

Kajian Literatur *Enhanced Phytoremediation* pada Lahan Tercemar Logam Berat Merkuri

Imroatin Sakinah Rahmatina dan Harmin Sulistiyaning Titah
Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: harmin_st@its.ac.id

Abstrak—Pertambangan emas skala kecil (PESK) merupakan salah satu sumber pencemar logam berat dengan konsentrasi merkuri yang tinggi. Logam berat dapat membahayakan makhluk hidup dan lingkungan di sekitarnya. Salah satu upaya untuk menurunkan konsentrasi pencemar logam berat merkuri pada tanah yaitu dengan fitoremediasi. Proses fitoremediasi dapat ditingkatkan dengan metode *enhanced phytoremediation*, salah satunya yaitu dengan penambahan rizobakteri (*Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* - PGPR). Terdapat banyak jenis tumbuhan yang mampu meremediasi tanah tercemar logam berat merkuri, diantaranya *Cyperus kyllingia* atau rumput teki, *Vetiveria zizanioides* atau akar wangi, dan *Lindernia crustacea* atau kerak nasi. Selain itu penambahan bakteri PGPR berupa *Pseudomonas* sp. dan *Bacillus* sp. dapat meningkatkan proses reduksi logam berat merkuri dalam tanah dan membantu meningkatkan pertumbuhan tumbuhan fitoremediator. Konsentrasi rata-rata logam berat merkuri yang dihasilkan oleh PESK di Kulon Progo yaitu 22 mg/kg. Karakteristik tanah tercemar logam berat merkuri yaitu berwarna kuning hingga kecoklatan, memiliki nilai pH tanah asam hingga basa yaitu 4,6 – 8,02, memiliki kandungan C dan N yang rendah hingga sangat rendah, yaitu 0,22% - 1,34% untuk C, dan 0,001% - 0,23% untuk N, serta memiliki struktur tanah lanau dan berpasir atau lempung berpasir.

Kata Kunci—*Enhanced Phytoremediation*, Fitoremediasi, Merkuri, PGPR, Rizobakteri.

I. PENDAHULUAN

INDONESIA merupakan salah satu negara yang memiliki banyak lokasi pertambangan. Disebutkan bahwa telah terjadi perubahan fungsi lahan di Indonesia sedikitnya 35% menjadi areal pertambangan [1]. Salah satu contohnya adalah pertambangan emas yang dapat memberikan banyak keuntungan. Namun demikian, industri pertambangan juga dapat memberikan dampak negatif melalui limbah yang dihasilkannya. Salah satu karakteristik limbah dari pertambangan yaitu adanya kandungan logam berat yang dapat menyebabkan pencemaran. Lingkungan yang telah tercemar tidak akan dapat berfungsi sebagaimana peruntukannya. Logam berat yang mencemari lingkungan dalam jumlah yang melampaui batas akan menyebabkan kemampuan lingkungan menurun dan tidak mendukung kehidupan yang ada didalamnya [2].

Logam berat dapat mencemari lingkungan dalam bentuk pencemaran di tanah. Pencemaran pada tanah dapat merusak tumbuhan yang akan dikonsumsi oleh manusia maupun hewan. Selain pencemaran melalui tanah, logam berat juga dapat mencemari udara dan air [3]. Salah satu sumber pencemar logam berat berupa merkuri yang ada di Indonesia yaitu melalui limbah pengolahan emas. Salah satu cara pengolahan emas secara tradisional yaitu dilakukan dengan proses amalgamasi yang menghasilkan limbah tailing dengan konsentrasi merkuri yang cukup tinggi. Limbah tailing yang dibuang di tanah secara langsung dapat menjadi sumber

pencemar bagi tanah dan lingkungan di sekitarnya. Merkuri yang berkontak dengan manusia dapat membahayakan fungsi ginjal dan bahaya kesehatan lainnya [4].

Salah satu pengolahan emas secara tradisional yang ada di Indonesia terletak di Kabupaten Kulon Progo, Yogyakarta. Kadar merkuri yang dihasilkan dari tailing pertambangan emas rakyat Kabupaten Kulon Progo sebesar 164-384 mg/kg [5], dan 7-50 ppm pada tanah [6]. Nilai ambang batas merkuri pada tanah berdasarkan *Canadian Soil Quality Guideline* yaitu sebesar 6,6 mg/kg.

Terdapat banyak cara yang dapat diterapkan untuk mengatasi pencemaran logam berat merkuri pada tanah. Salah satu cara yang dapat diterapkan yaitu dengan proses fitoremediasi yang memanfaatkan tumbuhan hiperakumulator [2]. Proses fitoremediasi memberikan pendekatan pengelolaan yang ramah lingkungan dan hemat biaya untuk pembersihan polutan beracun di lingkungan. Metode ini menggunakan tumbuhan untuk mendetoksifikasi, mengembalikan, dan memurnikan media lingkungan. Tumbuhan yang digunakan dalam fitoremediasi harus memiliki kemampuan yang lebih dari pada tumbuhan lain dalam menerima kontaminan yang ada di sekitarnya dan dikategorikan dalam tumbuhan hiperakumulator.

