

SKRIPSI

**DETEKSI GEN MERKURI REDUKTASE (*MerA*)
PADA BAKTERI *Lactobacillus plantarum* DAN *Pediococcus acilidactici*
SEBAGAI BAKTERI PEREDUKSI MERKURI (Hg)**

Disusun dan diajukan oleh:

SRI RAHMAWATI UMSINI

H041171013



**DEPARTEMEN BIOLOGI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2022**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**DETEKSI GEN MERKURI REDUKTASE (MerA) PADA BAKTERI
Lactobacillus plantarum DAN *Pediococcus acilidactici* SEBAGAI BAKTERI
PEREDUKSI MERKURI (Hg)**

Disusun dan diajukan oleh

SRI RAHMAWATI UMSINI

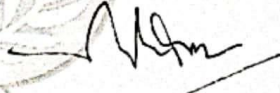
H041171013

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Program Sarjana Program Studi Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin pada tanggal 17 Februari 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping



Dr. Zaraswati Dwyana, M.Si
Nip. 1965512091990082001

Dr. Nur Haedar, M.Si
Nip.196801291997022001

Ketua Program Studi,



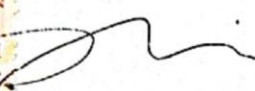
Dr. Nur Haedar, M.Si.
Nip. 196801291997022001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Sri Rahmawati Umsini
NIM : H041171013
Program Studi : Biologi
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa Skripsi dengan judul Deteksi Gen Merkuri Reduktase (MerA) pada Bakteri *Lactobacillus Plantarum* dan *Pediococcus Acilidactici* sebagai Bakteri Pereduksi Merkuri (Hg) adalah karya saya sendiri dan tidak melanggar hak cipta pihak lain. Apabila di kemudian hari Skripsi karya saya ini terbukti bahwa sebagian atau seluruhnya adalah hasil karya orang lain yang saya pergunakan dengan cara melanggar hak cipta pihak lain, maka saya bersedia menerima sanksi.

Makassar, 02 Februari 2022
Yang Menyatakan

(Sri Rahmawati Umsini)



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah *rabbil 'aalamin*, segala puji dan syukur atas kehadiran Allah *subhanahu wa ta'ala* yang telah melimpahkan rahmat, karunia, dan hidayah-nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul Deteksi Gen Merkuri Reduktase (*MerA*) pada *Lactobacillus plantarum* dan *Pediococcus acilidactici* Sebagai Bakteri Pereduksi Merkuri (Hg) sebagai salah satu syarat untuk meraih gelar Sarjana Sains di Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin.

Terwujudnya skripsi ini tidaklah lepas dari peran kedua orang tua saya tercinta. Ibu saya Dahlia, Yang senantiasa berdoa menundukkan hati kepada Allah *subhanahu wa ta'ala* dan senantiasa memberikan dukungan kepada penulis, baik menyemangati dikala lelah mengahampiri, menjadi penopang bagi penulis dan menyediakan bahu sebagai tempat bersandar, yang tidak lelah mendengar keluh kesah penulis serta memberikan pelukan hangat kepada penulis dan ayah saya Rahman Hatta rahimahullah yang sangat saya sayangi.

Tentunya proses perwujudan skripsi ini tidak lepas dari peran berbagai pihak lain. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Dwia Aries Tina Pubuluhi, M.A. selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
2. Dr. Eng. Amiruddin, S.Si, M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin.
3. Dr. Nur Haedar, M.Si. selaku Ketua Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin.

4. Dr. Syahribulan, M.Si. selaku Sekretaris Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin.
5. Dr. Juhriah M.Si selaku Penasehat Akademik yang telah memberikan arahan kepada penulis selama menuntut ilmu di Universitas Hasanuddin.
6. Tim dosen penguji Dr. Zaraswati Dwyana, M.Si, Dr. Nur Haedar, M.Si, Dr. Juhriah M.Si, dan Drs. Muh. Ruslan Umar M.Si.
7. Bapak/Ibu Dosen dan pegawai Departemen Biologi UNHAS atas ilmu dan bantuannya yang berharga selama masa studi penulis.
8. Fuad Gani, S.Si. selaku laboran laboratorium Mikrobiologi atas bimbingan dan arahnya selama penelitian begitupun kepada Rihuh, S.Si, atas kemurahan hatinya.
9. Juniati Binti Lukman, S.si., M.Biomed. selaku laboran laboratorium Pengembangan Sains di Science Building atas bimbingan dan arahnya selama penelitian, begitupun kepada Heriadi, M.Si.
10. Hijrianti, teman penelitian yang tidak hanya menemani penulis dalam penelitian ini, namun sejak awal kuliah hingga saat ini. Begitu pun teman-teman terdekat penulis, A. Auliya Utami, Zilhayai, dan Nahli Nahal yang dari mereka saya mendapatkan banyak bantuan dan ilmu berharga. Terima kasih atas semuanya.
11. Teman dekat saya yang menjadi orang kedua terdekat saya setelah ibu saya, Siti Anisa senantiasa memberikan doa dan dukungannya.
12. Teman-Teman dekat saya dari kampus STIFA Makassar, Wahyuni Lukman, Sri Musdalifa, Herlina, Sitti Fazrianti Saputri dan Silviana.
13. Teman-teman *We Are Three Bears*, Terkhususnya Fahira Anggraeni yang senantiasa memberikan doa dan dukungannya

14. Teman-teman seperjuangan Biologi angkatan 2017 (Biovergent) atas kebersamaan, dukungan, dan bantuannya selama 4 tahun ini, terkhusus teman-teman sesama penelitian di Laboratorium Mikrobiologi. Tak lupa kepada kakak-kakak senior yang telah membagi ilmunya kepada penulis selama kuliah.
15. Terakhir, kepada segala pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu, terima kasih atas bantuannya. Semoga Allah *subhanahu wa ta'ala* memberikan pahala yang berlipat ganda kepada seluruh pihak yang telah membantu penulis selama ini.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca. Akhir kata, penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi seluruh pembaca.

