

Kajian Fikoremediasi pada Air Tanah Tercemar Timbal dan Kadmium di Sekitar TPA Wukirsari, Gunungkidul

Dinda Fadhila dan Ipung Fitri Purwanti

Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: purwanti@enviro.its.ac.id

Abstrak—Kehadiran TPA sering kali berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan seperti pencemaran air tanah yang disebabkan oleh lindi. Lindi dapat mengandung logam berat seperti timbal dan kadmium. Fikoremediasi menggunakan mikroalga menjadi salah satu alternatif untuk mengatasi pencemaran air tanah karena dinilai lebih sederhana, mudah diaplikasikan, dan tidak memberikan dampak negatif pada lingkungan dibandingkan metode remediasi secara fisik dan kimia. Studi ini mengkaji literatur yang membahas pencemaran timbal dan kadmium pada air tanah, pemanfaatan mikroalga dalam fikoremediasi, dan kemampuan *Spirulina platensis* dalam menyisihkan logam berat untuk pencemaran air tanah di TPA Wukirsari, Gunungkidul. Hasil kajian menunjukkan bahwa mikroalga memiliki enzim pada permukaan sel yang mampu mengikat logam berat. Penambahan *Spirulina platensis* pada air tanah tercemar di sekitar TPA Wukirsari menyebabkan konsentrasi timbal dan kadmium berkurang masing-masing sebesar 90% dan 85%.

Kata Kunci—Air Tanah, Fikoremediasi, Kadmium, *Spirulina platensis*, Timbal.

I. PENDAHULUAN

TEMPAT Pemrosesan Akhir (TPA) merupakan ujung rantai dalam pengelolaan sampah di Indonesia. Ribuan ton sampah masuk ke TPA setiap harinya. Kehadiran TPA sering kali menuai konflik dengan masyarakat sekitar. Permasalahan yang sering terjadi yaitu kehadiran TPA berpotensi mencemari lingkungan sehingga dapat membahayakan kesehatan dan keselamatan masyarakat yang tinggal di sekitarnya.

Secara alami, sampah akan mengalami proses dekomposisi yang menghasilkan produk sampingan berupa lindi. Lindi merupakan cairan yang timbul akibat masuknya air dari luar ke dalam timbunan sampah, melarutkan dan membilas materi-materi terlarut, termasuk materi organik hasil proses dekomposisi secara biologi [1]. Lindi dapat merembes masuk ke dalam tanah mengikuti pola aliran air tanah dan bercampur dengan air tanah sampai pada jarak 200 meter [2]. Lindi mengandung banyak senyawa organik, anorganik, hingga logam berat yang bersifat toksik bagi makhluk hidup [3]. Hal ini disebabkan sampah yang dibuang ke TPA telah bercampur menjadi satu, termasuk barang-barang elektronik, bekas baterai, kemasan-kemasan cat, dan lain-lain. Kondisi tersebut mempengaruhi komposisi zat yang terdapat dalam lindi.

Tercemarnya air tanah oleh lindi yang mengandung logam berat tentu mengkhawatirkan. Pencemaran ini dapat menyebar hingga ke sumur-sumur masyarakat. Padahal di beberapa daerah, masyarakat masih menggunakan air sumur untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari seperti mandi serta mencuci bahan pangan, peralatan makan, dan pakaian. Penggunaan air sumur yang tercemar logam berat dapat

membahayakan kesehatan. Jika tidak segera ditangani dengan tepat, tentu dapat memberikan efek buruk jangka panjang bagi masyarakat yang tinggal di sekitar TPA.

Logam berat bersifat *nonbiodegradable* sehingga proses degradasi dan reduksinya tidak semudah mendegradasi limbah organik [4]. Metode remediasi secara fisik kimia mempunyai beberapa kekurangan, seperti biaya instalasi dan operasional yang tinggi, membutuhkan bahan kimia, dan menghasilkan lumpur pada akhir pengolahan yang membutuhkan pengolahan lebih lanjut [5]. Metode lainnya yang bisa dilakukan untuk mengatasi pencemaran air tanah yaitu fikoremediasi. Fikoremediasi merupakan teknik remediasi dengan menggunakan makroalga maupun mikroalga [6]. Fikoremediasi yang merupakan alternatif dari bioremediasi dinilai sebagai teknik yang sederhana karena tidak memerlukan teknologi tinggi, biaya yang relatif lebih rendah, mempunyai efisiensi yang tinggi, dan tentunya lebih ramah lingkungan dibandingkan teknik remediasi lainnya [7]. Kajian ini disusun untuk mengkaji pencemaran timbal dan kadmium pada air tanah yang disebabkan oleh lindi TPA. Hasil kajian digunakan untuk menganalisis dan menentukan alternatif fikoremediasi yang tepat untuk pencemaran air tanah di TPA Wukirsari.

II. METODE KAJIAN

Metode yang digunakan pada kajian ini yaitu mengkaji berbagai literatur yang berkaitan dengan pencemaran logam berat pada air tanah dan fikoremediasi. Literatur yang digunakan berupa jurnal nasional maupun internasional, buku teks, peraturan perundang-undangan, laporan penelitian, makalah seminar, hingga *website* resmi. Literatur-literatur tersebut digunakan untuk menganalisis studi kasus pencemaran air tanah yang terjadi di TPA Wukirsari, Gunungkidul.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Air Tanah

Air tanah merupakan air yang menempati pori-pori batuan di bawah permukaan tanah pada zona jenuh air. Air tanah menjadi salah satu sumber air yang potensial guna memenuhi kebutuhan manusia. Secara kualitas fisik, air tanah yang layak digunakan yaitu air yang tidak berbau, tidak berwarna, tidak berasa, tidak keruh, dan memiliki suhu air di bawah suhu udara sekitarnya. Kondisi dan posisi akuifer mempengaruhi bagus tidaknya kualitas air tanah. Akuifer merupakan suatu lapisan batuan atau formasi geologi yang mempunyai struktur yang memungkinkan air untuk masuk dan bergerak melaluinya dalam kondisi normal. Kualitas air

tanah juga dipengaruhi oleh iklim, kondisi geologi, geomorfologi, serta aktivitas manusia [8].

