

Kajian Remediasi Tanah Terkontaminasi Logam Berat Timbal di Desa Pesarean, Kabupaten Tegal dengan Stabilisasi/Solidifikasi

Wisda Isnaini Wijayati dan Ipung Fitri Purwanti
Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: purwanti@enviro.its.ac.id

Abstrak—Perkembangan industri memberikan dampak yang tidak hanya positif pada kehidupan manusia, melainkan juga terdapat dampak negatif terhadap lingkungan melalui pencemaran yang dihasilkan dari limbah industri. Sebagian besar, industri menghasilkan logam berat. Logam berat merupakan bahan pencemar berbahaya karena sifatnya yang tidak dapat dihancurkan (*non degradable*) oleh organisme hidup sehingga nantinya terakumulasi di lingkungan. Zat berbahaya dan beracun yang masuk ke dalam tanah terendap sebagai zat kimia beracun di tanah. Pada tanah terkontaminasi logam berat di Desa Pesarean diperlukan suatu metode yang tepat untuk menurunkan konsentrasi timbal yang terkandung di dalamnya. Maka dari itu, dipilihlah metode stabilisasi/solidifikasi untuk menurunkan konsentrasi logam berat timbal (Pb) pada tanah tercemar. Metode Stabilisasi/Solidifikasi ini digunakan karena bahan pengikat yang digunakan mudah didapat, membutuhkan biaya yang rendah serta bahan hasil pencampuran mempunyai kekuatan yang tinggi sehingga bisa digunakan kembali. Bahan pengikat yang digunakan dalam metode stabilisasi/solidifikasi yaitu *Ordinary Portland Cement* (OPC) Tipe 1. Semen Portland Tipe I ini dapat menurunkan konsentrasi logam berat khususnya timbal secara efektif dan efisien serta membuat kontaminan yang terkandung dalam tanah menjadi terstabilkan. Kajian kasus pencemaran tanah oleh logam berat timbal di Desa Pesarean, Kecamatan Adiwerna, Kabupaten Tegal, Indonesia dengan stabilisasi/solidifikasi secara *ex-situ*. Hasil perhitungan dibutuhkankannya 1290 semen untuk meremediasi 1/4 lahan tercemar pada Area Selatan 1, serta menghasilkan 123 cetakan batako yang nantinya akan dimanfaatkan kembali. Penambahan $1,9 \times 10^{-3}$ mg Fe(III) juga diperlukan untuk menurunkan galena (PbS) dan menjadi *anglesite* (PbSO₄), sehingga menghasilkan konsentrasi timbal yang memenuhi baku mutu saat setelah perlakuan S/S sebesar 6×10^{-4} mg/L.

Kata Kunci—Semen Portland, Stabilisasi/Solidifikasi, Tanah, Timbal.

I. PENDAHULUAN

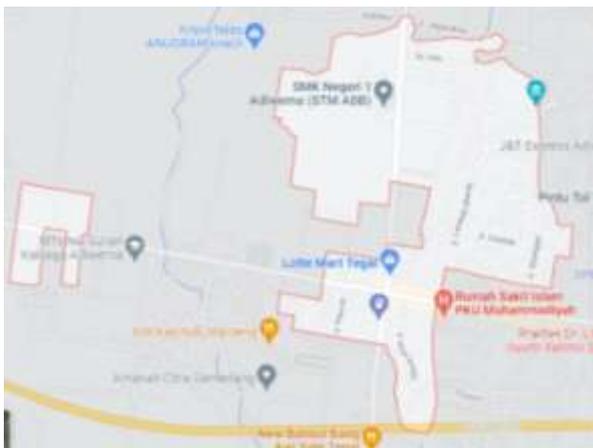
PERKEMBANGAN industri yang semakin pesat bukan hanya memberi dampak yang positif terhadap kehidupan manusia, akan tetapi juga memberi efek negatif terhadap lingkungan melalui pencemaran yang dihasilkan limbah industri. Limbah industri adalah sumber penghasil limbah yang paling banyak mengandung logam berat. Kehadiran logam beracun di tanah dapat sangat menghambat biodegradasi kontaminan organik. Kontaminasi logam berat tanah dapat menimbulkan risiko dan bahaya bagi manusia dan ekosistem melalui konsumsi langsung atau kontak dengan tanah yang terkontaminasi, rantai makanan (tanah-tanaman-manusia atau tanah-tanaman-hewan-manusia), minum air tanah yang terkontaminasi, pengurangan kualitas pangan (keamanan dan daya jual) melalui fitotoksitas [1]. Maka dari itu, diperlukan solusi untuk mengatasi tanah

tercemar. Salah satu metode pemulihan tanah tercemar logam berat yaitu dengan metode stabilisasi/solidifikasi (S/S) limbah padat dengan cara menambahkan pengikat semen, seperti kapur dan semen. Selama aplikasi S/S, senyawa beracun secara signifikan berkurang karena pada proses tersebut, limbah akan stabil secara fisik dan kimia sehingga meminimalkan ancaman terhadap lingkungan [2].

