarum ose, pipet tetes, bunsen, oven, bulb, laminar air flow, pipet volumetri, gelas ukur 250ml, micropippete, vortex, rak tabung reaksi, drigalski, inkubator 35°C. (4) Peralatan *staining*: kaca preparate, penjepit kayu, bunsen, mikroskop, (5) Peralatan

optimasi kinerja bakteri: tabung reaksi, jarum ose, pipet volumetri, bulb, spektrofotometri UV-Vis, dan alat tulis.

3.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi, aquades, sampel residu *fly ash* (abu terbang) hasil pembakaran batubara, Logam Tanah Jarang Yttrium (Y), Nutrient Agar (NA), Nutrient Broth (NB), alkohol 70%, larutan garam fisiologis (NaCl) 0,8%, sumbat (kapas dan kassa steril), sarung tangan lateks, spirtus, label, plastik, aluminium foil, plastik wrap, kristal violet, lugol/ iodine, etanol 95%, dan safranin.

3.3 Prosedur Penelitian

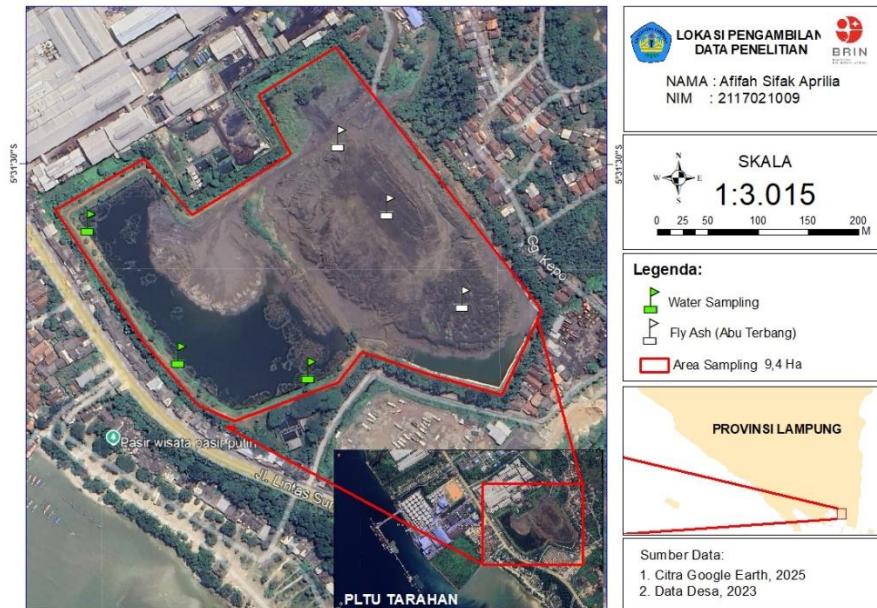
3.3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan studi eksperimental dengan pendekatan eksporatif untuk mengisolasi dan mengkarakterisasi bakteri dari sampel residu *fly ash* di sekitar area PLTU Tarahan, Lampung Selatan, yang mampu mengekstraksi LTJ dari polutan abu terbang sebagai agen bioremediasi.

3.3.2 Pengambilan Sampel

Kegiatan pengambilan sampel dilakukan dengan terlebih dahulu melakukan observasi di Kawasan PLTU Tarahan untuk menentukan titik sampling yang tepat. Pemilihan titik *sampling* dengan mengamati dan mengidentifikasi area yang masuk kriteria tanda pencemaran, seperti perubahan warna tanah, penurunan vegetasi,

hingga akumulasi *fly ash* (Aprilia, 2021). Sampel diambil dari 2 area, yaitu pada area *fly ash dump* dan di daerah aliran air. *Sampling* dilakukan dengan 2 kali pengulangan dan dikompositkan.



Gambar 1. Lokasi Pengambilan Sampel

Setiap titik sampling diambil menggunakan sekop/ sendok steril pada kedalaman 20 - 30cm. Dua sub-sampel diambil dari setiap titik (dari lokasi yang berbeda dalam radius 1 m) untuk meningkatkan representativitas. Semua sub-sampel dicampur dalam satu wadah steril untuk mendapatkan satu sampel komposit per titik. Sampel diberi label dengan informasi lokasi dan tanggal pengambilan serta dimasukkan di *cool box* untuk kemudian diuji di laboratorium.

