

Kajian Literatur Fitoremediasi Timbal pada Perairan Laut Tercemar Menggunakan Makroalga (Studi Kasus: Pencemaran Timbal di Teluk Jakarta)

Juang Angger Pamungkas dan Harmin Sulistiyaning Titah
Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: harminsulis@gmail.com

Abstrak—Pencemaran logam berat di perairan dapat mengganggu kelangsungan ekosistem di sekitarnya. Salah satu metode removal logam berat yang hemat dan ramah lingkungan adalah fitoremediasi. Makroalga merupakan salah satu tumbuhan yang dapat digunakan untuk fitoremediasi perairan yang tercemar logam berat. Kajian literatur ini dilakukan dengan tujuan untuk mengkaji jenis-jenis makroalga yang dapat menyerap logam berat, kemampuannya dalam menyerap logam berat, dan penerapannya pada suatu lokasi studi. Kajian literatur ini dilakukan dengan mengumpulkan literatur yang diperlukan dan kemudian mengkaji tiap literatur. Setelah literatur dikumpulkan dan dikaji, literatur kemudian dibahas dan diringkas dalam kaitannya dengan tujuan studi. Hasil pembahasan kemudian diterapkan pada suatu studi kasus untuk memprediksi hasil akhir suatu kasus perairan tercemar bila diremediasi menggunakan makroalga. Ada banyak jenis makroalga yang dapat digunakan untuk menyerap logam berat Pb, baik dari kelompok phaeophyceae, chlorophyta, maupun rhodophyta. Berdasarkan kajian ini kemampuan makroalga dalam menyerap logam berat Pb berada pada rentang 0,18-1,45 mmol Pb/g makroalga untuk kelompok phaeophyceae, 0,19-1,55 mmol Pb/g makroalga untuk kelompok chlorophyta, dan 0,15-1,35 mmol Pb/g makroalga untuk kelompok rhodophyta. Pada kajian ini, studi kasus fitoremediasi diterapkan di perairan Teluk Jakarta dengan menumbuhkan 202,5 kg *Ulva lactuca* pada 45 keramba berukuran masing-masing 9 m² dengan padat tebar makroalga sebesar 0,5 kg/m². Penerapan ini diperkirakan dapat menyerap sebanyak 45,92 kg logam berat Pb.

Kata Kunci—Fitoremediasi, Logam Berat, Makroalga, Perairan Tercemar, Timbal.

I. PENDAHULUAN

LOGAM berat merupakan salah satu pencemar utama sumber daya air di berbagai belahan dunia. Logam berat yang terdapat pada perairan suatu saat dapat turun dan membentuk sedimen. Sedimen ini akan mempengaruhi kelangsungan hidup biota air, khususnya hewan-hewan yang mencari makan di dasar perairan, serta masyarakat yang mengonsumsinya [1].

Logam berat bersifat *non-biodegradable* dan dapat larut dalam air sehingga mereka dapat dengan mudah masuk ke dalam tubuh manusia dan memberikan berbagai dampak negatif. Beberapa dampak kesehatan yang dapat disebabkan oleh logam berat, antara lain gangguan pada metabolisme, gangguan pada ginjal, gangguan pada syaraf, gangguan pada paru-paru, kanker, bahkan hingga kematian [2].

Dampak negatif pencemaran logam berat yang banyak ini menyebabkan pentingnya melakukan *removal* logam berat di perairan. Beberapa teknik *removal* yang dapat dilakukan, antara lain presipitasi kimiawi, adsorpsi dan ekstraksi, *reverse osmosis*, dan pertukaran ion. Teknik-teknik tersebut

sayangnya memakan biaya yang besar dan biasanya tidak ramah lingkungan [3-4].

Salah satu teknologi remediasi yang bersifat hemat biaya dan ramah lingkungan adalah fitoremediasi [5]. Salah satu jenis tumbuhan yang dapat digunakan untuk fitoremediasi perairan tercemar logam berat adalah makroalga. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa makroalga mampu melakukan removal logam berat hingga 85% [6].

Oleh karena itu, dalam kajian ini, literatur dari berbagai sumber akan dikumpulkan dan dikaji untuk agar didapatkan informasi mengenai jenis-jenis makroalga yang dapat menyerap logam berat, kemampuannya dalam menyerap logam berat, dan bagaimana bila diterapkan dalam suatu lokasi studi.

