

ANALISIS GENOMIK DAN MEKANISME TOLERANSI TIMBAL (Pb) OLEH BAKTERI INDIGENUS ASAL DANAU KAOLIN, BELITUNG, INDONESIA

NUR RAHMAYANI LAELIN



**PROGRAM STUDI BIOTEKNOLOGI
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
Bogor Indonesia

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University



PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Analisis Genomik dan Mekanisme Toleransi Timbal (Pb) oleh Bakteri Indigenus asal Danau Kaolin, Belitung, Indonesia” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir tesis ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, April 2026

Nur Rahmayani Laelin
P0501231009

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

RINGKASAN

NUR RAHMAYANI LAELIN. Analisis Genomik dan Mekanisme Toleransi Timbal (Pb) oleh Bakteri Indigenus Asal Danau Kaolin, Belitung, Indonesia. Dibimbing oleh RIKA INDRI ASTUTI dan YULI SITI FATMA.

Timbal (Pb) adalah salah satu logam berat yang diklasifikasikan sebagai zat beracun bahkan dalam jumlah sangat kecil dan tidak memiliki manfaat biologis bagi makhluk hidup. Unsur ini bersifat persisten di lingkungan karena tidak dapat terdegradasi secara alami serta cenderung terakumulasi pada tumbuhan, hewan, dan organisme akuatik di berbagai tingkat rantai makanan. Toksisitas timbal dapat berpotensi menimbulkan dampak gangguan kesehatan serius pada manusia akibat paparan jangka panjang. Timbal dapat memasuki ekosistem alami melalui proses alami dan aktivitas manusia, terutama pada sektor industri. Oleh karena itu, diperlukan penanggulangan pencemaran yang efektif dan ramah lingkungan, salah satunya melalui pemanfaatan mikroorganisme. Mikroba yang berasal dari lokasi tercemar sangat berpotensi untuk mendetoksifikasi pencemaran logam berat karena jenis mikroba ini memungkinkan untuk memiliki fenotipe toleran terhadap paparan logam berat. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kajian mengenai mekanisme toleransi mikroba terhadap timbal relevan untuk dikembangkan guna menunjang strategi penanggulangan pencemaran yang efektif dan berkelanjutan.

Isolat bakteri *Bacillus cereus* RDK1 dan *Burkholderia cenocepacia* RDK8 sebelumnya telah diisolasi dari area bekas pertambangan timah di danau Kaolin, Belitung, Indonesia. Isolat tersebut menunjukkan secara fenotip toleran terhadap 100 ppm $Pb(NO_3)_2$ yang mengindikasikan potensinya sebagai agen bioremediasi pencemaran timbal. Namun, pemahaman mengenai mekanisme toleransi isolat ini masih belum diketahui, sehingga hal ini membatasi potensi aplikasinya sebagai agen bioremediator. Studi ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan toleransi tertinggi diantara kedua isolat, mengidentifikasi gen-gen yang berperan dalam mekanisme toleransi, serta mengevaluasi beberapa mekanisme toleransi yang teramati secara fenotipik.

Metode penelitian dilakukan dalam beberapa tahapan, dimulai dari analisis toleransi kedua isolat bakteri tersebut terhadap $Pb(NO_3)_2$ pada konsentrasi 100 hingga 500 ppm, menentukan nilai *Minimum Inhibitory Concentration* (MIC) dan *Minimum Bactericidal Concentration* (MBC), mengukur sisa timbal dengan *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS), pembentukan biofilm dengan metode *Crystal Violet* 0,1% dan aktivitas siderofor menggunakan *Crome Azurol S* (CAS). Biosorpsi timbal pada sel bakteri yang dikonfirmasi melalui analisis *Transmission Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (TEM-EDS) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Analisis sekuens genom melalui *Whole Genom Sequencing* (WGS) juga dilakukan untuk memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai mekanisme yang mendasari ketahanan bakteri terhadap logam berat.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *B. cenocepacia* RDK8 dapat bertahan pada konsentrasi $Pb(NO_3)_2$ yang lebih tinggi dibandingkan dengan *B. cereus* RDK1, dengan MIC sebesar 2.500 ppm dan MBC sebesar 10.000 ppm. Analisis AAS mengkonfirmasi kemampuan kedua isolat dalam menyerap timbal, dengan hasil persentase efisiensi yang lebih tinggi pada *B. cenocepacia* RDK8, yaitu sebesar



68,81% pada konsentrasi $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 300 ppm dan 62,89% pada 500 ppm. Oleh karena itu, *B. cenocepacia* RDK8 diidentifikasi sebagai isolat paling efektif dalam penelitian ini.