3.3.3 Persiapan Uji (Pembuatan Larutan Stok)

Adapun 2 larutan stok yang dipersiapkan yaitu:

a. Pembuatan stok *fly ash* 100ppm

Langkah pertama yaitu menghitung jumlah *fly ash* yang dibutuhkan untuk konsentrasi 100ppm (100mg/L), maka untuk membuat larutan stok sebanyak 100ml diperlukan bobot abu terbang sebanyak 10mg. Setelah itu bubuk ditimbang sesuai jumlah yang diperlukan dengan timbangan analitik dan dimasukkan ke dalam erlenmeyer. Selanjutnya ditambahkan aquades hingga mencapai volume 100ml dan dihomogenkan. Erlenmeyer kemudian ditutup dengan aluminium foil dan disterilisasi di autoklaf bersama alat-alat gelas yang akan digunakan bersama pada suhu 121°C, selama 30 menit. Larutan stok disimpan di dalam kulkas, sedangkan alat-alat gelas dimasukkan ke dalam oven untuk sterilisasi kering.

b. Pembuatan stok logam Yttrium (Y) 100ppm

Untuk membuat larutan stok yttrium (Y) 100ppm, maka dipipet 10ml stok larutan standard logam Y (1000ppm) dan dimasukkan ke dalam erlenmeyer 100ml. Selanjutnya diencerkan dengan HNO_3 sebanyak 3,1ml dan ditambahkan aquadest hingga mencapai volume 100ml dan dihomogenkan. Erlenmeyer kemudian ditutup dengan aluminium foil dan disterilisasi di autoklaf pada suhu 121°C, selama 30 menit. Larutan stok yang sudah disterilisasi kemudian dimasukkan ke kulkas.

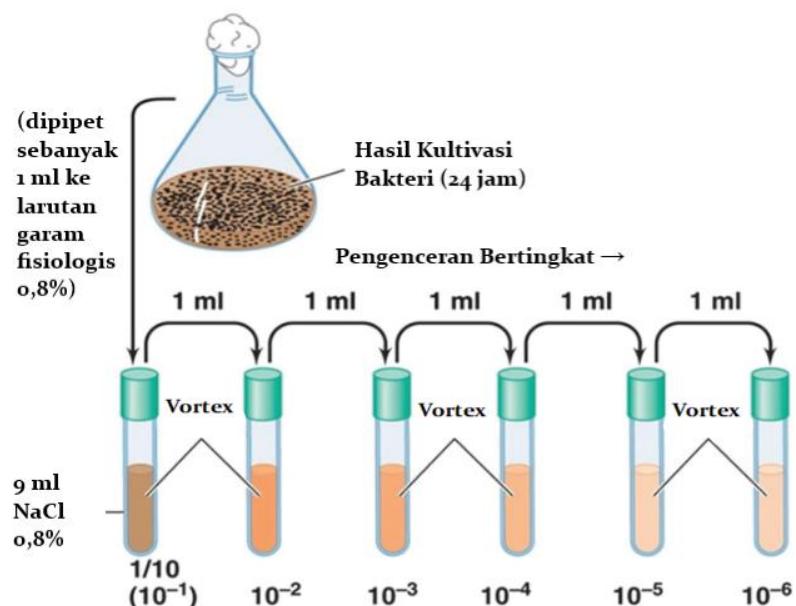
3.3.4 Kultivasi (Pembangkitan) Bakteri

Proses kultivasi atau pembangkitan bakteri dimulai dengan persiapan sampel polutan *fly ash* dan ditimbang sebanyak 5gr dan dimasukkan ke dalam 100 ml media NB dan ditutup dengan aluminium foil, kemudian di shaker selama 24 jam.

3.3.5 Isolasi Bakteri

Hasil shaker kemudian dipipet dan dilarutkan dalam larutan garam fisiologis steril 0,8% untuk selanjutnya dilakukan pengenceran berseri hingga didapatkan larutan 10^{-3} dan 10^{-4} . Setelah diperoleh pengenceran 10^{-3} dan 10^{-4} kedua larutan tersebut kemudian dipipet masing-masing sebanyak 0,1ml untuk inokulasi ke dalam media NA + *fly ash* (1 ppm) dan media NA + LTJ Yttrium (Y) (1 ppm) dengan metode spread yang kemudian diratakan dengan menggunakan drigalski dan diinkubasi kembali selama 24 jam.