II. METODE STUDI

Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan literatur yang diperlukan dan kemudian mengkaji tiap literatur. Literatur yang dikumpulkan dan dikaji adalah literatur yang terkait dengan pencemaran perairan laut oleh logam berat serta penerapan fitoremediasi menggunakan makroalga. Setelah literatur dikumpulkan dan dikaji, literatur kemudian dibahas dan digunakan dalam studi kasus sebagai contoh penerapan fitoremediasi menggunakan makroalga pada perairan laut tercemar logam berat timbal. Studi kasus yang dilakukan pada studi ini adalah pencemaran timbal pada perairan Teluk Jakarta dan penerapan fitoremediasi pada perairan Teluk Jakarta menggunakan makroalga.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pencemaran Air

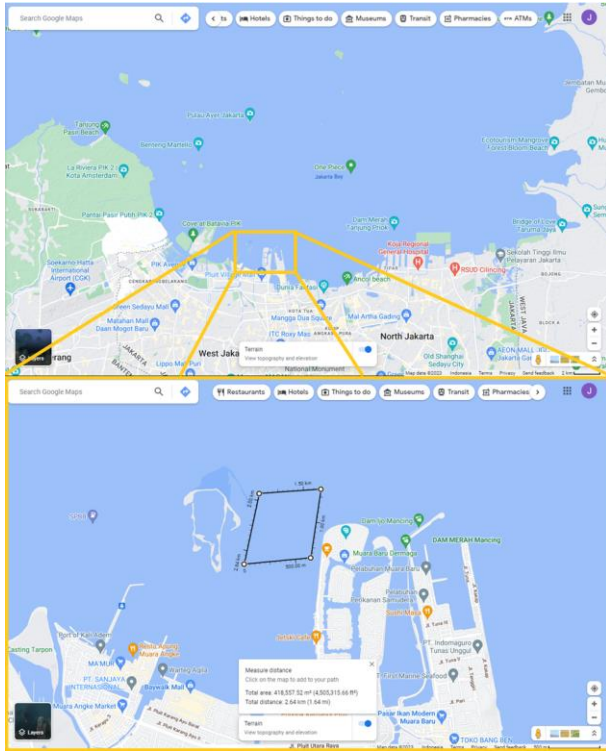
Definisi polusi lingkungan sebagai kontaminasi komponen fisik dan biologis dalam sistem bumi/atmosfer sehingga proses lingkungan normal terdampak secara negatif [7]. Dengan begitu, pencemaran air dapat didefinisikan sebagai kontaminasi air sehingga proses lingkungan perairan tersebut terdampak secara negatif.

Logam berat yang masuk ke dalam perairan dapat mengendap ke dasar perairan ataupun mengapung di permukaan. Logam berat yang masuk ke dalam sungai dapat terbawa oleh arus hingga ke lautan [8]. Logam berat yang sifatnya persisten ini dapat masuk ke dalam rantai makanan kehidupan laut yang kemudian dapat mempengaruhi predator lain seperti burung dan mamalia, termasuk manusia, yang menyebabkan logam berat dapat berpindah ke ekosistem lainnya [8].

1	1																	18
1	H																	2
2	Li	Be															10	Ne
3	Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
5	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Ar
6	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
7	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
8	55	56	+	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
9	Cs	Ba	+	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
10	87	88	**	104	105	106	107	108	109	110	111							
11	Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg							

*Lanthanides		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
**Actinides		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103

Gambar 1. Unsur-unsur yang termasuk logam berat (warna hijau).



Gambar 2. Wilayah spesifik lokasi studi di Teluk Jakarta.

Logam berat memiliki dampak yang bermacam-macam bagi lingkungan. Pada tanah, logam berat dapat masuk ke dalam rantai makanan melalui penyerapan oleh tumbuhan dan dapat mengganggu kesehatan seluruh organisme yang terkait pada rantai makanan tersebut. Logam berat juga dapat mengubah karakteristik tanah sehingga dapat menurunkan kualitas tanah dan juga dapat mencemari perairan di sekitarnya. Pada perairan, logam berat juga dapat masuk ke dalam rantai makanan melalui penyerapan oleh organisme air dan dapat mengganggu kesehatan seluruh organisme yang terkait pada rantai makanan tersebut. Pada udara, logam berat berupa zat partikulat dapat suatu saat mengalami presipitasi dan menyebabkan korosi, hujan asam, kerusakan pada infrastruktur, hingga eutrofikasi bila jatuh ke perairan [8]. Logam berat pada udara tentunya juga dapat menyebabkan gangguan kesehatan pada organisme yang menghirup udara tersebut.

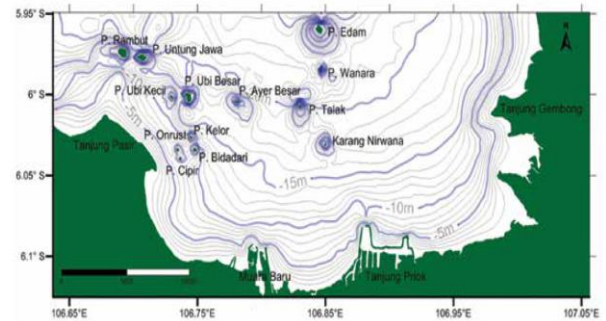
Beberapa dampak logam berat pada kesehatan manusia, antara lain mual, muntah, demam, diare, vertigo, gangguan pada hati, iritasi, dermatitis, bronkitis, gangguan pada ginjal, sinusitis, pneumonia, kanker, gangguan pada sistem reproduksi, gangguan pada otak, gangguan pada sistem saraf, gangguan psikologis, koma, bahkan kematian [8].

