



# KARAKTERISASI GENOM *Bacillus cereus* DCN1 DAN IDENTIFIKASI KLASTER GEN TERKAIT TOLERANSI TIMBAL (Pb) DAN BESI (Fe)

JULITA CATRIADILA



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 mengumunkan 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.



## PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Karakterisasi Genom *Bacillus cereus* DCN1 dan Identifikasi Klaster Gen Terkait Toleransi Timbal (Pb) dan Besi (Fe)” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apapun 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, Maret 2026

Julita Catri Adila  
P0501241025



@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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

## RINGKASAN

JULITA CATRI ADILA. Karakterisasi Genom *Bacillus cereus* DCN1 dan Identifikasi Klaster Gen Terkait Toleransi Timbal (Pb) dan Besi (Fe). Dibimbing oleh RIKA INDRI ASTUTI dan M. EKA PRASTYA.

Pencemaran logam berat seperti timbal (Pb) dan besi (Fe) menjadi masalah lingkungan yang signifikan karena bersifat toksik terhadap berbagai organisme, Paparan Pb diketahui dapat menyebabkan gangguan sistem saraf, fungsi ginjal, dan reproduksi, serta bersifat karsinogenik. Sementara itu, Fe merupakan logam esensial yang penting dalam berbagai proses biologis, namun keberadaan dalam kadar berlebih dapat memicu stres oksidatif, kerusakan jaringan, dan gangguan metabolisme. Tantangan ini mendorong upaya pengembangan pendekatan berkelanjutan berbasis mikroorganisme toleran logam yang dikenal memiliki adaptasi ekologis yang luas dan potensi tinggi dalam remediasi lingkungan. Pemahaman toleransi logam pada mikroorganisme memerlukan integrasi antara analisis fenotipik dan pendekatan genomik. *Whole Genome Sequencing* (WGS) berperan dalam mengidentifikasi klaster gen dan mekanisme molekuler yang mendasari respons terhadap cekaman logam. Kombinasi data genomik dan fenotipik memungkinkan evaluasi komprehensif terhadap strategi adaptasi dan potensi fungsional suatu mikroorganisme.

Penelitian ini bertujuan mengeksplorasi potensi *Bacillus cereus* DCN1, yang diisolasi dari tanaman cengkeh (*Syzygium aromaticum* L.), dalam menghadapi cekaman logam Pb dan Fe melalui pendekatan genomik dan fenotipik. Analisis genomik diawali dengan proses *Whole Genome Sequencing* (WGS) menggunakan platform MGI DNBSEQ-G400. Hasil sekuensing menunjukkan kualitas data yang tinggi dengan total panjang genom sebesar 5.846.109 bp dan jumlah pembacaan fragmen sebesar 11.411.106, dengan 59,66% fragmen berhasil dipetakan (6.808.421 fragmen). Sebanyak 4.169 gen berhasil diidentifikasi dengan *depth of coverage* sebesar 30x. Hasil perakitan genom menunjukkan jumlah total *contig* sebanyak 774 dan kandungan GC sebesar 35,38%. Selain itu, nilai Q20 dan Q30 masing-masing mencapai 97,55% dan 92,75%, menandakan akurasi pembacaan basa yang baik dan validitas data yang kuat untuk dianalisis lanjut.

Analisis komparatif genom menggunakan OrthoVenn3 mengungkapkan bahwa DCN1 berbagi 1.911 klaster *ortolog* dengan tujuh spesies *Bacillus* lainnya, dengan kekerabatan terdekat terhadap *B. cereus* ATCC 14579 dan *B. thuringiensis* serovar berliner ATCC 10792. Kedekatan ini didukung oleh analisis filogenetik dan visualisasi BRIG yang menunjukkan tingkat kesamaan genomik yang tinggi, mengindikasikan potensi kesamaan adaptasi fisiologis, termasuk terhadap logam berat. Identifikasi klaster biosintesis metabolit sekunder melalui metode antiSMASH mendeteksi sembilan region, terdiri dari tipe *NRPS-like*, *azole-containing RiPP*, *NI-siderophore*, *NRP-metallophore/NRPS*, *betalactone*, dua *RiPP-like*, *terpene*, dan *terpene-precursor*. Di antara region tersebut, region 1.3 dan 1.4 menunjukkan kemiripan signifikan dengan klaster biosintesis *petrobactin* dan *bacillibactin*, dua jenis siderofor yang diketahui berperan dalam pengikatan dan transportasi besi serta mekanisme homeostasis terhadap logam berat.