Tumbuhan yang digunakan dalam proses fitoremediasi tentunya memiliki batas kemampuan dalam menyisihkan pencemar yang ada. Oleh karena itu, diperlukan unsur-unsur pendukung untuk meningkatkan kemampuan tumbuhan dalam melakukan fitoremediasi atau disebut dengan *enhanced phytoremediation*. Salah satu bentuk *enhanced phytoremediation* yaitu penambahan mikroorganisme tertentu seperti rizobakteri atau yang dikenal dengan *plant growth-promoting rhizobacteria* (PGPR). *Enhanced phytoremediation* diaplikasikan untuk memperbaiki kondisi tumbuhan serta meningkatkan kemampuannya dalam menyisihkan pencemar.

II. METODE KAJIAN

Data dan pustaka yang dibutuhkan untuk menyusun kajian literatur ini didapatkan dari berbagai sumber seperti artikel dan jurnal ilmiah nasional dan internasional, tugas akhir, tesis, disertasi, seminar ilmiah, serta karya ilmiah lain. Referensi jurnal yang digunakan berasal dari *website* pencarian jurnal seperti *sciencedirect*, *researchgate*, *google scholar*, dan Mendeley yang terintegrasi dengan Microsoft word.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Lokasi Studi Kasus

Salah satu lokasi yang memiliki area pertambangan yaitu berada di Kecamatan Kokap, yang merupakan kecamatan



Gambar 1. Pembuangan Tailing/Limbah Sisa Tambang Secara Langsung di atas Tanah.



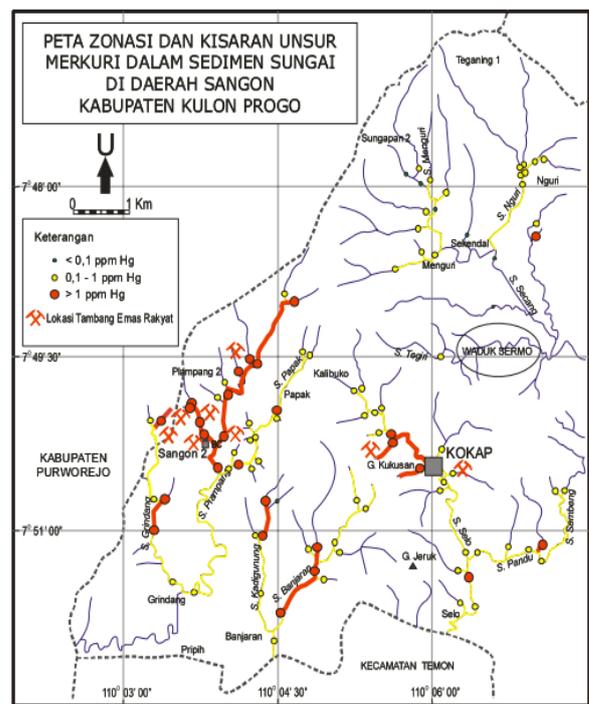
Gambar 2. Kondisi Tanah Tercemar Merkuri di Desa Kokap, Kulon Progo, Yogyakarta.

dengan wilayah paling luas di Kabupaten Kulon Progo yaitu 7.379,95 Ha [7]. Pertambangan emas milik rakyat yang berada di Kabupaten Kulon Progo dilakukan secara tradisional dengan teknik amalgamasi dengan zat tambahan yaitu merkuri yang kemudian dapat menghasilkan limbah dengan kandungan merkuri yang cukup tinggi. Limbah sisa tambang atau tailing yang dihasilkan tersebut ditampung di kolam penampungan dan juga dibuang secara langsung di tempat terbuka seperti area di sekitar gelondong (pengolahan), halaman rumah, kebun, hingga sungai. Hal tersebut kemudian menjadi sumber pencemaran tanah dan air tanah di lingkungan sekitarnya sebagaimana Gambar 1 [6].

Empat sampel tanah yang diambil dari sekitar lokasi pengolahan emas yang menggunakan gelondong di daerah Sangon memiliki konsentrasi merkuri yang tinggi yaitu melebihi 50 ppm Hg. Sedangkan untuk konsentrasi merkuri pada tailing yaitu lebih tinggi dari pada di tanah, berkisar antara 800 – 6900 ppm. Pencemaran merkuri juga dapat terjadi akibat cecceran tailing yang diangkat atau dipindahkan dari kolam penampungan menuju lokasi baru [6].