Metode stabilisasi/solidifikasi digunakan untuk mencegah penyebaran pencemar berbahaya ke lingkungan. Stabilisasi merupakan teknik mereduksi potensi bahaya limbah dengan tidak merubah sifat fisik material yang diolah [3]. Hal yang perlu diperhatikan agar proses S/S berjalan dengan baik yaitu pemahaman akan sifat dan mekanisme ikatan logam berat dengan bahan pengikat semen [4]. Semen Portland dapat digunakan sebagai matriks solidifikasi. Biasanya semen atau material seperti semen, atau resin yang digunakan untuk mengikat partikel secara bersama-sama. Penambahan air atau bahan aditif lain sangat dimungkinkan. Pengikat akan menciptakan bentuk limbah yang terstabilkan. Semen Portland merupakan pengikat yang paling umum digunakan dalam proses S/S semen [4].

Selama proses S/S terjadi peningkatan pH, dimana hal tersebut menyebabkan peningkatan jumlah mineral pengendapan dan dapat mengubah porositas dan struktur tanah. Kandungan oksigen dalam tanah dipengaruhi oleh porositas tanah yang menurun dengan jumlah presipitat yang lebih tinggi [5]. Pengaplikasian S/S pada tanah tercemar logam berat di Indonesia jarang ditemukan. Karakteristik jenis pencemar serta komposisi zat pengikat yang digunakan dalam metode S/S sebagai pertimbangan dalam melakukan S/S. Metode S/S dipilih karena telah diuji dan dievaluasi keefektifannya dalam mengandung dan merawat beragam kontaminan seperti logam berat timbal yang ditemukan pada lokasi tanah yang tercemar. Selain itu, bahan pengikat semen portland dipilih karena sangat cocok dan sesuai jika dikombinasikan pada logam membentuk senyawa yang tidak larut seperti logam berat timbal. Hasil dari proses S/S dapat digunakan kembali untuk bahan bangunan, bahan konstruksi, bahan jalan, atau bahan untuk timbunan [3].

Kasus pencemaran tanah oleh logam berat di Indonesia telah banyak terjadi seperti di Kabupaten Tegal, Jawa Tengah tepatnya di Desa Pesarean, Kecamatan Adiwerna. Pencemaran tanah tersebut diakibatkan oleh limbah industri dari aktivitas peleburan dan pengecoran logam. Senyawa logam berat yang terkandung dalam limbah yaitu Timbal (Pb). Limbah yang dihasilkan tidak diolah dan hanya dibuang begitu saja di sekitar pemukiman penduduk dan lahan terbuka yang menyebabkan pencemaran tanah dan udara. Penelitian menunjukkan hasil konsentrasi timbal pada daerah Desa



Gambar 1. Peta Desa Pesarean, Kabupaten Tegal.



Gambar 2. Pemetakan lahan tekontaminasi yang dipulihkan.

Pesarean telah melebihi batas normal kandungan timbal alami di dalam tanah yaitu sebesar 398.489 ppm [6].

II. METODE PENULISAN

Metode penulisan kajian ini yaitu menggunakan studi literatur dengan mengumpulkan serta menganalisis berbagai pustaka yang berkaitan dengan masalah pencemaran tanah oleh logam berat timbal (Pb). Remediasi tanah menggunakan metode stabilisasi/solidifikasi dengan bahan pengikat semen portland. Jenis pustaka antara lain buku teks, jurnal, laporan penelitian, laporan seminar, disertasi, dan laporan tugas akhir.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Gambaran Umum Lokasi Studi

Desa Pesarean, Kecamatan Adiwerna, Kabupaten Tegal terletak di koordinat -6.935907,109.130900 dengan luas wilayah 130,83 m². Populasi penduduknya sebanyak 12.444 jiwa dengan ketinggian wilayahnya yaitu sebesar 9,8 m di atas permukaan laut. Wilayah ini dibatasi oleh Kecamatan Dukuhhuri di sebelah utara, Kecamatan Talang dan Kecamatan Pangkah di sebelah Timur, Kecamatan Slawi dan Kecamatan Dukuhwaru di sebelah selatan serta Kecamatan Jatibarang (Kabupaten Brebes) di sebelah Barat. Peta Desa

Tabel 1. Presisi kekuatan tekan

	Umur Hari	Koefisien Variasi	Rentang Hasil Test yang Diterima
Semen Portland			
Rasio air-semen:			
<i>Single-Lab</i>	3	4,0	11,3
	7	3,6	10,2
<i>Multi-Lab</i>	Rata-rata	3,8	10,7
	3	6,8	19,2
	7	6,4	18,1
	Rata-rata	6,6	18,7
Campuran Semen Mortar aliran konstan :			
<i>Single-Lab</i>	3	4,0	11,3
	7	3,8	10,7
<i>Multi-Lab</i>	28	3,4	9,6
	Rata-rata	3,8	10,7
<i>Single-Lab</i>	3	7,8	22,1
	7	7,6	21,5
<i>Multi-Lab</i>	28	7,4	20,9
	Rata-rata	7,6	21,5
Semen pasangan bata Mortar aliran konstan :			
<i>Single-Lab</i>	7	7,9	22,3
	28	7,5	21,2
<i>Multi-Lab</i>	Rata-rata	7,7	21,8
	7	11,8	33,4
	28	12,0	33,9
	Rata-rata	11,9	33,7

Tabel 2.

