



TESIS - RE 185401

Biobleaching Aluminium dari Limbah Lumpur Pengolahan Air Minum menggunakan *Acidithiobacillus ferrooxidans* dan *Pseudomonas fluorescens*

TRIADNA FEBRIANI AABIDAH
03211750012006

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Dr. YULINAH TRIHADININGRUM, M.App.Sc

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN, DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020



TESIS - RE 185401

Biobleaching Aluminium dari Limbah Lumpur Pengolahan Air Minum menggunakan *Acidithiobacillus ferrooxidans* dan *Pseudomonas fluorescens*

TRIADNA FEBRIANI AABIDAH
03211750012006

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Dr. YULINAH TRIHADININGRUM, M.App.Sc

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN, DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020



THESIS - RE 185401

Bioleaching of Aluminum from Drinking Water Treatment Sludge using *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Pseudomonas fluorescens*

TRIADNA FEBRIANI AABIDAH
03211750012006

SUPERVISOR
Prof. Dr. YULINAH TRIHADININGRUM, M.App.Sc.

DEPARTEMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
FACULTY OF CIVIL, PLANNING, AND GEO ENGINEERING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

TRIADNA FEBRIANI AABIDAH

NRP: 03211750012006

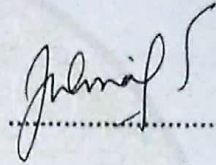
Tanggal Ujian: 13 Januari 2020

Periode Wisuda: Maret 2020

Disetujui oleh:

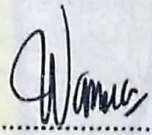
Pembimbing:

1. Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc.
NIP: 19530706 198403 2 004

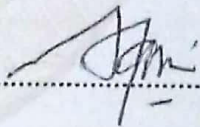

.....

Penguji:

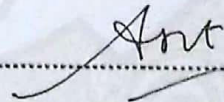
1. I D A A Warmadewanthi, S.T., M.T., Ph.D.
NIP: 19750212 199903 2 001


.....

2. Harmin Sulistyning Titah, S.T., M.T., Ph.D.
NIP: 19750523 200212 2 001


.....

3. Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T., M.Phil., Ph.D.
NIP: 19820804 200501 1 001


.....


Kepala Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan

Dr. Eng. Arie Dipareza Syafe'i, S.T., MEPM

NIP: 19820119 200501 1 001

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, berkah, dan hidayah-Nya sehingga tesis ini dapat terselesaikan. Tesis berjudul **“*Bioleaching Aluminium dari Limbah Lumpur Pengolahan Air Minum menggunakan Acidithiobacillus ferrooxidans dan Pseudomonas fluorescens*”** ini dibuat dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Pendidikan S2 Program Magister Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Tesis ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan bimbingan dari pihak-pihak yang terkait dalam pelaksanaannya. Oleh karena itu penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc., selaku dosen pembimbing tesis yang telah sabar dan menyediakan banyak waktu, tenaga, dan pikiran dalam memberikan arahan, bimbingan, dan saran.
2. Ibu I D A A Warmadewanthi, S.T., M.T., Ph.D., Ibu Harmin Sulistyaning Titah, S.T., M.T., Ph.D., dan Bapak Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T., M.Phil., Ph.D., selaku dosen penguji yang telah memberikan segala arahan, saran, dan kritik yang membangun.
3. Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi atas hibah dana penelitian dalam Program Pendidikan Magister menuju Doktor untuk Sarjana Unggul (PMDSU).
4. Saudari Rizkiy Amaliyah Barakwan yang telah memberikan izin untuk melakukan sebagian kecil dari penelitian beliau, serta dengan sabar mengarahkan dan memberikan bimbingan dalam pembuatan laporan.
5. Kedua orang tua yang selalu mengingatkan, menyemangati dan mendoakan penulis sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan baik.
6. Teman-teman S2 Teknik Lingkungan yang saling menyemangati dan memberikan masukan untuk pengerjaan tesis ini.

Penyusunan tesis ini telah penulis usahakan semaksimal mungkin, namun sebagaimana manusia biasa tentunya masih terdapat kesalahan. Untuk itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan. Semoga penelitian ini dapat memberikan sumbangsih bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan bermanfaat bagi masyarakat.

Surabaya, Januari 2020

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Bioleaching Aluminium dari Limbah Lumpur Pengolahan Air Minum menggunakan *Acidithiobacillus ferrooxidans* dan *Pseudomonas fluorescens*

Nama Mahasiswa : Triadna Febriani Aabidah
NRP : 03211750012006
Pembimbing : Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc

ABSTRAK

Pengolahan air minum menggunakan aluminium sulfat dalam proses koagulasi menghasilkan lumpur alum dalam jumlah besar. Lumpur alum tersebut mengandung kadar aluminium yang tinggi. Aluminium dalam lumpur alum berpotensi menyebabkan efek merusak bagi lingkungan. Bakteri dapat digunakan untuk menghilangkan aluminium melalui *bioleaching*. Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan karakteristik fisik-kimia dan toksisitas lumpur alum, menentukan pengaruh jenis bakteri dan komposisi media pada proses *bioleaching*, dan menentukan pengaruh bakteri *indigenous* lumpur alum terhadap kemampuan *bioleaching*.

Sampel lumpur alum berasal dari unit *clearator* IPAM Karangpilang PDAM Surabaya. Karakteristik fisik-kimia lumpur alum yang dianalisis adalah pH, *total solids* (TS), *total suspended solids* (TSS), alkalinitas, logam, *chemical oxygen demand* (COD), *biochemical oxygen demand* (BOD₅), nitrogen (N), dan fosfor (P). Uji toksisitas lumpur alum terhadap bakteri uji dengan menggunakan metode *disc diffusion* dan *broth dilution*. *Bioleaching* dilakukan selama 15 hari dalam sistem *batch* menggunakan reaktor dengan kapasitas 500 mL. Variasi yang digunakan pada tahap pertama *bioleaching* adalah jenis bakteri (*Acidithiobacillus ferrooxidans* dan *Pseudomonas fluorescens*) dan komposisi lumpur alum dan media tumbuh bakteri (50/50; 75/25; 87,5/12,5; dan 100/0 (v/v)). Hasil optimum dari tahap pertama digunakan pada penelitian tahap kedua *bioleaching* dengan variasi media lumpur steril dan lumpur tanpa sterilisasi untuk mengetahui pengaruh bakteri *indigenous*. Nilai pH dan aluminium terlarut diukur setiap 3 hari selama proses *bioleaching*.

Karakteristik fisik-kimia lumpur alum dari IPAM Karangpilang Surabaya mengandung aluminium tinggi (5.900 mg/L). Uji toksisitas menunjukkan bahwa lumpur alum tidak bersifat toksik pada bakteri *P. fluorescens* pada seluruh komposisi lumpur alum dan media tumbuh bakteri. Sedangkan pertumbuhan bakteri *A. ferrooxidans* mulai terhambat pada komposisi lumpur alum dan media tumbuh bakteri 87,5/12,5 dan 100/0 (v/v). Bakteri *A. ferrooxidans* mampu melarutkan aluminium tertinggi sebesar 340,70 mg/L (42,77%). Sedangkan bakteri *P. fluorescens* hanya mampu melarutkan aluminium tertinggi sebesar 8,14 mg/L (1,02 %). Kedua bakteri dapat melarutkan aluminium tertinggi pada komposisi lumpur alum dan media tumbuh bakteri 50/50 (v/v). Bakteri *indigenous* pada media 9K dalam lumpur alum dapat meningkatkan kelarutan aluminium

pada proses *bioleaching*. Efisiensi *bioleaching* aluminium dengan *A. ferrooxidans* dan bakteri *indigenous* sebesar 399,67 mg/L (50,18%).

Kata kunci : Aluminium, *bioleaching*, lumpur alum, *recovery* koagulan alum

Bioleaching of Aluminum from Drinking Water Treatment Sludge using *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Pseudomonas fluorescens*

Student Name : Triadna Febriani Aabidah
Student Identity Number : 03211750012006
Supervisor : Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc

ABSTRACT

Drinking water treatment uses aluminum sulfate in coagulation process, which generates large amount of alum sludge. The sludge potentially causes detrimental effect to the environment. Bacteria can be used for removing aluminum and other metals through bioleaching. This research aimed to determine the physical-chemical characteristics and toxicity of the alum sludge; to determine the bioleaching performances of *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Pseudomonas fluorescens* in varied sludge concentrations; and to determine the influence of indigenous bacteria in alum sludge on the aluminum bioleaching process.

The alum sludge samples were collected from clearator unit at Karangpilang water treatment plant in Surabaya City, Indonesia. The alum sludge was characterized according to pH, metals, COD, BOD, phosphate, and nitrogen concentrations. Toxicity test of the alum sludge was performed on both tested bacteria. The bioleaching was carried out for 15 days in batch system using reactors of 500 mL capacity. Varied sludge and bacterial medium compositions of: 100/0, 87.5/12.5, 75/25, 50/50 v/v were used during the experiment. The best type of bacteria and composition of sludge and bacterial medium used in second phase of bioleaching research with variations of sterile sludge medium and unsterile sludge medium to find out the influence of indigenous bacteria in alum sludge.

The results showed that the alum sludge had high concentrations of aluminum (5,900 mg/L). Toxicity tests showed that alum sludge was not toxic to *P. fluorescens* bacteria in every sludge concentrations. The growth of *A. ferrooxidans* began to be inhibited in alum sludge concentration of 87.5% and 100%. Bioleaching test results obtained that *A. ferrooxidans* was able to dissolve the highest aluminum until 340.70 mg/L (42.77%). *P. fluorescens* was only able to dissolve the highest aluminum until 8.14 mg/L (1.02%). Indigenous bacteria on 9K medium in alum sludge could increase aluminum extraction in bioleaching process. The efficiency of aluminum bioleaching with *A. ferrooxidans* and indigenous bacteria was 50.18% (399.67 mg/L).

Keyword : aluminium, alum sludge, bioleaching, recovery of alum

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.1.1 Sumber Limbah Lumpur Alum.....	1
1.1.2 Karakteristik dan Toksisitas Lumpur Alum	2
1.1.3 Pengolahan Lumpur Alum	3
1.1.4 <i>Bioleaching</i> Aluminium untuk <i>Recovery</i> Koagulan Alum.....	4
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Ruang Lingkup Penelitian.....	6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Karakteristik Lumpur Alum.....	7
2.2 Karakteristik Logam Aluminium	8
2.3 Ekstraksi Aluminium dengan <i>Bioleaching</i>	9
2.4 Mekanisme <i>Bioleaching</i> Logam	10
2.4.1 Mekanisme <i>Bioleaching</i> Aluminium dengan Bakteri <i>A. ferrooxidans</i>	11
2.4.2 Mekanisme <i>Bioleaching</i> dengan Bakteri <i>P. fluorescens</i>	11
2.5 Mikroorganisme dalam <i>Bioleaching</i>	12
2.5.1 Bakteri <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	12
2.5.2 Bakteri <i>Pseudomonas fluorescens</i>	13
2.5.3 Bakteri <i>Indigenous</i> Lumpur Alum	14
2.6 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Proses <i>Bioleaching</i>	15
2.7 Penelitian Terdahulu	16
2.8 Uji Toksisitas	17
2.9 Alkalinitas	18
2.10 Reaktor <i>Bioleaching</i> dengan Sistem <i>Batch</i>	18
2.11 Uji Statistik ANOVA <i>Two Way</i>	19
BAB 3 METODE PENELITIAN	21
3.1 Kerangka Penelitian	21
3.2 Persiapan Penelitian	22
3.2.1 Pengambilan dan Persiapan Sampel Limbah Lumpur Pengolahan Air Minum	22
3.2.2 Persiapan Media dan Biakan Bakteri	24
3.3 Menentukan Karakteristik Fisik dan Kimia Lumpur Alum	24
3.4 Uji Toksisitas Lumpur Alum	25

3.4.1 Metode <i>Disc Diffusion</i>	25
3.4.2 Metode <i>Broth Dilution</i>	26
3.5 Proses <i>Bioleaching</i>	28
3.5.1 Menentukan Pengaruh Jenis Bakteri dan Komposisi Media pada Proses <i>Bioleaching</i> Aluminium dari Limbah Lumpur Pengolahan Air Minum	28
3.5.2 Menentukan Pengaruh Bakteri <i>Indigenus</i> Lumpur Alum pada Proses <i>Bioleaching</i> Aluminium dari Limbah Lumpur Pengolahan Air Minum	29
3.5.3 Mekanisme <i>Bioleaching</i> dengan Bakteri.....	30
3.5.4 Pemisahan Larutan Hasil <i>Bioleaching</i> untuk Analisis Parameter Uji	31
3.5.5 Analisis Parameter.....	31
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	33
4.1 Karakteristik Lumpur Alum	33
4.2 Toksisitas Lumpur Alum IPAM Karangpilang terhadap Bakteri <i>A. ferrooxidans</i> dan <i>P. fluorescens</i>	37
4.3 <i>Bioleaching</i> Aluminium dari Limbah Lumpur Pengolahan Air Minum dengan Bakteri <i>A. ferrooxidans</i> dan <i>P. fluorescens</i>	39
4.3.1 <i>Bioleaching</i> Aluminium dengan Bakteri <i>P. fluorescens</i>	39
4.3.2 <i>Bioleaching</i> Aluminium dengan Bakteri <i>A. ferrooxidans</i>	42
4.6 Kelarutan Logam Lainnya (Fe, Mn, Zn, Pb, dan Cu) pada Proses <i>Bioleaching</i> dengan <i>P. fluorescens</i> dan <i>A. ferrooxidans</i>	51
4.7 Konsentrasi Karbon, Nitrogen dan Fosfor pada Proses <i>Bioleaching</i> dengan <i>P.</i> <i>fluorescens</i> dan <i>A. ferrooxidans</i>	52
4.7.1 Rasio C:N:P (BOD:N:P).....	52
4.7.2 Perubahan Unsur N pada Proses <i>Bioleaching</i>	54
4.7.3 Perubahan Unsur P pada Proses <i>Bioleaching</i>	55
4.7.4 Perubahan Konsentrasi COD pada Proses <i>Bioleaching</i>	56
4.8 Potensi Pengaplikasian Proses <i>Bioleaching</i> Aluminium dari Limbah Lumpur Pengolahan Air Minum.....	57
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	59
5.1 Kesimpulan	59
5.2 Saran.....	59
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN.....	75