Sebagaimana Ilustrasi berikut:



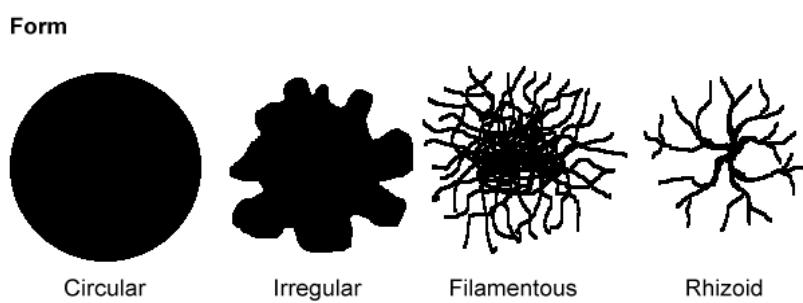
Gambar 2. Ilustrasi Pengenceran Bertingkat

3.3.6 Pemurnian (*Purity*)

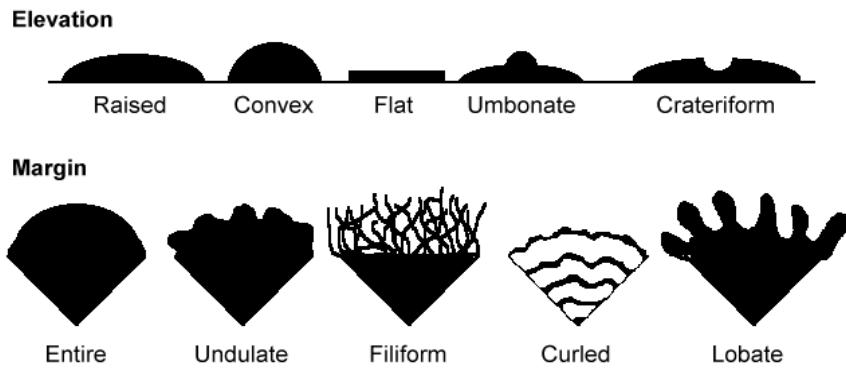
Koloni yang tumbuh setelah 24 jam pada setiap media selektif, sehingga diperlukan proses purity (pemurnian) untuk mendapatkan koloni murni. Bakteri diinokulasi dengan metode streak pada media selektif yang sesuai dan diberi label informasi media, seperti kode 1.1 (untuk koloni pertama yang diperoleh dari sampel abu terbang 1), 1.2 (koloni kedua yang diperoleh dari sampel abu terbang 1) dan seterusnya. Selanjutnya bakteri akan diinkubasi kembali dalam inkubator pada suhu 37°C selama 24 jam.

3.3.7 Karakterisasi Isolat Bakteri

Bakteri yang telah diperoleh dari hasil *purity* dan telah berusia 24 jam kemudian akan dikarakterisasi dengan pengamatan morfologi secara makroskopis dan pewarnaan Gram untuk pengamatan secara mikroskopis. Pengamatan morfologi koloni secara makroskopis dianalisis, berupa warna, bentuk, tepi koloni, dan elevasi atau permukaan koloni. Sedangkan pengamatan mikroskopis dengan pewarnaan Gram yang dilakukan untuk mengetahui jenis Gram positif ataupun negatif serta bentuknya seperti, bulat (*coccus*), batang (*bacillus*), dan spiral (*spirillum*), serta pewarnaan spora untuk mengidentifikasi keberadaan spora (Pratiwi dkk., 2023).



Gambar 3. Bentuk Koloni



Gambar 4. Elevasi Koloni, dan Tepi Koloni

a. Pewarnaan Gram

Tahapan ini dilakukan secara aseptis/ steril dengan terlebih dahulu membersihkan kaca preparat dengan alcohol dan dilewatkan pada nyala api (Bunsen) hingga kering dan dingin. Dilanjutkan dengan fiksasi isolat dengan melewatkannya diatas api bunsen. Kemudian proses pewarnaan Gram dilakukan dengan terlebih dahulu meneteskan secara berlebih kristal violet pada preparat hingga menutupi seluruh sediaan dan didiamkan selama 1 menit, dan dibilas dengan aquadest. Berikutnya diteteskan lugol/ iodine dengan didiamkan selama 1 menit dan dibilas kembali. Tahap ketiga yaitu dekolorisasi dengan etanol 95%. Kemudian yang terakhir diteteskan dengan safranin lalu didiamkan 30 detik dan dibilas dengan aquades serta dikering-anginkan untuk kemudian diamati dibawah mikroskop.