Makassar, 02 Februari 2022

Penulis

ABSTRAK

Bakteri resisten merkuri merupakan kelompok bakteri yang memiliki gen resisten terhadap merkuri dengan mereduksi ion merkuri Hg^{2+} menjadi Hg^0 yang tidak beracun. Kemampuan ini diinduksi oleh sistem operon mer, di antaranya adalah gen merA. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan bakteri *Lactobacillus plantarum* dan *Pediococcus acilidactici* dalam mereduksi merkuri secara in vitro dan mengetahui adanya gen merA pada bakteri *Lactobacillus plantarum* dan *Pediococcus acilidactici*. Dari uji in vitro diperoleh hasil *Lactobacillus plantarum* dan *Pediococcus acilidactici* dapat tumbuh konsentrasi merkuri 1 ppm, 5 ppm, 10 ppm, dan 15 ppm. Hal ini menunjukkan kedua bakteri tersebut merupakan bakteri resisten merkuri. Uji Deteksi Gen Merkuri Reduktase (MerA) pada Bakteri *Lactobacillus plantarum* dan *Pediococcus acilidactici* sebagai bakteri pereduksi merkuri dimulai dengan ekstraksi DNA, selanjutnya diamplifikasi dengan menggunakan tiga set primer yang sebelumnya telah di blast melalui NCBI. Masing-masing primer antara lain (MerA-F dan MerA-R, primer MerA2-F dan MerA2-R, serta primer A1s-n.F dan A5-n.R) menggunakan metode *Polymerase Chain Reaction* (PCR) kemudian dielektroforesis. Hasil amplifikasi dengan menggunakan PCR menunjukkan tidak ditemukannya gen merA pada bakteri *Lactobacillus plantarum* dan *Pediococcus acilidactici*.

Kata kunci: Deteksi gen merA, *Lactobacillus plantarum*, *Pediococcus acilidactici*, Polymerase Chain Reaction, Merkuri.

ABSTRACT

Mercury-resistant bacteria are a group of bacteria which acquired resistance genes to mercury thus able to reduce Hg^{2+} into Hg^0 which is non-toxic. This ability is induced by mer operon system, including the *merA* gene. This study aims to determine the ability of *Lactobacillus plantarum* and *Pediococcus acilidactici* bacteria to reduce mercury by in vitro and the presence of the *merA* gene in *Lactobacillus plantarum* and *Pediococcus acilidactici* bacteria. The invitro studies, it is showed that *Lactobacillus plantarum* and *Pediococcus acilidactici* can grow at mercury concentration of 1 ppm, 5 ppm, 10 ppm dan 15 ppm. This indicates that both bacteria are mercury-resistant bacteria. Detection of Mercury Reductase (*merA*) Gene in *Lactobacillus plantarum* and *Pediococcus acilidactici* as Mercury-Reducing Bacteria was carried out starting with DNA extraction, then amplified using each primers (primers *merA*-F and *merA*-R, primers *merA2*-F and *merA2*-R, as well as primers A1s-nF and A5-nR) using Polymerase Chain Reaction (PCR) method and finally electrophoresed. The results showed that the *merA* gene was not found in *Lactobacillus plantarum* and *Pediococcus acilidactici* bacteria.

Keywords: Detection of the *merA*, *Lactobacillus plantarum*, *Pediococcus acilidactici*, Polymerase Chain Reaction, Mercury.

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	10
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	12
PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Tujuan Penelitian	3
I.3 Manfaat Penelitian	3
I.4 Waktu dan Tempat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
II.1 Bakteri Asam Laktat.....	5
II.2 Probiotik	6
II.2.1 Pengertian Probiotik.....	6
II.2.2 Sifat Fisiologi Bakteri Probiotik	7
II.2.3 Mekanisme dan Manfaat Bakteri Probiotik	8
II.3 Bakteri <i>Lactobacillus plantarum</i>	9
II.4 Bakteri <i>Pediococcus acilidactici</i>	9
II.5 Merkuri (Hg)	11
II.5.1 Pencemran Logam Berat.....	11
II.5.2 Sifat dan Bentuk Merkuri.....	11
II.5.3 Jenis-jenis Merkuri.....	12
II.5.4 Sumber Pencemaran Merkuri.....	12
II.5.5 Konsentrasi Merkuri di Lingkungan.....	14

II.5.6 Dampak Pencemaran Merkuri Bagi Kesehatan	15
II.6 Potensi Bakteri dalam Toksisitas Merkuri	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
III.1 Alat.....	21
III.2 Bahan.....	21
III.3 Prosedur Kerja.....	22
III.3.1 Sterilisasi Alat.....	22
III.3.2 Pembuatan Media	22
III.3.3 Peremajaan Bakteri <i>P. acilidactici</i> dan <i>L. plantarum</i>	22
III.3.4 Pembuatan Stok	24
III.3.5 Uji Resistensi Bakteri Probiotik pada Beberapa Konsentrasi Hg.....	36
III.3.6 Ekstraksi DNA.....	24
III.3.7 Amplifikasi DNA dengan metode PCR.....	25
III.3.8 Deteksi Produk PCR dengan Elektroforesis	27
III.3.9 Pengolahan Data	30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	31
IV.1 Uji Resistensi Bakteri <i>L. plantarum</i> dan <i>P. acilidactici</i> pada Beberapa Konsentrasi Merkuri.....	31
IV.1.1 <i>Total Plate Count (TPC) L. plantarum</i> dan <i>P. acilidactici</i>	32
IV.1.2 <i>Optical Density P. acilidactici</i> dan <i>L. plantarum</i>	33
IV.1.3 Hubungan <i>Optical Density (OD)</i> dengan <i>Total Plate Count (TPC)</i>	33
IV.2. Deteksi Gen Resistensi Merkuri Menggunakan PCR.....	31
IV.2.1 Ekstraksi DNA.....	35
IV.2.2 Amplifikasi DNA dengan Metode PCR dan Visualisasi Produk PCR dengan Elektroforesis.....	36
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	39
V.1 Kesimpulan	39
V.2 Saran.....	40
DAFTAR PUSTAKA	40
LAMPIRAN.....	47

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Optimasi Amplifikasi PCR.....	39
2. Hasil Perhitungan Nilai Optic density (OD) Sebelum dan Setelah Inkubasi ...	65
3. Hasil Nilai TPC Sebelum dan Setelah Inkubasi	65
4. Hasil Hubungan Nilai OD dan TPC	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Mekanisme Gen <i>merA</i> dan <i>merB</i> dalam Detoksifikasi Merkuri	31
2. Penumbuhan <i>Lactobacillus plantarum</i> dan <i>Pediococcus acilidactici</i> pada Beberapa Konsentrasi Merkuri.....	42
3. Grafik <i>Total Plate Count Lactobacillus plantarum</i> dan <i>Pediococcus acilidactici</i>	44
4. Grafik <i>Optical Density Lactobacillus plantarum</i> dan <i>Pediococcus acilidactici</i>	44
5. Hasil Ekstraksi DNA <i>P. acilidactici</i> dan <i>L. plantarum</i>	46
6. Hasil Amplifikasi DNA Sampel <i>Lactobacillus plantarum</i> <i>Pediococcus acilidactici</i> Masing-Masing Primer	47