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Karakteristik Fisika dan Kimia Lumpur Alum dari Pengolahan Air Minum di Surabaya.....	7
Tabel 2.2	Penelitian-penelitian Terdahulu Mengenai Proses <i>Bioleaching</i> Aluminium..	16
Tabel 3.1	Parameter Fisik dan Kimia pada Analisis Karakterisasi Sampel Lumpur	25
Tabel 3.2	Desain Rancangan Faktorial Penelitian Tahap 1	29
Tabel 3.3	Desain Rancangan Faktorial Penelitian Tahap 2	29
Tabel 3.4	Variabel pada Proses <i>Bioleaching</i>	30
Tabel 3.5	Analisis Parameter <i>Bioleaching</i>	31
Tabel 4.1	Karakteristik Fisika-Kimia Lumpur Alum IPAM Karangpilang	33
Tabel 4.2	Nilai OD pada Uji Toksisitas dengan Bakteri <i>A. ferrooxidans</i>	39
Tabel 4.3	Pengaruh Komposisi Lumpur terhadap Efisiensi <i>Bioleaching</i> Aluminium dengan <i>P. fluorescens</i> pada Hari ke-15.....	42
Tabel 4.4	Pengaruh Komposisi Lumpur terhadap Efisiensi <i>Bioleaching</i> Aluminium dengan <i>A. ferrooxidans</i> pada Hari ke-9	44
Tabel 4.5	Nilai KA pada beberapa jenis senyawa.....	47
Tabel 4.6	Efisiensi <i>Bioleaching</i> Aluminium pada Perlakuan Lumpur Alum Steril dan Tidak Steril.....	49
Tabel 4.7	Rasio C:N:P (BOD:N:P) pada Reaktor <i>Bioleaching</i> dengan <i>P. fluorescens</i> Hari ke-0	53
Tabel 4.8	Rasio C:N:P (BOD:N:P) pada Reaktor <i>Bioleaching</i> dengan <i>A. ferrooxidans</i> Hari ke-0	53

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Hubungan pH dan Kelarutan Aluminium	8
Gambar 3.1	Tahap Penelitian.....	22
Gambar 3.2	Lokasi Pengambilan Sampel Lumpur Alum (a) Unit <i>Clearator</i> , (b) Saluran Drainase <i>Clearator</i> IPAM Karangpilang	23
Gambar 3.3	Uji Toksisitas dengan Metode <i>Disc Diffusion</i>	26
Gambar 3.4	Proses <i>Bioleaching</i> Lumpur Alum	31
Gambar 3.5	Proses <i>Bioleaching</i>	32
Gambar 4.1	Uji Toksisitas dengan Bakteri <i>P. fluorescens</i> pada Komposisi Lumpur Alum : Media Tumbuh Bakteri (a) 100/0; (b) 87,5:12,5; (c) 75/25; (d) 50/50	37
Gambar 4.2	Nilai OD pada Uji Toksisitas pada Bakteri <i>A. ferrooxidans</i>	39
Gambar 4.3	Nilai pH pada Proses <i>Bioleaching</i> menggunakan <i>P. fluorescens</i>	40
Gambar 4.4	Aluminium Terlarut Hasil Proses <i>Bioleaching</i> dengan <i>P. fluorescens</i>	41
Gambar 4.5	Nilai pH pada Proses <i>Bioleaching</i> menggunakan <i>A. ferrooxidans</i>	43
Gambar 4.6	Aluminium Terlarut Hasil Proses <i>Bioleaching</i> dengan <i>A. ferrooxidans</i>	43
Gambar 4.7	Hasil uji Anova <i>Two way</i> mengenai pengaruh komposisi media dan jenis bakteri terhadap efisiensi <i>bioleaching</i>	46
Gambar 4.8	Uji ANOVA <i>Two Way</i> mengenai Interaksi Antara Variasi Jenis Bakteri dan Komposisi Media terhadap Efisiensi <i>Bioleaching</i> Aluminium.....	47
Gambar 4.9	Konsentrasi Aluminium Terlarut pada Proses <i>Bioleaching</i> untuk Mengetahui Pengaruh Bakteri <i>Indigenous</i>	49
Gambar 4.10	Persentase Kelarutan Logam Fe, Mn, Zn, Pb, dan Cu pada Proses <i>Bioleaching</i> Hingga Hari ke-15	51
Gambar 4.11	Grafik kelarutan logam dan nilai pH.....	52
Gambar 4.12	Konsentrasi Total Nitrogen dalam Lumpur Alum	54
Gambar 4.13	Konsentrasi Total Fosfor dalam Lumpur Alum	55
Gambar 4.14	Konsentrasi COD dalam Lumpur Alum.....	56

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A Prosedur Analisis Laboratorium.....	75
LAMPIRAN B Hasil Analisis	84
LAMPIRAN C Dokumentasi.....	88
LAMPIRAN D Uji Statistik.....	90

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

1.1.1 Sumber Limbah Lumpur Alum

Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Surya Sembada Surabaya merupakan perusahaan jasa pemerintah penyedia layanan air bersih di Surabaya. PDAM Surya Sembada Surabaya mempunyai sejumlah instalasi pengolahan air minum (IPAM), salah satunya yaitu IPAM Karangpilang (Bhaskoro dan Ramadhan, 2018). Koagulasi-flokulasi merupakan salah satu proses pengolahan yang dilakukan di IPAM Karangpilang. Proses tersebut bertujuan untuk penjernihan dalam sistem pengolahan air bersih (Qomaruddin *et al.*, 2013). Proses fisik terjadi dalam koagulasi-flokulasi, yaitu terjadinya pembentukan flok-flok kecil sebagai wujud dari reaksi kimia antara ion negatif kotoran pada air baku dan ion positif bahan kimia yang dibubuhkan (koagulan). Flok-flok kecil ini menjadi semakin besar dan berat kemudian menggumpal dan mengendap sehingga terpisah menjadi lumpur dan efluen air bersih (Qomaruddin *et al.*, 2013).

Aluminium sulfat ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) atau alum adalah senyawa kimia yang paling banyak digunakan secara luas sebagai koagulan pada proses produksi air minum. Hal tersebut dikarenakan harganya yang ekonomis dan efektif, mudah dalam memperolehnya, dan aman dari korosif pada pipa (Ahmad *et al.*, 2016a). Penggunaan alum sebagai koagulan pada proses pengolahan air minum menyebabkan lumpur yang dihasilkan mengandung aluminium dengan konsentrasi tinggi (Cherifi *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2016; Barakwan *et al.*, 2019). Alum dapat terhidrolisis pada air membentuk aluminium hidroksida yang netral dimana koloid mengendap menjadi hidroksida terpresipitasi (Ahmad *et al.*, 2016b). Az-Zahra *et al.* (2014) menyatakan bahwa kadar aluminium total pada unit *accelerator* adalah sebesar 4.794 (mg/L).

Proses koagulasi-flokulasi di IPAM Karangpilang dilakukan pada unit *clearator* dengan menggunakan koagulan alum. Sehingga pada unit *clearator* selain menghasilkan efluen air bersih juga menghasilkan produk samping berupa lumpur. Lumpur tersebut umumnya disebut sebagai lumpur alum

(Cherifi *et al.*, 2016). IPAM Karangpilang membuang 253,65 m³/hari lumpur alum ke Kali Surabaya pada awal tahun 2017 (Firrizqy dan Oktaviani, 2017). Debit lumpur alum yang dihasilkan IPAM Karangpilang Surabaya meningkat pada akhir tahun 2017 menjadi 626 m³/hari (Primadipta dan Titah, 2017). Peningkatan jumlah lumpur alum disebabkan oleh meningkatnya kapasitas produksi air bersih akibat dari pesatnya pertumbuhan jumlah penduduk. Disisi lain diikuti dengan menurunnya kualitas air baku yang digunakan akibat dari meningkatnya pencemaran dari limbah domestik maupun industri (Yudo dan Said, 2019). Kedua hal tersebut mengakibatkan semakin banyak jumlah koagulan yang digunakan, sehingga semakin banyak juga lumpur alum yang dihasilkan (Keeleye *et al.*, 2016).

1.1.2 Karakteristik dan Toksisitas Lumpur Alum

Barakwan *et al.* (2019) menyatakan bahwa lumpur alum dari IPAM Karangpilang Surabaya mengandung aluminium (1.194 mg/L), besi (515 mg/L), kromium (0,217 mg/L), tembaga (0,559 mg/L), *biological oxygen demand* (BOD) sebesar 1.082,47 mg/L, dan *chemical oxygen demand* (COD) sebesar 9.666,7 mg/L. Sebagian besar dari karakteristik tersebut melewati baku mutu berdasarkan Kepmen LH No. 5 tahun 2014 mengenai standar kualitas air limbah, sehingga lumpur alum harus diolah dahulu sebelum masuk ke lingkungan. Hal ini berkaitan dengan potensi toksisitas aluminium yang tinggi sehingga bersifat racun bagi biota air.

Senyawa alum akan menyebabkan gangguan terhadap kesehatan jika kontak dengan manusia. Kontak antara senyawa alum dengan manusia tidak melalui air yang dikonsumsi sebagai air minum, tetapi melalui bioakumulasi dalam biota air. Kadarnya makin lama akan semakin tinggi dalam rantai makanan dari plankton sampai ke ikan, hingga akhirnya sampai pada tingkat beracun dan akan sangat berbahaya jika biota tersebut dikonsumsi oleh manusia (Soemarwoto, 2001). Aluminium dengan konsentrasi melebihi 2 µg/L pada jaringan makhluk hidup dapat memberikan dampak racun. Akumulasi ion aluminium dapat berada pada tulang, paru-paru, otot, hati dan jaringan otak (Krewski *et al.*, 2007). Akumulasi tersebut dapat menyebabkan gangguan kesehatan diantaranya

kerusakan jaringan detoksifikasi, ekskresi hati, ekskresi ginjal, alzheimer serta dapat menyebabkan *autism spectrum disorder* (Krewski *et al.*, 2007; Mold *et al.*, 2018).

1.1.3 Pengolahan Lumpur Alum

Lumpur alum dari IPAM di Indonesia pada umumnya langsung dibuang ke sungai tanpa pengolahan atau ditimbun di *landfill* setelah dilakukan proses pengeringan di *sludge drying bed* (Primadipta dan Titah, 2017). Namun, penimbunan lumpur alum di *landfill* harus dihindari karena berhubungan dengan dampak dari lepasnya kandungan aluminium yang tinggi pada lumpur ke lingkungan dan kebutuhan lahan yang luas untuk area penimbunan (Mortula *et al.*, 2009). Lumpur alum harus diolah terlebih dahulu agar kandungan kontaminannya memenuhi baku mutu peraturan yang berlaku sehingga tidak menyebabkan kerusakan pada lingkungan (Cerqueira *et al.*, 2014).

Pemisahan logam dari padatan seperti lumpur dapat dilakukan dalam tiga metode, yaitu secara fisik, kimia, dan biologis. Metode ekstraksi fisik seperti peleburan logam (*smelting*) dan kalsinasi berlangsung cepat juga dapat mereduksi volume padatan lumpur dalam jumlah besar, namun kurang ekonomis karena kebutuhan energi tinggi, menghasilkan emisi polusi, dan hilangnya sebagian logam pada pembakaran (Camargo *et al.*, 2016). Sementara, metode ekstraksi kimia dengan asidifikasi menggunakan larutan kimia inorganik berupa asam sulfat adalah metode yang paling umum digunakan karena prosesnya cepat dan lebih murah dibandingkan metode fisik (Jadhav dan Hocheng, 2012; Keeley *et al.*, 2016; Cherifi *et al.*, 2016). Namun, asidifikasi secara kimia ini menimbulkan limbah baru pada lingkungan akibat penambahan larutan kimia sehingga metode biologis yang ramah lingkungan dan ekonomis juga banyak dikembangkan dalam *recovery* logam (Camargo *et al.*, 2016). *Bioleaching* merupakan metode asidifikasi secara mikrobiologis untuk mengekstraksi logam-logam dari berbagai jenis lumpur (Gu *et al.*, 2018; Urik *et al.*, 2018; Shah *et al.*, 2017; Urik *et al.*, 2015).

1.1.4 Bioleaching Aluminium untuk Recovery Koagulan Alum

Proses *bioleaching* adalah proses nonselektif dengan terlarutnya aluminium dan logam-logam lain serta kandungan organik pada lumpur. Metode *bioleaching* memungkinkan *recovery* aluminium dengan proses yang hampir sama pada siklus biogeokimia alami sehingga ramah lingkungan, sederhana, efisien, dan layak secara ekonomi (Camargo *et al.*, 2016). *Bioleaching* memanfaatkan efek katalitik yang dihasilkan oleh aktivitas metabolisme mikroorganisme pengoksidasi besi dan sulfur (Pathak *et al.*, 2009). Aktivitas mikroba dapat mempengaruhi ion logam secara langsung dan tidak langsung. Secara langsung mikroorganisme menggunakan logam untuk melakukan reaksi redoks, mengubah tingkat penyerapan, spesiasi, dan kelarutan (Camargo *et al.*, 2016). Bakteri-bakteri tersebut mengoksidasi sulfur dan menurunkan senyawa sulfur menjadi asam sulfat dan menciptakan kondisi asam pada media yang mendukung pelarutan logam (Mishra dan Rhee, 2014).

Beberapa faktor penting yang dapat mempengaruhi *bioleaching* antara lain jenis mikroorganisme dan konsentrasi lumpur selama proses *bioleaching* (Gu *et al.*, 2018; Urik *et al.*, 2018). *Bioleaching* aluminium oleh bakteri *Acidithiobacillus ferrooxidans* dan *Pseudomonas fluorescens* telah terbukti mampu mengekstraksi logam berat dari padatan. *Bioleaching* aluminium dari lumpur bauksit mencapai efisiensi 78% dengan menggunakan bakteri *A. ferrooxidans* (Solisio *et al.*, 2002). Sedangkan *bioleaching* aluminium dari bauksit dengan menggunakan bakteri *P. fluorescens* mencapai efisiensi 73,98% (Shaikh *et al.*, 2018). Kepadatan lumpur sebesar 1-20% ditemukan sebagai kepadatan lumpur optimum pada *bioleaching* (Fass *et al.*, 1994).