b. Pewarnaan spora

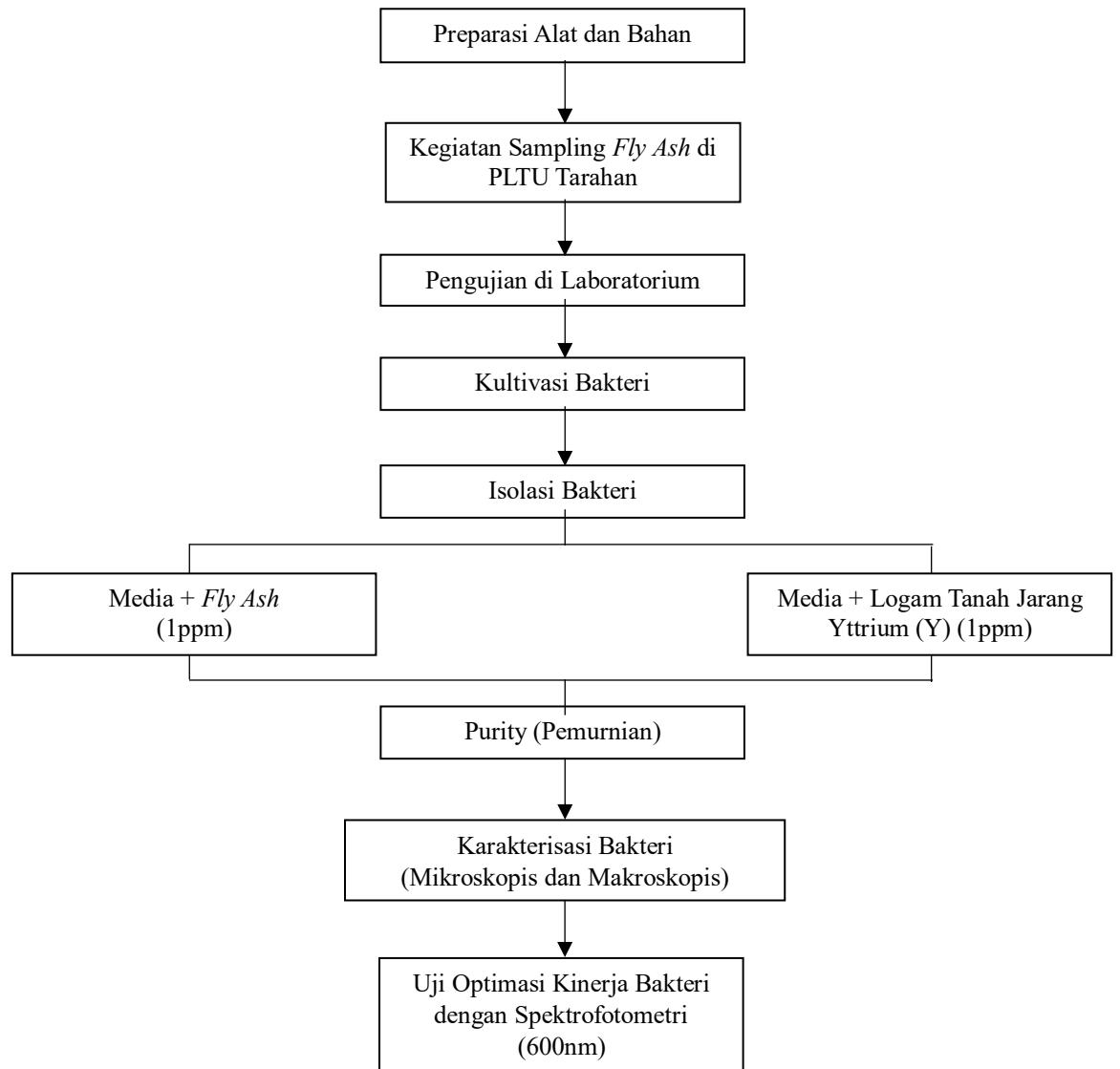
Pewarnaan spora dilakukan untuk mengetahui apakah isolat yang telah diisolasi mampu menghasilkan spora sebagai bentuk pertahanan terhadap kondisi ekstrem. Adanya spora akan tampak berwarna hijau akibat pewarna *malachite green*, sedangkan sel vegetatif akan berwarna merah.

Tahapan ini dilakukan secara aseptis dengan terlebih dahulu melakukan fiksasi pada gelas objek. Selanjutnya pewarnaan dilakukan dengan meneteskan *malachite green* sebagai cat pewarna spora secara menyeluruh pada permukaan sediaan dan didiamkan selama 10 menit kemudian dibilas dengan aquades. Kemudian dilanjutkan dengan pewarnaan dengan safranin dan didiamkan selama 30 detik dan kembali dibilas. Preparat ditunggu hingga kering dan diamati dibawah mikroskop.