Baku mutu zat pencemar penetapan pengelolaan tanah terkontaminasi limbah bahan berbahaya dan beracun

Zat Pencemar (berat kering)	TCLP-A (mg/L)	TK-A (mg/kg)
Timbal, Pb	3	6000
Tembaga, Cu	60	3000
Seng, Zn	300	15000
Kadmium, Cd	0,9	400

Pesarean tertera pada Gambar 1.

Desa Pesarean terkenal dengan industri besi pengecoran logam dengan bahan landasan kuningan dan aluminium, pusat jual beli logam rongsokan tembaga, aluminium dan kuningan, *home industry* vendor pabrikan dan industri kompor minyak. Industri logam yang ada di Desa Pesarean ini mulai berkembang pada pertengahan tahun 1980-an, diikuti industri rumah tangga pembakaran timah atau pengecoran logam dengan bahan baku aki bekas dan bahan bekas lainnya. Pada proses pembakaran timah menghasilkan gas buang yang mengandung partikel debu, SO₂, NO₂ dan logam timah serta limbah padat yang mengandung Pb. Jumlah limbah padat untuk kapasitas produksi sebesar 250 kg timah hitam atau dengan menggunakan 1000 kg aki bekas menghasilkan kurang lebih 150 kg.

B. Pencemaran Timbal di Lokasi Studi

Timbal atau timah hitam yang biasa disebut dengan (Pb) merupakan logam berat yang mempunyai warna kelabu kebiruan dan termasuk logam golongan IV A dalam tabel periodik unsur kimia. Timbal mempunyai nomor atom 82 dengan berat atom 207,2 berbentuk padat pada suhu ruang

dan memiliki berat jenis sebesar $11,34 \text{ g/cm}^3$ [7]. Beberapa industri yang menghasilkan timbal seperti industri pengecoran maupun pemurnian, industri baterai, industri bahan bakar, industri kabel dan industri kimia [8].

Sifat yang dimiliki oleh timbal yaitu lentur, sangat rapuh dan mengkerut pada pendinginan, sulit larut dalam air dingin, air panas dan air asam. Timbal memiliki titik lebur yang rendah, yaitu hanya $327,5 \text{ C}$ serta timbal dapat larut dalam asam nitrit, asam asetat dan asam sulfat pekat. Bentuk oksidasi yang paling umum adalah timbal (II) dan senyawa organometalik yang terpenting adalah timbal tetra etil (TEL: *tetra ethyl lead*), timbal tetra metil (TML: *tetra methyl lead*) dan timbal stearat. Timbal merupakan logam yang tahan terhadap korosi atau karat, sehingga sering digunakan sebagai bahan *coating* [9].

Pencemaran berasal dari logam-logam berat sangat beracun dan dapat menimbulkan kehancuran pada ekosistem organismenya. Metabolismenya terputus dikarenakan racun oleh bahan aktif logam berat akan bekerja sebagai penghalang kerja enzim dalam proses fisiologis atau metabolisme tubuh. Bahan beracun ini akan dapat terakumulasi dalam tubuh yang mengakibatkan gangguan kesehatan. Akumulasi logam tidak hanya tergantung pada kandungan logam dalam tanah, tetapi juga tergantung pada unsur kimia tanah, jenis logam, pH tanah, dan spesies tanaman [10].

C. Pencemaran Logam Berat Timbal Pada Tanah

Kepala Dinas Perindustrian dan perdagangan Kabupaten Tegal, Suharmanto, dalam acara Lokakarya Industri Kecil Berbasis Limbah Logam Berat, yang diselenggarakan bersama Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) di Balai Desa Pesarean, Rabu (23/11/2011) malam, mengatakan, lingkungan dan masyarakat yang telah tercemar limbah logam berat di Desa Pesarean, Kecamatan Adiwerna diakibatkan oleh adanya pembuangan limbah yang tidak diolah dari aktivitas peleburan dan pengecoran logam. Kegiatan pembakaran timah dan timbal menghasilkan gas buang yang mengandung debu dan beberapa senyawa seperti gas sulfur dioksida (SO_2), nitrogen oksida (NO_2), dan gas yang mengandung partikel logam timbal (Pb). Limbah padat yang dihasilkan dalam industri logam di desa ini berupa serbuk atau partikel dan kerak sisa pembakaran yang mengandung seng, timbal, tembaga dan besi [11].