Proses *bioleaching* aluminium pada penelitian ini efektifitas dan optimasinya dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu jenis mikroorganisme, komposisi media yang berfungsi sebagai nutrisi, serta keberadaan mikroorganisme *indigenous* lumpur. Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai acuan dalam pengolahan lumpur alum yang merupakan hasil samping dari produksi air minum di PDAM, khususnya dalam pengembangan teknologi *recovery* alum yang dapat dimanfaatkan kembali menjadi koagulan. *Recovery* alum dilakukan sebagai upaya untuk memanfaatkan kembali lumpur tersebut sebagai koagulan sehingga

selain dapat mengurangi kandungan alum dalam lumpur yang dibuang, secara ekonomi juga mengurangi biaya pengolahan limbah yaitu dengan berkurangnya pemakaian tawas.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka dapat dirumuskan permasalahan penelitian sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik fisika-kimia dan toksisitas limbah lumpur pengolahan air minum ?
2. Bagaimana pengaruh komposisi media pada proses *bioleaching* aluminium dari limbah lumpur pengolahan air minum menggunakan bakteri *A. ferrooxidans* dan *P. fluorescens*?
3. Bagaimana pengaruh bakteri *indigenous* lumpur alum pada proses *bioleaching* aluminium dari limbah lumpur pengolahan air minum?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang dipaparkan, maka tujuan yang hendak dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Menentukan karakteristik fisik-kimia dan toksisitas limbah lumpur pengolahan air minum.
2. Menentukan komposisi media pada proses *bioleaching* aluminium dari limbah lumpur pengolahan air minum menggunakan bakteri *A. ferrooxidans* dan *P. fluorescens*.
3. Menentukan pengaruh bakteri *indigenous* lumpur alum pada proses *bioleaching* aluminium dari limbah lumpur pengolahan air minum.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah untuk menggali potensi teknologi *bioleaching* aluminium untuk *recovery* koagulan alum guna pengembangan lebih lanjut.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup dalam penelitian ini adalah:

1. Limbah lumpur yang digunakan merupakan sampel dari unier *clearator* IPAM Karangpilang PDAM Surya Sembada Surabaya.
2. Waktu pengambilan sampel dilakukan pada Bulan Juli 2019.
3. Penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium di Laboratorium Pengolahan Limbah Padat dan B3 dan Teknologi Pengolahan air.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik Lumpur Alum

Aluminium sulfat ($Al_2(SO_4)_3$) atau alum adalah senyawa kimia yang paling banyak digunakan secara luas sebagai koagulan pada proses produksi air minum (Ahmad *et al.*, 2016a; Barakwan *et al.*, 2019). Hal tersebut dikarenakan biayanya yang ekonomis dan efektif, mudah dalam memperolehnya, dan aman dari korosif pada pipa. Hidrolisis alum dalam air membentuk aluminium hidroksida yang dapat mengikat pengotor pada air baku sehingga terjadi netralisasi muatan yang membentuk flok (Ahmad *et al.*, 2016a). Flok tersebut mengendap sehingga menghasilkan lumpur alum (Qomaruddin *et al.*, 2013; Dassanayake *et al.*, 2015). Komposisi fisik dan kimiawi lumpur alum sangat bergantung pada kualitas air baku, kualitas dan kemurnian koagulan alum, dan beberapa zat yang ditambahkan pada pengolahan kimia (serbuk karbon aktif penghilang bau dan polimer sebagai zat tambahan saat flokulasi) dalam produksi air bersih (Zhao *et al.*, 2011; Maiden *et al.*, 2015; Dassanayake *et al.*, 2015).

Struktur lumpur alum berbentuk gelatin amorf dan mengandung zat organik dan tersuspensi, zat anorganik, beberapa jenis mikroorganisme, produk koagulan, dan susbtansi kimia (Zhao *et al.*, 2011; Dassanayake *et al.*, 2015). Karakteristik fisika dan kimia lumpur alum dari pengolahan air minum di Surabaya dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Karakteristik Fisika dan Kimia Lumpur Alum dari Pengolahan Air Minum di Surabaya

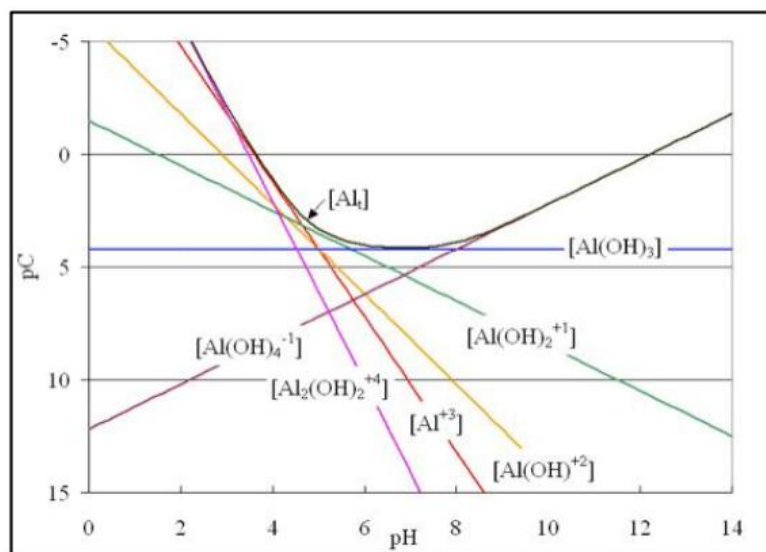
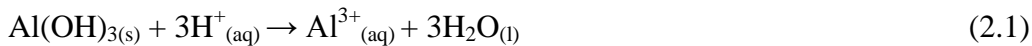
Parameter	Karakteristik lumpur
Suhu ($^{\circ}C$)	25,33
Densitas (kg/m^3)	0,97
pH	7,47
Kadar Air (%)	99,8
Volatile solids (mg/L)	12,696
Total solids (%)	0,9
Total suspended solids (mg/L)	12,511
Total dissolved solids (mg/L)	352,76
Total fixed solids (mg/L)	10,962

Parameter	Karakteristik lumpur
COD (mg/L)	9.666,7
BOD (mg/L)	1.082,5
Sludge volume index (mL/g)	114,18
Alkalinitas sebagai HCO ₃ ⁻ (mg/L)	70,83
Al (mg/L)	1.194
Fe (mg/L)	515
Cr (mg/L)	0,217
Cu (mg/L)	0,559
Jenis koagulan aluminium sulfat (Al ₂ (SO ₄) ₃)	

Sumber : Barakwan *et al.*, 2019

2.2 Karakteristik Logam Aluminium

Aluminium dapat dijumpai dalam berbagai bentuk yang berbeda dalam air, seperti senyawa hidroksil monomerik dan polimerik. Aluminium hidroksida adalah senyawa amfoter yang memiliki kelarutan tinggi pada kondisi larutan dengan pH asam dan basa (Cheng *et al.*, 2012). Aluminium hidroksida merupakan hidroksida yang juga bersifat amfoter, seperti halnya aluminium oksida. Padatan Al(OH)₃ dapat larut dalam asam kuat maupun basa kuat (Lukasiewicz, 2016). Reaksi aluminium hidroksida yang terjadi pada suasana asam dan basa dapat dilihat pada Persamaan 2.1 dan 2.2.



Gambar 2.1 Hubungan pH dan Kelarutan Aluminium (Lukasiewicz, 2016)

Gambar 2.1 menunjukkan bahwa jumlah semua jenis senyawa aluminium dalam larutan sama dengan presipitat dari $\text{Al}(\text{OH})_3$. Padatan $\text{Al}(\text{OH})_3$ dapat larut dalam asam kuat maupun basa kuat. Aluminium adalah logam yang dapat terhidrolisis dan relatif tidak larut dalam kisaran pH netral antara 6,0 sampai dengan 8,0. Aluminium yang terlarut hadir dalam bentuk larutan Al^{3+} dalam pH yang rendah. Al^{3+} merupakan senyawa yang dominan dalam pH 2. Proses hidrolisis terjadi saat pH meningkat dan menghasilkan hidroksida kompleks yang tidak mudah larut seperti $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ (Lukasiewicz, 2016).

2.3 Ekstraksi Aluminium dengan *Bioleaching*

Bioleaching merupakan metode asidifikasi secara mikrobiologis untuk mengekstraksi logam-logam dari berbagai jenis lumpur (Gu *et al.*, 2018; Urik *et al.*, 2018; Shah *et al.*, 2017; Urik *et al.*, 2015). *Bioleaching* diketahui sebagai metode yang efisien dan ekonomis untuk menghilangkan logam berat dari lumpur (Wong *et al.*, 2004). *Bioleaching* adalah suatu proses pelarutan/pelepasan logam dari sedimen menjadi bentuk yang larut dengan menggunakan bantuan mikroorganisme. Sehingga pada dasarnya prinsip *bioleaching* dan *leaching* sama, hanya saja pada *bioleaching* yang berperan untuk mempercepat terjadinya difusi logam ke dalam pelarut adalah mikroorganisme (Kurniawan *et al.*, 2010).

Bioleaching memiliki kelebihan (Gentina dan Acevendo, 2013), yaitu:

1. *Bioleaching* secara umum lebih sederhana dan lebih murah untuk dioperasikan dan dipelihara daripada proses kimia dan fisika. Ketika bakteri berasal dari lingkungan sumber kontaminan, maka akan lebih mudah dibudidayakan karena bakteri yang terlibat tumbuh secara alami di lingkungan tersebut.
2. *Bioleaching* sesuai untuk mengolah bijih logam dengan kadar rendah pada padatan atau limbah.
3. Kebutuhan energi rendah dan tidak ada kontaminasi atmosfer.

Sedangkan kelemahan dari proses *bioleaching* (Gentina dan Acevendo, 2013), yaitu:

1. Proses *leaching* oleh bakteri sangat lambat dibandingkan dengan metode lain.
2. Bahan kimia toksik terkadang juga dapat dihasilkan dari proses *bioleaching*.
3. Kurang sesuai untuk mengekstrak bijih logam dengan kadar tinggi pada

padatan atau limbah. Teknologi *bioleaching* memanfaatkan mikroorganisme dalam prosesnya, sehingga kadar logam yang terlalu tinggi dapat mengakibatkan efek toksik bagi mikroorganisme.

2.4 Mekanisme *Bioleaching* Logam

Bioleaching menggunakan kemampuan berbagai mikroorganisme untuk memobilisasi dan melepaskan logam dari bahan padat dan didasarkan pada tiga prinsip yaitu transformasi asam organik atau anorganik, reaksi oksidasi dan reduksi dan ekstraksi agen pengompleks (Pradha *et al.*, 2008; Rawlings *et al.*, 2003; Brandl, 2001). Mekanisme *bioleaching* dibedakan menjadi dua macam, yaitu *bioleaching* secara langsung dan tidak langsung.

a. *Bioleaching* secara langsung

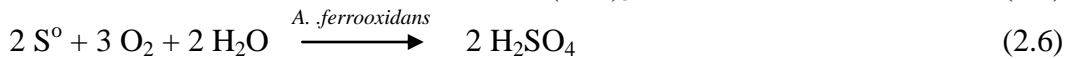
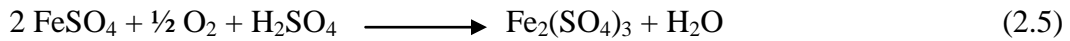
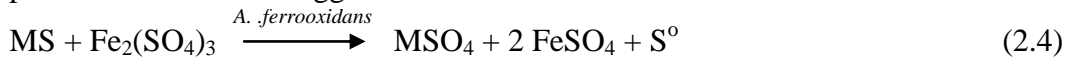
Proses pelarutan logam dari substrat padatan secara langsung dapat dilakukan melalui metabolisme mikroorganisme salah satunya bakteri. Mikroorganisme menggunakan logam untuk melakukan reaksi redoks, mengubah tingkat penyerapan, spesiasi dan kelarutan (Camargo *et al.*, 2016). Mekanisme *bioleaching* secara langsung, bakteri berkontak langsung dengan logam sulfida dalam lumpur. Melalui reaksi biokimia yang dikenal sebagai oksidasi (Thakur, 2006).

b. *Bioleaching* secara tidak langsung

Proses pelarutan logam dari substrat padatan secara tidak langsung dilakukan oleh produk metabolisme mikroorganisme. Mekanisme *bioleaching* secara tidak langsung, bakteri tidak bersentuhan dengan permukaan mineral (Thakur, 2006). Mekanisme *bioleaching* secara tidak langsung bakteri menghasilkan ligan organik dan membentuk suatu kompleks logam yang larut. Ligan organik yang dihasilkan bakteri ini berupa senyawa asam sitrat atau asam oksalat pada pH netral, di mana ligan ini akan membentuk ikatan yang kuat dengan ion logam sehingga logam tersebut dapat diekstrak dari mineral (Ehrlich, 1992). Bakteri juga dapat memproduksi asam laktat, asam asetat, asam suksinat, asam piruvat, dan asam format yang menyebabkan asidolisis. Produk organik lain yang dihasilkan bakteri pada suasana alkalin antara lain asam amino atau peptida yang juga efektif sebagai ligan untuk melarutkan logam (Isa, 2004).

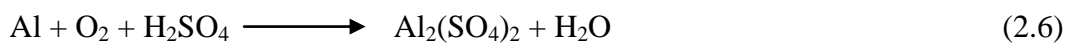
2.4.1 Mekanisme *Bioleaching* Aluminium dengan Bakteri *A. ferrooxidans*

Mekanisme *bioleaching* dengan bakteri *A. ferrooxidans* yaitu secara tidak langsung. Mekanisme *bioleaching* dengan bakteri *A. ferrooxidans* dapat dilihat pada Persamaan 2.4 hingga 2.6:



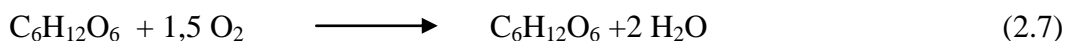
Mekanisme tidak langsung dilakukan dengan cara mengoksidasi mineral sulfida oleh ion besi (Fe^{3+}). Reaksi pertama (persamaan 2.4) dikendalikan langsung oleh *A. ferrooxidans*, reaksi kedua (persamaan 2.5) terjadi secara alami tanpa melibatkan *A. ferrooxidans*. Reaksi ketiga (persamaan 2.6) juga terjadi karena melibatkan *A. ferrooxidans*. Pelarutan logam terjadi oleh siklus proses antara reaksi pertama dan kedua dan pembentukan ion H^+ dengan mengoksidasi sulfur (Balram, 2010).

Aktivitas *A. ferrooxidans* yaitu reaksi oksidasi pada persamaan 2.4 hingga 2.6 menghasilkan senyawa asam sulfat. Maka asam sulfat akan mengubah aluminium yang tidak larut dalam lumpur menjadi aluminium sulfat yang larut dalam air (Olson, 1991). Reaksi oksidasi Al dengan asam sulfat dapat dilihat pada Persamaan 2.6.



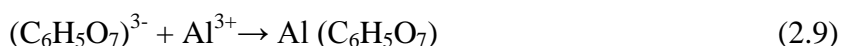
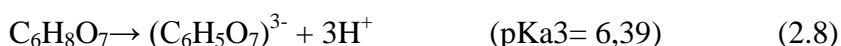
2.4.2 Mekanisme *Bioleaching* dengan Bakteri *P. fluorescens*

Bakteri *P. fluorescens* mempunyai kemampuan melepaskan logam dari suatu senyawa dengan pengasaman dan pembentukan fase kompleks. Aktivitas biologis bakteri *P. fluorescens* mengekskresikan ligan berupa asam trikarboksilat (asam sitrat dan asam oksalat) (Yousef *et al.*, 2009). Proses metabolisme dari *P. fluorescens* melibatkan sintesis karbohidrat, dimana mengubah glukosa yang dihasilkan dari sintesis karbohidrat menjadi produk asam organik (Persamaan 2.7) (Yousef *et al.*, 2009).