3.3.8 Optimasi Kinerja Bakteri terhadap Logam Tanah Jarang Yttrium (Y)

Isolat potensial sebagai pereduksi logam yang telah dimurnikan kemudian dilakukan uji resistansi. Dimulai dengan pembuatan media NB sebanyak 1 liter. Kemudian dimasukkan masing-masing larutan ke dalam tabung reaksi steril, untuk tabung 50 ppm diisi dengan 9,5ml NB ditambahkan dengan 0,5ml stok larutan standar Y 100ppm, selanjutnya tabung 100ppm diisi dengan 9ml NB ditambah 1ml larutan standar Y 100ppm, untuk tabung 200 ppm diisi dengan 8ml NB ditambah dengan 2ml larutan stok Y 100ppm, dan seterusnya hingga diperoleh tabung 300ppm, dan 400ppm. Masing-masing media selektif kemudian diinokulasikan 1 ose isolat bakteri dan diinkubasi pada suhu 37°C dan di spektrofotometri setiap selang waktu 24 jam, 48 jam, dan 72 jam bersama dengan kontrol positif (larutan stok Y + NB) dan kontrol negatif (NB tanpa larutan stok Y).

3.3.9 Diagram Alir



V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dari hasil isolasi dua jenis sampel diperoleh total 11 isolat potensial untuk ekstraksi logam tanah jarang sebagai agen bioremediasi, dengan 5 isolat dari *fly ash*, yaitu FA 1.1, FA 1.2, FA 2.1, FA 2.2, dan FA 3.2. Sedangkan 6 isolat lainnya diperoleh dari sampel air disekitar *fly ash dump* dengan kode W 1.1, W 1.2, W 2.1, W 2.2, W 3.1, dan W 3.2.
2. Hasil uji OD (Optical Density) pada seluruh isolat menunjukkan hasil yang kurang lebih sama dimana pada konsentrasi 400ppm dengan interval waktu 72 jam rata-rata masih menunjukkan adanya peningkatan angka absorbansi, walaupun sebagian besar peningkatan kurva secara signifikan terjadi hanya hingga pada konsentrasi 200ppm.
3. Berdasarkan hasil uji OD pada 5 isolat terbaik FA 1.1, FA 3.2, W 1.1, W 2.2, dan W 3.2, dapat disimpulkan bahwa kelima isolat ini merupakan isolat yang potensial untuk mengekstraksi logam tanah jarang Y sebagai agen bioremediasi dan sangat layak untuk dilakukan uji toleransi ambang batas pada konsentrasi lanjutan.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan, maka disarankan untuk dapat melakukan uji lanjutan pada konsentrasi bertingkat untuk mengetahui ambang batas toleransi isolat yang diperoleh, sehingga dapat diketahui sejauh mana kelayakan aplikasinya untuk mengekstraksi logam tanah jarang pada *fly ash*. Selanjutnya dapat dilakukan analisis potensi bioleaching dan karakterisasi molekuler.

D AFTAR PUSTAKA

- Abbas, S. H., & Firman, F. 2020. Analisis Potensi Logam Tanah Jarang Abu Batubara Limbah Pltu Mulut Tambang Pt. Wanatiara Persada Kawasi Obi. *Journal Of Science and Engineering*. 3(2): 1-7.
- Adebisi, N., Chowdhury, S., Saha, M., & Zaman, S. 2019. Fly ash management and its utilization: A comprehensive review. *Environmental Management and Sustainability*. 8(1): 23-31.
- Aji, A. P., Rahmat, M. B., & Asri, P. 2021. Analisis Kerusakan Spiral Wires pada Electrostatic Precipitator di Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *Jurnal 7 Samudra*. 6(2): 39-52.
- Ali, F., Widayati, S., & Usman, D. N. 2023. Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash (FABA) sebagai Campuran Media Tanam di PT Bukit Asam, Tbk Tanjung Enim Sumatera Selatan. In *Bandung Conference Series: Mining Engineering*. 3(2): 500-509.
- Alterary, S. S., & Marei, N. H. 2021. Fly ash properties, characterization, and applications: A review. *Journal of King Saud University-Science*. 33(6): 101536.
- Ambia, D. 2022). Pemanfaatan Fly Ash Batubara Sebagai Adsorben Pada Penyerapan Polutan Di Pengolahan Air Lindi TPA Balng Bintang. *Doctoral dissertation*. UIN Ar-Raniry.
- Aprilia, W. 2021. Analisis Logam Berat dalam Sedimen Berdasarkan *Geoaccumulation Index* (Ige) di Sungai Winongo, D.I. Yogyakarta. *Skripsi*. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Asof, M., Arita, S., Andalia, W., & Naswir, M. 2022. Analisis Karakteristik, Potensi dan Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash PLTU Industri Pupuk (Analysis of Characteristics, Potential and Utilization of Fly Ash and Bottom Ash PLTU Fertilizer Industry). *Jurnal Teknik Kimia*. 28(1): 44-50.