B. Timbal

Timbal merupakan unsur logam yang tergolong ke dalam golongan IVA, memiliki warna abu-abu kebiruan, kerapatan yang tinggi, massa atom 207,2 sma, nomor atom 82, dengan titik lebur 326,85°C dan titik didih 1749,85°C. Timbal biasa digunakan pada industri pengolahan logam, kertas, baterai, elektronik, dan sebagainya. Timbal memiliki sifat-sifat khusus sebagai berikut:

1. Merupakan logam yang lunak sehingga dapat dibentuk dengan mudah.
2. Tahan terhadap peristiwa korosi atau karat, sehingga sering digunakan sebagai bahan *coating*.
3. Mempunyai titik lebur rendah yaitu 326,85°C.
4. Mempunyai kerapatan yang lebih besar dibandingkan dengan logam-logam lain, kecuali emas dan merkuri.
5. Merupakan penghantar listrik yang tidak baik.

Konsentrasi timbal pada lindi dihasilkan dari sampah baterai timbal, pipa, dan cat yang dibuang ke TPA. Kondisi ini berpotensi meningkatkan konsentrasi timbal di dalam air tanah jika terjadi pencemaran [9]. Dalam Peraturan Menteri Kesehatan No. 32 Tahun 2017, kadar maksimum timbal yang diperbolehkan dalam air yang digunakan untuk keperluan higiene sanitasi yaitu 0,05 mg/L [10]. Keberadaan timbal yang berlebihan pada tubuh organisme dapat menyebabkan kerusakan pada sistem saraf, hematologi, *hematotoksis*, dan mempengaruhi kerja ginjal [11].

C. Kadmium

Kadmium merupakan logam berwarna putih perak, lunak, mengkilap, memiliki nomor atom 40, berat atom 112,4, titik leleh 312°C, titik didih 767°C, massa jenis 8,65 g/cm³, dan membentuk Cd²⁺ yang bersifat tidak stabil [12]. Kadmium digunakan dalam pertambangan, operasi metalurgi, industri *elektroplating*, pembuatan plastik vinil, dan sebagai pigmen dalam produksi cat [13]. Beberapa sifat khusus yang dimiliki oleh kadmium yaitu:

1. Tahan terhadap korosi.
2. Dalam bentuk logam, bersifat tidak larut dalam air dan tidak mudah terbakar.
3. Dalam bentuk serbuk, bersifat dapat larut dalam air dan dapat terbakar.

Sumber umum pencemaran kadmium berasal dari buangan alat elektronik, baterai, korosi pipa-pipa air, dan air limpasan dari tanah pertanian yang terkena dampak pupuk fosfat yang mengandung kadmium [14]. Dalam Peraturan Menteri Kesehatan No. 32 Tahun 2017, kadar maksimum kadmium yang diperbolehkan dalam air yang digunakan untuk keperluan higiene sanitasi yaitu 0,005 mg/L [10]. Keberadaan kadmium pada air tanah dapat mengakibatkan gangguan pada kulit, seperti kulit menjadi bersisik, kering, dan gatal [15]. Keracunan kadmium menyebabkan gangguan tubuh yang akut dan kronis seperti kerusakan ginjal, emfisema, hipertensi, atrofi, kerusakan paru-paru dan hati serta bersifat karsinogenik [16].

D. Pencemaran Logam Berat pada Air Tanah

Pencemaran air adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi dan atau komponen lain ke dalam

air oleh kegiatan manusia, sehingga kualitas air turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan air tidak dapat berfungsi sesuai dengan peruntukannya [17]. Tingkat pencemaran air tanah di tiap tempat bergantung pada tingkat kerentanan air tanah terhadap kontaminasi [18]. Rujukan oleh Sugianti, dkk., menyebutkan ada tujuh faktor yang mempengaruhi tingkat kerentanan air tanah terhadap pencemaran, yaitu [19]:

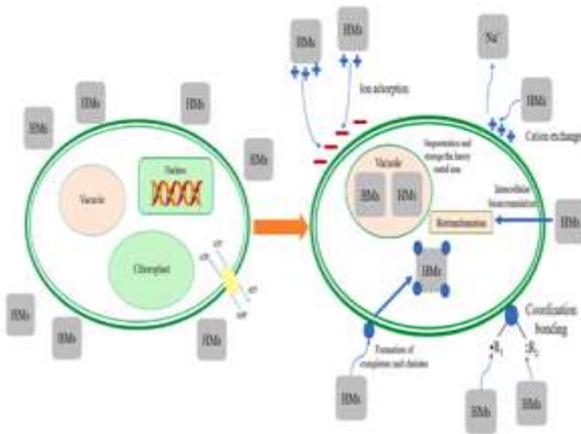
1. Kedalaman permukaan air tanah mencerminkan tebal lapisan tanah/batuan di atas permukaan air tanah.
2. Curah hujan berkaitan dengan besaran air hujan yang dapat melarutkan serta membawa bahan pencemar.
3. Jenis akuifer berperan dalam mengontrol pergerakan bahan pencemar di dalam lapisan jenuh air. Hal ini dipengaruhi oleh tekstur dan komposisi mineral lapisan akuifer.
4. Tekstur tanah merupakan kemampuan tanah untuk menyerap bahan pencemar. Tekstur tanah pasir memiliki daya resap air hujan lebih cepat dibandingkan tanah lempung sehingga lebih rentan terhadap pencemaran.
5. Kemiringan lereng berkaitan dengan kesempatan air hujan untuk meresap ke dalam tanah. Semakin landai lereng semakin banyak air yang dapat meresap, sehingga mempertinggi kemampuan untuk mengangkut bahan pencemar ke dalam tanah.
6. Jenis zona tak jenuh berperan dalam mengontrol pergerakan bahan pencemar di dalam zona tak jenuh.
7. Konduktivitas hidrolik akuifer berkaitan dengan kecepatan aliran air tanah untuk memperluas pencemaran di dalam akuifer.