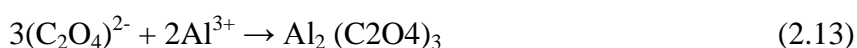
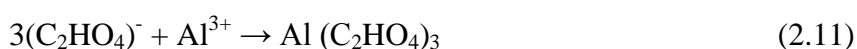


Ion logam dapat membentuk suatu reaksi ikatan secara kompleks dengan senyawa organik yang disebut kelasi atau khelat. Ketika dalam suatu larutan terdapat kation

(ion Al^{3+}) dan asam sitrat terdisosiasi penuh pada larutan (Yousef *et al.*, 2009), reaksi kompleksasi yang dapat terjadi seperti pada Persamaan 2.8 dan 2.9.



Asam oksalat mengandung dua gugus karboksilat ($\text{pKa}_1=1,2$ dan $\text{pKa}_2=4,2$) pada 25°C (Yousef *et al.*, 2009). Senyawa kompleks yang terbentuk antara ion aluminium dan anion oksalat dapat dilihat pada Persamaan (2.10) hingga (2.12).



2.5 Mikroorganisme dalam *Bioleaching*

Mikroorganisme merupakan salah satu faktor yang sangat berperan dalam *bioleaching* logam. Pemilihan mikroorganisme yang akan digunakan harus tepat karena mikroorganisme tersebut memiliki selektifitas terhadap logam-logam tertentu. Mikroorganisme yang umumnya digunakan dalam proses *bioleaching* logam salah satunya golongan bakteri (Kurniawan *et al.*, 2010). Bakteri dapat menghasilkan produk berupa asam organik atau anorganik dan ligan yang mampu memobilisasi logam sehingga logam dalam sedimen limbah dapat dikeluarkan (Lloyd, 2002). *Bioleaching* aluminium oleh bakteri *A. ferrooxidans* dan *P. fluorescens* telah terbukti mampu mengekstraksi logam berat dari padatan (Solisio *et al.*, 2002).

2.5.1 Bakteri *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Bakteri *Acidithiobacillus ferrooxidans* (*A. ferrooxidans*) dapat digolongkan ke dalam bakteri kemotrofik gram negatif, sel-selnya kecil berbentuk batang mempunyai ukuran $0,5 \times 1-4 \mu\text{m}$, dapat bergerak, autotrof fakultatif, aerob. Bakteri ini mampu mendapatkan energi yang berasal dari oksidasi satu atau lebih senyawa sulfur tereduksi seperti sulfida, tiosulfat atau dari oksidasi besi ferro (Fe^{2+}) menjadi ferri (Fe^{3+}). Produk akhir dari bakteri ini menghasilkan senyawa

sulfat dari senyawa sulfur yang dioksidasi (Isa, 2004).

Temperatur optimum pertumbuhan sekitar 28-30°C, pH untuk pertumbuhan 1,4-6,0 dengan pH optimum 2,5-5,8. Bakteri ini dijumpai pada lumpur, air laut, air tanah, tanah, limbah, daerah perairan asam dari tambang biji logam yang mengandung logam sulfida, seperti FeS, PbS. Bakteri *A. ferrooxidans* dalam metabolismenya menghasilkan asam organik, anorganik dan ligan (Isa, 2014).

Proses *bioleaching* oleh bakteri *A. ferrooxidans* telah terbukti mampu mengekstraksi logam berat dari padatan. *Bioleaching* memanfaatkan efek katalitik yang dihasilkan oleh aktivitas metabolisme mikroorganisme pengoksidasi besi (Pathak *et al.*, 2009). Bakteri tersebut mengoksidasi besi dan menurunkan senyawa sulfur menjadi asam sulfat dan menciptakan kondisi asam pada media yang mendukung pelarutan logam (Mishra dan Rhee, 2014). *A. ferrooxidans* hidup di lingkungan dengan pH optimum 1,5-2,5. Bakteri ini tumbuh pada media 9K yang mengandung FeSO₄ sebagai komposisi utama untuk menghasilkan asam sulfat sehingga dapat melarutkan logam. Selain itu, bakteri ini juga dapat mengoksidasi Fe²⁺ menjadi Fe³⁺ yang mengakibatkan reduksi ion-ion logam lain (Shaikh *et al.*, 2018).

Pelarutan Cu, Zn, Cd, Mn, dan Ni dari lumpur limbah lebih dari 80% dalam proses *bioleaching* selama 10 hari menggunakan *A. ferrooxidans* dan FeSO₄.7H₂O sebagai sumber energi (Xiang *et al.*, 2000). *A. ferrooxidans* dapat melarutkan aluminium dan besi dari lumpur tambang bauksit, masing-masing mencapai 79,02% dan 80,99% setelah *bioleaching* selama 21 hari (Shaikh *et al.*, 2018).

2.5.2 Bakteri *Pseudomonas fluorescens*

Bakteri *Pseudomonas fluorescens* (*P. fluorescens*) merupakan bakteri sel tunggal, gram negatif berbentuk batang lurus atau melengkung, mempunyai ukuran 0,5-1,0 x 1,5-5 µm, dapat bergerak karena flagela atau motil, tidak membentuk spora dan tumbuh secara aerob (Isa, 2004). *P. fluorescens* tumbuh optimum pada rentang suhu 25-30°C dan pada pH antara 4-8 (Donnarumma *et al.*, 2010; Scales *et al.*, 2014). *P. fluorescens* terdapat di tanah, tanaman, air

permukaan, dan mampu mengolah sejumlah substrat organik.

Bakteri *P. fluorescens* memiliki banyak manfaat dalam bioremediasi. Bakteri ini dapat menurunkan kadar pestisida (Huerta *et al.*, 2007), minyak (Zahang *et al.*, 2005), dan pewarna (Barragan *et al.*, 2007). *P. fluorescens* dapat mengekstraksi logam dari bijih mineral dan padatan lumpur dari berbagai sumber (Maria *et al.*, 2009; Cheng *et al.*, 2009; Brandl *et al.*, 2008). *P. fluorescens* dapat mengekstrak aluminium dan besi dari lumpur bauksit, masing-masing mencapai 39,6% dan 73,98% setelah *bioleaching* selama 21 hari. Bakteri ini toleran terhadap kadar logam tinggi namun pertumbuhannya pada pH 4-8 memberikan efisiensi rendah pada pelarutan logam (Shaikh *et al.*, 2018).

Bakteri ini menghasilkan produk metabolit seperti asam organik dan metabolit lain seperti H₂S dan ligan yang dapat menghilangkan ion-ion logam berat dari larutan dan atau merubah menjadi spesies yang kurang toksik (Isa, 2004). Asam organik yang dihasilkan oleh *P. fluorescens* diantaranya asam glukolat, asam sitrat, asam suksinat, asam laktat, asam oksalat, asam malat dan asam format (Musafa *et al.*, 2015; Rahayu *et al.*, 2018). Asam glukonat adalah asam organik utama yang diproduksi oleh *P. fluorescens* (Vyas dan Gulati, 2009).

2.5.3 Bakteri *Indigenous* Lumpur Alum

Bakteri *indigenous* adalah bakteri yang berasal dari lokasi pencemaran terjadi. Sumber air baku yang diolah di IPAM Karangpilang berasal dari Kali Surabaya (Bhaskoro dan Ramadhan, 2018). Sehingga, bakteri *indigenous* yang terdapat dalam lumpur alum IPAM Karangpilang dapat berasal dari Kali Surabaya. Penelitian terdahulu oleh Fahmy *et al.* (2010) mengenai *bioleaching* logam berat menggunakan bakteri *indigenous* dari lumpur saluran pembuangan air, hasil identifikasi dapat ditemukan bakteri *Pseudomonas* sp., *P. diminuta*, *P. pseudoalcaligenes*, dan *Escherichia* sp. Penelitian lain yang dilakukan oleh Wen *et al.* (2013) mengenai *bioleaching* logam berat menggunakan bakteri *indigenous* dari lumpur saluran pembuangan air, hasil identifikasi dapat ditemukan bakteri *A. ferrooxidans* dan *A. thiooxidans*.

2.6 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Proses *Bioleaching*

Faktor-faktor penting yang dapat mempengaruhi kualitas dan kuantitas *bioleaching* logam dari limbah padat (sedimen) adalah jenis limbah padat yang akan diolah, pemilihan jenis mikroorganisme yang akan digunakan, waktu ekstraksi, pH medium dan temperature *bioleaching* (Kurniawan *et al.* 2010). Faktor lainnya yaitu konsentrasi lumpur, jenis media, dan penambahan nutrisi selama proses *bioleaching* (Gu *et al.*, 2018; Urik *et al.*, 2018).

a. Nilai pH

Nilai pH media yang sesuai dapat meningkatkan aktivitas mikroorganisme dalam *bioleaching*. Nilai pH juga mempengaruhi kelarutan logam dan kestabilan ion-ion logam dalam fase larutan. Nilai pH optimum dalam *bioleaching* logam sulfida oleh *A. ferrooxidans* adalah 2-2,5 (Gu *et al.*, 2018). Sedangkan *bioleaching* logam oleh *P. fluorescens* adalah 3-4 (Shaikh *et al.*, 2018).

b. Kepadatan Lumpur

Efisiensi *bioleaching* menurun seiring dengan peningkatan kepadatan lumpur. Semakin tinggi kepadatan lumpur maka semakin tinggi pula potensi toksisitasnya bagi mikroorganisme. Toksisitas dapat menghambat metabolisme bakteri untuk menghasilkan asam, sehingga konsentrasi logam yang diekstraksi rendah (Gu *et al.*, 2018). Kepadatan lumpur sebesar 1-20% (w/v) ditemukan sebagai kepadatan lumpur optimum pada *bioleaching* (Fass *et al.*, 1994).

c. Nutrien

Beberapa senyawa berfungsi sebagai nutrisi penting yang dibutuhkan mikroorganisme diantaranya karbon, nitrogen, dan fosfor. Menurut Chen dan Lin (2001), penting untuk menentukan kondisi nutrisi optimal untuk pertumbuhan mikroorganisme dalam pelarutan logam selama *bioleaching*. Unsur karbon, nitrogen dan fosfor harus ada dalam rasio yang tepat agar tercapai pertumbuhan bakteri yang optimal. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa rasio C:N:P (BOD:N:P) optimum untuk pertumbuhan bakteri adalah 100:5:1 (Springer, 1993).

Sumber nutrisi N dapat berasal dari pepton, NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, dan NH_4Cl (Yustinah *et al.*, 2016). Sumber nutrisi P dapat berasal dari KH_2PO_4 dan K_2HPO_4 . Sedangkan sumber nutrisi C dapat berasal dari manitol, fruktosa, glukosa dan gliserol (Thomas *et al.*, 2008). Mikroba kemolithotrofik dapat

memperoleh energi dari senyawa anorganik seperti sulfur dan ion Fe (II) sebagai donor elektron. Mikroba juga menggunakan CO₂ sebagai pengganti karbon organik dan sumber karbon. Sumber utama Fe dalam media kultur untuk *bioleaching* dengan *A. ferrooxidans* adalah dalam bentuk FeSO₄ dengan konsentrasi 0,3-16 g/L (Gu *et al.*, 2018).

d. Suhu

Mikroorganisme mesofilik untuk *bioleaching* adalah pada suhu 30-35°C. Mikroorganisme termofilik untuk *bioleaching* adalah pada suhu 50-80°C. Proses pelarutan logam oksida dan sulfida bersifat eksoterm, panas dapat terakumulasi sehingga meningkatkan medium kultur yang tidak diinginkan oleh karena itu harus dikendalikan. Pemanasan diperlukan pada *bioleaching* aluminium dari bauksit untuk menghambat terlepasnya ion besi sehingga aluminium lebih murni (Yousef *et al.*, 2009).

e. Waktu *bioleaching*

Lamanya waktu *bioleaching* akan sangat berpengaruh pada pertumbuhan dan aktivitas metabolisme mikroorganisme. Tentu saja hal ini akan berdampak pada perolehan hasil akhir *bioleaching*, yaitu nilai konsentrasi logam yang terkandung dalam rafinat (Kurniawan *et al.*, 2010). Sistem reaktor *batch* membutuhkan waktu kontak yang lama (sekitar 16 hari) hingga pH asam (pH<2) untuk kelarutan logam (Pathak *et al.*, 2009).

2.7 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian telah dilakukan terkait pemanfaatan bakteri dalam proses pengolahan aluminium secara biologis. Penelitian terdahulu ini sebagai acuan dan pembelajaran dalam melakukan penelitian ini. Penelitian-penelitian terdahulu terkait proses *bioleaching* aluminium dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Penelitian-penelitian Terdahulu Mengenai Proses *Bioleaching* Aluminium

No	Sumber Polutan	Kondisi Operasi	Kelarutan Logam dan Efisiensi Proses	Sumber
1	Lumpur hasil proses pembuatan aluminium	<ul style="list-style-type: none"> • Jenis bakteri <i>A. ferrooxidans</i> • Reaktor sistem <i>batch</i> • Pengadukan 250 rpm 	Al tersisihkan 78% pada konsentrasi lumpur 1% pada reaktor dengan	Solisio <i>et al.</i> , 2002

No	Sumber Polutan	Kondisi Operasi	Kelarutan Logam dan Efisiensi Proses	Sumber
		<ul style="list-style-type: none"> Waktu <i>bioleaching</i> 20 hari 	inokulan bakteri dan penambahan FeSO ₄ pada hari ke-14	
2	Lumpur dari penambangan bauksit	<ul style="list-style-type: none"> Jenis bakteri <i>A. ferrooxidans</i> dan <i>P. fluorescens</i> Reaktor sistem <i>batch</i> Pengadukan 150 rpm pada 30°C Waktu <i>bioleaching</i> 17 hari 	Efisiensi <i>bioleaching</i> Al dengan <i>A. ferrooxidans</i> sebesar 60,49% - 87,33 %. Sedangkan dengan <i>P. fluorescens</i> sebesar 39,60% - 73,98%	Shaikh <i>et al.</i> , 2018
3	Limbah elektronik	<ul style="list-style-type: none"> Jenis bakteri <i>A. ferrooxidans</i> Reaktor sistem <i>batch</i> Pengadukan 150 rpm pada 30°C Waktu <i>bioleaching</i> 7 hari 	Al tersisihkan 90% pada konsentrasi limbah 5 g/L.	Brandl <i>et al.</i> , 2001

2.8 Uji Toksisitas

Uji toksisitas adalah serangkaian tes yang dilakukan untuk mengetahui tingkat toksisitas suatu zat. Beberapa metode uji toksisitas yang dapat dilakukan adalah *disk diffusion* dan *broth dilution* (CLSI, 2015).

a. Metode *disk diffusion*

Metode *disk diffusion* merupakan cara yang paling sering digunakan untuk menentukan kepekaan bakteri terhadap suatu senyawa. Metode ini menggunakan suatu cakram kertas saring (*paper disk*) yang berfungsi sebagai tempat menampung senyawa yang ingin diuji resistensinya terhadap bakteri uji. Kertas saring tersebut kemudian diletakkan pada cawan agar yang telah diinokulasi bakteri uji, kemudian diinkubasi pada waktu tertentu dan suhu tertentu, sesuai dengan kondisi optimum dari mikroba uji. Toksisitas dapat diamati setelah inkubasi selama 18- 24 jam dengan suhu 37°C. Hasil pengamatan yang diperoleh berupa ada atau tidaknya daerah bening yang terbentuk di sekeliling kertas cakram yang menunjukkan zona hambat pada pertumbuhan bakteri (CLSI, 2015; Pratiwi, 2008).

b. Metode *broth dilution*

Pengujian dilakukan dengan menggunakan sederet tabung reaksi yang berisi inokulum bakteri dan larutan uji dalam berbagai konsentrasi. Uji toksisitas diamati setelah inkubasi selama 18- 24 jam dengan suhu 37°C. Parameter yang diukur pada metode dilusi cair adalah tingkat kekeruhan yang menunjukkan nilai *Optical Density* (OD), yakni nilai kerapatan yang menunjukkan pertumbuhan mikroba uji dibandingkan dengan blanko standar (CLSI, 2015; Pratiwi, 2008). Ciric *et al.* (2010) menyatakan bahwa bakteri dapat tumbuh sangat baik terhadap polutan jika OD600 = > 0,2.