Hasil uji TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*) yang bertujuan untuk melihat kelarutan dari logam menunjukkan bahwa konsentrasi timbal dan tembaga melebihi ambang batas yang telah ditetapkan. Peraturan Pemerintah No.18 Tahun 1999, konsentrasi timbal maksimum adalah $2,5 \text{ mg/L}$ dan WHO (*World Health Organization*) menetapkan batas maksimum timbal dalam tanah adalah 400 ppm . Sebenarnya, sulit dilakukan penetapan ambang batas pada konsentrasi logam di tanah, dikarenakan faktor-faktor seperti sifat tanah dan kondisi tanah yang berbeda-beda setiap wilayah. Konsentrasi timbal pada tanah dapat dipengaruhi oleh lamanya polutan berada di atas tanah atau mencemari tanah sehingga senyawa organik mengalami degradasi. Selain itu, besarnya konsentrasi timbal pada tanah dapat pula disebabkan oleh keadaan alami tanah yang bersifat asam [6].

Data besarnya konsentrasi timbal dalam tanah tahun 2012

dan 2015 merupakan data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. Begitu juga data konsentrasi timbal dalam air tanah tahun 2012 dan tahun 2018. Konsentrasi Timbal dalam tanah dengan pengujian langsung merupakan hasil analisis menggunakan Spektroskopi Serapan Atom (AAS) dan (*X-ray Fluorescence*) XR-F [6]. Pengukuran konsentrasi timbal dalam tanah di pekarangan sekolah dan pemukiman, menunjukkan bahwa konsentrasi timbal tertinggi terletak pada pekarangan pemukiman di selatan timbunan limbah dan area pemukiman sebesar 398.489 ppm dan 160.427 ppm . Pada lingkungan sekolah, kandungan timbal tertinggi ada pada sekolah yang berada di belakang timbunan limbah pada koordinat kedua sebesar 21.021 ppm [6].

D. Penanganan Pencemaran di Desa Pesarean, Kabupaten Tegal

Berdasarkan PP No 101 Tahun 2014 Tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun, pemerintah Kabupaten Tegal mengeluarkan tiga kebijakan diantaranya:

1) Relokasi Industri Logam ke Kawasan PIK Kebasen

Kebijakan memindahkan atau merelokasi para pengusaha industri logam dikarenakan limbah yang dihasilkan terlalu banyak serta dampak yang ditimbulkan semakin buruk bagi lingkungan hidup dan manusia. Pemerintah merelokasi industri peleburan logam ini dari Desa Pesarean ke kawasan perkampungan industri kecil (PIK) di Desa Kebasen yang berada di tengah-tengah sawah dan jauh dari pemukiman yang jaraknya kurang lebih $1,3 \text{ kilometer}$ dari pemukiman Desa Pesarean.

Kebijakan ini tidak serta merta langsung disetujui oleh masyarakat, namun membutuhkan waktu sepuluh tahun bagi Pemerintah Kabupaten Tegal dalam merayu masyarakat selaku para pelaku industri peleburan logam untuk mau direlokasi ke Kawasan PIK Kebasen. Alasan warga yaitu Kawasan PIK Kebasen letaknya jauh dari pemukiman warga, sehingga mereka harus mengeluarkan biaya lebih banyak untuk transportasi dan pangan setiap harinya. Selain itu, lokasi PIK Kebasen ini diperkirakan hanya bisa menampung sekitar 70 pelaku usaha tersebut. Maka dari itu, Bupati Tegal, Umi Azizah, mengungkapkan bahwa kehadiran KLHK sangat diharapkan dalam penuntasan persoalan ini dengan mendukung pelaksanaan kegiatan pemulihan lahan terkontaminasi logam di Desa Pesarean.

2) Kebijakan Enkapsulasi

Kebijakan enkapsulasi yaitu dengan memasukkan limbah padat yang sudah menggenangi di Desa Pesarean ke dalam kapsul yang terbuat dari Geomembran teknologi Amerika, kemudian kapsul tersebut dipendam ke dalam tanah lapangan sepak bola di Desa Pesarean. Secara teori, kebijakan enkapsulasi ini bisa bertahan dan mampu menyimpan limbah selama 200 tahun. Akan tetapi setelah dikaji dan dilakukan uji coba, kebijakan ini tidak dapat diimplementasikan dikarenakan luas lapangan sepak bola yang digunakan tidak sesuai dengan jumlah limbah.

Selain itu, metode enkapsulasi ini cocok diterapkan pada tanah yang memiliki kedalaman diatas 3 meter , dimana pada lokasi awal rencana tempat penimbunan kapsul atau lapangan sepak bola yang berada di Desa Pesarean ini pada kedalaman 1 meter air tanah sudah keluar. Sehingga, kebijakan

enkapsulasi ini tidak disarankan untuk diterapkan karena nantinya air tanah akan ikut terkontaminasi limbah yang dihasilkan oleh industri peleburan logam [12].

3) Kebijakan Clean Up/Remediasi (Pembersihan Limbah Peleburan Logam)

Kebijakan penutupan limbah dengan memasang *Paving block* pada lahan terkontaminasi dan tanah tempat pembuangan limbah dinilai kurang efektif. Tanah yang terkontaminasi memang tertutup oleh *paving block*, tetapi tidak menghilangkan kontaminan dari wilayah itu sendiri. Sehingga kebijakan ini tidak akan mengurangi masalah, melainkan menambah resiko kontaminan merembes ke dalam lapisan air tanah.