- Auerbach, H., Koerner, I., Felix, R., & Pollmann, K. 2019. Bioleaching of rare earth elements from fluorescent phosphor. *Hydrometallurgy*. 189: 255–263.
- Ayora, C., Macías, F., Torres, E., Lozano, A., Carrero, S., Nieto, J. M., ... & Pérez-López, R. 2016. Recovery of rare earth elements and yttrium from passive-remediation systems of acid mine drainage. *Environmental Science & Technology*. 50(15): 8255–8262.
- Cánovas, D., Contreras, M., & García, J. A. 2021. Extraction of rare earth elements from industrial waste using fungal bioleaching. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 48(4-5): 293-308.
- Chen, Y., Liu, J., & Zhang, R. 2020. Extraction and utilization of rare earth elements from fly ash: Progress, challenges, and future prospects. *Journal of Cleaner Production*. 254: 120181.
- Chen, H., Liu, Y., Zhao, X., & Wang, L. 2022. Environmental factors influencing bacterial colony morphology and metabolic activity. *Frontiers in Microbiology*. 13: 867543.
- Chen, Y., Zhang, L., & Wang, J. 2021. The ecological and health effects of fly ash pollution and measures for environmental remediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 214: 112-119
- Das, N., Patra, H., & Mondal, S. 2022. Green approach for bioremediation and bioleaching of heavy metals using microbes: A review. *Journal of Environmental Management*. 305: 114305.
- Driks, A., & Eichenberger, P. 2021. The spore coat. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 85(3): e00107.
- Efendi, N., Frinaldi, A., Lanin, D., Umar, G., & Gusman, M. 2023. Pertambangan Emas Tanpa Izin (Peti): Dampak Lingkungan, Sosial Dan Ekonomi Serta Peranan Hukum Lingkungan. *Jurnal Ilmiah Multidisiplin Nusantara (JIMNU)*. 1(3): 123-128.
- Effendi, S., Mutalib, A., Anggraeni, A., dan Bahti, H. 2020. Penggunaan Desain Plackett Burman untuk Seleksi Parameter Pemisahan Logam Tanah Jarang Kelompok Sedang dari Logam Tanah Jarang Kelompok Lainnya dengan Metode Pengendapan. *Al- Kimiya*. 7(1): 01-06.
- Fadhila, D., & Purwanti, I. F. 2022. Kajian Fikoremediasi pada Air Tanah Tercemar Timbal dan Kadmium di Sekitar TPA Wukirsari, Gunungkidul. *Jurnal Teknik ITS*. 11(2): 34-40.

- Fatma, Y. S., Lesmana, D., Handayani, L., Sulistyorini, E., Arrasyid, B., Soimin, M., & Marda, A. B. 2023. *MIKROBIOLOGI LINGKUNGAN*. Tohar Media. Makassar.
- Firman, F., Haya, A., & Sahidi, A. A. 2020. Identifikasi Kandungan Logam Tanah Jarang pada Abu Batubara PLTU Mulut Tambang. *Jurnal GEOMining*. 1(1): 18-24.
- Gao, Y. 2020. The role of rare earth elements in advanced technologies. *Journal of Rare Earths*. 38(8): 745-754.
- Gao, R., Wei, X., Ding, H., Song, Y., & Lin, Y. 2022. Adaptation of spore-forming bacteria to extreme environments. *Archives of Microbiology*. 204(9), 556.
- Gupta, P., Mandal, S. K., & Srivastava, R. 2021. Adaptation of bacterial morphology under heavy metal stress: Role of EPS and cell surface modulation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 208: 111720.
- Huda, A. K. N. 2023. Transisi Energi Di Indonesia: Overview & Challenges. *Buletin Pertamina*. 9(2): 49-58.
- Jafar, M. A., et al. 2022. Dampak Kegiatan Pertambangan terhadap Kualitas Tanah dan Populasi Mikroba: Studi Kasus di Wilayah Pertambangan Batubara. *Jurnal Lingkungan dan Teknologi*. 18(2): 101-115.
- Jiang, Y., et al. 2020. Biotechnological Approaches to Recycling Rare Earth Elements from Electronic Waste: A Review. *Journal of Biotechnology and Environmental Sciences*. 12(2): 79-93.
- Johnson, D. B., & Hallberg, K. B. 2020. Acidophilic microorganisms and their potential for bioleaching and bioremediation. *Trends in Biotechnology*. 38(6): 597-609.
- Jufri, R. F. 2020. Microbial Isolation. *Journal La Lifesci*. 1(1): 18-23.
- Karyawati, A. T., Mauboy, R. S., Ruma, M. T. L., Bana, J. J., Amalo, D., & Suhardi, E. 2024. Isolasi dan karakterisasi bakteri asam laktat dari limbah cair tahu di Pabrik Tahu Bintang Oesapa Kecamatan Kelapa Lima Kota Kupang. *Jurnal Biotropikal Sains*. 21(3): 74–82.
- Kinasti, M. A., Lestari, E., dan Mayasari, D. 2018. Potensi Pemanfaatan Limbah Pembakaran Batubara (*Bottom Ash*) pada PLTU Sebagian Media Tanam dalam Upaya Mengurangi Pencemaran Lingkungan. *Jurnal Redaksi Tim*. 7(1): 36-46.
- Koch, A. L., Hazlett, K. R. O., & Young, K. D. 2020. The advantages of a thick wall: Peptidoglycan and the survival of Gram-positive bacteria in osmotic stress. *Microbial Physiology*. 30(1): 1–12.