B. Karakteristik Tanah Tercemar Logam Berat Merkuri di Lokasi Studi Kasus

Karakteristik fisik tanah yang berada di kabupaten Kulon Progo yaitu didominasi oleh lempung berwarna coklat kekuningan, dan bersifat basah sebagaimana Gambar 2. Konsentrasi total merkuri pada beberapa titik di Kabupaten Kulon Progo memiliki nilai sepuluh kali lipat lebih besar apabila dibandingkan dengan tanah kontrol. Adapun karakteristik tanah di area pertambangan emas milik rakyat di Kabupaten Kulon Progo yang meliputi jenis penyusun tanah, nilai pH, kadar air, dan konsentrasi merkuri dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 3. Peta Penyebaran Unsur Merkuri di Daerah Sangon, Kulon Progo.

Tabel 1. Karakteristik Tanah Tercemar Merkuri di Kulon Progo

Pasir %	Liat %	Lanau %	Kerikil %	Hg mg/kg	pH	Kadar air %
55,17	12,27	30,69	1,86	0,89	6,78	13,24
				> 50 ppm		
41,14	20,63	38,22		0,30 – 22,51 mg/kg	6,00	14,64
				18 pppm	7,05	
				29,3 ppm		
48,16	16,45	34,45	1,86	21,92 mg/kg	6,65	13,24

Peta penyebaran merkuri akibat usaha pertambangan emas di daerah Sangon, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta, dapat dilihat pada Gambar 3 [6].

Berdasarkan data yang telah dituliskan dalam Tabel 1, dapat disimpulkan dalam beberapa poin yaitu:

1. Memiliki nilai pH yang cenderung netral
Tanah yang memiliki nilai pH rendah akan memiliki sifat lebih mudah tercemar karena logam berat lebih mudah terlarut pada tanah yang bersifat asam.
2. Terjadi pencemaran logam berat merkuri pada tanah dengan rata-rata 22 mg/kg.
Logam berat merkuri dari proses amalgamasi akan mencemari tanah dalam bentuk Hg⁰, dan mengendap di dalam lumpur, tanah, serta sedimen sungai, Hg⁰ teroksidasi dan bereaksi dengan asam-asam organik membentuk larutan merkuri Hg²⁺ yang mengendap serta dapat terserap oleh partikel-partikel tanah, Hg²⁺ dapat mengalami proses metilasi yang dipengaruhi oleh bakteri sekitar.
3. Karakteristik tanah didominasi oleh lanau dan pasir
Tekstur tanah di area pertambangan Kulon Progo bersifat

Tabel 2.
Jenis-Jenis Tumbuhan Hiperakumulator

No	Nama Tumbuhan	% Removal dan/atau Akumulasi
1	<i>Cyperus kyllingia</i> - Rumput Teki	> 10 mg/kg pada pucuk < 5 mg/kg pada akar 0,77 ppm pada pucuk 13,05 ppm pada pucuk 89,97 mg/kg (tajuk) 78,21 mg/kg pada akar 122,53 mg/kg pada tajuk 77,9 mg/kg pada akar
2	<i>Jatropha curcas L.</i> - Jarak Pagar	100% 7,25 mg/kg 10,23 ppm pada akar
3	<i>Arabidopsis thaliana</i>	Fitoremediasi dengan genetic engineering
4	<i>Nicotiana tabacum</i>	348 mg/kg
5	<i>Paspalum conjugatum</i>	227,7 ng/berat tumbuhan 8,82 mg/kg Hg > 32,5 mg/kg pada pucuk < 5 mg/kg pada akar 1,78 ppm di pucuk 47 ppm di pucuk 18%-20% 47 mg/kg Hg 20,555 di akar 6,135 ppm di daun
6	<i>Caladium sp.</i>	0,14 mg/kg 0,48 ppm di akar 1,16 ppm di pucuk
7	<i>Brassica napus</i>	Hiperakumulator Hg
8	<i>Brassica juncea</i> - Indian mustard - Sawi	81% 404,97 mg/kg 44% 436,36 mg/kg 18,9 ± 15 mg/kg 25 g Hg/ha > 1 mg/g pada akar 45% 156,611 - 888,711 mg/kg pada akar 60,416 - 134,580 mg/kg pada tajuk
9	<i>Vetiveria zizanioides L.</i>	0,698 mg/kg pada akar 55,752% 0,822 mg/kg pada akar 65,252% 33,2 ± 0,31 mg/kg 88,9 mg/kg pada akar
10	<i>Lindernia crustacea</i>	2,96 mg/kg Hg < 10 mg/kg pada pucuk < 5 mg/kg pada akar 89,13 mg/kg 0,05 mg/tumbuhan < 15 mg/kg pada akar < 5 mg/kg pada tajuk ± 15 mg/kg pada akar > 5 mg/kg pada tajuk > 10 mg/kg pada akar ± 10 mg/kg pada tajuk
11	<i>Digitaria radicata</i>	50,93 ppm 1,65 mg/kg Hg
12	<i>Celosia plumosa</i>	66,81% 65,55% 81,25 - 98,68 %

lempung dan lempung berpasir [8]. Tanah yang memiliki kandungan pasir yang tinggi akan memudahkan masuknya logam berat ke dalam tanah karena pasir tidak memiliki daya ikat air yang tinggi.