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Skema Kerja Deteksi Gen Merkuri Reduktase (<i>MerA</i>) Pada Bakteri <i>Lactobacillus plantarum</i> Dan <i>Pediococcus acilidactici</i> Sebagai Bakteri Pereduksi Merkuri.....	60
Lampiran 2. Skema Kerja Uji Resistensi <i>L. plantarum</i> dan <i>P. acilidactici</i>	61
Lampiran 3. Skema Kerja Ekstraksi DNA Bakteri	62
Lampiran 4. Skema Kerja Amplifikasi DNA dengan PCR.....	63
Lampiran 5. Skema Kerja Total <i>Plate Account</i>	64
Lampiran 6. Skema Kerja Spektrofotometer T0 dan T1	65
Lampiran 7. Lampiran Daftar Tabel	66
Lampiran 8. Dokumentaasi Proses Pembuatan Media Peremajaan	68
Lampiran 9. Dokumentasi Pembuatan Media Uji Bakteri Resistensi Merkuri.....	69
Lampiran 10. Dokumentasi Ekstraksi DNA <i>L. plantarum</i> dan <i>P. acilidactici</i>	70
Lampiran 11. Dokumentasi Amplifikasi DNA dengan PCR.....	72
Lampiran 12. Doukumentasi Visualisasi Produk PCR dengan Elektrovoresis.....	73
Lampiran 13. Dokumentasi Gambar Hasil Blast Primer	74
Lampiran 14. Dokumentasi Uji Resistensi Bakteri <i>Lactobacillus plantarum</i> dan <i>Pediococcus acilidactici</i> pada Media Hg	79
Lampiran 15. Dokumetasi Perhitungan <i>Total Plate Count</i>	80
Lampiran 16. Dokumentasi Hasil <i>Total Plate Count</i>	81
Lampiran 17. Dokumentasi Spektrofotometer	90
Lampiran 18. Dokumentasi Hasil Spektrofotometer	91

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Salah satu bahan pencemar yang umum ditemukan di perairan adalah logam berat. Pencemaran logam berat dikategorikan pencemaran yang dapat menimbulkan dampak yang merugikan bagi lingkungan dengan sifat *non-degradable* yang akan terakumulasi di kolom air dan sedimen kemudian terabsorpsi ke dalam organisme laut. Logam berat yang terlarut dalam perairan dengan konsentrasi tertentu dapat menjadi sumber racun bagi kehidupan organisme laut. Logam berat dapat terakumulasi melalui rantai makanan. Organisme yang menempati puncak rantai makanan memiliki konsentrasi logam berat yang semakin tinggi.

Merkuri atau Hg merupakan salah satu unsur yang paling beracun diantara logam berat yang lainnya. Sebagian besar merkuri yang terdapat di alam dihasilkan oleh limbah industri dalam jumlah ± 10.000 ton tiap tahunnya. Sekitar ± 3.000 ton berasal dari limbah industri pengolahan bahan-bahan kimia, obat-obatan dan pembuatan bahan insektisida (Juhriah and Mir., 2016). Waduk utama dari merkuri ini adalah samudra, yang kemudian terakumulasi oleh organisme laut yang dikonsumsi oleh manusia.

Terdapat beberapa solusi dalam menanggulangi pencemaran logam berat, baik secara kimiawi atau fisika. Namun dikarenakan biaya yang cukup tinggi serta pelepasan hasil sampingan yang bersifat berbahaya maka peneliti melirik penanggulangan merkuri secara biologi yang bersifat ramah lingkungan. Terdapat

beberapa mikroorganisme yang dapat mendetoksifikasi merkuri (Hg) pada lingkungan.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kelompok bakteri asam laktat diantaranya *Bacillus* spp, *Clostridium* dan *Lactobacillus* merupakan bersifat probiotik yang dapat mendetoksifikasi merkuri yang bersifat toksik menjadi tidak toksik. Bakteri asam laktat merupakan bakteri anaerob fakultatif yang menghasilkan asam laktat sebagai produk akhir utamanya, selain menghasilkan asam laktat sebagai produk utamanya bakteri asam laktat juga menghasilkan asam asetat, etanol, CO₂, dan bakteriosin (Usaman *et al.*, 2018). Karakteristik dari bakteri asam laktat yang dapat dijadikan probiotik antara lain telah diidentifikasi dengan jelas baik secara fenotipik maupun genotipik, pertumbuhan pada berbagai suhu, memiliki kemampuan tumbuh pada kadar garam yang tinggi, dan toleransi terhadap asam dan basa (Hasan *et al.*, 2020). Adapun Bakteri probiotik merupakan bakteri asam laktat yang apabila dikonsumsi dapat memberikan manfaat kesehatan bagi penggunaanya dengan meningkatkan keseimbangan mikroorganisme di dalam saluran pencernaan (Usman *et al.*, 2018).

Berdasarkan penelitian Khalik (2019) beberapa bakteri yang diisolasi dari usus ikan bandeng *Chanos-chanos forskal* resisten terhadap merkuri pada konsentrasi 10 ppm, 15 ppm dan 20 ppm. Menurut Angreani (2019) dan Ulfiani (2019) *Lactobacillus plantarum* dan *Pediococcus acilidactici* mampu mereduksi merkuri baik pada konsentrasi 5 ppm, 10 ppm dan 20 ppm.

Bakteri memiliki kemampuan yang dapat digunakan untuk mereduksi logam merkuri dengan cara mentransformasikan logam merkuri melalui proses oksidasi, reduksi, metilasi dan dimetilasi, yakni dimulai dari sifat ketahanan

terhadap Hg^{2+} yang dapat diubah menjadi Hg^0 dengan adanya enzim merkuri reduktase yang mampu melepaskan ion Hg^0 (Abdullah *et al.*, 2018).

Proses pengubahan merkuri yang bersifat toksik menjadi non toksik biasanya dilakukan oleh bakteri yang memiliki sifat resistensi terhadap merkuri dengan adanya gen mer operon. Menurut Rasmussen *et al.*, (2018) menyatakan bahwa gen mer operon tersusun atas beberapa sub gen didalamnya yakni salah satunya adalah gen *merkuri reduktase* (MerA) dan *organomerkuri liase* (MerB).