Urutan genom lengkap RDK8 diperoleh menggunakan platform MGI DNBSEQ. Analisis seluruh genom mengidentifikasi gen kunci dan jalur metabolisme yang berpotensi terlibat dalam toleransi terhadap timbal seperti gen-gen yang terlibat dalam efluks, kelatasi, *exopolysaccharide* (EPS)/biofilm, dan proteksi stres oksidatif sebagai respon terhadap cekaman timbal. Temuan gen kunci didukung oleh kemampuan fenotipik. Aktivitas positif siderofor pada media agar CAS menunjukkan kemampuan sel dalam mengikat timbal. Selain itu, terjadi penurunan produksi biofilm seiring dengan peningkatan konsentrasi timbal, dari kategori kuat pada kelompok kontrol menjadi negatif pada konsentrasi 10.000 ppm. Pengamatan morfologi sel menggunakan SEM menunjukkan perubahan pada struktur permukaan setelah terpapar timbal. Analisis TEM-EDS menunjukkan distribusi timbal secara dominan di tepi sel yang terasosiasi dengan struktur dinding sel. Lokalisasi ini mengindikasikan adanya mekanisme sekuestrasi ekstraseluler atau periplasmik. Temuan ini menegaskan potensi genetik dan aksi *B. cenocepacia* RDK8 sebagai bakteri potensial toleran timbal.

Berdasarkan hasil tersebut, *B. cenocepacia* RDK8 menunjukkan fenotipe toleran terhadap stres $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$. Integrasi analisis genomik dengan beberapa karakteristik fenotipik mengungkapkan bahwa *B. cenocepacia* RDK8 memiliki potensi mekanisme toleransi timbal. Temuan ini menunjukkan bahwa kombinasi kapasitas fisiologis dan potensi genetik mendukung penggunaan *B. cenocepacia* RDK8 sebagai kandidat yang unggul dalam bioremediasi lingkungan yang terkontaminasi timbal.

Kata kunci: biofilm, bioremediasi, siderofor, timbal, *whole genome sequencing*

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

SUMMARY

NUR RAHMAYANI LAELIN. Genomic Analysis and Mechanisms of Lead (Pb) Tolerance in Indigenous Bacteria from Kaolin Lake, Belitung, Indonesia. Supervised by RIKA INDRI ASTUTI and YULI SITI FATMA.

Lead (Pb) is a heavy metal classified as a toxic substance even in very small amounts and has no biological benefit for living organisms. This substance is persistent in the environment because it does not degrade naturally and tends to accumulate in plants, animals, and aquatic organisms at various levels of the food chain. Lead toxicity can potentially cause serious health disorders in humans as a result of long-term exposure. Lead can enter natural ecosystems through both natural processes and human activities, primarily in the industrial sector. Therefore, effective and environmentally friendly pollution control is required, one of which involves utilizing microorganisms. Indigenous microbes from polluted sites have great potential to detoxify heavy metal contamination, as these types of microbes are likely to have tolerant phenotypes against heavy metal exposure. This condition indicates that studies on the mechanisms of microbial tolerance to lead are relevant for development to support effective and sustainable pollution control strategies.

The bacterial isolates *Bacillus cereus* RDK1 and *Burkholderia cenocepacia* RDK8 were previously isolated from a former tin mining area in Kaolin Lake, Belitung, Indonesia. These isolates phenotypically exhibited tolerance to 100 ppm $Pb(NO_3)_2$, indicating their potential as bioremediation agents for lead pollution. However, understanding of the tolerance mechanisms in these isolates is still lacking, thereby limiting their application potential as bioremediators. The aim of this study is to determine the highest tolerance level among the two isolates, identify the genes involved in the tolerance mechanism, and evaluate several tolerance mechanisms observed phenotypically.