2.9 Alkalinitas

Alkalinitas adalah kemampuan air untuk menetralkan asam yang masuk ke dalam badan air, disebut juga buffer atau penyangga. Alkalinitas disebabkan oleh garam yang berasal dari asam lemah dalam air, basa lemah atau basa kuat. Bikarbonat (HCO₃⁻), ammonia, dan hidroksida merupakan bentuk yang paling banyak berperan sebagai alkali dalam air. Air yang tercemar dan anaerob mengandung garam-garam penyebab alkalinitas seperti asetat, propanoat dan sulfida (Masduqi dan Assomadi, 2016). Menurut Sawyer *et al.* (2003), nilai alkalinitas disebabkan adanya ion karbonat (CO₃²⁻), bikarbonat (HCO₃⁻), hidroksida (OH⁻), asam organik, dan garam yang terbentuk dari asam organik yang resisten terhadap oksidasi biologis. Beberapa reaksi yang diestimasi dalam aksi alkalinitas dalam menahan keasamaan menurut Masduqi dan Assomadi (2016) dapat dilihat pada Persamaan 2.5, 2.6 dan 2.7.



2.10 Reaktor *Bioleaching* dengan Sistem *Batch*

Reaktor adalah tempat, ruang atau volume ruang tertentu tempat terjadinya reaksi antar reaktan untuk membentuk suatu produk. Reaktor *batch*, yaitu reaktor yang tidak ada aliran masuk maupun aliran keluar dari reaktor tersebut. Reaktor *batch* merupakan reaktor yang teraduk sempurna, reaktor diisi dengan reaktan,

dilakukan pengadukan dan dibiarkan terjadi reaksi selama waktu t (Masduqi dan Assomadi, 2016). Sistem reaktor *batch* dalam proses *bioleaching* dapat mengakibatkan peningkatan nilai kadar solid lumpur yang dapat menurunkan efisiensi *bioleaching* dalam melarutkan logam. Hal ini karena tingginya kadar solid dapat menurunkan transfer massa O_2 dan CO_2 yang dibutuhkan oleh bakteri untuk biosintesis. Akumulasi dari tingginya konsentrasi logam berat yang terlarut dari lumpur dengan kadar solid tinggi dapat mencapai tingkat yang dianggap toksik bagi mikroorganisme pada sistem reaktor *batch* (Babel dan Dacera, 2006). Tingginya kadar solid lumpur juga dapat menghambat aktivitas bakteri *A. ferrooxidans* yang sangat sensitif terhadap beberapa jenis senyawa organik seperti asam organik, asam amino, dan sebagainya (Cho *et al.*, 2002). Sistem reaktor *batch* membutuhkan waktu kontak yang lama (sekitar 16 hari) hingga pH asam ($pH < 2$) untuk kelarutan logam (Pathak *et al.*, 2009).

2.11 Uji Statistik ANOVA *Two Way*

Analisis varian (*analysis of variance*) atau ANOVA adalah suatu metode analisis statistika yang termasuk ke dalam cabang statistika inferensi. Uji dalam anova menggunakan uji F karena dipakai untuk pengujian lebih dari 2 sampel. Dalam praktik, analisis varians dapat merupakan uji hipotesis maupun pendugaa (Sugiharto. 2009). ANOVA digunakan untuk melakukan analisis komparasi multivariabel. ANOVA *Two Way* digunakan bila sumber keragaman yang terjadi tidak hanya karena satu faktor (perlakuan). Faktor lain yang mungkin menjadi sumber keragaman juga harus diperhatikan. Faktor lain ini dapat berupa perlakuan lain atau faktor yang sudah terkondisi. Tujuan dari pengujian ANOVA *Two Way* ini adalah untuk mengetahui apakah ada pengaruh dari berbagai perlakuan yang diuji terhadap respon yang diinginkan (Usman dan Akbar, 2000).

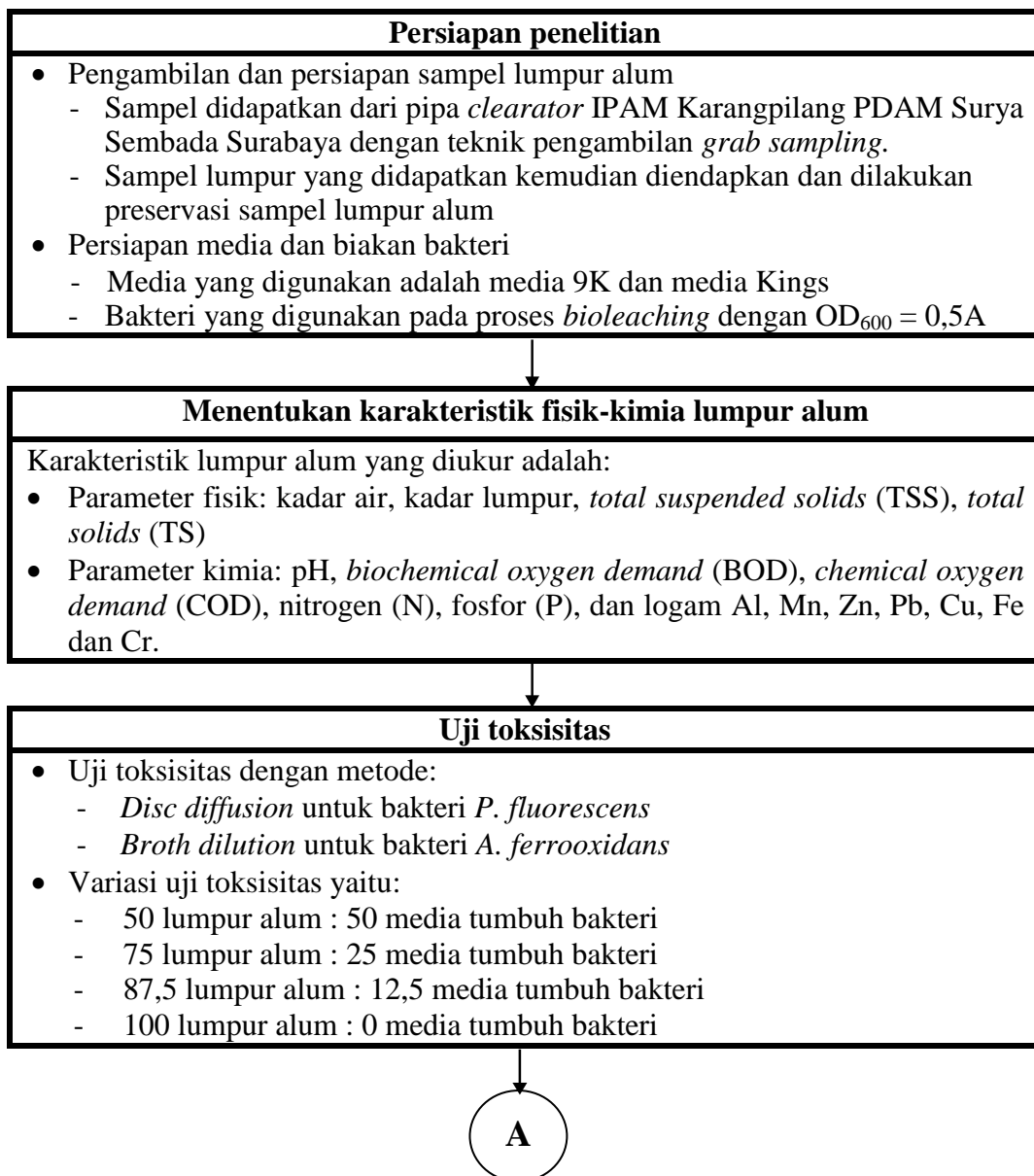
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

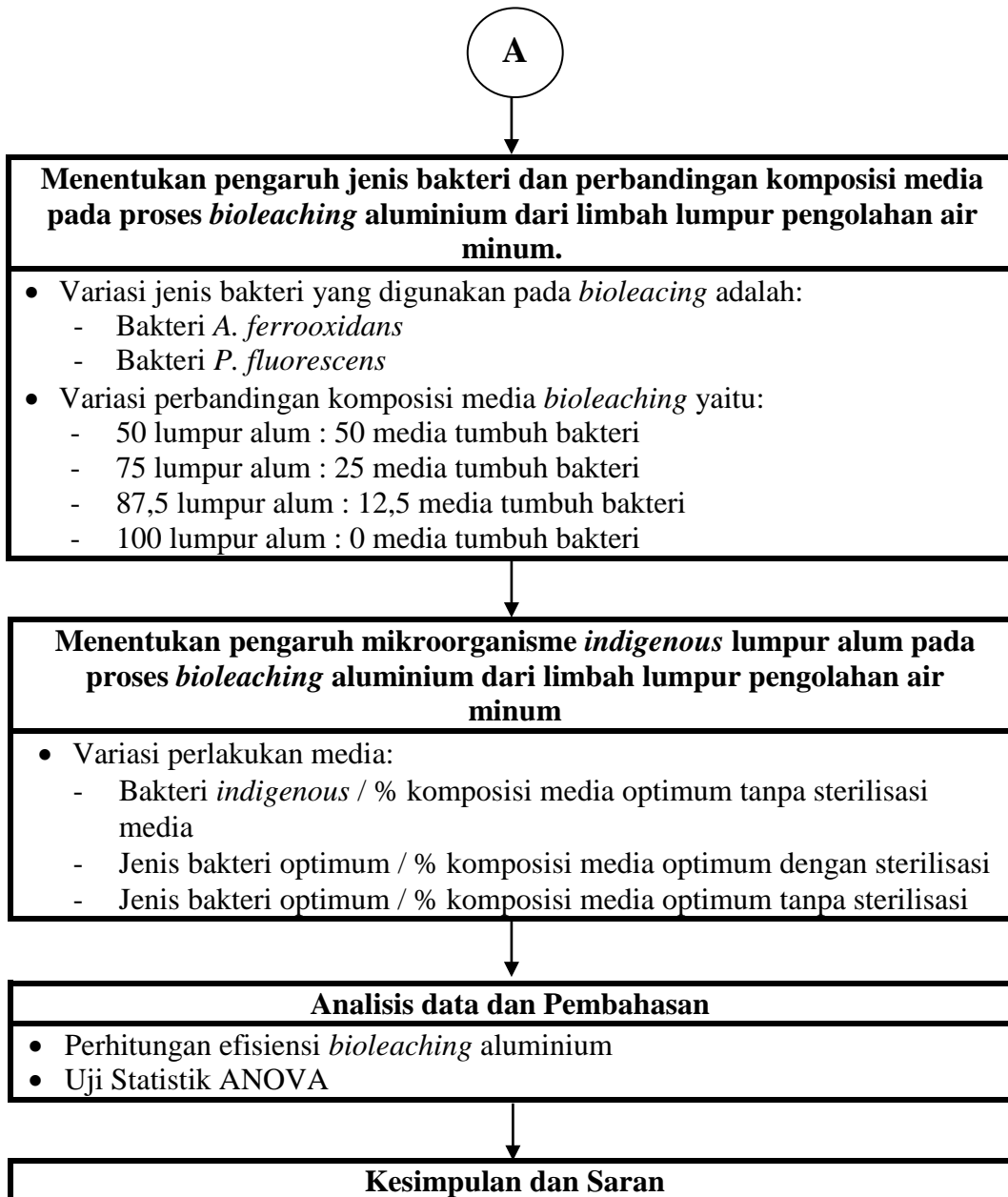
BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Kerangka Penelitian

Metode penelitian ini disajikan dalam bentuk tahapan penelitian yang memiliki tujuan untuk memberikan gambaran dan langkah penelitian guna mencapai tujuan yang telah dijelaskan pada Bab 1. Tahap penelitian secara lengkap dapat dilihat pada Gambar 3.1.





Gambar 3.1 Tahap Penelitian

3.2 Persiapan Penelitian

3.2.1 Pengambilan dan Persiapan Sampel Limbah Lumpur Pengolahan Air Minum

Pengambilan sampel limbah lumpur pengolahan air minum (lumpur alum) dilakukan pada pipa unit *clearator* di IPAM Karangpilang, PDAM Surya Sembada, Surabaya. Sampel lumpur diambil di pipa drain unit *clearator* karena pada unit tersebut terbentuk lumpur alum dan lumpur alum tercampur sempurna

sebelum dibuang menuju unit *thickener* untuk dikurangi kadar airnya (New Jersey DEP, 2012). Teknik pengambilan sampel dilakukan secara *grab sampling* pada 3 unit *clearator* di IPAM Karangpilang. Gambar 3.2 merupakan lokasi pengambilan sampel lumpur alum. Kemudian, sampel lumpur alum dikompositkan untuk generalisasi sampel dan memudahkan analisis. Pewadahan sampel menggunakan kontainer plastik berbahan plastik *polyethylene* karena bersifat inert, ringan, dan tidak mudah pecah (New Jersey DEP, 2012; Hadi, 2005). Sampel lumpur kemudian diendapkan untuk mengurangi kadar air dalam lumpur. Preservasi sampel lumpur dilakukan dengan menggunakan *freezer* pada suhu $<6^{\circ}\text{C}$ dengan waktu maksimum adalah 7 hari karena akan dilakukan karakterisasi terhadap kandungan zat organik pada sampel (New Jersey DEP, 2012).