Oleh sebab itu maka dilakukan penelitian mengenai deteksi gen merkuri reduktase (MerA) pada bakteri *L. plantarum* dan *P. acilidactici* yang diharapkan sebagai bakteri yang dapat mendetoksifikasi logam berat dan juga berpotensi sebagai probiotik.

I.2 Tujuan Penelitian

1. Mengetahui kemampuan bakteri *Lactobacillus plantarum* dan *Pediococcus acilidactici* dalam mereduksi merkuri secara in vitro.
2. Penelitian ini bertujuan untuk mendeteksi gen merkuri reduktase (MerA) pada bakteri *Lactobacillus plantarum* dan *Pediococcus acilidactici*.

I.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan ilmiah mengenai bakteri asam laktat yang mampu mengabsorpsi merkuri Hg khususnya spesies *Lactobacillus plantarum* dan *Pediococcus acilidactici* dalam menanggulangi akumulasi merkuri yang ada pada tubuh secara biologis.

I.4 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Maret 2021 sampai Juli 2021. Di Laboratorium Penelitian dan Pengembangan Sains, dan di Laboratorium Mikrobiologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Hasanuddin.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Bakteri Asam Laktat

Bakteri Asam Laktat (BAL) merupakan bakteri gram positif berbentuk basil atau kokus, tidak berspora dan bersifat fakultatif anaerob serta hasil utamanya mampu memfermentasi laktosa dengan asam laktat (Widyadyana *et al* 2017). *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Bifidobacterium*, *Tetragonococcus*, *Vagococcus*, *Weisella*, *Sterprococcus*, *Leuconostoc*, *Aerococcus*, *Oenococcus*, *Carnobacterium*, *Enterococcus*, *Sporolactobacillus*, dan *Pediococcus* merupakan genus dari bakteri asam laktat (Yerlikaya, 2019).

Terdapat dua kelompok bakteri asam laktat berdasarkan kemampuannya dalam memfermentasi glukosa yaitu BAL homofermentatif dan BAL dan heterofermentatif. BAL homofermentatif merupakan bakteri asam laktat yang menghasilkan asam laktat sebagai produknya adapun BAL heterofermentatif merupakan jenis bakteri yang sering digunakan dalam pengawetan makanan, karena memproduksi asam laktat dalam jumlah yang tinggi sehingga dapat menghambat pertumbuhan bakteri yang menyebabkan kebusukan makanan (Purwandhani, 2016).

Bakteri asam laktat diketahui mampu memproduksi folat dalam jumlah banyak. Folat atau yang dikenal sebagai vitamin B9 merupakan nutrisi penting yang hanya diproduksi oleh tanaman dan mikroorganisme. Folat mampu mencegah risiko cacat lahir pada bayi, misalnya cacat pembuluh syaraf. Rendahnya status gizi folat dapat menyebabkan risiko terkena osteoporosis,

penyakit jantung koroner, demensia dan alzheimer's. Anemia serta meningkatnya risiko kanker (Purwandhani, 2016).

II.2 Probiotik

II.2.1 Pengertian Probiotik

Sunaryanto *et al* (2014) menyatakan bahwa istilah probiotik berasal dari bahasa Yunani yang berarti “untuk hidup”. Istilah ini pertama kali digunakan oleh Lilley dan Stillwell pada tahun 1965 yang diartikan sebagai substansi yang dihasilkan oleh suatu mikroorganisme yang dapat menstimulasi pertumbuhan mikroorganisme lain. Probiotik dikenal sebagai bakteri baik yang berperan dalam kesehatan serta keseimbangan mikroorganisme usus. Probiotik dapat ditemukan dalam makanan fermentasi dan susu kultur (Karim, 2016; Shi *et al.*, 2016). Mikroorganisme tersebut diharapkan dapat memberi keuntungan bagi inang yaitu dengan mengatur keseimbangan mikroba dalam saluran pencernaan serta meningkatkan respon imun (Umasugi *et al.*, 2018).

Terdapat ratusan jenis bakteri berbeda spesies yang merupakan mikroorganisme alami yang terdapat di usus. Bakteri mikrobial usus yang memiliki manfaat bagi kesehatan atau berpotensi dalam pencernaan kemudian diseleksi untuk probiotik. Genus bakteri *Lactobacillus bulgaricus*, *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus achidophillus*, merupakan bakteri yang dikenal sebagai strain bakteri probiotik yang umum dijumpai pada produk makanan (Dwyana, 2017). Selain Strain *Lactobacillus* dan *Bifidobacterium*, genus *Pediococcus* juga telah diuji dan hal tersebut yang mendasari digunakan dalam produk makanan fermentasi (Zommiti *et al.*, 2018).

II.2.2 Sifat Fisiologi Bakteri Probiotik

Probiotik dapat menghasilkan bakteriosin yang berfungsi melawan patogen yang bersifat selektif hanya terhadap beberapa strain patogen. Probiotik menghasilkan asam asetat, hidrogen peroksida, laktoperoksidase, lipopolisakarida dan beberapa antimikrobal lainnya serta menghasilkan sejumlah nutrisi penting dalam sistem imun dan metabolisme host seperti Vitamin B, pyridoksin, niasin, asam folat, kobalamin, biotin serta antioksidan penting seperti Vitamin K (Yuniastuti, 2014). Dwyana (2017) menambahkan bahwa probiotik juga menghasilkan asam laktat yang dapat menurunkan nilai keasaman atau pH pada pangan.

Kriteria probiotik yang telah ditetapkan oleh FAO (2002); Chotiah & Rini Damayanti (2018) Antara lain:

1. Probiotik harus teridentifikasi secara fenotip dan genotipe.
2. Mampu bertahan hidup pada kondisi asam lambung dan garam empedu pencernaan
3. Dapat memberikan keuntungan pada usus
4. Mampu menempel pada mukus atau sel epitel usus
5. Menghasilkan aktivitas antimikroba terhadap bakteri patogen
6. Merupakan mikroorganisme yang aman atau termasuk mikroorganisme GRAS (*generally recognized as safe*)
7. Tidak bersifat resisten terhadap antibiotik
8. Tidak menghasilkan toksin
9. Dan tidak termasuk bakteri patogen

II.2.3 Mekanisme dan Manfaat Bakteri Probiotik

Mekanisme kerja probiotik dengan menekan populasi mikroba patogen melalui kompetisi dalam hal memproduksi senyawa antimikroba ataupun nutrisi serta merubah metabolisme mikrobial dengan meningkatkan atau menurunkan aktivitas enzim pengurai. Selain itu, probiotik juga dapat menstimulasi imunitas melalui peningkatan kadar antibodi (Daten & Ardyati, 2018).