B. Logam Berat

Logam berat memiliki beberapa definisi. Pada tahun 2018,

Tabel 1. Karakteristik Berbagai Logam Berat (Cd, Hg, Pb)

Unsur	Karakteristik
Cd	<ul style="list-style-type: none"> Densitas: 8,69 g/cm³ Sering ditemukan berupa campuran dengan seng Berupa logam berwarna perak kebiruan
Hg	<ul style="list-style-type: none"> Densitas: 13,5336 g/cm³ Berupa logam cair berwarna keperakan dalam suhu ruangan Jarang ditemukan dalam wujud alami
Pb	<ul style="list-style-type: none"> Densitas: 11,3 g/cm³ Berwarna abu-abu perak Lunak



Gambar 3. Batimetri Teluk Jakarta.

mencoba untuk memberikan definisi logam berat yang lebih komprehensif [9]. Mereka mendefinisikan logam berat sebagai logam yang memenuhi 3 kriteria, yaitu:

1. Muncul secara alami
2. Memiliki nomor atom lebih besar dari 20
3. Memiliki densitas lebih besar dari 5 g/cm³

Berdasarkan definisi tersebut dan penapisannya pada Tabel 1, maka unsur yang termasuk ke dalam kategori logam berat dapat dilihat pada Gambar 1 yang diwarnai hijau. Karakteristik berbagai logam berat (Cd, Hg, Pb) disajikan dalam Tabel 2.

C. Makroalga

Makroalga yang umum disebut sebagai rumput laut merupakan salah satu kelompok alga yang terdiri dari organisme multiseluler, berbeda dengan mikroalga yang sifatnya uniseluler. Makroalga memiliki akar, batang, dan daun sebagaimana tumbuhan darat pada umumnya. Makroalga yang sering dijumpai umumnya merupakan makroalga laut, sedangkan makroalga air tawar jumlahnya lebih sedikit. Makroalga diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu alga merah (rhodophyta), cokelat (phaeophyceae), dan hijau (chlorophyta) [10].

Setidaknya ada 903 spesies makroalga yang teridentifikasi di Indonesia dengan rincian 201 alga hijau, 138 alga cokelat, dan 564 alga merah. Adapun keseluruhan spesies makroalga yang ada di dunia diperkirakan mencapai 10.000 spesies yang berbeda [11]. Bila dibandingkan, maka perairan Indonesia menjadi habitat bagi sekitar 9% spesies makroalga di dunia.

Makroalga secara umum memiliki bagian-bagian tubuh sebagai berikut: *holdfast* (bagian yang mirip akar dan digunakan untuk menempel di dasar laut atau permukaan lain), *stipe* (bagian yang mirip batang), dan *blade* (bagian pipih yang mirip daun).

D. Fitoremediasi Logam Berat dengan Makroalga

Strategi yang digunakan dalam proses remediasi dapat dibagi menjadi lima, yaitu fitoekstraksi/fitoakumulasi,

Tabel 2.
Studi terdahulu fitoremediasi timbal menggunakan makroalga

Makroalga	Jenis	Kemampuan Uptake
<i>Pelvetia canaliculata</i>	Phaeophyceae	1,25 mmol/g (pH = 4) 1,45 mmol/g (pH = 5)
<i>Laminaria hyperborea</i>	Phaeophyceae	1,35 mmol/g (pH = 5) 0,24 mmol/g (pH = 5)
<i>Ecklonia radiata</i>	Phaeophyceae	1,26 mmol/g (pH = 5)
<i>Sargassum natans</i>	Phaeophyceae	1,22 mmol/g (pH = 3,5)
<i>Fucus vesiculosus</i>	Phaeophyceae	1,11 mmol/g (pH = 3,5)
<i>Ascophyllum nodosum</i>	Phaeophyceae	1,31 mmol/g (pH = 3,5)
<i>Sargassum vulgare</i>	Phaeophyceae	1,10 mmol/g (pH = 3,5)
<i>Sargassum wightii</i>	Phaeophyceae	0,82 mmol/g (pH = 5)
<i>Padina sp.</i>	Phaeophyceae	1,25 mmol/g (pH = 5)
<i>Sargassum sp.</i>	Phaeophyceae	1,16 mmol/g (pH = 5)
<i>Sargassum muticum</i>	Phaeophyceae	0,18 mmol/g (pH = 5)
<i>Fucus spiralis</i>	Phaeophyceae	0,21 mmol/g (pH = 5)
<i>Bifurcaria bifurcata</i>	Phaeophyceae	0,25 mmol/g (pH = 5)
<i>Ulva lactuca</i>	Chlorophyta	1,55 mmol/g (pH = 5,5) 1,11 mmol/g (pH = 4,5–5)
<i>Ulva sp.</i>	Chlorophyta	1,46 mmol/g (pH = 5)
<i>Spirogyra sp.</i>	Chlorophyta	0,68 mmol/g (pH = 5)
<i>Caulerpa racemosa</i>	Chlorophyta	0,19 mmol/g (pH = 5)
<i>Chondracanthus chamissoi</i>	Rhodophyta	1,35 mmol/g (pH = 4–5)
<i>Gracilaria sp.</i>	Rhodophyta	0,45 mmol/g (pH = 5)
<i>Jania rubens</i>	Rhodophyta	0,15 mmol/g (pH = 5)
<i>Pterocladia capillacea</i>	Rhodophyta	0,16 mmol/g (pH = 5)
<i>Corallina mediterranea</i>	Rhodophyta	0,31 mmol/g (pH = 5)
<i>Galaxaura oblongata</i>	Rhodophyta	0,43 mmol/g (pH = 5)