Anotasi lanjut secara fungsional menggunakan BlastKOALA berhasil mengidentifikasi 2.322 entri protein (47,9%) dengan keterlibatan dalam berbagai



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.

lintasan biologis, termasuk sistem homeostasis besi, respons terhadap stres oksidatif, detoksifikasi logam berat, dan perbaikan kerusakan molekuler. Temuan dari ketiga pendekatan ini secara sinergis mendukung hipotesis bahwa toleransi logam berat pada DCN1 dapat dimediasi melalui biosintesis siderofor dan eksopolisakarida, yang dikodekan oleh gen-gen seperti *dhbB*, *dhbE*, *dhbF*, *besA*, *epsA*, dan *epsB*.

Evaluasi fenotipik dilakukan untuk menilai kesesuaian antara potensi genomik dan kemampuan adaptif nyata dari DCN1 terhadap paparan logam berat. Uji pertumbuhan awal pada empat jenis logam (Fe, Pb, Cd, dan Hg) menunjukkan bahwa hanya Fe dan Pb yang mampu mendukung pertumbuhan stabil, menunjukkan spesifisitas toleransi terhadap kedua logam tersebut. Nilai *Minimum Inhibitory Concentration* (MIC) tercatat sebesar 2.500 ppm untuk FeCl<sub>3</sub> dan 5.000 ppm untuk Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, sementara itu nilai *Minimum Bactericidal Concentration* (MBC) dari keduanya melebihi 10.000 ppm, mengindikasikan tingkat toleransi yang tinggi.

Temuan bioinformatika terkait keberadaan kluster gen siderofor dan *Extracellular Polymeric Substances* (EPS) mendorong pengujian pembentukan biofilm oleh DCN1. Hasil uji menunjukkan produksi biofilm yang tinggi, terutama pada konsentrasi FeCl<sub>3</sub> sebesar 2.500 ppm dan Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> sebesar 5.000 ppm. Uji biosorpsi menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) menunjukkan penurunan konsentrasi Fe dan Pb terlarut dalam medium setelah inkubasi. Pengamatan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) memperlihatkan sel bakteri berukuran lebih besar dibandingkan kontrol, dengan permukaan sel tertutup oleh struktur menyerupai matriks biofilm. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa DCN1 memiliki potensi genetik dan fisiologis dalam menoleransi logam berat Pb dan Fe. Kombinasi pendekatan genomik dan fenotipik memberikan pemahaman yang komprehensif terhadap strategi adaptasi bakteri, serta memperkuat potensi DCN1 sebagai kandidat agen bioremediasi di lingkungan yang tercemar logam berat.

Kata kunci: *Bacillus cereus* DCN1, biofilm, logam berat, siderofor, *Whole Genome Sequencing* (WGS)

## SUMMARY

**JULITA CATRI ADILA.** Genom Characterization of *Bacillus cereus* DCN1 and Identification of Gene Clusters Related to Lead (Pb) and Iron (Fe) Tolerance. Supervised by RIKA INDRI ASTUTI and M. EKA PRASTYA.