TPA dengan sistem pembuangan secara terbuka (*open dumping*) lebih berpotensi menghasilkan produk sampingan berupa lindi. Air hujan yang jatuh di atas tumpukan sampah akan menghasilkan lindi. Kemudian lindi akan merembes ke dalam tanah yang kemudian menyebar mengikuti aliran air tanah [20]. Logam berat yang terkandung dalam lindi akan ikut terbawa masuk ke dalam aliran air tanah. Konsentrasi logam berat dalam air tanah relatif rendah, namun kondisi ini tetap harus menjadi perhatian karena logam berat sukar diuraikan dan bersifat akumulatif. Seiring berjalannya waktu, logam berat akan terakumulasi dalam air tanah sehingga konsentrasinya semakin meningkat [15].

E. Mikroalga sebagai Fikoremediator

Pemanfaatan alga baik itu makroalga maupun mikroalga untuk proses remediasi lingkungan disebut fikoremediasi [21]. Proses ini memanfaatkan kemampuan alga untuk menghilangkan polutan dari lingkungan atau mengubahnya menjadi bentuk yang tidak beracun. Proses fikoremediasi sangat bergantung pada pertumbuhan dan aktivitas alga sebagai fikoremediator.

Mikroalga merupakan alga mikroskopis yang biasa ditemukan di air tawar maupun air laut. Mikroalga termasuk organisme uniseluler dan multiseluler sederhana yang memiliki ukuran bervariasi dari mulai beberapa mikrometer hingga beberapa ratus mikrometer. Mikroalga dapat tumbuh dengan mudah asalkan kebutuhan nutrisi dasarnya seperti air, garam mineral, dan cahaya tercukupi. Mikroalga juga mampu tumbuh di media cair, termasuk air limbah [22]. Hal inilah yang mendasari mikroalga dapat digunakan sebagai fikoremediator.



Gambar 1. Mekanisme Penyisihan Logam Berat Melalui Dinding Sel pada Mikroalga.



Gambar 2. Trikhoma dari *Spirulina Plantensis*.

Menurut rujukan Adams, Anyanwu, Kawaro, dan Gultom, faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan mikroalga yaitu [23–26]:

1) Cahaya

Mikroalga membutuhkan cahaya sebagai sumber energi untuk proses fotosintesis. Intensitas cahaya yang dibutuhkan oleh tiap alga berbeda-beda bergantung pada volume kultivasi dan densitas mikroalga. Semakin tinggi densitas dan volume kultivasi, maka semakin tinggi pula intensitas cahaya yang diperlukan [26].

2) Nutrien

Nutrien diperlukan oleh mikroalga untuk melakukan pertumbuhan dan pembelahan sel. Nutrien yang paling dibutuhkan untuk pertumbuhan mikroalga yaitu karbon, nitrogen, dan fosfor. Sumber nutrien untuk alga harus berdasarkan rasio tertentu. Rasio N:P:C yang paling cocok untuk alga adalah 16:106:1. Jika mikroalga mengalami kekurangan sumber nutrien, maka hal tersebut dapat mempengaruhi penurunan kandungan protein, pigmen fotosintesis, dan kandungan produk karbohidrat serta lemak.

3) Suhu

Suhu merupakan faktor lingkungan yang dapat mempengaruhi pertumbuhan alga dalam hal laju reaksi kimia, tingkat difusi dalam air, difusi dan transportasi melalui membran, transportasi elektron, serta fotosintesis dan

aktivitas enzim. Semua hal tersebut mempengaruhi populasi mikroalga. Maka dari itu suhu pada tempat tumbuh harus dalam kondisi yang tepat untuk mendukung kehidupan mikroalga. Suhu optimal untuk kultivasi mikroalga berada pada rentang 24-30°C.

4) Salinitas

Salinitas merupakan faktor yang mempengaruhi kemampuan organisme air dalam mempertahankan tekanan osmotik yang baik antara protoplasma organisme dengan air sebagai lingkungan hidupnya. Selain itu, pertumbuhan dan produktivitas biomassa dan lipid juga dipengaruhi oleh salinitas.

5) CO₂

Pada proses metabolismenya, CO₂ yang dibutuhkan oleh mikroalga akan diubah menjadi biomassa [26]. Beberapa jenis mikroalga dapat tumbuh lebih cepat pada konsentrasi CO₂ yang tinggi. Maka dari itu kadang kala diperlukan penambahan CO₂ murni ke dalam media pertumbuhan mikroalga.

6) pH

pH mempengaruhi berbagai parameter seperti akumulasi lipid dalam produksi mikroalga, distribusi CO₂, ketersediaan karbon, serta ketersediaan logam dan nutrisi lainnya. Mikroalga secara spesifik akan tumbuh pada kisaran pH tertentu. Perubahan pH akibat kontaminasi pencemar pada suatu lingkungan akan menyebabkan laju degradasi mikroalga menjadi lambat atau bahkan tidak terjadi sama sekali.