- Memiliki kadar air yang rendah
Kadar air pada tanah dipengaruhi oleh keberadaan bahan organik. Tanah yang memiliki kandungan bahan organik tinggi juga akan memiliki kadar air tanah yang tinggi [8]. Penelitian yang dilakukan pada sampel tanah di Kulon Progo menyebutkan bahwa tanah tersebut didominasi oleh

kompleks mediteran, grumusol, regosol, dan litosol, yang berstruktur lempung lanau, memiliki pH netral hingga basa, serta kandungan organik yang rendah [9]. Adapun karakteristik kimia tanah tercemar logam berat merkuri dengan studi kasus Kulon Progo mengacu pada karakteristik kimia tanah tercemar merkuri secara umum di Indonesia.

Pada Tabel 2 dapat diketahui bahwa kandungan C dan N pada tanah tercemar merkuri sangat rendah. Sedangkan untuk kandungan Na berada pada nilai sedang, serta K dan Ca berada pada kategori nilai yang tinggi. Informasi terkait

Tabel 3.
Prediksi Karakteristik Kimia Tanah Tercemar Logam Berat Merkuri di Kulon Progo

Komponen	Nilai
C	0,67%
N	0,07%
C/N	9,571
P	1,46 mg/kg
K	0,774 cmol/kg
Na	0,454 cmol/kg
Ca	11,56 cmol/kg

Tabel 4.
Karakteristik Kimia Tailing di Kulon Progo

Hg
302,31 mg/kg
277,47 - 352,32 mg/kg
800-6900 ppm
164,19 - 383,21 mg/kg
1023,11 mg/kg

dengan kandungan kimia tanah menjadi pedoman dalam penerapan proses *enhanced phytoremediation* yang dirangkum dalam Tabel 3. Oleh karena kandungan kimia dalam tanah yang rendah, maka sebelum dilakukan penanaman jenis-jenis tumbuhan fitoremediator terpilih, perlu dilakukan pemupukan untuk meningkatkan kandungan unsur-unsur kimia dan mendukung proses pertumbuhan tumbuhan fitoremediator.

C. Pemilihan Spesies Tumbuhan dan Mikroorganisme

Pengetahuan terkait jenis-jenis tumbuhan yang memiliki kemampuan dalam meremediasi logam berat merkuri perlu terus dikembangkan. Beberapa hal yang mendukung pernyataan tersebut yaitu metode fitoremediasi pada tanah tercemar merupakan upaya remediasi yang mudah dilakukan dan membutuhkan biaya yang murah, Indonesia memiliki keragaman hayati yang sangat besar. Penelitian lebih lanjut pada berbagai tumbuhan asli Indonesia dapat memberikan informasi lebih terkait fungsi yang dapat diberikan oleh tumbuhan tersebut, baik sebagai agen fitoremediasi logam berat merkuri maupun jenis pencemar lainnya. Jenis-jenis tumbuhan Hiperakumulator dapat dilihat pada Tabel 4. Tiga jenis tumbuhan yang dipilih yaitu:

1. *Cyperus kyllingia* – Rumput teki
2. *Vetiveria zizanioides* L. – Akar wangi
3. *Lindernia crustacea* – Kerak nasi

Ketiga jenis tumbuhan tersebut dipilih karena memiliki kemampuan mengakumulasi pencemar merkuri dalam jumlah besar. Selain itu, jenis tumbuhan yang dipilih tersebut memiliki karakteristik yang hampir sama yaitu berupa rumput-rumputan, sehingga dapat memudahkan pemeliharaan tumbuhan selama proses *enhanced phytoremediation*. Rumput-rumputan termasuk jenis tumbuhan yang mudah tumbuh. Pemilihan tiga jenis tumbuhan tersebut diharapkan dapat memaksimalkan proses fitoremediasi logam berat merkuri pada lahan tercemar akibat pertambangan emas.