The research methods were carried out in several stages, starting from analyzing the tolerance of both bacterial isolates to $Pb(NO_3)_2$ at concentrations from 100 to 500 ppm, determining the Minimum Inhibitory Concentration (MIC) and Minimum Bactericidal Concentration (MBC), measuring residual lead using Atomic Absorption Spectroscopy (AAS), biofilm formation using the 0.1% Crystal Violet method, and siderophore activity using Chrome Azurol S (CAS). Specific lead biosorption on bacterial cells was confirmed through Transmission Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (TEM-EDS) and Scanning Electron Microscopy (SEM) analyses. Genomic sequence analysis via Whole Genome Sequencing (WGS) was also conducted to provide a comprehensive understanding of the underlying mechanisms of bacterial resistance to heavy metals.

The results showed that *B. cenocepacia* RDK8 could withstand higher concentrations of $Pb(NO_3)_2$ compared to *B. cereus* RDK1, with an MIC of 2,500 ppm and an MBC of 10,000 ppm. AAS analysis confirmed the ability of both isolates to absorb lead, with higher percentage efficiency in *B. cenocepacia* RDK8, namely 68.81% at a $Pb(NO_3)_2$ concentration of 300 ppm and 62.89% at 500 ppm. Therefore, *B. cenocepacia* RDK8 was identified as the most effective isolate in this study.



The complete genome sequence of RDK8 was obtained using the MGI DNBSEQ platform. Whole-genome analysis identified key genes and metabolic pathways potentially involved in lead tolerance, such as genes related to efflux, chelation, exopolysaccharide (EPS)/biofilm formation, and oxidative stress protection in response to lead stress. The presence of key genes was supported by phenotypic capabilities. Positive siderophore activity on CAS agar medium indicated the cell's ability to bind lead. In addition, biofilm production decreased with increasing lead concentration, from strong in the control group to negative at 10,000 ppm. Cell morphology observations using SEM showed changes in surface structure after exposure to lead. TEM-EDS analysis shows that lead is predominantly distributed at the cell edges, associated with the cell wall structure. This localization indicates the presence of an extracellular or periplasmic sequestration mechanism. These findings confirm the genetic potential and action of *B. cenocepacia* RDK8 as a potential lead-tolerant bacterium.

Based on these results, *B. cenocepacia* RDK8 exhibits a tolerant phenotype towards $Pb(NO_3)_2$ stress. The integration of genomic analysis with phenotypic characteristics reveals that *B. cenocepacia* RDK8 possesses strong lead tolerance mechanisms. These findings indicate that the combination of physiological capacity and genetic potential supports the use of *B. cenocepacia* RDK8 as a superior candidate for bioremediation of environments contaminated by lead.

Keywords: biofilm, bioremediation, siderophore, lead, whole genome sequencing



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

ANALISIS GENOMIK DAN MEKANISME TOLERANSI TIMBAL (Pb) OLEH BAKTERI INDIGENUS ASAL DANAU KAOLIN, BELITUNG, INDONESIA

NUR RAHMAYANI LAELIN

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Sains pada
Program Studi Bioteknologi

**PROGRAM STUDI BIOTEKNOLOGI
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Judul Tesis : Analisis Genomik dan Mekanisme Toleransi Timbal (Pb) oleh Bakteri Indigenus asal Danau Kaolin, Belitung, Indonesia
Nama : Nur Rahmayani Laelin
NIM : P0501231009

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Dr. Rika Indri Astuti, S.Si., M.Si.

Pembimbing 2:
Dr. Yuli Siti Fatma, S.Si., M.Si.



Handwritten signature of Rika Indri Astuti

Diketahui oleh

Ketua Program Studi Bioteknologi:
Prof. Dr. Ir. Miftahudin, M.Si.
NIP. 196204191989031001

Dekan Sekolah Pascasarjana:
Prof. Dr. Ir. Yusli Wardiatno, M.Sc.
NIP. 196607281991031002

Handwritten signature and official stamp of the Dean of Postgraduate School

Tanggal Ujian: 06 April 2026

Tanggal Lulus: 19 APR 2026

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan November 2024 sampai bulan Oktober 2025 yaitu dengan judul “Analisis Genomik dan Mekanisme Toleransi Timbal (Pb) oleh Bakteri Indigenus Asal Danau Kaolin, Belitung, Indonesia”.