Heavy metal pollution, such as lead (Pb) and iron (Fe), is a significant environmental issue due to its toxicity to various organisms. Exposure to Pb is known to cause nervous system disorders, kidney dysfunction, and reproductive issues, as well as being carcinogenic. Meanwhile, Fe is an essential metal important in various biological processes, but its presence in excessive amounts can trigger oxidative stress, tissue damage, and metabolic disorders. This challenge has driven efforts to develop sustainable approaches based on metal-tolerant microorganisms, which are known for their broad ecological adaptations and high potential in environmental remediation. Understanding metal tolerance in microorganisms requires the integration of phenotypic analysis and genomic approaches. Whole Genome Sequencing (WGS) plays a role in identifying gene clusters and molecular mechanisms underlying responses to metal stress. The combination of genomic and phenotypic data enables a comprehensive evaluation of an organism's adaptive strategies and functional potential.

This study aims to explore the potential of *Bacillus cereus* DCN1, isolated from clove plants (*Syzygium aromaticum* L.), in coping with Pb and Fe metal stress through genomic and phenotypic approaches. Genomic analysis began with Whole Genome Sequencing (WGS) using the MGI DNBSEQ-G400 platform. The sequencing results showed high-quality data with a total reference genome length of 5,846,109 bp and a total of 11,411,106 reads, where 59.66% of the reads were successfully mapped (6,808,421 reads). A total of 4,169 genes were identified with a depth of coverage of 30x. The assembly results showed a total of 774 *contigs* with an N50 value of 24 kb and a GC content of 35.38%. Additionally, the Q20 and Q30 values reached 97.55% and 92.75%, respectively, indicating excellent base reading accuracy and data validity for further analysis.

Comparative genome analysis using OrthoVenn3 revealed that DCN1 shares 1,911 orthologous clusters with seven other *Bacillus* species, with the closest relationship to *B. cereus* ATCC 14579 and *B. thuringiensis* serovar *berliner* ATCC 10792. This proximity is supported by phylogenetic analysis and BRIG visualization, which show a high level of genomic similarity, indicating potential physiological adaptation similarities, including toward heavy metals. Identification of secondary metabolite biosynthesis clusters via antiSMASH detected nine regions, comprising NRPS-like, azole-containing RiPP, NI-siderophore, NRP-metallophore/NRPS, betalactone, two RiPP-like, terpene, and terpene-precursor types. Among these regions, regions 1.3 and 1.4 show significant similarity to the petrobactin and bacillibactin biosynthesis clusters, two types of siderophores known to play a role in iron binding and transport as well as heavy metal homeostasis mechanisms.

Functional annotation using BlastKOALA successfully identified 2,322 protein entries (47.9%) involved in various biological pathways, including iron homeostasis systems, oxidative stress responses, heavy metal detoxification, and molecular damage repair. Findings from these three approaches synergistically



support the hypothesis that heavy metal tolerance in DCN1 may be mediated through siderophore and exopolysaccharide biosynthesis, encoded by genes such as *dhbB*, *dhbE*, *dhbF*, *besA*, *epsA*, and *epsB*.

Phenotypic evaluation was conducted to assess the alignment between genomic potential and the actual adaptive capacity of DCN1 toward heavy metal exposure. Initial growth tests on four types of metals (Fe, Pb, Cd, and Hg) showed that only Fe and Pb could support stable growth, indicating specificity in tolerance toward these two metals. The Minimum Inhibitory Concentration (MIC) values were recorded at 2,500 ppm for FeCl<sub>3</sub> and 5,000 ppm for Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, while the Minimum Bactericidal Concentration (MBC) of both exceeded 10,000 ppm, indicating a high level of tolerance.

Bioinformatics findings related to the presence of siderophore and Extracellular Polymeric Substances (EPS) gene clusters prompted testing of biofilm formation by DCN1. The results showed high biofilm production, especially at FeCl<sub>3</sub> concentrations of 2,500 ppm and Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> concentrations of 5,000 ppm. Biosorption tests using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) showed a decrease in the concentration of dissolved Fe and Pb in the medium after incubation. Scanning Electron Microscopy (SEM) observations revealed that the bacterial cells were larger than the control, with the cell surface covered by a structure resembling a biofilm matrix. The results of this study indicate that DCN1 has genetic and physiological potential to tolerate heavy metals Pb and Fe. The combination of genomic and phenotypic approaches provides a comprehensive understanding of bacterial adaptation strategies and reinforces the potential of DCN1 as a candidate bioremediation agent in heavy metal-contaminated environments.