Mikroalga sangat sensitif terhadap konsentrasi logam berat. Logam berat dapat merangsang mikroalga untuk mensintesis protein pengikat logam berat seperti *metallothionein* dan fitokelatin, lalu mengubah ion logam berbahaya menjadi bentuk ikatan protein yang tidak beracun. Inilah alasan mengapa mikroalga dapat mentolerir logam berat [27]. Mikroalga juga memiliki luas permukaan sel yang besar dan dapat dengan cepat dan efisien menyerap logam berat.

Penyisihan logam berat oleh mikroalga terjadi melalui proses *biosorpsi* yang mencakup dua langkah, lihat Gambar 1. Pertama berbagai bentuk logam yang berbeda segera bermuatan negatif melalui interaksi elektrostatis dan kemudian *diabsorpsi* pada permukaan sel mikroalga. Dinding sel mikroalga memiliki luas permukaan besar yang dibentuk oleh kombinasi berbagai serat mikroba multilevel, seperti amonium alginat, pektin, polisakarida, dan berbagai semikonduktor terkonsentrasi (laktosa). Kompleks glial pada dinding sel terdiri dari makromolekul, yang menyediakan seluruh sel dengan beberapa kelompok fungsional utama yang dapat berinteraksi dengan berbagai logam dan kation. Kelompok-kelompok ini dengan cepat dihidrolisis pada suhu tertentu dan melepaskan ion dan kation, sehingga memungkinkan sel alga untuk mengisi dan secara efisien menyerap ion logam berat di dalam air. Selanjutnya logam berat akan bereaksi dengan kelompok pada permukaan sel alga atau enzim pengikat pada permukaan membran plasma sel alga untuk membentuk kompleks, kristal, atau endapan sel, yang kemudian ditransfer ke bagian dalam sel alga melalui transportasi aktif dan akhirnya mengikat ke bagian pengikatan internal protein intraseluler dan peptida [28].



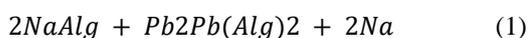
Gambar 3. Lokasi TPA Wukirsari.

F. Penurunan Konsentrasi Timbal dan Kadmium dengan Fikoremediasi oleh *Spirulina platensis*

Spirulina platensis merupakan mikroalga multiseluler yang berasal dari golongan *Cyanobacterium*. Gambar *S. platensis* dapat dilihat pada Gambar 2. Secara alami mikroalga ini dapat hidup di perairan tawar hingga perairan dengan tingkat salinitas yang tinggi. *S. platensis* memiliki ciri-ciri morfologis yaitu berbentuk filamen yang tersusun atas sel-sel berbentuk silindris tanpa sekat pemisah, tidak bercabang dengan trikhoma (benang), berpilin, dan berwarna hijau kebiruan. Diameter selnya sekitar 1-3µm pada jenis yang lebih kecil dan berukuran sekitar 3-12 µm pada jenis yang lebih besar. Jika diamati di bawah mikroskop, *S. platensis* memiliki 4 lapisan dinding sel yaitu lapisan eksternal, lilitan lapisan protein fibril sepanjang trikhoma, lapisan peptidoglikan, dan selaput lendir dinding sel [29].

Spirulina sp. dapat tumbuh dengan baik pada intensitas cahaya 4.500-7.098 lux, tingkat salinitas hingga 85 g/L, pH pada rentang 6,8-8,7 dan suhu pada rentang 35-40°C [30-33]. Mikroalga jenis ini mudah ditemukan di perairan secara alami maupun sudah banyak tersedia secara komersil. *S. platensis* dipilih sebagai fikoremediator karena mampu mengikat logam berat pada ion Cr³⁺, Cu²⁺, Cd²⁺, dan Pb²⁺ [21]. Selain itu, *S. platensis* memiliki tingkat toleransi yang tinggi terhadap konsentrasi logam berat dibanding dengan pengujian terhadap mikroalga lainnya. Hasil pengujian menunjukkan pada hari ke-15 *S. platensis* mampu menurunkan konsentrasi Pb sebesar 90% dan Cd 85% pada konsentrasi masing-masing pencemar 1 mg/L. Pada konsentrasi pengujian yang sama, persen penurunan konsentrasi logam berat *Chlorella vulgaris* hanya sebesar 80% untuk Pb dan 79% untuk Cd [34].

Saat berinteraksi dengan logam berat, *S. platensis* dapat menyerap logam berat dari media cair dan mengakumulasi ke dalam selnya. Menurut rujukan Siswoyo, dkk, mekanisme yang terjadi dapat dilihat pada Persamaan 1 berikut ini [35]:



Dinding sel mikroalga tersusun dari polisakarida, salah satunya yaitu alginat yang dapat berikatan secara ionik dengan logam berat. Berdasarkan reaksi di atas, polisakarida

Tabel 1. Hasil Pengukuran Pb dan Cd pada Sumur Warga di TPA Wukirsari

No. Titik	Lokasi sampel	Jarak dengan sumber pencemar (m)	Mei 2015		September 2015	
			Pb (mg/L)	Cd (mg/L)	Pb (mg/L)	Cd (mg/L)
4	Sumur warga 1	300	0,52	0,02	0,04	0,02
6	Sumur warga 2	400	0,53	0,03	0,06	0,003
9	Sumur warga 4	750	-	-	0,05	0,003
10	Sumur warga 5	830	0,53	0,03	0,04	0,001
8	Sumur warga 3	900	0,52	0,02	0,01	0,001

berupa senyawa alginat yang menyusun dinding sel *S. platensis* akan berikatan dengan logam berat Pb. Kemudian *S. platensis* akan melepaskan anion dari permukaan selnya ke lingkungan. Logam berat yang telah terikat selanjutnya akan diserap ke dalam intraseluler *S. platensis*.