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing, Ibu Dr. Rika Indri Astuti, S.Si., M.Si. selaku ketua komisi pembimbing dan Ibu Dr. Yuli Siti Fatma, S.Si., M.Si. selaku anggota komisi pembimbing yang telah membimbing, mengarahkan, memotivasi, serta memberi banyak saran selama proses penelitian dan penyusunan tesis ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada moderator seminar dan penguji luar komisi pembimbing.

Terima kasih penulis ucapkan kepada Ayahanda Yanto Apriyanto, Ibunda Nunung Nurbani, Kaka Nurhikmayati Fazrin dan Adik Dzidan Iyad selaku keluarga tercinta yang selalu memberikan motivasi, doa, dan dukungan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Ungkapan terima kasih kepada Ichi Dianita, Rezka Nur Ansar, Atma, Zaidatu, Nurul Azma, Shafiyah Lulu, Biotek 23, dan teman-teman yang telah menemani dan memberikan dukungan secara fisik maupun mental.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, April 2026

Nur Rahmayani Laelin

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	3
TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Logam Berat	4
2.2 Logam Berat Timbal	4
2.3 Toksisitas Timbal	6
2.4 Resistensi Bakteri terhadap Timbal	6
2.5 Whole Genome Sequence	9
III METODE	11
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	11
3.2 Alur Penelitian	11
3.3 Alat dan Bahan	12
3.4 Prosedur Kerja	12
3.4.1 Uji Toleransi terhadap $Pb(NO_3)_2$	12
3.4.2 Dekontaminasi $Pb(NO_3)_2$ oleh Bakteri	12
3.4.3 Penentuan Nilai <i>Minimum Inhibitory Concentration</i> (MIC) dan <i>Minimum Bactericidal Concentration</i> (MBC)	13
3.4.4 Isolasi DNA genom, <i>Whole Genome Sequencing</i> , dan Analisis Klaster Gen pada Bakteri Toleran Pb Terpilih	13
3.4.5 Analisis Komparatif Genom <i>Burkholderia cenocepacia</i> RDK8	13
3.4.6 Analisis Kualitatif Deteksi Siderofor	14
3.4.7 Analisis Kualitatif Pembentukan Biofilm	14
3.4.8 <i>Scanning Electron Microscopy</i>	14
3.4.9 Analisis <i>Transmission Electron Microscopy Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy</i> (TEM-EDS)	15
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	16
4.1 Hasil	16
4.1.1 Morfologi dan Uji Toleransi terhadap $Pb(NO_3)_2$	17
4.1.2 Dekontaminasi $Pb(NO_3)_2$ oleh Bakteri	17
4.1.3 Penentuan Nilai <i>Minimum Inhibitory Concentration</i> (MIC) dan <i>Minimum Bactericidal Concentration</i> (MBC)	18
4.1.4 Isolasi DNA genomik, Pengurutan Seluruh Genom, dan Analisis Klaster Gen dari Bakteri Toleran Pb Terpilih	18
4.1.5 Analisis komparatif genome <i>Burkholderia cenocepacia</i> RDK8 dengan spesies bakteri lainnya	24
4.1.6 Aktivitas Siderofor dan Biofilm	26
4.1.7 Hasi Pengamatan melalui <i>Scanning Electron Microscopy</i>	27



4.1.8 Hasil Observasi <i>Transmission Electron Microscopy Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy</i>	27
4.2 Pembahasan	28
V SIMPULAN DAN SARAN	33
5.1 Simpulan	33
5.2 Saran	33
DAFTAR PUSTAKA	34
LAMPIRAN	44
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	50

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



DAFTAR TABEL

1	Klasifikasi Unsur-Unsur Logam Berdasarkan Peran dan Toksisitasnya	1
2	Bakteri toleran terhadap timbal yang telah berhasil diisolasi	6
3	Efisiensi Dekontaminasi Pb(NO ₃) ₂ oleh <i>Burkholderia cenocepacia</i> RDK8 dan <i>Bacillus cereus</i> RDK1	15
4	Nilai MIC dan MBC dari <i>Burkholderia cenocepacia</i> RDK8 dan <i>Bacillus cereus</i> RDK1 terhadap Pb(NO ₃) ₂	16
5	Karakteristik genomik bakteri toleran timbal <i>Burkholderia cenocepacia</i> RDK8 berdasarkan analisis <i>Whole Genome Sequence</i>	17
6	Gen-gen fungsional yang berpotensi terlibat dalam mekanisme toleransi Pb(NO ₃) ₂ pada <i>Burkholderia cenocepacia</i> RDK8, berdasarkan analisis data genom	19
7	Prediksi Hasil <i>Biosynthetic Gene Cluster</i> (BGC) of <i>Secondary Metabolites Burkholderia cenocepacia</i> RDK8 melalui AntiSMASH	21