Tumbuhan dari kelompok *Cyperus kyllingia* dan tumbuhan *Lindernia crustacea* ditemukan tumbuh di lokasi terkontaminasi merkuri dari pertambangan milik rakyat. Kondisi tersebut dapat meningkatkan resistensi tumbuhan terhadap logam berat merkuri. *Vetiveria zizanioides* memiliki

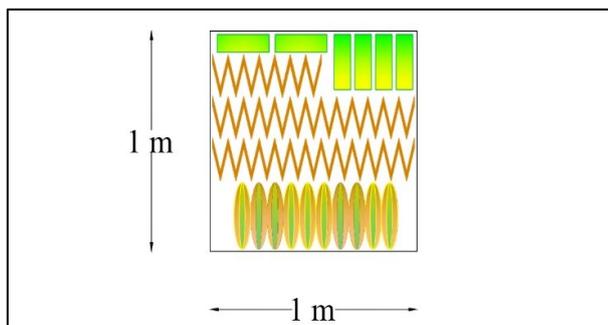
sistem perakaran yang besar dan pertumbuhan yang sangat cepat. Sistem akar yang dimiliki oleh jenis tumbuhan ini yaitu lurus ke bawah sehingga tidak ada bentuk persaingan dengan vegetasi di sekitarnya. Penelitian serupa juga menyebutkan bahwa tumbuhan *Vetiveria zizanioides* dan *Cyperus kyllingia* bersifat sinergis dalam meremediasi tanah tercemar logam berat merkuri. Akar wangi dapat tumbuh pada berbagai jenis tanah, seperti pasir hingga lempung berpasir serta dapat tumbuh pada tanah yang memiliki nilai pH pada kisaran 4 – 7,5. Selain itu, sistem perakaran yang dimiliki oleh akar wangi dapat mempertahankan air dan kelembaban pada rizosfer sehingga dapat terbentuk lingkungan yang menguntungkan bagi organisme rizosfer [10]. Berdasarkan sifat tersebut, maka jenis tumbuhan ini sesuai apabila diaplikasikan pada tanah di Kulon Progo yang memiliki sifat tanah tersebut.

Metode yang dipilih pada *enhanced phytoremediation* yaitu dengan penambahan PGPR. Jenis PGPR yang akan digunakan yaitu dari kelompok *Pseudomonas* sp. dan *Bacillus* sp. Pemilihan jenis bakteri tersebut didasari pada penelitian terdahulu dimana kedua jenis rizobakteri tersebut merupakan kelompok yang paling banyak ditemui hidup di area perakaran tumbuhan. Selain itu, penelitian terdahulu yang dilakukan di lahan terkontaminasi merkuri dari area bekas pertambangan Indonesia menyebutkan bahwa *Pseudomonas* sp. dan *Bacillus* sp. merupakan bakteri yang hidup di area tersebut. Penelitian lain menyebutkan bahwa bakteri yang secara alamiah hidup pada area terkontaminasi akan memiliki kecenderungan untuk bertahan hidup yang besar pada area terkontaminasi tersebut atau resistensi terhadap zat pencemar (logam berat) di sekitarnya. Selain dalam fungsi peningkatan pertumbuhan dari tumbuhan tersebut, kemampuan *Pseudomonas* sp. dan *Bacillus* sp. juga telah diteliti dapat mereduksi kandungan pencemar merkuri melalui enzim yang dihasilkan serta mekanisme metabolisemenya. Rizobakteri *Bacillus* juga telah diteliti terkait kemampuannya dalam menghasilkan enzim merkuri reduktase yang dapat mereduksi ion Hg^{2+} menjadi Hg^0 [11]. Penelitian lain juga menyebutkan bahwa bakteri *Pseudomonas* menghasilkan enzim yang mampu mereduksi merkuri pada suatu area terkontaminasi. Penelitian tersebut juga menyebutkan bahwa persentase removal yang mampu dihasilkan oleh bakteri *Pseudomonas* yaitu berkisar antara $82,24 \pm 2,15$ % hingga $89,96 \pm 0,02$ % [12].

Peran bakteri PGPR pada penerapan *enhanced phytoremediation* yaitu dengan meningkatkan fitoremediasi melalui penyerapan logam berat merkuri, mengurangi efek toksik, dan mengubah logam berat merkuri yang berada dalam bentuk beracun menjadi bentuk yang kurang beracun, serta meningkatkan pertumbuhan tumbuhan fitoremediasi. Pengaplikasian strain PGPR juga dapat meningkatkan pertumbuhan tumbuhan dan serapan N, P, dan K hingga mencapai 75% [13].

D. Penerapan Enhanced Phytoremediation

Luas lahan tercemar logam berat merkuri di daerah sangon, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo yang akan diterapkan proses *enhanced phytoremediation* yaitu sebesar 500 m^2 dengan kedalaman 60 cm. Berdasarkan perencanaan tersebut kemudian dihitung volume tanah yang akan diremediasi sebagai berikut.