Probiotik dapat diperoleh dari makanan fermentasi, susu kultur dan digunakan secara meluas dalam penyediaan makanan bayi. Probiotik dikenal sebagai bakteri baik yang bermanfaat dalam menjaga keseimbangan mikroba usus, meningkatkan sistem imun, intoleransi mikroba, antihipertensi dan meredakan gangguan menopause (Shi *et al.*, 2016). Hal ini didukung oleh (Umasugi *et al.*, 2018) yang menyatakan bahwa probiotik memiliki kemampuan dalam merangsang sistem pertahanan tubuh dalam melawan penyakit atau meningkatkan kemampuan penyerapan usus sekaligus menekan populasi patogen.

Penggunaan probiotik pada kehamilan juga telah diteliti dapat bermanfaat untuk imunitas, mencegah gangguan atopik, bakterial vaginosis, diabetes melitus gestasional (GDM) dan hipertensi (Handayani *et al.*, 2020). Dalam hal bakteri vaginosis probiotik melawan bakteri vaginosis melalui beberapa mekanisme, persaingan dengan antigen, stabilisasi lapisan mucin dan pencegahan pertumbuhan bakteri patogen dengan cara memproduksi zat antibakteri diantaranya reutricyclin, asam organik, bakteriosin, reuterin dan hidrogen peroksida (Handayani *et al.*, 2020). Beberapa jenis bakteri seperti *Streptococcus*, *Escherichia*, *Lactobacillus*, dan *Bifidobacterium* genera dapat mensintesis neurotransmitter dalam sistem saraf otonom. Perubahan pada prevalensi bakteri ini dapat mengubah tonus pembuluh darah dan berkontribusi terhadap

perkembangan hipertensi. Mikrobiota usus dapat mengubah fungsi endotel yang dapat berdampak pada penurunan tekanan darah (Handayani *et al.*, 2020).

II.3 Bakteri *Lactobacillus plantarum*

Lactobacillus merupakan bakteri yang bersifat gram positif, *Homofermentative*, *Thermophilic* dan *non spore forming* rod. Kebanyakan spesies *lactobacillus* tidak dapat memfermentasi penthosa dan asam piruvat (Duar *et al.*, 2017). Tidak bersifat pathogen dan dapat menghambat pertumbuhan bakteri patogen (Andayani *et.al* 2017). *Lactobacillus plantarum* merupakan bakteri asam laktat (Usman *et al.*, 2018).

Lactobacilus plantarum termasuk bakteri asam laktat yang berpotensi sebagai biopreservatif karena dapat menghambat pertumbuhan bakteri patogen dengan daya hambat yang lebih luas dibanding jenis bakteri lainnya. *Plantaricin* merupakan senyawa antimikroba yang dihasilkan oleh *Lactobacillus plantarum*. Dengan adanya penambahan bakteri *Lactobacilus plantarum* pada produk pangan dapat menghambat pertumbuhan bakteri patogen dengan cara menurunkan pH substrat (Usman & Suradi, 2018).

Dalam penelitian Angreani (2019) menyatakan bahwa *Lactobacilus plantarum* mampu mereduksi merkuri baik pada konsentrasi 5ppm, 10 ppm dan 20 ppm, dengan masa inkubasi 2,049 pada konsentrasi 5ppm pada konsentrasi 10 ppm yaitu 1,885 dan 1, 542 pada konsentrasi 20 ppm.

II.4 Bakteri *Pediococcus acidilactici*

Bakteri *Pediococcus acidilactici* umumnya diisolasi dari bahan pangan terfermentasi khususnya dari daerah tropis seperti sosis babi ala Bali atau urutan

(Antara *et al.*, 2001; Sujaya *et al.*, 2016). *Pediococcus acilidactici* termasuk bakteri asam laktat yang menghasilkan substansi antimikroba yaitu pediosin serta memiliki kemampuan toleran terhadap larutan garam berkisar antara 15 hingga 20% (Kusumawati *et al.*, 2011; Hidayat, 2016).

Beberapa kajian ilmiah tentang manfaat probiotik bagi kesehatan telah banyak dilakukan seperti menurunkan kadar kolesterol, meringankan reaksi alergi terhadap laktosa, memproduksi vitamin B, meningkatkan absorpsi kalsium, memodulasi sistem imun, mencegah infeksi berbagai bakteri patogen, dan mengurangi risiko kanker kolon (Ouweland, 1999; Sujaya *et al.*, 2016) dan *Pediococcus acilidactici* merupakan bakteri gram positif memiliki bentuk koloni bulat tepian yang rata, berwarna putih susu dan elevasi cembung dan bersifat katalase negatif dan oksidase negatif. Serta mampu memfermentasi gula tanpa disertai produk gas (Reimena & Budiman, 2017).

Berdasarkan penelitian Ulfiani (2019) menyatakan bahwa *Pediococcus acilidactici* dapat mereduksi merkuri pada konsentrasi 5ppm, 10 ppm dan 20 ppm, dan merupakan kultur yang paling baik dibanding kultur lainnya dalam mereduksi merkuri dengan hasil kerapatan sel yang menunjukkan nilai yang tertinggi. Pada konsentrasi 10 ppm dan *Pediococcus acilidactici* menunjukkan pertumbuhan yang cukup tinggi dibanding yang lain dan tetap mengalami pertumbuhan pada konsentrasi 20 ppm.

Penelitian Ameen *et al.*, 2020 melaporkan bahwa *Lactobacillus plantarum* menunjukkan ketahanan atau resistensi yang cukup tinggi sekitar 500 ppm terhadap nikel dan 100 ppm terhadap kromium. Penelitian lainnya mengungkapkan bahwa *L. plantarum* dapat mencegah keracunan akut terhadap cadmium (Cd). George *et al.* (2021) melaporkan bahwa beberapa genus bakteri

pediococcus salah satunya dan *Pediococcus acilidactici* mampu mereduksi cadmium (Cd) dengan kadar konsentrasi Cd sebanyak 25 ppm.