**Keywords:** *Bacillus cereus* DCN1, biofilm, heavy metals, siderophores, Whole Genome Sequencing (WGS)



@Hak cipta milik IPB University

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, 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.*



### @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.



# **KARAKTERISASI GENOM *Bacillus cereus* DCN1 DAN IDENTIFIKASI KLASTER GEN TERKAIT TOLERANSI TIMBAL (Pb) DAN BESI (Fe)**

**JULITA CATRIADILA**

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

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



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Penguji Luar Komisi: Dr. Popi Asri Kurniatin, S.Si., Apt., M.Si.



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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

**Judul Tesis** : Karakterisasi Genom *Bacillus cereus* DCNI dan Identifikasi Kluster Gen Terkait Toleransi Timbal (Pb) dan Besi (Fe)  
**Nama** : Julita Catri Adila  
**NIM** : P0501241025

Disetujui oleh

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

**Pembimbing 2:**  
Dr. M. Eka Prastya, S.Si., M.Si.



Diketahui oleh

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

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



Tanggal Ujian: 27 Januari 2026

Tanggal Lulus: 06 APR 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.

## 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 Januari hingga Agustus 2025 ini ialah analisis genotipe dan evaluasi fenotipe atas sifat toleran logam *Bacillus cereus* DCN1, dengan judul “Karakterisasi Genom *Bacillus cereus* DCN1 dan Identifikasi Klaster Gen Terkait Toleransi Timbal (Pb) dan Besi (Fe)”.

Terima kasih penulis ucapkan kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam penelitian ini, khususnya:

1. Dr. Rika Indri Astuti, S.Si., M.Si. dan Dr. M. Eka Prastya, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberi saran, arahan, serta motivasi selama penelitian dan penyusunan karya ilmiah ini.
2. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada moderator dan penguji tesis saya yang telah memberikan koreksi dan saran demi perbaikan tesis ini.
3. Dosen, staff, dan laboran Program Studi Bioteknologi, IPB University.
4. Amarullah, Rosnida, Riko Febriantoro, Urika Dwi May Hendra, Septania Amalia Putri, serta seluruh keluarga atas dukungan, doa, dan kasih sayang yang diberikan.
5. Alfina Ayunda Safitri sebagai sahabat yang telah mendukung dan membersamai saya dalam suka maupun duka.
6. Sakina, Medi, Risyah, Orin, dan Fio sebagai teman sejawat yang telah memberikan pembelajaran dan arahan selama penelitian.
7. Teman-teman Laboratorim Bioenergi dan Biprospeksi PAU dan Pasacasarjana Bioteknologi atas diskusi, bantuan, dan kebersamaan selama penelitian dilaksanakan.

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

Bogor, Maret 2026

*Julita Catri Adila*



@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.

## DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
<b>I PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	2
<b>II TINJAUAN PUSTAKA</b>	<b>3</b>
2.1 Logam Berat dan Dampaknya	3
2.2 <i>Bacillus cereus</i>	4
2.3 Toleransi Mikroorganisme terhadap Logam Berat	5
2.4 Pendekatan Genomik Berbasis <i>Next-Generation Sequencing</i>	8
<b>III METODE</b>	<b>9</b>
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	9
3.2 Bagan Alur Rencana Penelitian	9
3.3 Alat dan Bahan	9
3.4 Prosedur Kerja	10
3.4.1 Peremajaan Isolat	10
3.4.2 Isolasi DNA	10
3.4.3 <i>Whole Genome Sequencing</i> Berbasis MGI DNBSEQ-G400	10
3.4.4 Analisis Genomik Berbasis Bioinformatika	11
3.4.5 Penapisan Sifat Toleransi Terhadap Beberapa Logam Berat (Pb, Fe, Hg, dan Cd)	11
3.4.6 Penentuan Nilai <i>Minimum Inhibitory Concentration</i> (MIC) dan <i>Minimum Bactericidal Concentration</i> (MBC)	11
3.4.7 Deteksi Biofilm	12
3.4.8 <i>Atomic Absorption Spectrophotometry</i> (AAS)	12
3.4.9 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	12
<b>IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	<b>14</b>
4.1 Anotasi Sekuens Genom Total <i>Bacillus cereus</i> DCN1	15
4.2 Pemetaan Kromosom dan Plasmid <i>Bacillus cereus</i> DCN1	15
4.3 Analisis Komparatif Genom Total <i>Bacillus cereus</i> DCN1 dengan Bakteri Endofit Genus <i>Bacillus</i> Toleran Logam	17
4.4 Deteksi Klaster Gen Biosintesis Metabolit Sekunder dari Genom Total <i>Bacillus cereus</i> DCN1	19
4.5 Analisis Fungsional Terkait Toleransi Logam Berat Berbasis Bioinformatika	20
4.6 Respon Pertumbuhan <i>Bacillus cereus</i> DCN1 terhadap Logam Berat Hg, Cd, Pb, dan Fe	22
4.7 Penentuan <i>Minimum Inhibitory Concentration</i> (MIC) dan <i>Minimum Bactericidal Concentration</i> (MBC) terhadap Cekaman Pb dan Fe	22
4.8 Deteksi Pembentukan Biofilm	23



4.9 Uji Dekontaminasi Logam Pb dan Fe berbasis <i>Atomic Absorption Spectrophotometry</i> (AAS)	24
4.10 Identifikasi Biofilm dan Perubahan Morfologi akibat Paparan Logam	24
4.11 Pembahasan	25
V SIMPULAN DAN SARAN	31
5.1 Simpulan	31
5.2 Saran	31
DAFTAR PUSTAKA	32
LAMPIRAN	42
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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

## DAFTAR TABEL

1	Mekanisme toleransi Pb dan Fe pada bakteri	6
2	Parameter kualitas dan hasil pembacaan sekuen genom total <i>Bacillus cereus</i> DCN1 menggunakan platform MGI DNBSEQ-G400	15
3	Bakteri pembanding dari Genus <i>Bacillus</i> dengan sifat toleran logam yang telah dilaporkan	17
4	Prediksi <i>Biosynthetic Gene Cluster</i> (BGC) of <i>Secondary Metabolites</i> <i>Bacillus cereus</i> DCN1	19
5	Gen-gen yang diprediksi berperan dalam Toleransi Logam Berat pada <i>Bacillus cereus</i> DCN1	20
6	Nilai MIC dan MBC <i>Bacillus cereus</i> DCN1 terhadap Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> dan FeCl <sub>3</sub>	22
7	Residual logam Pb dan Fe setelah proses dekontaminasi oleh <i>Bacillus cereus</i> DCN1 pada inkubasi 12 dan 24 jam berdasarkan hasil serapan menggunakan <i>Atomic Absorption Spectrophotometry</i> (AAS)	24