fitostabilisasi, fitodegradasi, rhizofiltrasi, dan fitovolatilisasi. Fitoekestaksi adalah penyerapan dan penyimpanan polutan oleh tumbuhan pada daun, batang, ataupun akar. Fitostabilisasi adalah pembatasan mobilitas atau pengendapan polutan pada zona akar tumbuhan. Fitodegradasi adalah degradasi polutan organik oleh tumbuhan melalui hidrolisis dan metabolisme. Rhizofiltrasi adalah penyerapan, akumulasi, atau pengendapan polutan melalui sistem perakaran tumbuhan. Fitovolatilisasi adalah konversi polutan menjadi bentuk volatil dan diikuti pelepasannya ke atmosfer oleh tumbuhan [12].

Makroalga sendiri dapat melakukan fitoremediasi melalui dua mekanisme utama. Makroalga dapat menyerap logam berat melalui proses metabolisme ke dalam sel-selnya serta menyerap logam berat melalui biosorpsi [13]. Adapun keduanya, bila dibandingkan dengan lima strategi sebelumnya, termasuk dalam fitoekestaksi/fitoakumulasi.

Faktor-faktor abiotik yang dapat mempengaruhi penyerapan logam berat pada tumbuhan, antara lain: pH, keberadaan kation lain di badan air, suhu, salinitas, serta intensitas cahaya dan lama pencahayaannya. pH, suhu, salinitas, dan keberadaan kation lain umumnya mempengaruhi solubilitas dan keterikatan ion logam pada tumbuhan, sedangkan intensitas cahaya dan lamanya mempengaruhi pertumbuhan dari tumbuhan [14].

Faktor-faktor biotik yang dapat mempengaruhi penyerapan logam berat pada tumbuhan antara lain: ciri khusus tumbuhan (kemampuan hiperakumulasi, daya tahan terhadap konsentrasi polutan yang tinggi), kapasitas penyimpanan logam pada tumbuhan, kemampuan detoksifikasi tumbuhan, interaksi dengan senyawa lain dalam sel tumbuhan.

Kemampuan hiperakumulasi logam berat dan kapasitas penyimpanan logam berat mempengaruhi banyaknya logam yang dapat diserap oleh tumbuhan. Daya tahan terhadap konsentrasi polutan yang tinggi, kemampuan detoksifikasi tumbuhan, dan interaksi dengan senyawa lain dalam sel tumbuhan mempengaruhi kemampuan hidup dan ketahanan tumbuhan dalam menyerap logam berat [21].

E. Studi Terdahulu

Studi terdahulu fitoremediasi timbal menggunakan makroalga dirangkum dalam Tabel 2.