G. Penerapan Penyisihan Timbal dan Kadmium pada Air Tanah di Sekitar TPA Wukirsari, Gunungkidul

TPA Wukirsari berlokasi di Desa Baleharjo, Kecamatan Wonosari, Kabupaten Gunungkidul, Yogyakarta. Letak TPA Wukirsari dapat dilihat pada Gambar 3. Pembangunan TPA Wukirsari dilakukan sejak tahun 1998 dan mulai beroperasi pada tahun 2005 dengan luas awal 2,5 hektar dan kapasitas sekitar 25.000 m³ sampah. Sampai pada tahun 2016, total luas TPA Wukirsari mencapai 9,8 hektar.

Beberapa sumur warga di sekitar TPA Wukirsari diketahui tercemar logam berat Pb dan Cd [35]. Pencemaran tersebut diperkirakan karena tercemar oleh lindi yang dihasilkan TPA. Keberadaan logam berat dalam sumur warga ini berpotensi memberikan efek negatif. Selain untuk kebutuhan sehari-hari seperti memasak, mencuci, dan mandi, warga juga menggunakan air tanah untuk kegiatan pertanian dan peternakan ayam potong. Logam terakumulasi dalam tanaman maupun daging ayam potong, yang jika masuk ke dalam tubuh manusia dapat menyebabkan penyakit berbahaya.

TPA Wukirsari beroperasi dengan sistem *controlled landfill*. Namun sistem tersebut belum berjalan dengan maksimal karena ketersediaan tanah penutup yang terbatas sehingga pengurangan sampah tidak dilakukan setiap hari. Air hujan berpotensi masuk ke dalam timbunan sampah yang terbuka. Rujukan oleh Negara, N., memaparkan bahwa pada musim hujan produksi lindi meningkat sehingga proses yang dilakukan di unit pengolahan lindi berlangsung lebih cepat [36]. Akibatnya keluaran lindi menjadi lebih banyak. Hal ini terjadi di TPA Wukirsari dimana lindi keluar dari tanggul.

Pengujian dilakukan pada 5 sumur warga di sekitar TPA Wukirsari dengan jarak 0-900 meter dari sumber pencemar [35]. Lokasi sumur warga dapat dilihat pada Gambar 4. Penelitian dilakukan pada musim kemarau, yaitu bulan Mei 2015 dan musim penghujan, yaitu bulan September 2015 untuk mencerminkan kondisi sekitar pada kedua musim tersebut. Hasil pengukuran logam berat Pb dan Cd pada air

**PETA PENYEBARAN LOGAM TIMBAL (Pb) DAN KADMIUM (Cd)
DISEKITAR KAWASAN TPA WUKIRSARI GUNUNGGKIDUL
PADA BULAN SEPTEMBER**



Gambar 4. Peta Sebaran Lokasi Sumur Warga yang Tercemar Timbal dan Kadmium di sekitar TPA Wukirsari.

tanah di sekitar TPA Wukirsari dapat dilihat pada Tabel 1 berikut ini.

Menurut Permenkes No. 32 Tahun 2017, baku mutu Pb dan Cd dalam air tanah yaitu 0,05 mg/L dan 0,005 mg/L [10]. Berdasarkan data pada Tabel 1, dapat dilihat pada bulan Mei 2015 konsentrasi Pb di sumur warga 1, 2, 3, dan 5 melebihi baku mutu yaitu masing-masing sebesar 0,52 mg/L, 0,53 mg/L, 0,52 mg/L, dan 0,53 mg/L. Sedangkan pada bulan September 2015 hanya air di sumur warga 2 yang melebihi baku mutu yaitu sebesar 0,06 mg/L. Pada bulan Mei 2015, konsentrasi Cd di sumur warga 2 melebihi baku mutu yaitu sebesar 0,06 mg/L. Sedangkan pada bulan September 2015, hanya air di sumur warga 1 yang melebihi baku mutu yaitu sebesar 0,02 mg/L.

Pada studi kasus ini, metode fikoremediasi yang diusulkan yaitu dengan menggunakan mikroalga *Spirulina platensis*. Proses remediasi dilakukan dengan menambahkan mikroalga ke dalam air tanah yang tercemar logam berat Pb dan Cd. Cara penambahan mikroalga pada air tercemar dilakukan dengan memompa air sumur dan menampungnya dalam sebuah reaktor. Kemudian inokulan mikroalga ditambahkan ke dalam air. Persentase penyisihan oleh *S. platensis* diasumsikan berdasarkan rujukan Soeprbowati dkk, karena konsentrasi logam berat yang diujikan mendekati studi kasus di TPA Wukirsari. Efisiensi penyisihan logam berat oleh *S. platensis* dapat dilihat pada Tabel 2 [37].

Konsentrasi Pb dan Cd yang digunakan dalam pembahasan ini merupakan konsentrasi tertinggi, yaitu konsentrasi Pb dan Cd pada sumur warga 5 saat musim kemarau, tepatnya pada bulan Mei 2015. Konsentrasi Pb awal yaitu 0,53 mg/L. Dengan penambahan *S. platensis* terjadi penyisihan Pb sebesar 90% sehingga konsentrasi Pb menjadi 0,053 mg/L. Angka ini sudah memenuhi baku mutu Pb untuk air tanah menurut Permenkes No. 32 Tahun 2017 yaitu 0,05 mg/L.

Konsentrasi Cd awal yaitu 0,03 mg/L. Dengan penambahan *S. platensis* terjadi penyisihan Cd sebesar 85% sehingga konsentrasi Cd menjadi 0,0045 mg/L. Angka ini sudah memenuhi baku mutu Cd untuk air tanah menurut Permenkes No. 32 Tahun 2017 yaitu 0,005 mg/L.