DAFTAR GAMBAR

1	Mekanisme toleransi Pb pada bakteri: adsorpsi permukaan, sekuestrasi ekstraseluler, efluks <i>ATPase</i> tipe P _{IB} , akumulasi intraseluler, presipitasi, dan pengikatan oleh siderofor.	7
2	Model aksi protein <i>Pbr</i>	8
3	Diagram alir konstruksi pustaka dan proses sekuensing	10
4	Alur penelitian	11
5	Karakteristik morfologi koloni isolat bakteri pada media <i>Nutrient Agar</i> setelah inkubasi selama 24 jam pada suhu 27 °C	16
6	Pengaruh Pb(NO ₃) ₂ terhadap pertumbuhan <i>B. cenocepacia</i> RDK8 dan <i>B. cereus</i> RDK1	17
7	Hasil analisis <i>Clusters of Orthologous Groups</i> (COGs) dari analisis protein fungsional pada urutan genom lengkap bakteri toleran timbal <i>Burkholderia cenocepacia</i> RDK8	20
8	Peta genetik klaster gen biosintesis metabolit sekunder tipe <i>NRP-metallophore</i> pada <i>B. cenocepacia</i> RDK8 di region 10.1	24
9	Hasil analisis klaster gen ortolog berdasarkan urutan genom lengkap <i>Burkholderia cenocepacia</i> RDK8 dibandingkan dengan spesies <i>Burkholderia</i> lainnya	24
10	Diagram Venn yang menggambarkan kesamaan dan perbedaan anotasi <i>Gene Ontology</i> (GO) antara isolat RDK8 dengan spesies terkait	25
11	Hasil analisis perbandingan klaster dan jumlah protein yang sesuai antara RDK8 dan referensi spesies <i>Burkholderia</i> lainnya	25
12	Hasil analisis filogenetik dengan platform OrthoVenn3 terhadap <i>Burkholderia cenocepacia</i> RDK8 dan 9 spesies pembanding lainnya	26
13	Hasil analisis fenotipik Siderofor dan Biofilm	26
14	Pengamatan <i>Scanning Electron Microscopy</i> terhadap <i>Burkholderia cenocepacia</i> RDK8	27
15	Mikrograf TEM morfologi sel <i>Burkholderia cenocepacia</i>	28

- 16 Hasil *Transmission Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (TEM-EDS) yang menunjukkan unsur kimia yang dipancarkan oleh *B. cenocepacia* RDK8 28

DAFTAR LAMPIRAN

1. Nilai *Optical Density* pada uji toleransi *Burkholderia cenocepacia* RDK8 dan *Bacillus cereus* RDK1 terhadap $Pb(NO_3)_2$ 40
2. Hasil uji *Minimum Inhibitory Concentration* (MIC) isolat *Burkholderia cenocepacia* RDK8 dan *Bacillus cereus* RDK1 40
3. Hasil uji *Minimum Bactericidal Concentration* (MBC) isolat *Burkholderia cenocepacia* RDK8 41
4. Hasil uji *Minimum Bactericidal Concentration* (MBC) *Bacillus cereus* RDK1 41
5. Hasil Uji Analisis Biofilm pada Isolat *Burkholderia cenocepacia* RDK8 42
6. Hasil Analisis Kualitatif Siderofor *Burkholderia cenocepacia* RDK8 pada Media *Crome Azurol S* 42
7. Peta genetik klaster gen biosintesis metabolit sekunder *Burkholderia cenocepacia* RDK8 42
8. Hasil Analisis Komposisi Unsur Berdasarkan Analisis EDS pada Sampel *B. cenocepacia* RDK8 43