Gambar 4. Sketsa Penanaman pada 1 m².

$$\begin{aligned} \text{Volume tanah tercemar merkuri} &= \text{Luas lahan} \times h \\ &= 500 \text{ m}^2 \times 0,6 \text{ m} \\ &= 300 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Kebutuhan jumlah tumbuhan dihitung dengan pendekatan terhadap kemampuannya dalam mengakumulasi logam berat merkuri pada bagian tubuhnya. Tumbuhan rumput teki mampu mengakumulasi logam berat merkuri hingga 122 mg/kg, akar wangi sebesar 88,9 mg/kg, dan kerak nasi sebesar 89 mg/kg. Perbandingan jumlah tumbuhan masing-masing yang akan digunakan yaitu; *Cyperus kyllingia* 50% : *Vetiveria zizanioides* L. 20% : *Lindernia crustacea* 30%.

Berdasarkan data dan perencanaan jumlah lahan yang akan ditanami tumbuhan fitoremediator tersebut, maka dapat diperkirakan jumlah tumbuhan yang dibutuhkan pada proses fitoremediasi. Perhitungan kebutuhan tumbuhan didasari dengan pendekatan kemampuan setiap jenis tumbuhan dalam satuan mg/kg dengan persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} N \text{ tumbuhan} &= \frac{\text{Konsentrasi Polutan}}{\text{Konsentrasi removal tumbuhan}} \times \frac{\text{Berat tanah tercemar}}{\text{satuan berat tanah}} \\ \text{Berat tanah tercemar} &= \text{Vol. tanah tercemar} \times \rho \text{ tanah} \\ &= 300 \text{ m}^3 \times 1.530 \text{ kg/m}^3 \\ &= 459.000 \text{ kg} \\ \text{Jumlah tumbuhan} &= \frac{22 \text{ mg/kg}}{122,5 \text{ mg/kg}} \times \frac{459.000 \text{ kg}}{\text{kg}} \times 50\% \\ &= 41.216,32 \text{ Rumput teki} \\ &\approx 41.217 \text{ Rumput teki} \end{aligned}$$

Dengan perhitungan yang sama, didapatkan jumlah kebutuhan tumbuhan akar wangi dan kerak nasi yaitu 22.718 dan 34.039. Skema penanaman dapat dilihat pada Gambar 4 dengan keterangan kotak warna hijau dan kuning adalah akar wangi, yang dibawahnya merupakan rumput teki, dan dibawahnya lagi adalah kerak nasi.

Kebutuhan jumlah bakteri yang digunakan pada proses *enhanced phytoremediation* dalam perhitungan ini didasari pada kajian literatur terdahulu terkait kemampuannya dalam meningkatkan pertumbuhan tumbuhan fitoremediator dan perannya yang membantu mereduksi pencemar logam berat merkuri pada tanah. Persentase inokulum yang akan digunakan yaitu 6%(v/v) dari kapasitas retensi tanah tercemar logam berat merkuri. Nilai tersebut didasari pada penelitian terdahulu terkait potensi bakteri dari kelompok *Pseudomonas* dengan 6% (v/b) pada bahan pembawa dengan populasi bakteri yaitu 10⁷ - 10⁸ CFU/gram [14]. Media yang akan digunakan sebagai media peremajaan bakteri pada perencanaan ini yaitu berupa *Nutrient Broth* (NB). Adapun nilai retensi tanah di lokasi studi kasus diperkirakan sama dengan nilai retensi tanah taman yaitu sebesar 0,33 mL/gram [15]. Maka berdasarkan informasi tersebut, dilakukan

perhitungan kebutuhan inokulum bakteri yang akan digunakan yaitu sebagai berikut

$$\begin{aligned} \text{Kapasitas retensi tanah} &= 0,33 \text{ mL/gram} \\ \text{Berat tanah} &= 459.000 \text{ kg} \\ \text{Volume media} &= 0,33 \text{ mL/gram} \times 459 \times 10^6 \text{ gram} \\ &= 151,47 \times 10^6 \text{ mL} \\ &= 151.470 \text{ L} \\ \text{Volume bakteri } 6\% \text{ v/v} &= 6\% \times 151.470 \text{ L} \\ &= 9.088,2 \text{ L} \end{aligned}$$

Kemudian dalam perencanaan *enhanced phytoremediation* ini, jumlah bakteri yang digunakan yaitu dengan perbandingan 1 : 1 antara *Pseudomonas* sp. dan *Bacillus* sp. Sehingga dengan perencanaan tersebut, jumlah inokulum masing-masing bakteri yang dibutuhkan masing-masing yaitu 4.544,1 L Inokulum.