Diasumsikan kebutuhan air bersih untuk individu di satu rumah sebesar 120 L/orang/hari. Jumlah anggota keluarga sebanyak 5 orang dalam 1 KK. Maka total kebutuhan air bersih dalam satu hari sebesar 600 L/hari. Angka ini merupakan debit air tanah yang akan diolah setiap hari. Lalu dapat dihitung neraca massa dalam unit pengolahannya, seperti tercantum pada Tabel 3.

Berdasarkan rujukan Soeprbowati, *S. platensis* akan mencapai kemampuan degradasi logam berat yang optimum pada hari ke-15 [37]. Kapasitas reaktor direncanakan dapat memenuhi kebutuhan air bersih 1 KK dalam 15 hari. Maka total kebutuhan air bersih untuk 15 hari yaitu 9000 L atau 9 m³. Angka ini diperoleh dari total kebutuhan air bersih dalam satu hari dikalikan 15 hari.

Sebanyak 100 mL bibit *S. platensis* diinokulasikan ke dalam 1000 mL media. Media yang digunakan yaitu air laut dengan tambahan pupuk Walne sebagai tambahan nutrisi bagi mikroalga [37]. Kerapatan sel dari *S. platensis* yang ditambahkan yaitu 10.000 sel/mL. Untuk menghitung inokulan *S. platensis* yang dibutuhkan, dapat digunakan perbandingan antara bibit *S. platensis* dengan media cairnya. Sehingga untuk 9 m³ air dibutuhkan inokulan *S. platensis* sebanyak 0,9 m³. Dengan kerapatan sel sebesar 10.000 sel/mL, maka total sel *S. platensis* yang dimasukkan sebanyak 9×10^9 sel.

Diasumsikan $t_d = 15$ hari dan kedalaman reaktor = 1,5 m, maka volume reaktor diperoleh dari total air sumur yang diolah (9 m³) ditambah dengan total inokulan *S. platensis* (0,9 m³). Sehingga volume reaktor sebesar 9,9 m. Luas permukaan

Tabel 2.
Efisiensi Penyisihan Pb dan Cd

Zat pencemar	Persentase penyisihan (%)	Konsentrasi awal (mg/L)	Konsentrasi akhir (mg/L)
Pb	90	0,53	0,053
Cd	85	0,03	0,0045

Tabel 3.
Perhitungan Neraca Massa

Para meter	Debit air (L/hari)	Persentase removal (%)	Influen (kg/hari)	Removed (kg/hari)	Efluen (kg/hari)
Pb	600	90	0,00046	0,00041	0,00005
Cd	600	85	0,000026	0,000022	0,000004

reaktor diperoleh dari perbandingan volume dengan kedalaman yaitu sebesar 6,6 m². Direncanakan dimensi panjang : lebar = 2 : 1, maka lebar reaktor yaitu 1,8 m dan panjang reaktor yaitu 3,6 m. Sketsa reaktor dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6.

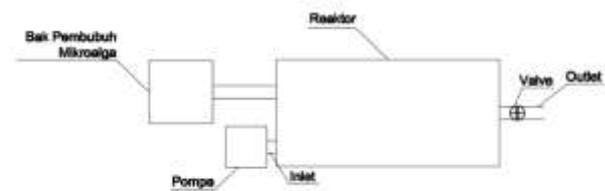
Mikroalga ditumbuhkan pada bak pembibit mikroalga terlebih dahulu. Bibit *S.platensis* dijual secara komersial dengan harga sekitar Rp30.000-Rp50.000 per 250 mL. Proses menumbuhkan mikroalga butuh waktu 1 minggu hingga tumbuh dengan baik. Setelah itu, bibit *S.platensis* yang telah siap dicampurkan kedalam reaktor yang telah berisi air sumur. Proses ini membutuhkan waktu 15 hari hingga *S.platensis* dapat menyisihkan konsentrasi timbal dan kadmium masing-masing sebesar 90% dan 85%. Setelah proses selesai, mikroalga tidak dapat digunakan lagi karena telah mengikat timbal dan kadmium sehingga harus diganti dengan yang baru.

KESIMPULAN/RINGKASAN

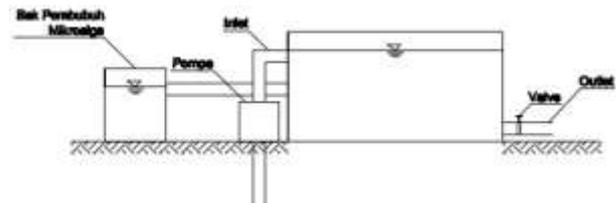
Mikroalga dapat mengikat ion logam berat pada permukaan selnya agar bereaksi dengan enzim pengikat. Kemudian logam berat yang telah terikat ditransfer ke bagian dalam sel mikroalga. Melalui mekanisme ini, konsentrasi logam berat pada air tanah yang tercemar akan berkurang. Fikoremediasi menggunakan *Spirulina platensis* dapat menjadi alternatif untuk menangani pencemaran Pb dan Cd pada air tanah di sekitar TPA Wukirsari. Fikoremediasi dilakukan dengan menambahkan inokulan *Spirulina platensis* sebanyak 0,9 m³ untuk meremediasi air tanah sebanyak 9 m³. Penambahan mikroalga ini menyebabkan konsentrasi Pb berkurang sebanyak 90% menjadi 0,053 mg/L dan konsentrasi Cd berkurang sebanyak 85% menjadi 0,0045 mg/L.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 59 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah*. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2016.
- [2] A. Walid, R. G. T. Kusumah, E. P. Putra, W. Herlina, and P. Suciarti, "Pengaruh keberadaan TPA terhadap kualitas air bersih di wilayah pemukiman warga sekitar: Studi literatur," *J. Ilm. Univ. Batanghari Jambi*, vol. 20, no. 3, pp. 1075–1078, 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.33087/jiubj.v20i3.1025>.
- [3] W. Purwanta and Joko P. Susanto, "Laju produksi dan karakterisasi polutan organik lindi dari TPA Kaliwlingi, Kabupaten Brebes," *J. Teknol. Lingkung.*, vol. 18, no. 2, pp. 157–164, 2017, doi: <https://doi.org/10.29122/jtl.v18i2.2036>.
- [4] S. Ikerismawati, "Bioremediasi Pb oleh bakteri indigen limbah cair