(a)



(b)

Gambar 3.2 Lokasi Pengambilan Sampel Lumpur Alum (a) Unit *Clearator*, (b) Saluran Drainase *Clearator* IPAM Karangpilang

3.2.2 Persiapan Media dan Biakan Bakteri

Kultur murni *A. ferrooxidans* berasal dari kultur murni yang dimiliki oleh Sekolah Ilmu dan Teknologi Hayati (SITH), Institut Teknologi Bandung (ITB). Sedangkan kultur murni *P. fluorescens* berasal dari kultur murni yang dimiliki oleh Departemen Biologi, Universitas Airlangga.

a. Pembuatan Media 9K

Media 9K merupakan media pertumbuhan khusus bakteri *A. ferrooxidans* yang digunakan pada proses *bioleaching*. Pembuatan 1 liter 9K media dibutuhkan 3 g *ammonium sulphate* ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$); 0.5 g *magnesium sulphate* ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$); 0,5 g *dipotassium hydrogen phosphate* (K_2HPO_4); 0,1 g *potassium chloride* (KCl); 0,01 g *calcium nitrate* ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$); dan 21 g *ferrous sulphate* ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Keasaman media diatur hingga pH 2 dengan 10 N H_2SO_4 (Funari *et al.*, 2017; Silverman dan Lundgren, 1959).

b. Pembuatan Media Kings

Media Kings merupakan media pertumbuhan khusus bakteri *P. fluorescens* yang digunakan pada proses *bioleaching*. Pembuatan 1 liter media Kings dibutuhkan 20 g *peptone*; 15 mL *glycerin*; 5 g *magnesium sulphate* ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$); 2,5 g *dipotassium hydrogen phosphate* (K_2HPO_4) dan 1 L akuades dengan pH 7.2 (Kings *et al.*, 1954; Shaikh *et al.*, 2018).

c. Peremajaan biakan bakteri

Peremajaan biakan bakteri dilakukan sebelum melakukan proses *bioleaching*. Bakteri uji diremajakan dengan tujuan untuk menjaga indukan bakteri uji agar tidak mati atau terkontaminasi. Tujuan lainnya yaitu digunakan sebagai cadangan persediaan bakteri jika terjadi kesalahan atau kebutuhan bakteri yang melebihi perkiraan. Pemindehan bakteri dilakukan secara aseptik dengan menggunakan jarum ose dari kultur induk ke media baru. Setelah dilakukan pemindehan, bakteri diinkubasi selama 24 jam sebelum dapat digunakan dalam proses *bioleaching* (Kurniawan, 2018).

3.3 Menentukan Karakteristik Fisik dan Kimia Lumpur Alum

Karakteristik sampel lumpur diperlukan untuk menentukan potensi *bioleaching* aluminium untuk *recovery* koagulan dari lumpur alum. Parameter

fisik-kimia lumpur alum yang dianalisis dan metode analisis dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter Fisik dan Kimia pada Analisis Karakterisasi Sampel Lumpur

No	Parameter	Metode	Sumber
1	pH	pH-meter	APHA AWWA, 2012
2	<i>Total Solids (TS)</i>	Gravimetri	
3	<i>Total Suspended Solids (TSS)</i>	Gravimetri	
4	Kadar air	Gravimetri	
5	Kadar lumpur	Gravimetri	
6	Alkalinitas sebagai HCO_3^-	Titrimetri	
7	<i>Biochemical Oxygen Demand (BOD)</i>	Titrimetri-Winkler (5 hari BOD tes)	
8	<i>Chemical Oxygen Demand (COD)</i>	Titrimetri (<i>close reflux</i>)	
9	Nitrogen(N)	<i>Total Kjeldahl Nitrogen (TKN)</i>	
10	Fosfor (P)	Spektrofotometri	
11	Logam (Al, Mn, Zn, Pb, Cu, Fe dan Cr)	<i>Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)</i>	Ahmad <i>et al.</i> , 2016b

3.4 Uji Toksisitas Lumpur Alum

3.4.1 Metode *Disc Diffusion*

Uji toksisitas lumpur alum terhadap bakteri *P. fluorescens* dilakukan dengan menggunakan metode *disc diffusion*. Biakan murni bakteri *P. fluorescens* ditumbuhkan pada 15 mL media Kings cair baru. Kemudian media yang telah terisi biakan bakteri diagitasi dengan *shaker* dengan kecepatan 150 rpm pada suhu kamar selama 24 jam (CLSI, 2015; Purwanti *et al.*, 2015; Balamurugan *et al.*, 2014). Sebanyak 0,1 mL larutan bakteri tersebut diteteskan pada cawan petri yang berisi media agar dan diratakan dengan spatula steril.

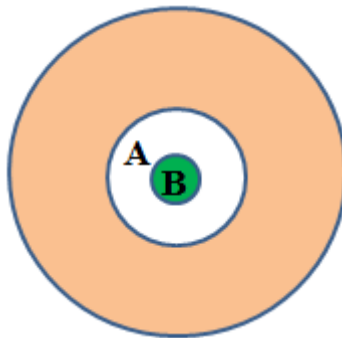
Selanjutnya kertas uji (*disk blank*) dengan diameter 6 mm direndam selama 5 menit dalam media lumpur alum uji. Kertas uji yang telah mengandung lumpur alum kemudian diletakkan pada permukaan media agar dalam cawan petri. Kemudian diinkubasi pada suhu kamar selama 24 jam (CLSI, 2015; Bauer *et al.*, 1966). Lumpur alum yang diuji memiliki variasi kadar lumpur (v/v) yaitu:

- 50 lumpur alum : 50 media tumbuh bakteri

- 75 lumpur alum : 25 media tumbuh bakteri
- 87,5 lumpur alum : 12,5 media tumbuh bakteri
- 100 lumpur alum : 0 media tumbuh bakteri

Resistensi bakteri terhadap lumpur alum ditandai dengan ada atau tidaknya zona hambat setelah inkubasi selama 24 jam. Zona hambat berupa lingkaran bening yang terbentuk disekeliling kertas uji. Nilai diameter zona hambat menunjukkan kemampuan daya hambat lumpur. Semakin besar diameter zona hambat semakin tinggi resistensi bakteri tersebut terhadap lumpur alum (Bauer *et al.*, 1966; Imamuddin, 2011; Susanto *el al.*, 2012; CLSI, 2015). Kemampuan daya hambat lumpur alum dapat diketeahui dengan Persamaan 3.1 dan berdasarkan Gambar 3.3 (Susanto *el al.*, 2012).

$$\text{Diameter Zona Hambat} = \text{Diameter A} - \text{Diameter B} \quad (3.1)$$



Gambar 3.3 Uji Toksisitas dengan Metode *Disc Diffusion*

Berdasarkan perhitungan diameter zona hambat yang diamati pada media, zona hambat dapat dikategorikan sebagai berikut (Mulyadi *el al.*, 2017; Greenwood, 1995):

1. Diameter > 20 mm = daya hambat kuat (toksisitas tinggi)
2. Diameter 16 – 20 mm = daya hambat sedang (toksisitas sedang)
3. Diameter 10 – 15 mm = daya hambat lemah (toksisitas rendah)
4. Diameter < 10 mm = daya hambat tidak ada (tidak toksik)

3.4.2 Metode *Broth Dilution*

Uji toksisitas lumpur alum terhadap bakteri *A. ferrooxidans* dilakukan dengan menggunakan metode *broth dilution*. Biakan murni bakteri *A.*

ferrooxidans ditumbuhkan pada 100 mL media 9K baru. Kemudian media yang telah terisi biakan bakteri diagitasi dengan *shaker* dengan kecepatan 150 rpm pada suhu kamar hingga OD = 0,5 (Purwanti *et al.*, 2015; Balamurugan *et al.*, 2014; CLSI, 2015).

Pengujian toksisitas dilakukan dengan menumbuhkan bakteri pada media yang akan digunakan pada proses *bioleaching* yaitu media campuran lumpur alum dan media tumbuh bakteri. Volume media yang digunakan pada uji toksisitas sebanyak 100 mL dengan perbandingan komposisi media (v/v) yang digunakan yaitu:

- 0 lumpur alum : 100 media tumbuh bakteri (kontrol)
- 50 lumpur alum : 50 media tumbuh bakteri
- 75 lumpur alum : 25 media tumbuh bakteri
- 87,5 lumpur alum : 12,5 media tumbuh bakteri
- 100 lumpur alum : 0 media tumbuh bakteri

Konsentrasi penambahan suspensi bakteri sebesar 10% (v/v) (Fonti *et al.*, 2016; Gu *et al.*, 2018). Setelah penambahan suspensi bakteri kemudian dilakukan pengadukan dengan *shaker* selama 72 jam (Owuama, 2017). Bakteri yang diinokulasi ke media uji kemudian diamati pertumbuhannya dengan mengukur nilai *Optical Density* (OD). Nilai OD diukur menggunakan UV–Spektrofotometer dengan panjang gelombang 600 nm pada jam ke-0, jam ke-24, jam ke-48 dan jam ke-72. Ciric *et al.* (2010) menyatakan bahwa bakteri dapat tumbuh sangat baik terhadap polutan jika $OD_{600} > 0,2$. Nilai OD yang digunakan sebagai parameter pertumbuhan pada penelitian ini yaitu selisih OD jam ke-0 dengan jam ke-24, 48 dan 72. Menurut Ciric *et al.* (2010), adapun kriteria pertumbuhan bakteri dari uji toksisitas yaitu:

1. $OD_{600} 0,00 - 0,019$ = bakteri tidak tumbuh,
2. $OD_{600} 0,02 - 0,099$ = pertumbuhan bakteri,
3. $OD_{600} 0,1 - 0,2$ = pertumbuhan bakteri baik,
4. $OD_{600} > 0,2$ = pertumbuhan bakteri sangat baik.

3.5 Proses *Bioleaching*

3.5.1 Menentukan Pengaruh Jenis Bakteri dan Komposisi Media pada Proses *Bioleaching* Aluminium dari Limbah Lumpur Pengolahan Air Minum

Bioleaching dilakukan dengan sistem reaktor *batch* dalam skala laboratorium. Menurut Pathak *et al.* (2009), sistem reaktor *batch* membutuhkan waktu kontak yang lama (sekitar 16 hari) hingga pH asam ($\text{pH} < 2$) untuk kelarutan logam. Sehingga penelitian ini dilakukan selama 15 hari. Penelitian tahap ini dirancang dengan desain faktorial yang dilengkapi dua faktor rancangan. Faktor rancangan percobaan meliputi jenis bakteri dan komposisi media *bioleaching* (v/v). Media *bioleaching* yang dimaksud dalam penelitian ini yaitu media campuran dari media tumbuh bakteri dan lumpur alum yang memiliki konsentrasi 2,2%.

Jenis bakteri yang digunakan adalah *A. ferrooxidans* dan *P. fluorescens*. *A. ferrooxidans* merupakan bakteri pengoksidasi besi. Bakteri tersebut mengoksidasi sulfur dan menciptakan kondisi asam yang mendukung lepasnya aluminium dari lumpur alum yaitu terbentuk $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (Solisio *et al.*, 2002). Sedangkan bakteri *P. fluorescens* menghasilkan produk metabolit seperti asam organik yang dapat melarutkan ion-ion logam berat dari padatan (Isa, 2004). Konsentrasi bakteri yang digunakan pada proses *bioleaching* yaitu 10% v/v dengan $\text{OD}_{600} = 0,5$ (Purwanti *et al.*, 2015; Balamurugan *et al.*, 2014).

Perbandingan komposisi media *bioleaching* (v/v) yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

- 50 lumpur alum : 50 media tumbuh bakteri
- 75 lumpur alum : 25 media tumbuh bakteri
- 87,5 lumpur alum : 12,5 media tumbuh bakteri
- 100 lumpur alum : 0 media tumbuh bakteri

Lumpur alum dalam media *bioleaching* pada tahap ini dalam kondisi steril. Sterilisasi lumpur alum dilakukan untuk memastikan tidak ada mikroorganisme lain dalam sampel lumpur yang dapat mempengaruhi proses *bioleaching*. Terdapat 1 reaktor berisikan 100% media tumbuh bakteri untuk setiap jenis bakteri. Reaktor tersebut untuk memastikan bahwa kedua bakteri uji memiliki kemampuan untuk menciptakan kondisi asam. Penelitian tahap ini terdapat 12

satuan percobaan yang secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Desain Rancangan Faktorial Penelitian Tahap 1

Jenis Bakteri	Perbandingan Komposisi Media (Lumpur Alum : Media Tumbuh Bakteri (v/v))			
	50:50	75:25	87,5:12,5	100:0
<i>A. ferrooxidans</i> (A)	A 50:50	A 75:25	A 87,5:12,5	A 100:0
<i>P. fluorescens</i> (P)	P 50:50	P 75:25	P 87,5:12,5	P 100:0
Tanpa inokulasi bakteri (K)	K 50:50	K 75:25	K 87,5:12,5	K 100:0

Hasil optimum dari penelitian tahap ini berupa perbandingan komposisi media optimum pada jenis bakteri optimum yang akan diujikan pada penelitian tahap selanjutnya.

3.5.2 Menentukan Pengaruh Bakteri *Indigenous* Lumpur Alum pada Proses *Bioleaching* Aluminium dari Limbah Lumpur Pengolahan Air Minum

Penelitian tahap ini bertujuan untuk menentukan pengaruh keberadaan bakteri *indigenous* lumpur alum terhadap proses *bioleaching* lumpur alum. Proses *bioleaching* dilakukan dengan dua perlakuan pada tahap ini. Perlakuan pertama yaitu proses *bioleaching* menggunakan media lumpur alum steril. Perlakuan kedua yaitu proses *bioleaching* menggunakan media lumpur alum tanpa sterilisasi. Selain itu, sterilisasi saat pengaplikasian proses *bioleaching* akan membutuhkan biaya operasional yang besar, sehingga untuk menurunkan biaya operasional tersebut perlu diketahui efisiensi proses *bioleaching* tanpa sterilisasi. Proses *bioleaching* pada tahap ini menggunakan jenis bakteri optimum dan komposisi media optimum dari tahap sebelumnya. Desain rancangan faktorial lengkap pada penelitian tahap ini dapat dilihat pada Tabel 3.3 dengan jumlah reaktor percobaan sebanyak 4 reaktor.