Apabila dibandingkan dengan tanpa inokulan, potensi reduksi merkuri oleh *Pseudomonas* sp. dapat mencapai hingga sebesar 53,3%. Selain itu, dalam pengaplikasian tersebut, dilakukan penambahan pupuk NPK Phonska (15-15-15) dengan mengikuti dosis anjuran yaitu 300 kg/ha [14]. Dengan luas lahan yang akan diremediasi, kebutuhan pupuk yaitu 30 kg. Dalam hal ini, penambahan pupuk dilakukan untuk memenuhi kebutuhan nitrogen, fosfor, dan kalium serta nutrisi penting bagi bakteri PGPR yang digunakan [10]. Penambahan pupuk NPK Phonska 15-15-15 dapat diberikan kembali pada tujuh hari setelah tanam untuk memenuhi kebutuhan nutrisi tumbuhan dan bakteri PGPR [14].

E. Mekanisme yang Terjadi Selama Proses *Enhanced Phytoremediation*

Proses *enhanced phytoremediation* yang diterapkan pada lokasi studi kasus diawali dengan persiapan lahan serta tumbuhan yang akan digunakan (dapat dilakukan di dalam *polybag*). Penambahan bakteri PGPR dilakukan secara langsung di lahan terkontaminasi bersamaan dengan penambahan pupuk pada satu hari sebelum tanam. Selain itu, penambahan bakteri PGPR melalui proses penyiraman tumbuhan juga dapat dilakukan pada 30 hari setelah tanam. Kemudian proses *enhanced phytoremediation* dapat dilanjutkan dengan penanaman tumbuhan di lahan terkontaminasi. Terdapat tiga jenis tumbuhan yang dipilih untuk meremediasi lahan tercemar logam berat merkuri yaitu *Cyperus kyllingia* atau rumput teki, *Vetiveria zizanioides* L. atau akar wangi, dan *Lindernia crustacea* atau kerak nasi. Pengaplikasian 3 jenis tumbuhan atau mix plant diharapkan dapat memaksimalkan proses fitoremediasi terhadap pencemaran logam berat merkuri. Berdasarkan penelitian terdahulu sebagaimana telah disebutkan pada Tabel 4, ketiga jenis tumbuhan yang dipilih memiliki kemampuan untuk menyerap logam berat merkuri pada bagian akarnya dalam konsentrasi yang tinggi. Berdasarkan pernyataan tersebut, maka dalam proses *enhanced phytoremediation* ini telah terjadi mekanisme *phytofiltration* dan *phytostabilization*. Selain itu, ketiga jenis tumbuhan ini juga mampu mentranslokasikan zat pencemar yang telah diserap oleh akar menuju tajuk tumbuhan seperti daun dan pucuk tumbuhan dalam konsentrasi yang tinggi. Beberapa penelitian juga mendapatkan nilai konsentrasi merkuri di pucuk lebih besar dari pada konsentrasi merkuri di akar. Maka berdasarkan kondisi tersebut, ketiga jenis tumbuhan ini telah menerapkan mekanisme *phytoaccumulation* atau *phytodegradation*.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut: (1) Karakteristik tanah tercemar logam berat merkuri secara fisik dan kimia yaitu berwarna kuning hingga kecoklatan, memiliki nilai pH tanah asam hingga basa yaitu 4,6 – 8,02, memiliki kandungan C dan N yang rendah hingga sangat rendah 0,22% - 1,34% untuk C, dan 0,001% - 0,23%, memiliki kandungan merkuri yang tinggi yaitu dapat mencapai 598,14 mg/kg, memiliki kadar air yang rendah yaitu 13,24%, memiliki struktur tanah lanau dan berpasir atau lempung berpasir. (2) Penyisihan pencemar logam berat merkuri pada tanah dengan fitoremediasi menggunakan tumbuhan hiperakumulator melalui proses *enhanced phytoremediation* telah banyak dilakukan di berbagai negara baik negara maju dan berkembang. Efisiensi pada proses *enhanced phytoremediation* akan meningkat karena adanya penambahan bakteri PGPR yang mempunyai potensi untuk mereduksi Hg. Selain itu, bakteri PGPR juga mampu meningkatkan pertumbuhan dari tumbuhan dan ketahanan terhadap patogen. Bakteri PGPR yang mempunyai potensi tersebut yaitu seperti; *Pseudomonas* sp. dan *Bacillus* sp. Berbagai spesies tumbuhan telah dideteksi sebagai tumbuhan hiperakumulator Hg, yaitu; *Cyperus kyllingia* – Rumput Teki, *Jatropha curcas* L. - Jarak Pagar, *Arabidopsis thaliana*, *Nicotiana tabacum*, *Paspalum conjugatum*, *Caladium* sp., *Brassica napus*, *Brassica juncea* - Indian mustard, *Vetiveria zizanioides* L., *Lindernia crustacea*, *Digitaria radicata*, dan *Celosia plumosa*. (3) Penerapan *enhanced phytoremediation* di lahan tercemar Hg di Kulon Progo dilakukan dengan menggunakan bakteri PGPR terpilih yaitu *Pseudomonas* sp. dan *Bacillus* sp. serta tumbuhan terpilih yaitu *Cyperus kyllingia* atau Rumput teki, *Vetiveria zizanioides* L. atau Akar wangi, dan *Lindernia crustacea* atau Kerak nasi pada luas lahan 500 m² dengan kedalaman 0,6 m. Tumbuhan ditanam secara campuran dengan jumlah tumbuhan yang diperlukan berturut-turut yaitu 41.217 Rumput teki, 22.718 Akar wangi, dan 34.039 Kerak nasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Hidayati, "Fitoremediasi dan potensi tumbuhan hiperakumulator," *Hayati*, vol. 12, no. 1, pp. 35–40, 2005.