F. Penerapan Fitoremediasi Perairan Laut Tercemar Timbal Menggunakan Makroalga (Teluk Jakarta)

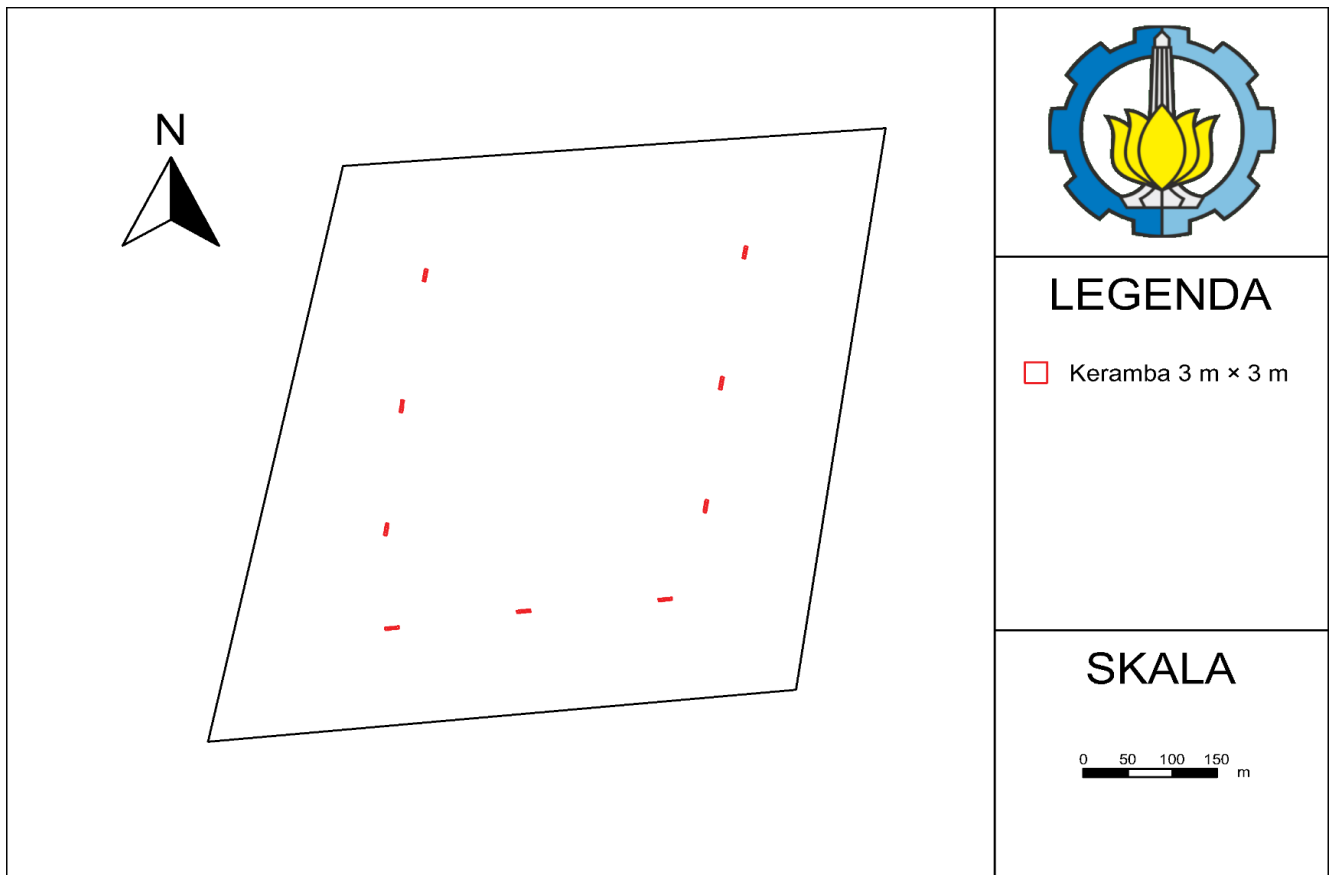
Sebelumnya pernah melakukan pengambilan sampel untuk mengukur kandungan logam berat pada perairan Teluk Jakarta di tiga titik berbeda. Hasil pengukuran berada pada rentang 0,003–0,422 mg/L yang melebihi baku mutu air laut, yaitu 0,008 mg/L.

Pada studi ini, kandungan Pb pada perairan Teluk Jakarta direncanakan untuk difitoremediasi menggunakan makroalga. Adapun jenis makroalga yang digunakan adalah spesies *Ulva lactuca* karena keberadaannya yang cukup umum di Indonesia. Panjang *Ulva lactuca* bisa mencapai 100 cm dengan rata-rata sekitar 26 cm [15].

Wilayah spesifik di mana fitoremediasi akan dilakukan terdapat pada Gambar 2. Luas wilayah ini sekitar 418.557,52 m². Wilayah spesifik dipilih dengan memerhatikan kedalaman perairan teluk untuk memastikan fitoremediasi tetap dapat dilakukan dalam keadaan pasang maupun surut. Perbedaan antara pasang tertinggi dengan surut terendah pada perairan Teluk Jakarta adalah 1,2 m. Ini berarti wilayah lokasi studi untuk fitoremediasi setidaknya harus memiliki kedalaman 1,2 m ditambah dengan jangkauan kedalaman makroalga.

Berdasarkan perbedaan kedalaman pada saat pasang tertinggi dengan surut terendah tersebut, maka wilayah spesifik lokasi studi ditentukan dengan memerhatikan batimetri Teluk Jakarta. Batimetri Teluk Jakarta disajikan pada Gambar 3 [16]. Batimetri Teluk Jakarta pada Gambar 3 menggambarkan kedalaman perairan Teluk Jakarta dengan garis kontur. Berdasarkan batimetri Teluk Jakarta pada Gambar 3, maka wilayah spesifik lokasi studi direncanakan pada daerah dengan kedalaman (garis kontur) setidaknya 1,2 m ditambah dengan kedalaman jangkauan makroalga.