Pilihan kebijakan lainnya yaitu remediasi secara *ex-situ*, yaitu dengan mengambil tanah kemudian memindahkannya ke tempat lain dan menggantinya dengan tanah baru atau tanah yang tidak tercemar. Setelah ditinjau dari aspek teknik, sosial maupun ekonomi, pembersihan lahan ini dinilai efektif karena penggunaan lahan kembali yaitu dengan tanah yang sudah tidak mengandung limbah sehingga aman untuk digunakan. Pengerukan tanah ini cocok dilakukan di Desa Pesarean dikarenakan juga air tanahnya yang dangkal, sehingga jika dilakukan secara *in-situ* dengan metode kimia dikhawatirkan munculnya kembali limbah pada tanah tersebut [6].

update data saat penyusunan DED kondisi terkini yaitu diketahui estimasi volume tanah yang terkontaminasi limbah logam di Desa Pesarean, Kecamatan Adiwerna mencapai 18.019 ton atau setara dengan 9.023 m³ yang berasal dari kegiatan peleburan logam seperti aluminium, tembaga, timbal, merkuri, besi dan aki bekas. Limbah tersebut tersebar di lima lokasi, yaitu *dumpsite*, jalan dan gang, pemakaman, halaman sekolah, serta pekarangan terbuka. Wakil Bupati Tegal, Sabilillah Ardie membeberkan tiga area lokasi lahan terkontaminasi telah dipetakan, yaitu Area Selatan 1, Area Selatan 2, dan Area Utara. Gambar 2 menunjukkan area pemetakan lahan terkontaminasi yang akan dipulihkan.

Alhasil pada tahun 2021, pemulihan pada Area Selatan 2 tepatnya di halaman SMA-SMK NU 01 Penawaja telah dilaksanakan yaitu berupa pembersihan limbah dan tanah terkontaminasi sebanyak 3.301 ton. Tanah tersebut berhasil dikeruk dan diangkat menggunakan alat eskavator hingga tanah dasar menjadi bersih lalu diangkut ke PT. Purwakarta Jaya Sejahtera untuk digunakan sebagai substitusi bahan baku pembuatan batako dan bata tahan api. Sehingga saat ini data mengenai tanah yang masih terkontaminasi dan belum dipulihkan sebanyak 14.780 ton. Rinciannya, 8.653 ton lahan seluas 2.428 m² dan 6.127 ton di lahan seluas 3.466 m². Direktorat Pemulihan Kontaminasi dan Tanggap Darurat Limbah B3 (PKTDLB3), Haruki Agustina, mengatakan bahwa upaya pemulihan lingkungan ini tidak hanya sebatas pada penanganan limbahnya melainkan pada perekonomian warganya. Sebagaimana menguatnya fungsi kawasan Desa Pesarean sebagai destinasi wisata, pemerintah mengusulkan agar masyarakat yang semula masih berkecimpung di usaha pengecoran logam beralih ke profesi lain yang ramah lingkungan (Radar Tegal, 2021). Bupati Tegal, Umi Azizah mengatakan bahwa lahan yang telah dilakukan kegiatan pemulihan, dimanfaatkan untuk mendukung kegiatan wisata religi yang menyatu dalam satu kawasan di Makam Sunan Amangkurat I.

E. Karakteristik Tanah Terkontaminasi Timbal di Desa Pesarean, Kabupaten Tegal

Jenis litologi batuan di Desa Pesarean adalah kerikil alluvium, batupasir dan lempung sehingga jenis tanah di daerah ini dihitung sebagai campuran batupasir dan tanah lempung. Tanah aluvial adalah tanah yang berlempung, tertutup debu dan pasir yang lapisan atasnya dapat dikembangkan dengan menambahkan bahan tambahan dan terkadang mengandung bahan organik. Tanah aluvial umumnya berwarna abu-abu sampai coklat, berpasir atau berdebu, dan memiliki struktur yang menggumpal atau tidak berstruktur [6]. Tanah bertekstur lempung mempunyai luas permukaan spesifik yang luas sehingga memiliki kemampuan mengikat air yang tinggi. Saat air terikat oleh partikel lempung, akan terjadi lekatan yang kuat, sehingga air dapat tertahan di dalam partikel lempung. Kadar air yang terkandung pada jenis tanah aluvial yang terkontaminasi logam berat yaitu rata-rata 29,2% [13].

pH merupakan faktor penting dalam perlakuan S/S dikarenakan dapat menstabilkan logam berat dalam matriks semen dengan membentuk hidroksida logam yang tidak larut dalam pelindian logam berat [14]. Dikarenakan tidak tersedianya data spesifik mengenai derajat keasaman (pH) pada tanah tercemar di Desa Pesarean, maka diasumsikan menggunakan data jurnal yang mengatakan bahwa berdasarkan hasil analisis di laboratorium menunjukkan pH tanah di daerah Kecamatan Adiwerna, Kabupaten Tegal berkisar antara 6,0-7,0 [15]. Hasil yang didapatkan pada uji kandungan logam menggunakan portable XRF (*X-ray-Flourescence*), yaitu pengujian langsung pada tanah yang terkontaminasi konsentrasi timbal tertinggi berada di halaman perumahan di selatan TPA dimana terletak pada titik sampel ke-14 yaitu sebesar 398.489 ppm [6].