- [2] C. F. Onggi, L. Boekoesoe, and S. Kadir, "Fitoremediasi menggunakan tanaman Jarak Pagar (*Jatropha curcas* L) pada tanah tercemar merkuri (hg) di wilayah pertambangan tradisional," *Fak. Ilmu-Ilmu Kesehatan dan Keolahragaan, Univ. Negeri Gorontalo*, pp. 1–10, 2015.
- [3] W. Widowati, *Efek Toksik Logam: Pencegahan dan Penanggulangan Pencemaran*. Yogyakarta: ANDI, 2008.
- [4] A. Ekawanti, D. Irawati, I. A. Lestarini, and N. A. Putra, "Pemeriksaan kadar hemoglobin ibu hamil di daerah lingkaran tambang emas Kecamatan Sekotong," *J. PEPADU*, vol. 2, no. 1, pp. 6–9, 2021.
- [5] T. T. Kalimantanoro, "Stabilisasi/Solidifikasi Tailing Tambang Emas Rakyat Kulon Progo Menggunakan Semen Portland dan Tanah Tras," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2016.
- [6] B. T. Setiabudi, "Penyebaran merkuri akibat usaha pertambangan emas di Daerah Sangon, Kabupaten Kulon Progo, D.I. Yogyakarta," *Kolok. Has. Lapangan SUBDIT Konserv.*, 2005.
- [7] Kementerian Pekerjaan Umum, "Bab IV Profil Kabupaten Kulon Progo - Rencana Terpadu & Program Investasi Infrastruktur Jangka Menengah Bidang Cipta Karya," in *RPI2-JM Kabupaten Kulon Progo Tahun 2015-2019*, Kulon Progo: Direktorat Jenderal Cipta Karya Kementerian Pekerjaan Umum, 2014, pp. IV-1-IV–20.
- [8] Z. A. Banunaek, "Pencemaran Merkuri di Lahan Pertambangan Emas Rakyat dan Strategi Pengendaliannya," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2016.
- [9] E. D. K. P. Anisa, "Stabilisasi/solidifikasi tanah tercemar merkuri tambang emas rakyat Kulon Progo Yogyakarta menggunakan campuran semen portland dan tanah tras," *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 2, 2016, doi: 10.12962/j23373539.v5i2.17208.
- [10] A. Y. Winata, "Fitoremediasi Tanah Tercemar Pelumas Bekas menggunakan Akar Wangi (*Vetiveria zizanioides*)," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018.
- [11] E. Zulaika, U. Sholikah, and Y. A. Prasetya, "Potensi bakteri *Bacillus* sebagai agensia bioremediasi limbah," *Semin. Pemetaan Potensi dan Inov. Ilmu Pengetahuan, Teknol. Seni dan Budaya Jatim, Ristek-ITS*, pp. 1–6, 2012.
- [12] P. Giovanella, L. Cabral, F. M. Bento, C. Gianello, and F. A. O. Camargo, "Mercury (II) removal by resistant bacterial isolates and mercuric (II) reductase activity in a new strain of *Pseudomonas* sp. B50A," *N. Biotechnol.*, vol. 33, no. 1, pp. 216–223, 2016, doi: 10.1016/j.nbt.2015.05.006.
- [13] M. A. Altaf, R. Shahid, A. Qadir, S. Naz, and M. Ren, "Potential role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) to reduce potential role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) to reduce chemical fertilizer in horticultural crops," *Int. J. Res. Agric. For.*, vol. 6, no. 5, pp. 21–30, 2019.
- [14] L. P. Santi and D. H. Geonadi, "Potensi *Pseudomonas fluorescens* strain KTSS untuk bioremediasi merkuri di dalam tanah," *Menara Perkeb.*, vol. 77, no. 2, pp. 110–124, 2009.
- [15] A. Obenu, "Fitoremediasi Tanah Tercemar Aluminium menggunakan *Scirpus Grossus*, *Typha Angustifolia* dan Bioaugmentasi *Vibrio Alginolyticus*," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2019.