Gambar 5. Sketsa Reaktor Tampak Atas.



Gambar 6. Sketsa Potongan Reaktor.

- agar," *J. Biosilampari J. Biol.*, vol. 1, no. 2, pp. 51–58, 2019, doi: <https://doi.org/10.31540/biosilampari.v1i2.288>.
- [5] E. Ratnawati, R. Ermawati, and S. Naimah, "Teknologi biosorpsi oleh mikroorganisme, solusi alternatif untuk mengurangi pencemaran logam berat," *J. Kim. dan Kemasan*, vol. 32, no. 1, pp. 34–40, 2010, doi: <http://dx.doi.org/10.31266/at>.
 - [6] R. R. Liwun, L. I. Yulianti, and B. R. Sidharta, "Potensi *Skeletonema costatum* (Greville) sebagai fikoremediator logam berat timbal (Pb) limbah batik," *Biota J. Ilm. Ilmu-Ilmu Hayati*, vol. 5, no. 1, pp. 16–24, 2020, doi: <https://doi.org/10.24002/biota.v5i1.2950>.
 - [7] A. Hidayat, A. Siregar, and R. D. Waldi, *Telaah Mendalam tentang Bioremediasi: Teori dan Aplikasinya dalam Upaya Konservasi Tanah dan Air*. Bogor, Indonesia: IPB Press, 2017, ISBN: 978-602-440-095-8.
 - [8] H. Nubatonis, H. Sutaji, A. Warsito, and J. Tanesib, "Analisis pola sebaran air lindi sekitar tempat pembuangan akhir (TPA) Noenbila Kabupaten Timor Tengah Selatan menggunakan metode elektromagnetik konduktivitas," *J. Fis. Fis. Sains dan Apl.*, vol. 6, no. 1, pp. 24–31, 2021, doi: <https://doi.org/10.35508/fisa.v6i1.2489>.
 - [9] T. Boateng, F. Opoku, and O. Akoto, "Heavy metal contamination assessment of groundwater quality: A case study of Oti Landfill Site, Kumasi," *Appl. Water Sci.*, vol. 9, no. 33, pp. 1–15, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0915-y>.
 - [10] Kementerian Kesehatan, *Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 32 Tahun 2017 tentang Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan dan Persyaratan Kesehatan Air Untuk Keperluan Higiene Sanitasi, Kolam Renang, Solus Per Aqua, dan Pemandian Umum*. Jakarta: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia (Kemenkes), 2017.
 - [11] S. Pandia, E. Purba, and W. Hasan, "Kandungan logam berat pada air lindi tempat pembuangan akhir (TPA) sampah Kota Banda Aceh," 2017, ISSN: 2579-3101.
 - [12] F. Istarani and E. Pandebesie, "Studi dampak arsen (As) dan kadmium (Cd) terhadap penurunan kualitas lingkungan," *J. Tek. ITS*, vol. 3, no. 1, pp. D53–D58, 2014, doi: [10.12962/j23373539.v3i1.5684](https://doi.org/10.12962/j23373539.v3i1.5684).
 - [13] I. C. Bon, L. M. Salvatierra, L. D. Lario, J. Moratio, and L. M. Perez, "Prospects in cadmium-contaminated water management using free-living cyanobacteria (*Oscillatoria* sp.) water," *Water*, vol. 13, no. 4, p. 542, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/w13040542>.
 - [14] M. Murraya, N. Taufiq-Spj, and E. Supriyanti, "Kandungan logam berat Besi (Fe) dalam air, sedimen dan kerang hijau (*Perna viridis*) di Perairan Trimulyo, Semarang," *J. Mar. Res.*, vol. 7, no. 2, pp. 133–140, 2018, doi: <https://doi.org/10.14710/jmr.v7i2.25902>.
 - [15] A. Putra and F. Mairizki, "Analisis logam berat pada air tanah di Kecamatan Kubu Babussalam, Rokan Hilir, Riau," *J. Katalisator*, vol. 5, no. 1, pp. 47–53, 2020, doi: <http://doi.org/10.22216/jk.v5i1.5277>.
 - [16] P. Mariadi and I. Kurniawan, "Analisis mutu air tanah tempat pembuangan akhir (TPA) (Studi kasus TPA sampah Sukawinatan Palembang)," *J. Ilm. dan Ilmu Pengetah. Alam*, vol. 17, no. 1, pp. 61–71, 2020, ISSN: 2581-0170.
 - [17] Pemerintah Pusat, *Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air Dan Pengendalian Pencemaran Air*. Jakarta: Pemerintah Pusat, 2001.
 - [18] T. Harter and L. G. Walker, *Assessing Vulnerability of Groundwater*. California: University of California Agriculture and Natural Resource (ANR), 2001, ISBN: 978-1-879906-81-5.
 - [19] K. Sugianti, D. Mulyadi, and R. Maria, "Analisis kerentanan pencemaran air tanah dengan pendekatan metode drastic di Bandung Selatan," *J. Lingkung. dan Bencana Geol.*, vol. 7, no. 1, pp. 19–33, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.34126/jlbg.v7i1.91>.