- Kumar, A., et al. 2018. Environmental impact of fly ash and its utilization. *Environmental Science and Pollution Research*. 25(1): 345-356.
- Li, Z., Jin, D., Bo, H., Wang, W., Zhang, B., Zhang, W., & Li, H. 2023. Deposisi abu terbang jangka panjang mengatur komunitas bakteri di berbagai zona gangguan: bukti dari keanekaragaman, kompleksitas jaringan, dan fungsi metabolisme prediktif. *Science of The Total Environment*. 888: 164244.
- Li, X., Zhang, Y., & Huang, X. 2020. Stress response and morphological adaptation of environmental bacteria to nutrient and oxidative stress. *Journal of Applied Microbiology*. 129(6): 1415–1427.
- Lisafitri, Y., Kardena, E., & Helmy, Q. 2024. Potential, isolation, and characterization of bacteria isolates from a coal ash dumpsite for recovery of nickel from coal fly ash. *E3S Web of Conferences: EDP Sciences*. 485 (05001): 01-09.
- Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. 2018. *Brock Biology of Microorganisms* (15th ed.). Pearson Education.
- Mireles, A., et al. 2018. Bioremediation of heavy metals using microorganisms. *Biotechnology Advances*. 36(6): 1863-1875.
- Niu, Z., Zhang, W., & Li, Y. 2021. Microbial extraction of rare earth elements from coal fly ash: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 18(5): 2493.
- Oktavian, P., Anas, M., Sudiana, I. N., Safaani, J., & Agusu, L. 2024. Studi Kajian Literatur: Pengaruh Keberadaan Logam Berat Terhadap Tingkat Kesuburan Tanah di Indonesia. *Einstein's: Research Journal of Applied Physics*. 2(1): 20-23
- Pratiwi, L., Rasyidah, R., & Mayasari, U. 2023. Isolasi dan Identifikasi Bakteri Heterotrofik di Perairan Pantai Pandaratan Kecamatan Sarudik Kabupaten Tapanuli Tengah Provinsi Sumatera Utara. *Bioma: Berkala Ilmiah Biologi*. 25(1): 28-37.
- Puspita, M., Arsyad, A., dan Zahar, W. 2022. Identifikasi Keterdapatannya Unsur Logam Tanah Jarang dalam Lapisan Batubara di PT. Prima Mulia Sarana Sejahtera Kabupaten Muara Enim Provinsi Sumatra Selatan. *Jurnal Penelitian dan Pengabdian Masyarakat*. 1(9): 657-666.
- Rahadi, S., Santosa, D. A., & Suryanto, D. 2019. Bioremediasi logam timbal (Pb) menggunakan bakteri indigenous pada tanah tercemar air lindi (leachate) [Bioremediation of lead using indigenous bacteria isolated from leachate contaminated soil]. *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*. 6(3): 135–144.