II.5 Merkuri (Hg)

II.5.1 Pencemaran Logam Berat

Merkuri atau air raksa (Hg) merupakan salah satu jenis logam yang banyak ditemukan di alam, tersebar dalam batu-batuan, biji tambang, tanah, air dan udara sebagai senyawa anorganik dan organik. Secara alamiah merkuri berasal dari kerak bumi dengan konsentrasi sebesar 0,08 ppm (Kepel, 2019).

Merkuri Hg yang terdapat dalam limbah perairan umum mengalami perubahan akibat aktivitas mikroorganisme menjadi metil-merkuri (Me-Hg) yang bersifat beracun dan memiliki daya ikat yang kuat di samping kelarutannya yang tinggi dalam tubuh hewan air melalui rantai makanan *food chain* mengakibatkan merkuri terakumulasi baik melalui proses bioakumulasi maupun biomagnifikasi dalam tubuh biota yang dapat mengakibatkan kadar merkuri mencapai level yang berbahaya bagi biota air dan berdampak pada kesehatan manusia yang mengonsumsi hasil tangkapan hewan air (Ishak, 2017).

II.5.2 Sifat dan Bentuk Merkuri

Merkuri (Hg) atau raksa berasal dari bahasa latin yaitu *Hydragyrum*, terjemahan dari bahasa inggris yang berarti mudah menguap. Raksa adalah unsur kimia yang mempunyai nomor atom 80, berat atom 200,61 dan jari-jari atom 1,48 Å⁰. Raksa memiliki wujud cair pada suhu ruang 25°C dan bersifat *volatile*. Warna dari raksa tergantung dari wujudnya, wujud cair dapat berupa warna putih perak sedangkan fase padat berupa warna abu-abu, densitas 13,55 dan tegangan permukaan yang lebih tinggi dibanding air dan alkohol (Delvi & Zainul, 2019).

II.5.3 Jenis-jenis Merkuri

Adapun jenis-jenis merkuri antara lain sebagai berikut (Adlim, 2016):

1. Merkuri dalam bentuk senyawa anorganik

Merkuri dalam bentuk senyawa disebut sinabar yang diperkirakan sebagai sumber pencemaran secara alami yang terdapat di alam. Merkuri dalam bentuk sinabar tergolong senyawa merkuri anorganik.

2. Senyawa merkuri organik

Senyawa merkuri organik adalah senyawa yang sangat beracun dibandingkan dengan senyawa merkuri anorganik dan unsur merkuri. Senyawa merkuri organik umumnya merupakan senyawa sintetik yang sangat reaktif, mudah larut, mudah menguap dan lebih mudah berikatan dengan sistem biologi yang juga bersifat organik. Senyawa organik yang terkenal adalah mono atau dimetil merkuri yang memiliki afinitas kuat terhadap gugus tiol yang terdapat dalam protein.

II.5.4 Sumber Pencemaran Merkuri

Merkuri termasuk unsur paling langka di Bumi menempati posisi ke-16, namun konsentrasi merkuri secara global telah meningkat kira-kira tiga kali lipat dikarenakan berbagai kegiatan antropogenik. Samudra dunia merupakan waduk utamanya (Mason *et al.*, 2012; De *et al.*, 2014; Naik & Dubey, 2016). Logam berat merkuri (Hg) merupakan logam berat yang paling sering ditemukan sebagai pencemar di wilayah perairan. Merkuri termasuk logam yang bersifat toksik sehingga keberadaannya dapat menimbulkan efek yang buruk bagi kesehatan (Siwi, *et al.*, 2019).

Penggunaan merkuri atau aktivitas tertentu akan disebarkan ke lingkungan, baik berupa bahan pertanian, obat-obatan, cat, kertas, pertambangan sisa

pembuangan industri (Juhriah and Mir 2016). Logam merkuri biasanya berasal dari buangan limbah pertanian dan industri (Siwi *et al.*, 2019).

Sumber pencemaran merkuri dalam beberapa industri sebagai berikut:

1. Dalam Bidang Industri Pertambangan Emas

Dalam proses pengolahan emas, hasil limbah industri yang mengandung metil merkuri dibiarkan mengalir ke sungai. Pencemaran akibat pembuangan limbah industri yang mengandung metil merkuri ke dalam air danau berdampak pada organisme yang didalamnya ikut tercemar. Organisme yang tercemar kemudian dikonsumsi oleh manusia sehingga menyebabkan akumulasi merkuri dan bersifat toksik. (Herman, 2006; Nuansa *et al.*, 2017).

2. Dalam Bidang Pertanian

Dalam bidang pertanian penggunaan merkuri dapat dijumpai dalam pestisida. Pestisida yang mengandung merkuri dalam penggunaannya akan diserap oleh tanaman dan dikonsumsi oleh manusia dan menyebabkan akumulasi merkuri dan apabila kadar merkuri berlebih di dalam tubuh dapat menyebabkan keracunan (Alfian, 2006; Nuansa *et al.*, 2017). Penyerapan logam berat Hg dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu pH tanah, kadar bahan organik tanah dan potensial redok dapat secara drastis menurunkan pH, peningkatan konsentrasi asam-asam organik (Haryono and Soemono., 2019).

3. Dalam Bidang Kedokteran

Dalam bidang kesehatan, merkuri umumnya berasal dari pecahnya alat-alat kesehatan yang menggunakan merkuri baik dalam bentuk cairan ataupun uap akan menyebar ke lingkungan (Hadi, 2013).

Penggunaan amalgam pada bidang kedokteran gigi yakni pada proses penambalan gigi posterior pasien dewasa dan anak-anak umumnya

mengandung merkuri yang dapat berbahaya bagi kesehatan dan dapat berpengaruh dalam jangka waktu yang lama. Di lingkungan kerja dokter gigi, pemaparan merkuri dapat melalui pernapasan, melalui kontak langsung, dengan kulit maupun melalui saluran pencernaan. Akibat tumpahan merkuri yang tidak segera dibersihkan sisa amalgam merkuri yang dibuang secara sembarangan. Selain hal tersebut, minimnya ventilasi di dalam ruang kerja, penggunaan sterilisator panas kering serta penggunaan alat ultrasonik dapat memacu pencemaran merkuri di praktek dokter gigi (Nonong *et al.*, 2015).