- [20] Y. Arbi, R. L. Siregar, and T. P. Damanhuri, "Kajian pencemaran air tanah oleh lindi di sekitar air dingin Kota Padang," *J. Sains dan Teknol. Keilmuan dan Apl. Teknol. Ind.*, vol. 18, no. 1, 2018, ISSN: 2615-2827.
- [21] M. Prambodo, R. Hariyati, and T. Soeprbowati, "Spirulina platensis geitler sebagai fikoremediator logam berat Pb skala laboratorium," *Bioma Berk. Ilm. Biol.*, vol. 18, no. 2, pp. 64–69, 2016, doi: <https://doi.org/10.14710/bioma.18.2.64-69>.
- [22] R. A. Nugroho, *Seluk Beluk Mikroalga dan Botryococcus braunii*. Kaliurang, Yogyakarta: Deepublish, 2021, ISBN: 978-623-02-2847-6.
- [23] G. Adams, P. T. Fufeyin, S. Okoro, and I. Ehinomen, "Bioremediation, biostimulation and bioaugmentation: A review," *Int. J. Environ. Bioremediation Biodegrad.*, vol. 3, no. 1, pp. 28–39, 2015, doi: [10.12691/ijebb-3-1-5](https://doi.org/10.12691/ijebb-3-1-5).
- [24] R. Anyanwu, C. Rodriguez, A. Durrant, and A.-G. Olabi, "Microalgae cultivation technologies," *Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng. Elsevier B.V.*, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09258-4>.
- [25] M. Kawaroe, T. Prarono, A. Sunuddin, D. W. Sari, and D. Agustine, *Mikroalga Potensi dan Pemanfaatannya untuk Produksi Bio Bahan Bakar*. Bogor, Indonesia: PT Penerbit IPB Press, 2019, ISBN: 978-602-440-893-0.
- [26] S. Gultom, "Mikroalga: sumber energi terbarukan masa depan," *J. Kelaut. Indones. J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 11, no. 1, pp. 95–103, 2018, doi: <https://doi.org/10.21107/jk.v11i1.3802>.
- [27] H. Li, J. Watson, Y. Zhang, H. Lu, and Z. Liu, "Environment-enhancing process for algal wastewater treatment, heavy metal control and hydrothermal biofuel production: A critical review," *Bioresour. Technol.*, vol. 298, p. 122421, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122421>.
- [28] C. Yan, Z. Qu, J. Wang, L. Cao, and Q. Han, "Microalgal bioremediation of heavy metal pollution in water: Recent advances, challenges, and prospects," *Chemosphere*, vol. 286, no. 3, p. 131870, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131870>.
- [29] I. N. K. Kabinawa and A. Sugiharto, *Spirulina; Ganggang Penggempur Aneka Penyakit*. Tangerang: PT AgroMedia Pustaka, 2006, ISBN: 979-006-025-4.
- [30] T. R. Soeprbowati and H. Riche, "Potensi Mikroalga sebagai Agen Bioremediasi dan Aplikasinya dalam Penurunan Konsentrasi Logam Berat pada Instalasi Pengolah Air Limbah Industri," Universitas Diponegoro, 2013.
- [31] A. Isnansetya, *Teknik Kultur Phytoplankton dan Zooplankton Pakan Alami untuk Pembenihan Organisme Laut*. Yogyakarta: Kanisius, 1995, ISBN: 9794974307.
- [32] J. Wong, Y. Wong, and N. Tam, "Nickel biosorption by two chlorella species, *C. Vulgaris* (a commercial species) and *C. Miniata* (a local isolate)," *Bioresour. Technol.*, vol. 73, no. 2, pp. 133–137, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00175-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00175-3).
- [33] E. N. Hidayah, J. I. Nurdiana, and N. Candrahanifa, N. Kamalita, "Perbandingan antara mikroalga *Chlorella* sp. dan *Spirulina platensis* dalam penurunan nitrat fosfat pada air limbah domestik menggunakan Oxidation Ditch Algae Reactor (ODAR)," *Environ. Sci. Engineering Conf.*, vol. 2, no. 1, 2021, ISSN: 2798-6241.
- [34] N. D. Siswati, T. Indrawati, and M. Rahmah, "Biosorpsi logam berat plumbum (Pb) menggunakan biomassa *Phanerochaete chrisosporium*," *J. Ilm. Tek. Lingkungan.*, vol. 1, no. 2, pp. 67–72, 2009, ISSN: 2085-501-X.
- [35] E. Siswoyo and G. F. Habibi, "Sebaran logam berat cadmium (Cd) dan timbal (Pb) pada air sungai dan sumur di daerah sekitar tempat pembuangan akhir (TPA) Wukirsari Gunung Kidul, Yogyakarta," *J. Pengelolaan Sumberd. Alam dan Lingkungan.*, vol. 8, no. 1, 2018, doi: <https://doi.org/10.29244/jpsl.8.1.1-6>.
- [36] N. D. Negara, "Studi Penyebaran Konsentrasi Besi (Fe) dan Mangan (Mn) dari Lindi TPA Wukirsari Gunungkidul," Universitas Islam Indonesia, 2016.
- [37] T. R. Soeprbowati and R. Hariyati, "Phycoremediation of Pb, Cd, Cu, and Cr by *spirulina platensis* (Gomont) geitler," *Am. J. Biosci.*, vol. 2, no. 4, pp. 165–170, 2014, doi: [10.11648/j.ajbio.20140204.18](https://doi.org/10.11648/j.ajbio.20140204.18).