F. Standar Kuat Tekan dan Baku Mutu Konsentrasi Timbal

ASTM C109 merupakan standar mengenai *Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 2 Inch or 50 mm)* yang menghasilkan kuat tekan rentang hasil tes yang didapat selama 28 hari pemeraman. Tabel 1. merupakan isi Standar ASTM C109.

Pada lampiran V Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 101 Tahun 2014 Tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun mengungkapkan bahwa setiap zat pencemar mempunyai baku mutu untuk pengelolaan tanah terkontaminasi Limbah B3. Tabel 2. merupakan beberapa nilai baku karakteristik beracun melalui TCLP dan Total Konsentrasi Untuk Penetapan Pengelolaan Tanah Tekontaminasi Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun.

G. Penerapan Remediasi Tanah Terkontaminasi Logam Berat Timbal di Desa Pesarean, Kabupaten Tegal

Pengujian kuat tekan dari masing-masing rasio pencampuran OPC (*Ordinary Portland Cement*) Tipe 1 dengan tanah yang terkontaminasi timbal yang diambil dari sekitar *Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM)*, Bangi, Malaysia [16]. Pengamatan dilakukan melalui Tes UCS dan *X-ray fluorescence* pada tanah terkontaminasi timbal yang distribusi ukuran partikel menunjukkan 17% berukuran lanau dan 24% berukuran lempung. Dimana, tanah tersebut hanya mengandung 24 µg/g timbal saja. Sehingga perlu ditambahkan timbal sintesis yaitu timbal nitrat, Pb(NO₃)₂

(murni 98%) untuk mendapatkan kurang lebih 1000 mg/kg timbal (1000 ppm). Kemudian dibuat variasi rasio campuran semen:tanah (berdasarkan persen berat) yaitu 10, 20, 40, 50, 60 dan 100% (kontrol) yang nantinya sampel tersebut dicetak dalam cetakan plastik (50 x 50 x 50 mm) dan pemadatan dengan digetarkan selama 5 menit. Setelah itu sampel dikeluarkan dari cetakan dan disimpan dalam kantong kedap udara, lalu dikeringkan pada suhu ruang ($27\pm 3^{\circ}\text{C}$) dan kelembaban sebesar $75\pm 5\%$. Pada skenario stabilisasi/solidifikasi ini digunakan OPC Tipe 1 dengan rasio semen:tanah yaitu 60% dikarenakan pada rasio ini diprediksi menghasilkan kuat tekan bebas (UCS) selama 28 hari sebesar 10,75 MPa.

Selanjutnya, dilakukan uji pelindian menggunakan analisis XRD selama 24 jam terhadap tanah terkontaminasi timbal dengan konsentrasi (40430 ± 3210 mg/kg) yang sudah dicampur dengan OPC dan dilakukan pemeraman selama 28 hari [17]. Sampel tanah diketahui mempunyai pH 7,5 yang menunjukkan tinggi jumlah mineral karbonat berfungsi pada netralisasi keasaman tanah. Perilaku Pb sangat bergantung pada pH, seperti yang diharapkan berdasarkan sifat amfoternya, menunjukkan mobilisasi yang lebih rendah pada pH sirkum-netral. Hasil yang didapatkan yaitu terjadi penurunan konsentrasi Pb dalam eluat 2040 ± 90 $\mu\text{g/L}$ yang menunjukkan retensi 99,93% dari total Pb dengan pH 12,3. Uji pelindian ini dilakukan pada berbagai pH mulai 2,0 hingga 12,7. Hasilnya menunjukkan nilai minimum pelindian Pb pada tanah yang tidak diolah yaitu 0,01 mg/L yang dicapai pada pH 9. Sedangkan, pH antara 4,5 dan 7 yang menghasilkan nilai pelindian Pb stabil yaitu sebesar 0,2 mg/L. Peningkatan yang jelas ditemukan untuk kedua pH lebih rendah dari 4 dan lebih tinggi dari 9, dimana pelepasan tertinggi dari tanah yang terkontaminasi dicapai antara pH 12 dan 13. Berdasarkan hasil penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa pada hasil uji pelindian yang bernilai 0,2 mg/L menghasilkan pH berkisar 10, dimana pada pH 10 matriks semen dikatakan sesuai untuk stabilitas fase C-S-H.