- Rajput, P., Verma, S., & Tiwari, S. 2021. Fly ash pollution: Environmental hazards and its sustainable management strategies. *Environmental Science and Pollution Research*. 28(10): 11691–11704.
- Rina, R. 2020. Karakteristik dan Potensi Tanah Tua di Indonesia untuk Eksplorasi Mineral. *Jurnal Geologi dan Sumber Daya Alam*. 12(3): 45-58.
- Rosahdi, T. D., Tafiani, N., & Hafsari, A. R. 2019. Identifikasi Spesies Isolat Bakteri K2Br5 dari Tanah Karst dengan Sistem Kekerabatan Melalui Analisis Urutan Nukleotida Gen 16S rRNA. *al Kimiya: Jurnal Ilmu Kimia dan Terapan*. 5(2): 84-88.
- Sahidi, A. A., Senen, A. M., & Madjid, S. M. 2020. Pemanfaatan Limbah Abu Batubara Sebagai Sumber Logam Tanah Jarang. *Jurnal GEOMining*. 1(2): 72-78.
- Semenov, A. V., & Vasil'ev, I. N. 2020. Formation and emission of fly ash in coal-fired power plants. *Environmental Science and Pollution Research*. 27(8): 8360-8375.
- Setiawan, H., & Kurniawati, T. 2019. *Composition and Environmental Risk of Fly Ash from Indonesian Coal-Fired Power Plants*. *Journal of Hazardous Materials*.
- Setlow, P. 2020. Germination of spores of *Bacillus* species: What we know and do not know. *Journal of Bacteriology*. 202(10): e00022.
- Singh, R., Suri, P., & Meena, R. H. 2020. Structural differences in bacterial cell walls and their contribution to environmental adaptability. *Environmental Microbiology Reports*. 12(3): 321–329.
- Singh, R., Thakur, M., & Gupta, S. 2023. Toxicity of fly ash on aquatic and terrestrial ecosystems: a review. *Environmental Monitoring and Assessment*. 195: 112-134.
- Situmorang, T. S., Rahmiati, R., & Simanjuntak, H. A. 2022. Isolasi Dan Karakterisasi Bakteri Dari Tanah Bakaran Sampah. *Journal of Natural Sciences*. 3(3): 162-167.
- Supriadi, H., dkk. 2021. Pemisahan Logam Tanah Jarang Dari Tailing Zirkon Dengan Proses Pelindian Asam. *Prosiding Seminar Nasional Riset dan Teknologi Terapan (Ritektra)*. D1-D8.
- Supriadi, A., Setiawan, B., & Rahman, T. 2021. Pemanfaatan potensi logam tanah jarang dari fly ash di Indonesia: Tinjauan potensi dan tantangan. *Journal of Environmental Resources*. 9(1): 34-42.

- Taib, E. N., Maya, H., Shabirah, R., & Siregar, F. R. 2023. Isolation and identification of microbes in soil used to grow shallots (*Allium cepa* L.). *Biologi Edukasi: Jurnal Ilmiah Pendidikan Biologi*. 15(2): 96-104.
- Uthami, F. N., & Irdawati, I. 2024. Karakteristik pola pertumbuhan bakteri termofilik isolat MS-12 dari sumber air padas mudiak sapan. *MASALIQ*. 4(1): 344-351.
- Wang, H., & Li, F. 2022. Health risks and ecological impact assessment of fly ash pollution. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 19(6): 3147-3165.
- Wang, J., Chen, F., & Tan, Y. 2021. Valorization of coal combustion residues: Potential applications of rare earth elements in fly ash. *Environmental Science & Technology*. 55(6): 3875-3883.
- Wang, J., Hu, Y., & Zhao, B. 2019. Correlation between colony morphology and motility of environmental bacteria in aquatic habitats. *Aquatic Microbial Ecology*. 83(1): 45–54.
- Widiastuti, D., Astuti, D. I., & Susilowati, R. 2022. Bioremediation potential of native *Bacillus* sp. strains as a sustainable strategy for cadmium accumulation. *Microorganisms*. 10(12): 2427.
- Yanti, D., Rahmawati, R., & Kurniatuhadi, R. 2021. Karakteristik Morfologis dan Fisiologis Bakteri Endofit dari Akar Napas Tumbuhan *Avicennia marina* (fork) vierh di Mempawah Mangrove Park. *Biologica Samudra*. 3(2): 166-183.
- Yanti, R., Wahyuni, T., & Kurniawan, H. 2021. Struktur dan karakteristik dinding sel bakteri Gram positif dan Gram negatif. *Jurnal Biologi dan Pendidikan Biologi*. 13(1): 45–51.
- Yuniar, F. 2020. Karakterisasi dan Uji Toleransi Kadmium pada Isolat Bakteri Pereduksi Sulfat dari Air Asam Tambang. *Doctoral dissertation*. Universitas Hasanuddin.
- Zhang, X., et al. 2021. Health risk assessment of heavy metals in fly ash. *Environmental Monitoring and Assessment*. 193(3): 1-12.
- Zhang, T., Chen, X., & Wu, Q. 2020. Heavy metals contamination and their effects on plants in fly ash-contaminated soil: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 27: 11683-11697.
- Zhang, T., Wu, Z., & Yu, L. 2022. Emerging strategies for rare earth recovery from fly ash: Economic potential and environmental considerations. *Resources, Conservation, and Recycling*. 185: 106491

Zhou, Z., Liu, Y., & Li, Y. 2022. Structural mechanisms of multidrug efflux in Gram-negative bacteria. *Nature Reviews Microbiology*. 20(7): 390–403..