Konsentrasi Pb pada Teluk Jakarta diketahui mencapai



Gambar 4. Rencana peletakan keramba pada lokasi studi.

berkisar antara 0,003–0,422 mg/L. Bila luas wilayah lokasi studi adalah 36,94 km² serta kedalaman rata-rata yang dapat dijangkau *Ulva lactuca* adalah sekitar 26 cm [15], maka beban pencemar timbal dapat dihitung sebagai berikut:

$$BP = C \times V$$

$$BP = C \times A \times H$$

$$BP = 0,422 \text{ mg/L} \times 418.557,52 \text{ m}^2 \times 26 \text{ cm}$$

$$BP = 0,000422 \text{ kg/m}^3 \times 418.557,52 \text{ m}^2 \times 0,26 \text{ m}$$

$$BP = 45,92 \text{ kg}$$

dimana *BP* adalah beban pencemar, *C* adalah konsentrasi pencemar di badan air, *V* adalah volume badan air yang diremediasi, *A* adalah luas badan air yang diremediasi, dan *H* adalah jangkauan kedalaman tumbuhan.

Ulva lactuca diketahui dapat melakukan *uptake* ion Pb dalam rentang 1,11–1,55 mmol/g. Bila berat molekul Pb adalah 207,2 mg/mmol, maka makroalga yang diperlukan dapat dihitung sebagai berikut:

$$MA = (BP \div BMPb) \div Q$$

$$MA = (45,92 \text{ kg} \div 207,2 \text{ mg/mmol}) \div 1,11 \text{ mmol/g}$$

$$MA = (45,92 \text{ kg} \div 0,0002072 \frac{\text{kg}}{\text{mmol}})$$

$$\div 1.110 \text{ mmol/kg}$$

$$MA = 199,66 \text{ kg}$$

dimana *MA* adalah makroalga (*Ulva lactuca*) yang diperlukan, *Q* adalah kapasitas *uptake* makroalga, *BM_{Pb}* adalah berat molekul Pb, dan *BP* adalah beban pencemar.

Beberapa penelitian telah mencoba membandingkan pertumbuhan *Ulva lactuca* dengan padat tebar yang beragam, mulai dari 0,5 kg/m² hingga 6 kg/m². Hasil menunjukkan bahwa semakin rendah padat tebar *Ulva lactuca*, semakin besar *yield* biomasnya [17]. Jika padat tebar *Ulva lactuca* yang direncanakan adalah 0,5 kg/m² dan fitoremediasi dilakukan pada keramba apung berukuran 3 m x 3 m (9 m²), maka jumlah keramba yang diperlukan dapat dihitung sebagai berikut:

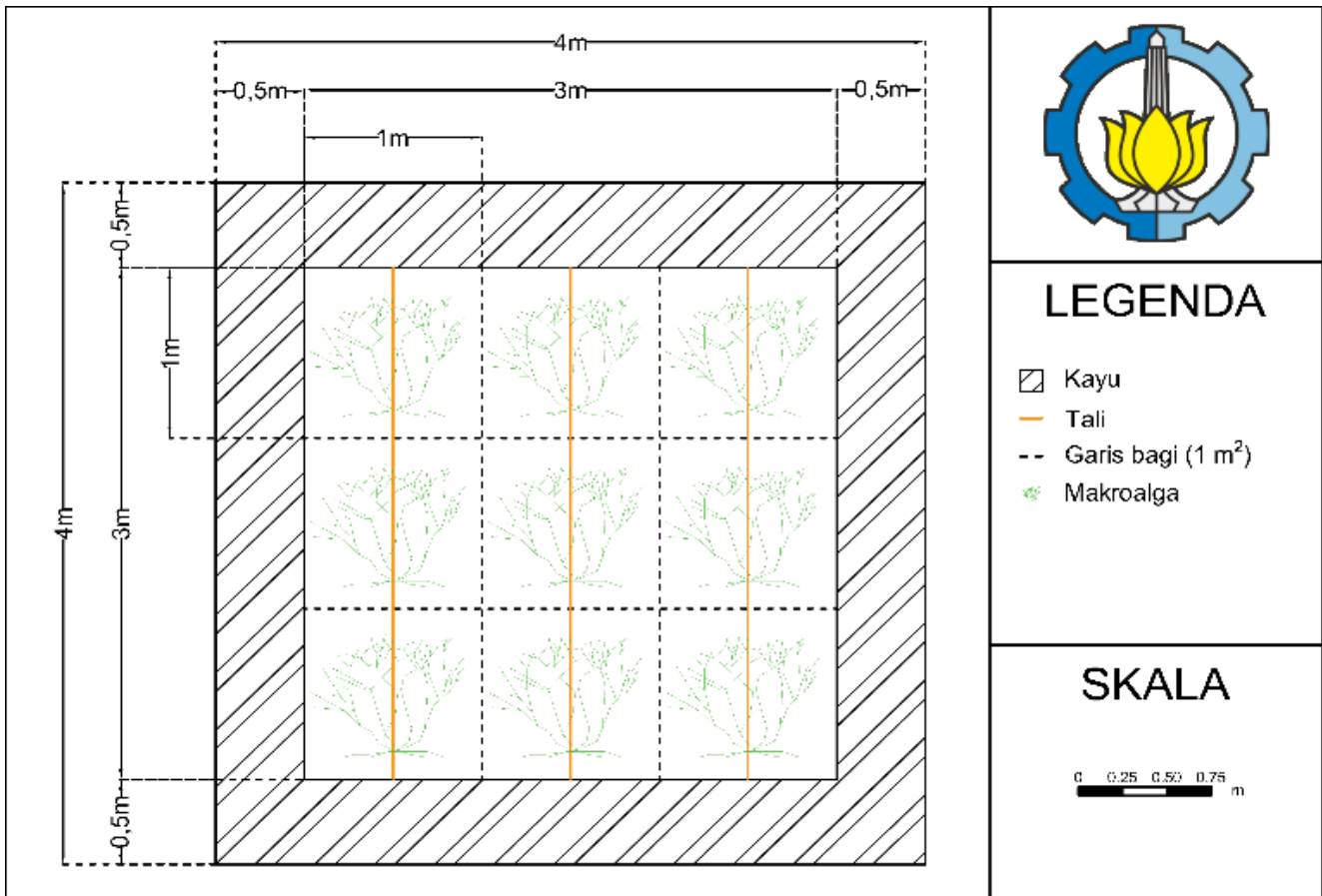
$$N = (MA \div SD) \div A$$

$$N = (199,66 \text{ kg} \div 0,5 \text{ kg/m}^2) \div 9 \text{ m}^2/\text{keramba}$$

$$N = 44,37 \approx 45 \text{ keramba}$$

dimana *N* adalah jumlah keramba yang diperlukan, *MA* adalah makroalga (*Ulva lactuca*) yang diperlukan, *SD* adalah padat tebar makro alga (*stocking density*), dan *A* adalah luas keramba. Pembulatan keramba membuat makroalga yang diperlukan menjadi 202,5 kg.

Lokasi peletakan keramba pada lokasi studi direncanakan sebagaimana pada Gambar 4. Peletakan keramba direncanakan berdasarkan pola arus laut pada perairan Teluk Jakarta. Pola arus laut perairan Teluk Jakarta menunjukkan bahwa arus laut secara umum bergerak dari arah barat lokasi studi spesifik pada saat musim barat dan bergerak dari arah timur lokasi studi spesifik pada saat musim timur [16]. Berdasarkan pola arus laut perairan Teluk Jakarta pada musim barat dan musim timur, maka keramba direncanakan untuk diletakkan pada bagian barat dan timur lokasi studi



Gambar 5. Desain keramba (tampak atas).

spesifik.

Desain keramba untuk fitoremediasi direncanakan sebagaimana pada Gambar 5. Keramba didesain dengan pelampung dan pijakan kayu di tiap sisinya untuk memudahkan pengelolaan. Keramba diberikan pemberat di tiap sudutnya agar tidak berpindah karena terbawa oleh arus laut. Tiap 1 m^2 luas dalam keramba akan ditumbuhi $0,5 \text{ kg Ulva lactuca}$ untuk mencapai padat tebar $0,5 \text{ kg/m}^2$ sebagaimana yang telah direncanakan.

Mekanisme yang terjadi selama proses fitoremediasi pada makroalga *Ulva lactuca* terbagi dalam dua tahapan proses, yaitu proses adsorpsi logam berat pada permukaan makroalga yang sifatnya lebih cepat dan reversibel, lalu proses uptake logam berat secara intraseluler melalui metabolisme makroalga yang sifatnya lebih lambat [18]. Adapun absorpsi logam berat di permukaan makroalga ke dalam sel tidak begitu dipengaruhi oleh faktor-faktor yang mempengaruhi metabolisme makroalga, melainkan dipengaruhi oleh banyaknya kandungan logam berat di perairan itu sendiri [19].

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari studi literatur ini adalah ada banyak jenis makroalga yang dapat digunakan untuk menyerap logam berat Pb, baik dari kelompok phaeophyceae, chlorophyta, maupun rhodophyta. Berdasarkan studi ini kemampuan makroalga dalam menyerap logam berat Pb berada pada rentang $0,18\text{--}1,45 \text{ mmol Pb/g}$ makroalga untuk kelompok phaeophyceae, $0,19\text{--}1,55 \text{ mmol Pb/g}$ makroalga untuk kelompok chlorophyta, dan $0,15\text{--}1,35 \text{ mmol Pb/g}$ makroalga untuk kelompok