II.5.5 Konsentrasi Merkuri di Lingkungan

Kadar merkuri menurut peraturan menteri kesehatan maksimum di dalam air sebesar 0,001 mg/L atau sekitar (1 µg/L.), kadar merkuri pada tanah sekitar 0,03 mg/g (Juhriah and Mir, 2016). Dan kadar merkuri pada udara menurut peraturan menteri kesehatan adalah 0,05 mg Hg/m³/8h. Logam merkuri dapat menjadi berbahaya disebabkan oleh sistem bioakumulasi yaitu peningkatan konsentrasi unsur kimia di dalam tubuh makhluk hidup. Logam berat dapat menimbulkan efek bagi kesehatan manusia (Nuraini, 2015; Yaulis, 2018).

Pembentukan MeHg dalam lingkungan laut tergantung pada jenis sedimen, kadar merkuri anorganik di lingkungan, pengaruh kondisi lingkungan seperti sulfur, pH, temperatur, Fe, senyawa organik, dan jenis bakteri yang ada (Das *et al.*; 2008 Acquavita; Budiyanto, 2012). MeHg pada umumnya terbentuk oleh proses metabolisme bakteri pereduksi sulfat. Konsentrasi oksigen yang rendah berpotensi meningkatkan aktifitas bakteri. Mikroorganisme dapat mengubah merkuri kedalam tiga keadaan oksidasi (0, +1 dan +2), bentuk organik dan anorganik (Vetriai *et al.* 2005; Budiyanto, 2012). Aktivitas manusia yang

membuang merkuri anorganik berakibat dalam peningkatan produksi MeHg di lingkungan.

Ketika merkuri berada dalam perairan maka dapat berubah dari satu bentuk ke bentuk yang lain hingga membentuk ikatan yang kompleks. Hal ini dapat memasuki rantai makanan atau kembali ke atmosfer dalam bentuk yang tidak stabil. (De *et al*, 2014). Kadar MeHg pada rantai makanan ditentukan oleh masuknya merkuri serta faktor yang mempengaruhi pembentukan metil merkuri. Apabila merkuri masuk ke dalam lingkungan perairan berikatan dengan klor dan membentuk ikatan HgCl, dalam bentuk tersebut Hg akan mudah masuk kedalam fitoplakton. Fitoplankton tersebut merupakan titik awal asupan merkuri pada rantai makanan dengan cara mengakumulasi merkuri anorganik dan MeHg dari perairan. (Narasiang *et al* 2015).

II.5.6 Dampak Pencemaran Merkuri Bagi Kesehatan

Merkuri umumnya memasuki tubuh dapat melalui udara, air atau makanan yang terserap dalam jumlah yang bervariasi. Sementara itu tubuh manusia tidak dapat mengolah bentuk-bentuk dari metil merkuri sehingga merkuri tetap berada dalam tubuh dalam waktu yang relatif lama dan dapat menimbulkan gangguan kesehatan. Pemaparan merkuri dalam waktu singkat dengan kadar merkuri yang tinggi dapat mengakibatkan kerusakan paru-paru, muntah, peningkatan tekanan darah dan denyut jantung (Prihantini & Hutagalung, 2018).

Tingginya kadar merkuri dapat menyebabkan ataksia, penurunan pendengaran maupun bicara, kegilaan, mengalami koma dan akhirnya kematian. Keracunan merkuri tidak hanya dialami oleh orang dewasa namun juga terjadi pada janin. Merkuri dapat menyebabkan kerusakan otak pada janin yang ibunya terkontaminasi oleh merkuri (Yorifuji *et al*, 2018; Pratiwi, 2020).

Peristiwa keracunan logam Merkuri telah ada sejak tahun 1960-an. Telah tercatat berbagai peristiwa akibat keracunan merkuri yang terjadi antarlain kasus di Minamata di Jepang (1953-1965) banyak menderita penyakit aneh dan kurang lebih 40 orang meninggal. Hal ini dikarenakan mereka mengkonsumsi ikan dan kerang yang mengandung merkuri organik atau metil merkuri (CH_3Hg) dengan konsentrasi yang tinggi. Di Nigata Jepang terdapat kurang lebih 100 orang menderita akibat keracunan merkuri dan 6 orang yang meninggal dunia (Guntur *et al.*, 2021).

Di Indonesia sendiri pernah terjadi kasus keracunan merkuri yang cukup menyita perhatian, seperti pada kasus Teluk Buyat yang diakibatkan dari pencemaran penambangan emas di PT. Newmont. Akibat dari pencemaran tersebut kadar merkuri pada ikan mencapai 0,257 mg/l di sungai Rungan dan 0,679 mg/l di sungai kahayan. Ambang batas kandungan merkuri dalam ikan seharusnya 0,5 mg/l. Sedangkan kadar merkuri di dasar Rungan sebesar 0,554 mg/l dan di dasar sungai Khayan 0,789 mg/l padahal ambang batas untuk sedimen hanya 0,005 mg/l⁴ (Reza *et al.*, 2016).

Salah satu penatalaksanaan penyakit yang paling umum dilakukan adalah penggunaan obat-obatan kimia dengan tujuan promotif, prevensif, kuratif dan rehabilitasi Asmiliani (2019). Keracunan akut yang dikarenakan merkuri dapat diberikan BAL (*British Anti-Lewiste*), suatu senyawa yang mengandung 2,3-etilendamin tetra asetat) dan NAP (N-asetil-d-penicilmin) senyawa tersebut akan mengikat Hg dan meningkatkan ekskresi melalui urin (Prihantini and Patar., 2018). Namun beberapa penelitian melaporkan bahwa *British Anti-Lewiste* menimbulkan efek samping berupa nefrotoksisitas dan hipertensi (Swaran, 2014). Nefrotoksisitas dapat didefinisikan sebagai penyakit ginjal atau disfungsi yang

timbul sebagai akibat langsung atau tidak langsung dari paparan obat-obatan dan bahan kimia industri atau lingkungan. Penggunaan obat yang berlebihan kemungkinan akan menyebabkan beberapa efek samping pada fungsi organ (Sukmawati and Ira 2019)

II.6 Potensi Bakteri dalam Toksisitas Merkuri

Pencemaran merkuri merupakan masalah yang cukup besar pada saat ini dan terdapat beberapa solusi yang dihadirkan dalam mengatasi hal tersebut. Namun dikarenakan biaya (teknik) yang mahal serta adanya pelepasan produk sampingan yang berbahaya. Oleh karena itu para peneliti beralih pada pemanfaatan mikroorganisme sebagai agent bioremediasi merkuri. Terdapat beberapa bakteri yang dilaporkan memiliki mekanisme dalam mendetoksifikasi merkuri yang bersifat toksik menjadi tidak toksik yang dimanfaatkan untuk membersihkan lingkungan yang telah tercemar oleh merkuri (De *et al.*, 2014).