## DAFTAR GAMBAR

1	Mekanisme toleransi logam pada bakteri (Thai <i>et al.</i> 2023)	6
2	Alur kerja penelitian karakterisasi genom dan evaluasi fenotipe sifat toleran logam pada <i>Bacillus cereus</i> DCN1	9
3	Peta genom total <i>Bacillus cereus</i> DCN1 berdasarkan <i>reference genome</i> <i>Bacillus cereus</i> FORC-047 kromosom. Keterangan: <i>Coding Sequences</i> perbacaan <i>forward</i> (merah), <i>Coding Sequences</i> perbacaan <i>reverse</i> (biru), rRNA (abu-abu), tRNA (hijau), <i>GC content</i> (> 50% = hijau; < 50% = kuning), <i>GC skew</i> (> 0 = hijau; < 0 = kuning)	16
4	Peta plasmid <i>Bacillus cereus</i> DCN1 berdasarkan <i>reference genome</i> (A) <i>Bacillus cereus</i> FORC-047 plasmid pFORC47_1, (B) <i>Bacillus cereus</i> FORC-047 plasmid pFORC47_2. Keterangan: <i>Coding Sequences</i> perbacaan <i>forward</i> (merah), <i>Coding Sequences</i> perbacaan <i>reverse</i> (biru), rRNA (abu-abu), tRNA (hijau), <i>GC content</i> (> 50% = hijau; < 50% = kuning), <i>GC skew</i> (> 0 = hijau; < 0 = kuning)	16
5	Perbandingan kluster ortolog <i>Bacillus cereus</i> DCN1 dengan 7 spesies pembanding	17
6	Analisis hubungan kekerabatan melalui pohon filogenetik antara <i>Bacillus cereus</i> DCN1 dan 7 spesies pembanding	18
7	Visualisasi perbandingan peta genetik antara 7 spesies pembanding dari genus <i>Bacillus</i> dengan <i>Bacillus cereus</i> DCN1	18
8	Peta genetik posisi gen biosintesis metabolit sekunder <i>Bacillus cereus</i> DCN1 (A) NI- <i>siderophore</i> pada <i>region</i> 1.3, (B) NRP- <i>metallophore</i> pada <i>region</i> 1.4	19
9	Klasifikasi fungsi protein dari sekuen genom total <i>Bacillus cereus</i> DCN1 berdasarkan pusat data KEGG	20
10	Pengaruh cekaman logam Fe, Pb, Cd, dan Hg terhadap pertumbuhan <i>Bacillus cereus</i> DCN1 pada konsentrasi 50 dan 100 ppm. Anotasi huruf	



	berbeda menunjukkan perbedaan signifikan ( $p < 0,05$ ) berdasarkan uji ANOVA yang dilanjutkan dengan Duncan (DMRT). Garis error menunjukkan standar deviasi (SD).	22
11	Pengaruh cekaman logam $Pb(NO_3)_2$ pada berbagai konsentrasi terhadap pembentukan biofilm <i>Bacillus cereus</i> DCN1 (A) Grafik pembentukan biofilm (B) Visualisasi plak biofilm yang terbentuk pada dinding tube.	23
12	Pengaruh cekaman logam $FeCl_3$ pada berbagai konsentrasi terhadap pembentukan biofilm <i>Bacillus cereus</i> DCN1 (A) Grafik pembentukan biofilm (B) Visualisasi plak biofilm yang terbentuk pada dinding tube.	23
13	Citra SEM <i>B. cereus</i> DCN1 pada kondisi normal dan di bawah cekaman logam berat. (a–c) Sel bakteri pada kondisi kontrol; (d–f) sel bakteri setelah perlakuan dengan $Pb(NO_3)_2$ ; (g–i) sel bakteri setelah perlakuan dengan $FeCl_3$ . Gambar (a), (d), dan (g) diambil dengan pembesaran 5000x; gambar (b), (c), (e), (f), (h), dan (i) diambil dengan pembesaran 10.000x	24

## DAFTAR LAMPIRAN

1	Jumlah dan Persentasi ATGC Hasil Anotasi <i>Bacillus cereus</i> DCN1	43
2	Kluster BLAST dari jalur biosintesis pada <i>region</i> 1.3	44
3	Kluster BLAST dari jalur biosintesis pada <i>region</i> 1.4	45
4	Visualisasi Pertumbuhan <i>Bacillus cereus</i> DCN1 pada Media Agar dari Uji MIC dan MBC Menggunakan Mikrotiter 98-Well	46
5	Nilai ODC dan Klasifikasi Kekuatan Biofilm Berdasarkan Absorbansi	48
6	Perhitungan panjang sel <i>Bacillus cereus</i> DCN1 pada citra SEM menggunakan ImageJ	49