Rasio semen:tanah yaitu 60% menghasilkan kuat tekan yang sesuai dengan ASTM C109 sebesar 10,75 MPa [16]. Hasil uji pelindian TCLP retensi logam berat yang tinggi dalam matriks/lumpur pozzolan [18]. Persen retensi logam berat lebih dari sekitar 79% untuk Cd, Pb, dan Ni dan lebih dari 93% untuk Cr, Cu, dan Zn setelah TCLP. Urutan logam yang tertahan dalam bahan pozzolan/matriks lumpur adalah ditemukan sebagai berikut:

Seng > Timbal > Kromium > Tembaga > Kadmium > Nikel
(Untuk *fly ash*)

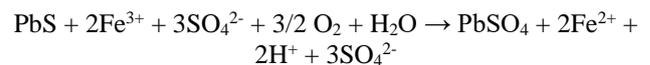
Seng > Kromium > Timbal > Tembaga > Kadmium > Nikel.
(Untuk *Cement Clinker Dust (CCD)*)

Berdasarkan pernyataan tersebut, dapat disimpulkan bahwa penggunaan semen portland tipe I lebih baik digunakan dalam menurunkan logam berat timbal pada metode S/S dibandingkan dengan semen portland pozzolan. Semen Portland Pozzolan lebih efektif menurunkan pelindian logam berat Seng (Zn) dibanding dengan timbal, dimana tanah tercemar pada Desa Pesarean hanya tercemar logam berat timbal, sedangkan untuk air tanahnya logam berat konsentrasi timbal masih dibawah baku mutu yaitu <0,01 mg/kg.

Kemudian dilakukan perhitungan mengenai jumlah beban yang ingin dikurangi dan akan dilakukan metode S/S dari data-data awal tanah yang telah diketahui yaitu $\frac{1}{4}$ massa tanah tercemar Area Selatan 1 dikarenakan lokasinya yang lebih dekat dengan objek wisata religi dan situs cagar budaya Makam Amangkurat I yaitu sebesar 2163,5 ton dan konsentrasi timbal tertinggi yaitu sebesar 398.489 ppm dihasilkan beban 860 ton.

Selanjutnya, dilakukan perhitungan mengenai banyaknya semen dan air (40% dari berat total) yang digunakan untuk dicampur pada tanah tercemar dan banyaknya cetakan yang dibuat untuk meremediasi tanah tercemar. Dimana dipilih rasio semen:tanah sebesar 60%, sehingga dihasilkan 1290 ton untuk jumlah semen yang dibutuhkan serta dicampur dengan 860 ton air. Metode yang dilakukan secara ex-situ ini, dimana hasil campuran dimanfaatkan menjadi batako seperti pada Area Selatan 2. Proses pembuatan batako yaitu dengan dilakukan pemadatan menjadi bentuk balok-balok serta pada proses pengerasannya ditempatkan pada tempat yang lembab atau tidak terkena sinar matahari langsung atau hujan. Ukuran cetakan batako normal yang dipilih yaitu 40 x 10 x 20 cm dengan densitasnya sebesar 2200 kg/m³. Volume total cetakan yang dihasilkan sebesar 977.273 cm³, sehingga dihasilkan jumlah cetakan sebanyak 123 buah.

Penambahan Fe(III) dapat membubarkan galena (PbS) dan membentuk *anglesite* (PbSO₄). Sehingga akan menghasilkan reaksi berikut [17]:



Konsentrasi yang dihasilkan pada setiap cetakan bernilai $0,9 \times 10^{-6}$ mg/kg. Maka selanjutnya didapatkan massa Fe(III) per cetakan dengan nilai $1,9 \times 10^{-3}$ mg. Hasil konsentrasi akhir yang didapatkan setelah perlakuan S/S tanah terkontaminasi di Desa Pesarean pada $\frac{1}{4}$ Area Selatan 1 yaitu sebesar $2,7 \times 10^{-10}$ mg/kg, dengan efisiensi stabilisasi yang dihasilkan yaitu sebesar 99,9%.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan uraian yang dijelaskan dapat diperoleh kesimpulan bahwa pencemaran tanah terkontaminasi logam berat timbal di Desa Pesarean, Kecamatan Adiwerna, Kabupaten Tegal, Indonesia disebabkan oleh adanya pembuangan limbah industri peleburan logam dan aki bekas yang tidak diolah ke lingkungan sekitar sehingga menimbulkan dampak buruk bagi lingkungan maupun masyarakat sekitar.

Metode untuk mengurtangi pencemar logam berat timbal ialah metode stabilisasi/solidifikasi. Bahan pengikat yang digunakan yaitu *Ordinary Portland Cement Type I (OPC)*. Semen Portland tipe I ini memiliki persentase penurunan logam berat timbal yang lebih besar dibandingkan dengan bahan pengikat Semen Portland pozzolan. Penggunaan semen Portland tipe I sesuai untuk tanah tercemar timbal di Desa Pesarean yang memiliki kandungan tertinggi hingga 398.489 ppm.

Metode stabilisasi/solidifikasi yang dilakukan adalah secara ex-situ karena tanah pada lokasi wilayah studi yang dangkal. Banyaknya semen yang dibutuhkan untuk meremediasi $\frac{1}{4}$ tanah tercemar Pb pada Area Selatan 1

dengan memilih rasio semen: tanah sebesar 60:40 adalah 1290 ton dengan berat beban yang tercemar adalah 860 ton.