Tabel 3.3 Desain Rancangan Faktorial Penelitian Tahap 2

Jenis Bakteri/ Perbandingan Komposisi Media Optimum	Perlakuan	
	Lumpur Steril (LS)	Lumpur Tidak Steril (LT)
Jenis bakteri optimum / perbandingan komposisi media optimum (B)	B-LS	B-LT

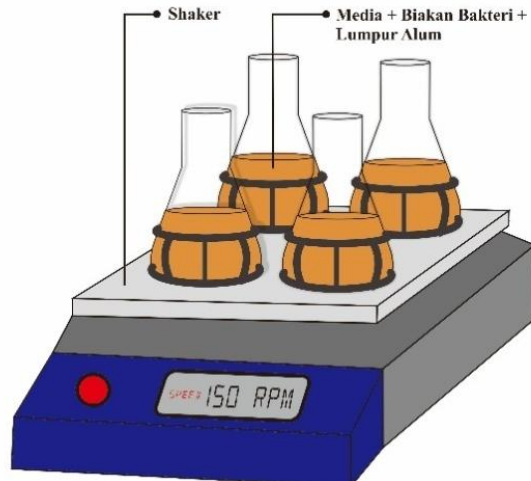
Jenis Bakteri/ Perbandingan Komposisi Media Optimum	Perlakuan	
	Lumpur Steril (LS)	Lumpur Tidak Steril (LT)
Tanpa inokulasi/ perbandingan komposisi media optimum (K)	K-LS	K-LT

3.5.3 Mekanisme *Bioleaching* dengan Bakteri

Sampel lumpur alum ditambahkan sesuai variasi perbandingan komposisi media campuran (v/v) pada media dalam reaktor 500 mL. Konsentrasi penambahan suspensi bakteri sebesar 10% (v/v) pada setiap proses *bioleaching* (Fonti *et al.*, 2016; Gu *et al.*, 2018). Kultur suspensi bakteri pada penelitian ini yaitu 30 mL dengan $OD_{600} = 0,5$ A ditambahkan pada 270 mL media campuran (media pertumbuhan bakteri dan lumpur alum). Perbandingan komposisi media campuran disesuaikan dengan variasi pada setiap tahap penelitian. Kemudian dilakukan agitasi selama *bioleaching* menggunakan *shaker* dengan kecepatan 150 rpm pada suhu ruang. Proses *bioleaching* dilakukan dengan sistem *batch* selama 15 hari (Prabhu *et al.*, 2014). Variabel pada proses *bioleaching* dapat dilihat pada Tabel 3.4 dan proses *bioleaching* secara singkat dapat dilihat pada Gambar 3.4.

Tabel 3.4 Variabel pada Proses *Bioleaching*

Variabel Kontrol	Variabel Bebas
<ul style="list-style-type: none"> • Volume media campuran 270 mL • Konsentrasi lumpur alum 15% • Volume suspensi bakteri 30 mL • Waktu <i>bioleaching</i> 15 hari • Kecepatan agitasi 150 rpm 	<ul style="list-style-type: none"> • Jenis bakteri: <ul style="list-style-type: none"> - <i>A. ferrooxidans</i> - <i>P. fluorescens</i> • Perbandingan komposisi media <i>bioleaching</i> (lumpur alum : media pertumbuhan bakteri (v/v)) <ul style="list-style-type: none"> - 50:50 - 75:25 - 87,5:12,5 - 100:0 • Kondisi lumpur alum <i>bioleaching</i> <ul style="list-style-type: none"> - Steril - Tanpa sterilisasi



Gambar 3.4 Proses *Bioleaching* Lumpur Alum

3.5.4 Pemisahan Larutan Hasil *Bioleaching* untuk Analisis Parameter Uji

Proses pemisahan dari hasil *bioleaching* menggunakan bakteri *A. ferrooxidans* dilakukan dengan sentrifugasi larutan pada 4000 rpm selama 20 menit (Prabhu *et al.*, 2014). Supernatan disaring menggunakan kertas saring Milipore 0,45 μm Merck diameter 47 mm (Prabhu *et al.*, 2014).

3.5.5 Analisis Parameter

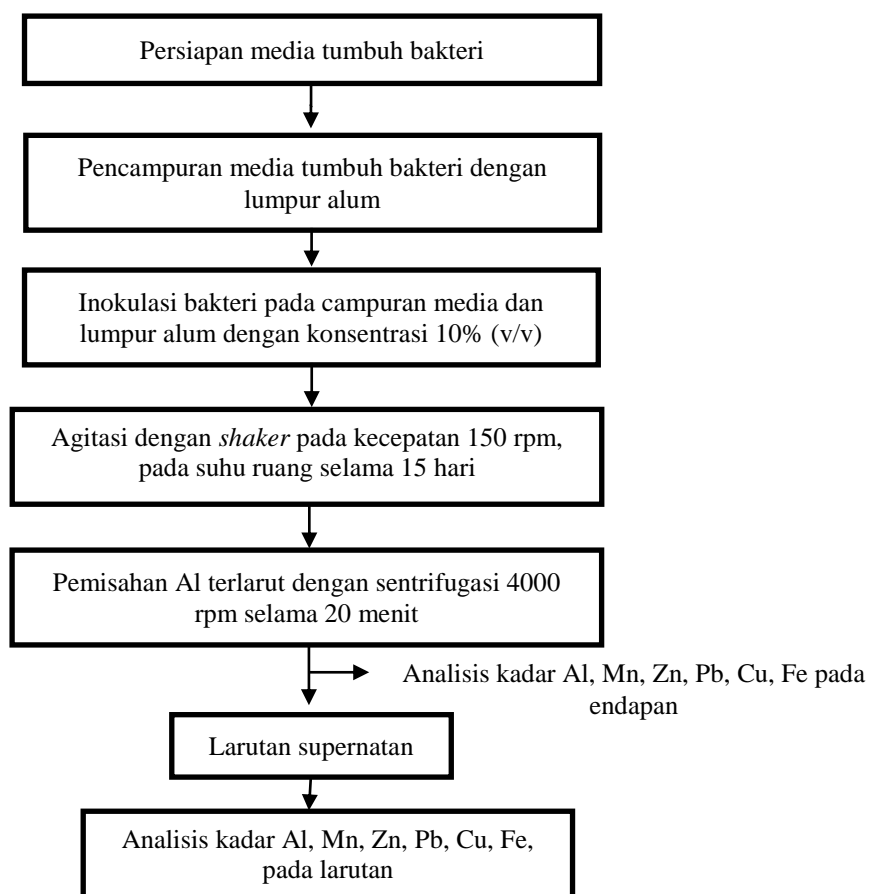
Parameter yang diukur pada proses *bioleaching* dapat dilihat pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Analisis Parameter *Bioleaching*

No	Parameter	Waktu Sampling	Metode Analisis	Sumber
1	Konsentrasi Al pada larutan	H-0, H-3, H-6, H-9, H-12, dan H-15	<i>Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)</i>	Ahmad <i>et al.</i> , 2016
2	COD	H-0 dan H-15	Titrimetri (<i>close refluks</i>)	APHA AWWA, 2012
3	BOD	H-0	Titrimetri-Winkler (5 hari BOD tes)	APHA AWWA, 2012
4	pH	H-0, H-3, H-6, H-9, H-12, dan H-15	pH-meter	APHA AWWA, 2012
5	Konsentrasi Al pada biomass	H-0	ICP-OES	Ahmad <i>et al.</i> , 2016

No	Parameter	Waktu Sampling	Metode Analisis	Sumber
6	Konsentrasi Mn, Zn, Pb, Cu, dan Fe pada larutan	H-0 dan H-15	ICP-OES	APHA AWWA, 2012
7	Nitrogen	H-0 dan H-15	Total Kjeldahl Nitrogen (TKN)	APHA AWWA, 2012
8	Fosfor	H-0 dan H-15	Spektrofotometri	APHA AWWA, 2012

Keseluruhan proses *bioleaching* aluminium dari lumpur alum hingga proses *recovery* koagulan dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Proses *Bioleaching*

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Lumpur Alum

Lumpur alum yang akan diolah berasal dari unit *clearator* IPAM Karangpilang. Kondisi eksisting lumpur alum di IPAM Karangpilang saat ini masih belum diolah dan langsung dibuang ke badan air atau ditampung di *sludge lagoon*, maka hasil karakterisasi lumpur alum dibandingkan dengan baku mutu Lampiran XLVII Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. Karakterisasi lumpur alum bertujuan untuk mengetahui komposisi awal lumpur yang akan diolah dan potensi *recovery* aluminium yang terkandung dalam lumpur. Selain itu juga untuk mengetahui mekanisme penyiapan larutan lumpur alum yang akan digunakan untuk mekanisme *bioleaching*. Hasil karakterisasi lumpur alum tercantum pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Karakteristik Fisika-Kimia Lumpur Alum IPAM Karangpilang

No	Parameter	Konsentrasi	Baku Mutu	Satuan
1	pH	6,70	6-9	-
2	Kadar air	97,79	-	%
3	Kadar lumpur	2,20	-	%
4	<i>Total Solids</i> (TS)	28.110	-	mg/L
5	<i>Total Suspended Solids</i> (TSS)	25.366	200	mg/L
6	<i>Biochemical Oxygen Demand</i> (BOD)	2.345	50	mg/L
7	<i>Chemical Oxygen Demand</i> (COD)	4.914	100	mg/L
8	Nitrogen (N)	9,30	30	mg/L
9	Fosfor (P)	2,05	-	mg/L
10	Alkalinas sebagai HCO_3^-	353, 33	-	mg/L
11	Aluminium (Al)	5.900	10**	mg/L
12	Besi (Fe)	3.800	5	mg/L
13	Mangan (Mn)	1.041	2	mg/L
14	Seng (Zn)	400	5	mg/L
15	Timbal (Pb)	43,01	0.1	mg/L
16	Tembaga (Cu)	10,75	0.5	mg/L

Keterangan:

= Melebihi baku mutu

(*) Lampiran XLVII, Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia No. 5/2014.

(**) NPDES (U.S EPA, 2011).

a. Karakteristik fisika lumpur alum

Tabel 4.1 menunjukkan bahwa nilai kadar air pada lumpur alum sebesar 97,79% dan kadar lumpur sebesar 2,20%. Menurut penelitian Pascal *et al.* (2016), kadar air lumpur akan mempengaruhi volumenya sehingga juga akan mempengaruhi efektivitas dan biaya operasional pengolahan lumpur. Sedangkan konsentrasi TS dan TSS pada lumpur alum berturut-turut yaitu 28.110 mg/L, dan 25.366 mg/L. Nilai TSS pada lumpur alum melebihi baku mutu efluen yaitu 200 mg/L. Nilai TSS yang tinggi dalam lumpur alum dipengaruhi oleh kualitas air baku yang berasal dari Kali Surabaya, dengan kandungan TSS yang tinggi yaitu mencapai 1.000 mg/L (Barakwan *et al.*, 2019).

Nilai TS dan TSS pada lumpur alum menunjukkan kepadatan lumpur. Menurut Gu *et al.* (2018), kepadatan lumpur yang tinggi dapat menurunkan efisiensi proses *bioleaching*. Hal tersebut dikarenakan toksisitas logam berat meningkat seiring meningkatnya kadar lumpur. Penelitian oleh Deng *et al.* (2013) mengenai *bioleaching* logam berat dalam campuran tanah yang terkontaminasi dengan menggunakan *Penicillium chrysogenum*. Menunjukkan bahwa persentase *leaching* logam berat yang lebih tinggi diperoleh dalam percobaan *bioleaching* dengan kandungan padatan yang lebih rendah. Namun, peningkatan kandungan padatan mengakibatkan penurunan *leaching* logam berat dan meningkatkan waktu reaksi.

b. Karakteristik kimia lumpur alum

Tabel 4.1 menunjukkan nilai pH pada lumpur alum adalah sebesar 6,70. Nilai ini memenuhi standar baku mutu untuk pH, yaitu 6-9. Nilai pH lumpur alum mendekati netral dan cenderung alkalin karena penggunaan garam dari asam kuat ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) sebagai koagulan dalam proses koagulasi flokulasi. Nilai pH netral yang menyebabkan logam berat mengendap dan teradsorb oleh lumpur (Dahhou *et al.*, 2017). Nilai pH pada lumpur alum mempengaruhi kelarutan logam dan kestabilan ion-ion logam dalam fase larutan. Aluminium adalah logam yang dapat terhidrolisis dan relatif tidak larut dalam kisaran pH netral antara 6,0 sampai dengan 8,0 (Lukasiewicz, 2016). Semakin rendah nilai pH larutan, maka kelarutan aluminium akan semakin tinggi dengan pH optimum 1-3 (Cheng *et al.*, 2012).

Selanjutnya, hasil karakterisasi didapatkan nilai COD sebesar 4.914 mg/L dan nilai BOD sebesar 2.345 mg/L. Hasil ini menunjukkan bahwa nilai BOD dan COD lumpur alum dari IPAM PDAM Surabaya melebihi baku mutu efluen, masing-masing 50 mg/L dan 100 mg/L. Tingginya konsentrasi BOD dan COD dipengaruhi oleh pembuangan air limbah domestik dan industri di sepanjang Kali Surabaya yang digunakan sebagai air baku IPAM Karangpilang (Razif dan Persada, 2015). Rasio BOD/COD pada lumpur alum yaitu 0,48. Menurut Metcalf dan Eddy (1985), rasio BOD/COD antara 0,4 hingga 0,8 dapat dianggap sebagai bahan yang dapat terurai secara biologis.

Kadar senyawa pada lumpur alum juga dapat mempengaruhi proses *bioleaching*. Tabel 4.1 menunjukkan kadar nitrogen dan fosfor berturut-turut yaitu 9,3 mg/L dan 2,05 mg/L. Kadar nitrogen dan fosfor pada lumpur alum berasal dari air baku di Kali Surabaya. Kandungan nitrogen berasal dari pembuangan limbah pertanian, perikanan, dan limbah domestik di sepanjang sungai (Yudo dan Said, 2019). Kadar nitrogen pada lumpur alum memenuhi baku mutu pada Lampiran XLVII Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah.

Tabel 4.1 menunjukkan nilai alkalinitas sebagai HCO_3^- yang cukup tinggi di Kali Surabaya, yaitu sebesar 353,33 mg/L. Kadar HCO_3^- di Kali Surabaya disebabkan oleh batuan kapur yang terlarut ke dalam air Kali Surabaya. Kali Surabaya merupakan anak Sungai Brantas yang masuk ke wilayah DAS Brantas. Deposit batu kapur yang memiliki kontribusi ke dalam DAS Brantas berada di sekitar Turen, Tulungagung dan Pegunungan Kendeng di bagian Utara DAS. Kontribusi HCO_3^- dari wilayah deposit kapur disekitar Pegunungan Kendeng yang berada dalam wilayah DAS Brantas diduga meningkatkan konsentrasi HCO_3^- di Kali Surabaya. Kali Surabaya merupakan sarana transportasi sedimen utama dari Sungai Brantas ke arah laut, sehingga batuan kapur banyak terkandung di dalam sedimen di Kali Surabaya. Kalsium karbonat (batuan kapur) akan bereaksi dengan air yang jenuh dengan karbon dioksida untuk membentuk kalsium bikarbonat yang larut (Prihartanto, 2008). Reaksi antara batuan kapur dengan air dapat dilihat pada Persamaan 4.1.