rhodophyta. Pada studi ini, studi kasus fitoremediasi diterapkan di perairan Teluk Jakarta dengan menumbuhkan $202,5 \text{ kg Ulva lactuca}$ pada 45 keramba berukuran masing-masing 9 m^2 dengan padat tebar makroalga sebesar $0,5 \text{ kg/m}^2$. Penerapan ini diperkirakan dapat menyerap sebanyak $45,92 \text{ kg}$ logam berat Pb.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Utami, W. Rismawati, and K. Sapanli, "Pemanfaatan Mangrove untuk Mengurangi Logam Berat di Perairan," in *Seminar Nasional Hari Air Sedunia*, Palembang: Universitas Sriwijaya, 2018.
- [2] R. a Bharti and R. Sharma, "Effect of Heavy Metals: An Overview," in *Materials Today: Proceedings*, Amsterdam: Elsevier, 2022, pp. 880–885.
- [3] H. Huang, J. Liu, P. a Zhang, D. Zhang, and F. Gao, "Investigation on the simultaneous removal of fluoride, ammonia nitrogen and phosphate from semiconductor wastewater using chemical precipitation," *Chem. Eng. J.*, vol. 307, pp. 696–706, 2017.
- [4] A. E. Burakov, E. V Galunin, I. V Burakova, and A. E. Kucherova, "Adsorption of heavy metals on conventional and nanostructured materials for wastewater treatment purposes: A review," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 148, pp. 702–712, 2018.
- [5] S. Ali, Z. Abbas, M. Rizwan, and I. E. Zaheer, "Application of floating aquatic plants in phytoremediation of heavy metals polluted water: a review," *Sustainability*, vol. 12, no. 5, p. 1927, 2020.
- [6] S. Bahaa, I. A. wahab Al-Baldawi, S. R. Yaseen, and S. R. S. Abdullah, "Biosorption of heavy metals from synthetic wastewater by using macro algae collected from iraqi marshlands," *J. Ecol. Eng.*, vol. 20, no. 11, 2019.
- [7] I. M. Krishna, V. Manickam, A. Shah, and N. Davergave, *Environmental Management: Science and Engineering for Industry*. New Delhi: Butterworth Heinemann, 2017. ISBN: 978-0128119891.
- [8] J. Briffa, E. Sinagra, and R. Blundell, "Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans," *Heliyon*, vol. 6, no. 9, 2020.
- [9] H. a Ali and E. Khan, "What are heavy metals? long-standing controversy over the scientific use of the term 'heavy metals'-proposal of a comprehensive definition," *Toxicol. Environ. Chem.*, vol. 100, no.

- 1, pp. 6--19, 2018.
- [10] S. R. Chia, H. C. Ong, K. W. an Chew, P. L. Show, and S.-M. Phang, "Sustainable approaches for algae utilization in bioenergy production," *Renew. Energy*, vol. 129, pp. 838--852, 2018.
- [11] I. Levine, "Algae: A Way of Life and Health," in *Seaweed in Health and Disease Prevention*, Amsterdam: Elsevier, 2016. ISBN: 978-0-12-802772-1.
- [12] A. Vaidya, R. Pandey, S. Mudliar, M. S. Kumar, T. Chakrabarti, and S. Devotta, "Production and recovery of lactic acid for polylactide – an overview," *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 5, pp. 429--467, 2005.
- [13] K. Ben Chekroun and M. Baghour, "The role of algae in phytoremediation of heavy metals: a review," *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 4, no. 6, pp. 873--880, 2013.
- [14] P. Krems, M. Rajfur, M. Waclawek, and A. Kłos, "The use of water plants in biomonitoring and phytoremediation of waters polluted with heavy metals," *Ecol. Chem. Eng. S*, vol. 20, no. 2, pp. 353--370, 2013.
- [15] M. A. a Kazi, M. G. a Kavale, and V. V Singh, "Morphological and molecular characterization of *Ulva chaugulii* sp. nov., *U. lactuca* and *U. ohnoi* (Ulvophyceae, Chlorophyta) from India," *Phycological*, vol. 55, no. 1, pp. 45--54, 2016.
- [16] R. Rositasari, R. Puspitasari, I. S. Nurhati, and T. Purbonegoro, 5 *Dekade LIPI di Teluk Jakarta: Review Penelitian Oseanografi di Teluk Jakarta 1970-2015*, Jakarta: Pusat Penelitian Oseanogra – Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, 2017. ISBN: 978-602-6504-07-4.
- [17] A. a Neori, I. Cohen, and H. Gordin, "Ulva lactuca biofilters for marine fishpond effluents ii. growth rate, yield, and c:n ratio," *Bot. Mar.*, vol. 34, pp. 483--489, 1991.
- [18] F. A Mourad and A. El-Azim, "Use of green alga ulva lactuca (L) as an indicator to heavy metal pollution at intertidal waters in suez gulf, aqaba gulf and suez canal, egypt," *Egypt. J. Aquat. Biol. Fish.*, vol. 23, no. 4, pp. 437--449, 2019.
- [19] I. Sánchez-Rodríguez, M. A. Huerta-Díaz, E. Choumiline, O. Holgun-Quinones, and J. A. Zertuche-González, "Elemental concentrations in different species of seaweeds from loreto bay, baja california sur, mexico: implications for the geochemical control of metals in algal tissue," *Environ. Pollut.*, vol. 114, no. 2, pp. 145--160, 2001.