Hasil uji pelindian Pb pada hari ke 28 dengan menambahkan Fe(III) pada sampel tanah sebesar $1,9 \times 10^{-3}$ mg per cetakan batako dengan ukuran $40 \times 10 \times 20$ cm, menghasilkan konsentrasi total 123 cetakan sebesar 6×10^{-4} mg/L. Konsentrasi tersebut berada dibawah baku mutu yang telah ditetapkan yaitu 0,5 mg/L efisiensi stabilisasi/solidifikasi sebesar 99,9%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. A. Wuana and F. E. Okieimen, "Heavy Metals in contaminated soils : a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation," *Int. Sch. Res. Not.*, 2011.
- [2] D. Dermatas and X. Meng, "Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils," *Eng. Geol.*, vol. 70, no. 3-4, 2003, doi: 10.1016/S0013-7952(03)00105-4.
- [3] P. Desogus, P. P. Manca, G. Orrù, and A. Zucca, "Stabilization-solidification treatment of mine tailings using Portland cement, potassium dihydrogen phosphate and ferric chloride hexahydrate," *Miner. Eng.*, vol. 45, 2013, doi: 10.1016/j.mineng.2013.01.003.
- [4] M. P. Utomo and E. W. Laksono, "Kajian Tentang Proses Solidifikasi/Stabilisasi Logam Berat dalam Limbah dengan Semen Portland," in *Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan dan Penerapan MIPA Yogyakarta*. 2007.
- [5] J. Kumpiene, A. Lagerkvist, and C. Maurice, "Stabilization of Pb- and Cu-contaminated soil using coal fly ash and peat," *Environ. Pollut.*, vol. 145, no. 1, 2007, doi: 10.1016/j.envpol.2006.01.037.
- [6] I. Lestari, H. Agustina, and T. Soesilo, "Analysis of Lead Contamination in Soil (Case : Pesarean Village, Tegal District Area)," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019.
- [7] H. Palar, *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat*. Jakarta: Rineka Cipta, 2008, ISBN: 978-979-518-595-6.
- [8] S. Sudarmaji, "Toksikologi logam berat B3 dan dampaknya terhadap kesehatan," *J. Kesehat. Lingkung.*, vol. 2, no. 2, pp. 129--142, 2006.
- [9] R. Amalia, "Analisis Hubungan Kadar Timbal (Pb), Zinc Protoporphyrin dan Besi (Fe) dalam Sampel Darah Operator SPBU di Kota Semarang," Departemen Biologi: Universitas Negeri Semarang, 2016.
- [10] Charlene, "Pencemaran Logam Berat Timbal (Pb) dan Cadmium (Cd) pada Sayur-sayuran," Departemen Falsafah Sain: Institut Pertanian Bogor, 2004.
- [11] I. J. Adam, "Adaptasi Masyarakat Terhadap Perubahan Lingkungan Permukiman Akibat Aktivitas Industri Logam Rumah Tangga di Desa Pesarean, Kecamatan Adiwerna, Kabupaten Tegal," Departemen Ilmu Lingkungan: Universitas Gadjah Mada, 2006.
- [12] D. N. Fitriyani, "Analisis kebijakan pemerintah tegal dalam mengatasi pencemaran limbah industri logam (studi kasus industri logam di Desa Pesarean Kecamatan Adiwerna Kabupaten Tegal)," *J. Polit. Gov. Stud.*, vol. 6, no. 3, pp. 51--60, 2017.
- [13] J. Meyer, A. Schmidt, K. Michalke, and R. Hensel, "Volatilisation of metals and metalloids by the microbial population of an alluvial soil," *Syst. Appl. Microbiol.*, vol. 30, no. 3, 2007, doi: 10.1016/j.syapm.2006.05.001.
- [14] S. Paria and P. K. Yuet, "Solidification/stabilization of organic and inorganic contaminates using portland cement: a literature review," *Environ. Rev.*, vol. 14, no. 4, pp. 217--255, 2006.
- [15] D. Mulyono, "Analisis kesesuaian lahan dan evaluasi jenis tanah dalam budidaya tanaman tebu untuk pengembangan daerah Kabupaten Tegal," *J. Sains dan Teknol. Indones.*, vol. 13, no. 2, 2011.
- [16] A. Tarmizi, A. Karim, I. Rahman, A. Latiff, and M. Taha, "The effect of strength in lead contaminated residual soil solidified/stabilized with cement," *Int. J. Civ. Environ. Eng.*, vol. 12, no. 6, pp. 8--12, 2012.
- [17] S. Contessi *et al.*, "Stabilization of lead contaminated soil with traditional and alternative binders," *J. Hazard. Mater.*, vol. 382, 2020, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.120990.
- [18] M. R. Lashen, A. M. Ashmawy, H. S. Ibrahim, and S. M. A. Moniem, "Pozzolanic-based materials for stabilization/solidification of contaminated sludge with hazardous heavy metal: case study. desalination and water treatment," *Desalin. Water Treat.*, vol. 51, no. 13-15, pp. 2644--2655, 2013.