Mikroorganisme terdapat dimana-mana dan dapat beradaptasi dan menunjukkan mekanisme pertahanan yang berbeda terhadap logam berat yang dapat menghasilkan efek yang berguna untuk menghilangkan sifat toksisitasnya. Bakteri resisten merkuri adalah bakteri yang memiliki gen resisten terhadap merkuri baik bakteri tersebut bersifat gram positif dan negatif. Terdapat beberapa bakteri yang memiliki gen resisten yang dapat mengubah bentuk ion merkuri menjadi tidak stabil (Tanumihardja *et al.*, 2017).

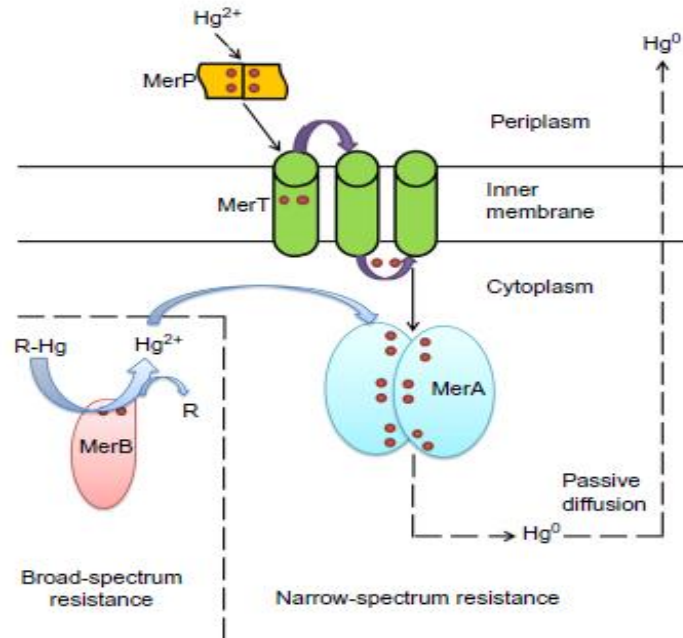
Sifat toksik dari merkuri (Hg) dapat berkurang oleh adanya mikroorganisme resisten merkuri. Detoksifikasi merkuri oleh bakteri resisten merkuri dikarenakan adanya gen resisten terhadap merkuri, yaitu gen operon *mer* (Lumanto *et al.*, 2017). Gen operon *mer* terdapat di plasmid, kromosom, transpor, dan integron (Budiarso and Ronald., 2015).

Gen operon *Mer* terdiri dari gen-gen struktural diantaranya *merR*, *merT*, *merP*, *merC*, *merA* dan *merB* (Budiarmo and Ronald., 2015). *MerA* merkuri reduktase disebut sebagai pusat protein dalam mereduksi merkuri yang dikode oleh *mer loci*, *cytosolic flavin disulfide oxidoreductase* dan NADPH sebagai pereduksi yang diekspresikan oleh regulator Hg^{2+} yang terletak di sitosol dengan bantuan protein membran integral misal *merT*, *merP* dalam memfasilitasi penyerapan Hg^{2+} ke dalam sitosol (De *et al.*, 2014).

MerA memiliki domain amino terminal yang fleksibel dan homologus terhadap *plasmic binding protein merP*. Terdapat dua *cystein* residues yang digunakan oleh *merP* untuk menggantikan *nucleosil* seperti Cl^- terhadap Hg^{2+} . Selanjutnya *merP* mengganti Hg^{2+} dengan bantuan *cystein* dari tiga transmembran heliks pertama dari *merT* ke sitosol yang berikatan dengan sepasang *cystein* yang terletak pada sitosol pada membran dalam. Kemudian produk *merC* dan *merF*, bertindak sebagai sistem transpor merkuri (De *et al.*, 2014).

Dalam beberapa kasus terdapat pula bakteri yang memiliki gen *merB* (De *et al.*, 2014). Namun dalam beberapa isolat bakteri telah dilaporkan resisten terhadap senyawa merkuri organik dan anorganik olehnya itu disebut sebagai resisten merkuri spektrum luas. Selain struktur dan gen fungsional lainnya bakteri ini memiliki gen tambahan yang dikenal sebagai *merB*. Karakterisasi dari *merB* ini dikodekan oleh R831 yang memiliki massa molekul 22,4 kDa, serta tidak memiliki kofaktor dan bersifat monomer. Yang berfungsi dalam memotong ikatan C-Hg menjadi Hg^{2+} pada sitoplasma, kemudian dilanjutkan oleh *MerA* untuk mengubahnya menjadi Hg^0 (De *et al.*, 2014). Bakteri yang hanya memiliki gen merkuri reduktase (*MerA*) disebut bakteri resisten merkuri spektrum sempit

sedangkan bakteri yang memiliki gen merA dan juga gen MerB disebut bakteri resisten merkuri spektrum luas (Tanumihardja *et al.*, 2017).



Gambar 1. Mekanisme Gen MerA dan MerB dalam mendetoksifikasi merkuri.

Dikenal dua enzim yakni *organomecurial lyase* dan *mercurial reductase*. *Organomecurial lyase* yang berfungsi untuk memotong rantai karbon merkuri kemudian *mercurial reductase* mengubah bentuk ion yang larut dalam air (Hg^{2+}) menjadi merkuri yang tidak dapat dilarutkan (De *et al.*, 2014). Gen *merA* merupakan gen pengkode pembentukan enzim merkuri reduktase yang mampu mengubah Hg^{2+} menjadi Hg^0 yang kurang beracun (Lumanto *et al.*, 2017).

Bakteri melakukan transformasi kimia sebagai respon dari merkuri melalui oksidasi, reduksi, *methylation*, dan *demethylation* serta mengembangkan perlawanan menggunakan material genetik kromosom termasuk plasmid. Telah banyak dilaporkan mengenai bakteri resisten merkuri yang di isolasi dari limbah industri, laut yang terkontaminasi oleh merkuri. Terdapat lima mekanisme bakteri

dalam mereduksi merkuri melalui mediasi mer operon antara lain De *et al.*, (2014) :

1. Pengurangan penyerapan ion merkuri,
2. Demetilasi metilmerkuri menjadi senyawa merkuri selufida,
3. Sequertasi metil merkuri
4. Metilasi merkuri
5. Reduksi Hg^{2+} menjadi Hg^0 .