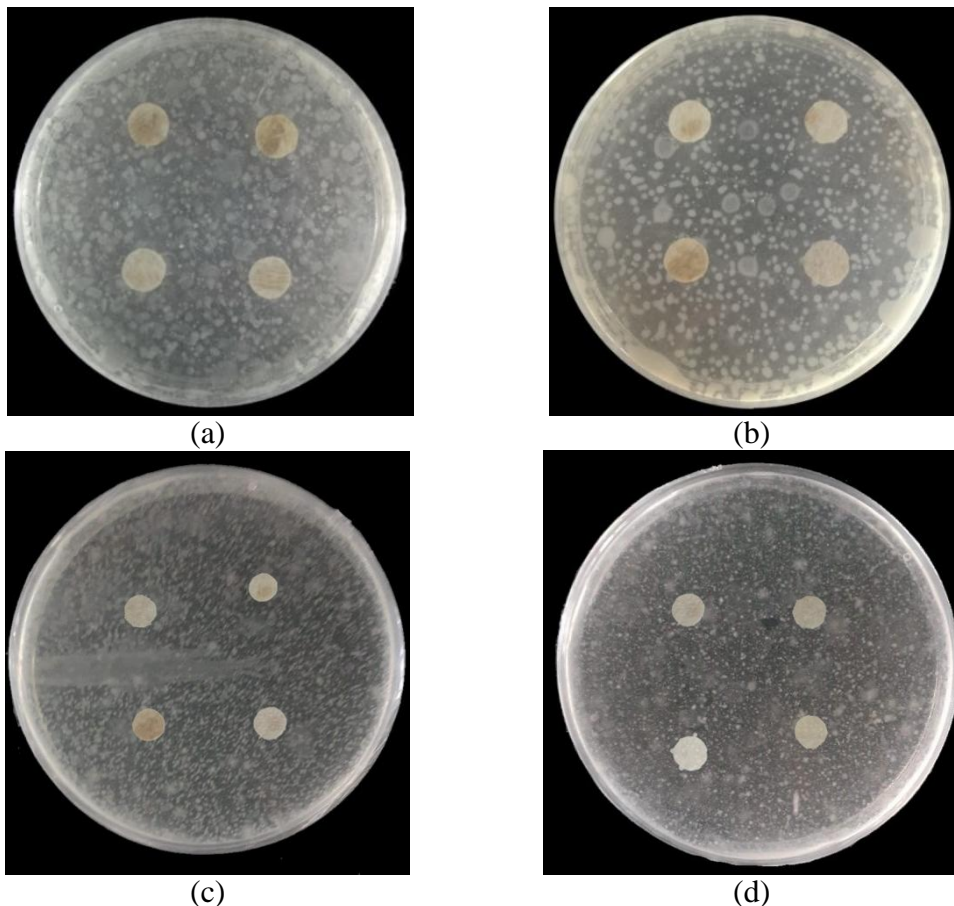


Menurut Chen dan Lin (2001), penting untuk menentukan kondisi nutrisi optimal untuk pertumbuhan mikroorganisme dalam pelarutan logam selama *bioleaching*. Unsur karbon, nitrogen dan fosfor harus ada dalam rasio yang tepat agar tercapai pertumbuhan bakteri yang optimal. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa rasio C:N:P (BOD:N:P) optimum untuk pertumbuhan bakteri adalah 100:5:1 (Springer, 1993). Sedangkan rasio C:N:P (BOD:N:P) pada lumpur alum yaitu 1.143,90: 4,54: 1. Maka perlu ditambahkan kadar N dan P pada lumpur alum untuk menciptakan kondisi optimum bagi pertumbuhan bakteri pada proses *bioleaching*. Kadar N dan P pada penelitian ini ditambahkan melalui penambahan media pertumbuhan bakteri yang mengandung unsur tersebut. Konsentrasi penambahan media tumbuh bakteri berdasarkan variasi komposisi lumpur alum dan media tumbuh bakteri yang telah ditentukan (50/50, 75/25, 87,5/12,5 dan 100/0 (v/v)).

Kadar logam tertinggi pada lumpur alum IPAM Karangpilang yaitu Al, Fe dan Mn, yaitu masing-masing sebesar 5.900 mg/L, 3.800 mg/L, dan 1.041 mg/L. Konsentrasi logam-logam tersebut melebihi baku mutu berdasarkan mutu Lampiran XLVII Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. Aluminium yang tinggi dalam lumpur alum disebabkan oleh penggunaan koagulan aluminium sulfat ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) atau alum dalam proses koagulasi flokulasi di IPAM Karangpilang, Surabaya. Kandungan aluminium yang tinggi ini memiliki potensi untuk dilakukan *bioleaching* untuk *recovery* koagulan. Kandungan besi yang tinggi diakibatkan oleh penambahan FeCl_3 sebagai campuran koagulan alum saat kekeruhan air baku sangat tinggi. Sedangkan, kandungan mangan dalam lumpur alum dapat berasal dari kandungan alami unsur tersebut pada sedimen, batuan, dan tanah di sungai (Trollip *et al.*, 2013). Sedangkan kadar logam lainnya yaitu Zn sebesar 400 mg/L, Pb sebesar 43,01 mg/L, dan Cu sebesar 10,75 mg/L. Konsentrasi logam-logam tersebut melebihi baku mutu berdasarkan mutu Lampiran XLVII Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. Kandungan Zn, Pb dan Cu pada lumpur alum berasal dari pembuangan limbah industri di sepanjang sungai (Uwimana *et al.*, 2010; Ranjbar *et al.*, 2017).

4.2 Toksisitas Lumpur Alum IPAM Karangpilang terhadap Bakteri *A. ferrooxidans* dan *P. fluorescens*

Toksisitas lumpur alum diujikan pada komposisi media *bioleaching* yaitu 100/0; 87,5/12,5; 75/25 dan 50/50 (lumpur alum : media tumbuh bakteri (v/v)). Toksisitas lumpur alum pada konsentrasi tersebut perlu diketahui karena persentase lumpur alum tersebut merupakan variasi yang digunakan pada saat proses *bioleaching*. Menurut Gu *et al.* (2018), toksisitas logam berat meningkat seiring meningkatnya kadar lumpur. Bakteri memiliki resistensi terhadap logam pada konsentrasi tertentu. Sehingga, uji toksisitas dilakukan untuk memastikan bahwa variasi konsentrasi tersebut tidak bersifat toksik bagi pertumbuhan bakteri uji dan tidak menghambat proses *bioleaching*. Uji toksisitas dilakukan dengan metode *disc diffusion* untuk bakteri *P. fluorescens* dengan pengamatan timbulnya zona hambatan. Hasil uji toksisitas dengan *disc diffusion* pada bakteri *P. fluorescens* dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Uji Toksisitas dengan Bakteri *P. fluorescens* pada Komposisi Lumpur Alum : Media Tumbuh Bakteri (a) 100/0; (b) 87,5:12,5; (c) 75/25; (d) 50/50

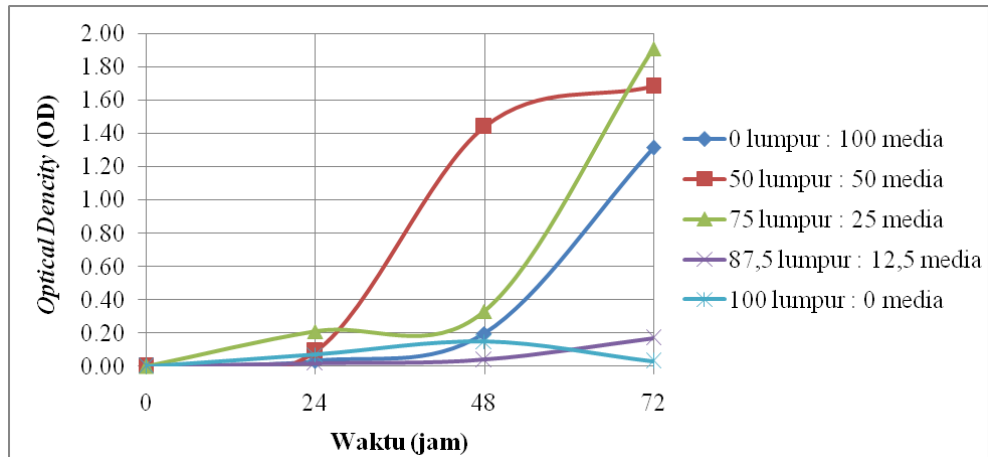
Gambar 4.1 menunjukkan bahwa lumpur alum pada seluruh variasi uji tidak bersifat toksik terhadap bakteri *P. fluorescens*. Hal tersebut dapat diketahui karena pada seluruh konsentrasi lumpur alum tidak menunjukkan adanya zona hambat pada sekitar kertas uji. Bakteri *P. fluorescens* merupakan bakteri gram negatif yang memiliki resistensi dan toleransi yang lebih besar terhadap logam dibandingkan dengan bakteri gram positif karena struktur dinding sel yang lebih kompleks sehingga mampu mengikat dan mengimobilisasi ion logam (Ahmad *et al.*, 2005).

Menurut Rasulov *et al.* (2013) bakteri dapat menghasilkan polisakarida ekstraseluler atau *exopolysaccharides* (EPS) sebagai agen aktif pada permukaan dinding sel untuk mengkelat logam. EPS merupakan polimer dari gula pereduksi yang disekresikan oleh mikroorganisme ke lingkungan eksternalnya. EPS umumnya terdiri dari monosakarida dan 15 beberapa substituen non-karbohidrat seperti asetat, piruvat, suksinat, dan fosfat juga biomolekul seperti protein, asam nukleat, dan lipid. Adsorpsi logam dengan EPS adalah proses interaksi antara kation logam dan muatan negatif dari gugus fungsional asam EPS.

Uji toksisitas dilakukan dengan metode *broth dilution* untuk bakteri *A. ferrooxidans* dengan pengamatan pertumbuhan bakteri berdasarkan nilai *Optical Density* (OD). Gambar 4.2 menunjukkan bahwa lumpur alum tidak bersifat toksik terhadap bakteri *A. ferrooxidans* pada perbandingan lumpur alum : media tumbuh bakteri (v/v) 50/50 dan 75/25. Hal tersebut ditunjukkan dengan nilai OD pada masing-masing konsentrasi yaitu 1,683 dan 1,910 pada jam ke-72 (Tabel 4.2). Ciric *et al.* (2010) menyatakan bahwa bakteri dapat tumbuh sangat baik terhadap polutan jika $OD_{600} = > 0,2$. Sedangkan pada perbandingan lumpur alum : media tumbuh bakteri (v/v) 87,5/12,5 dan 100/0 pertumbuhan bakteri *A. ferrooxidans* terhambat. Hal tersebut ditunjukkan dengan nilai OD pada masing-masing konsentrasi yaitu 0,170 dan 0,030 pada jam ke-72 (Tabel 4.2). Hal tersebut dikarenakan toksisitas logam berat meningkat seiring meningkatnya kadar lumpur (Gu *et al.*, 2018).

Tabel 4.2 Nilai OD pada Uji Toksisitas dengan Bakteri *A. ferrooxidans*

Perbandingan Media (Lumpur Alum : Media 9K (v/v))	Nilai OD Jam ke-		
	24	48	72
0: 100 (kontrol)	0,032	0,198	1,314
50 : 50	0,091	1,440	1,683
75 : 25	0,210	0,330	1,910
87,5 : 12,5	0,020	0,039	0,170
100 : 0	0,070	0,150	0,030



Gambar 4.2 Nilai OD pada Uji Toksisitas pada Bakteri *A. ferrooxidans*

4.3 Bioleaching Aluminium dari Limbah Lumpur Pengolahan Air Minum dengan Bakteri *A. ferrooxidans* dan *P. fluorescens*

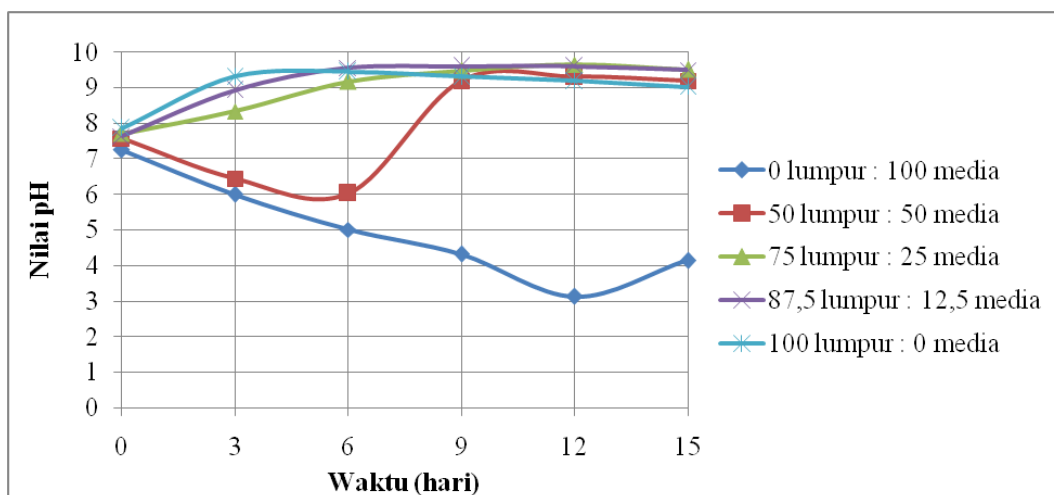
4.3.1 Bioleaching Aluminium dengan Bakteri *P. fluorescens*

Proses *bioleaching* menggunakan aktivitas metabolise bakteri untuk menciptakan suasana asam pada media sehingga dapat melarutkan logam dalam lumpur. Gambar 4.3 menunjukkan nilai pH selama proses *bioleaching* menggunakan *P. fluorescens*. Nilai pH pada reaktor komposisi 100 media: 0 lumpur menurun dari 7,25 menjadi 3,12 setelah 12 hari, kemudian meningkat menjadi 5,11 hingga proses *bioleaching* berakhir. Penurunan pH dalam reaktor tersebut disebabkan oleh pembentukan asam organik oleh metabolisme *P. fluorescens*. *P. fluorescens* menghasilkan berbagai asam organik, khususnya asam sitrat, asam glukonat, asam suksinat, asam laktat, asam oksalat, asam malat dan asam format (Musafa *et al.*, 2015; Rahayu *et al.*, 2018).

Penurunan pH terjadi pada reaktor dengan komposisi lumpur alum dan media bakteri 50/50 (v/v) dari 7,57 menjadi 6,02 setelah 6 hari dan meningkat menjadi 9,30. Nilai pH dalam reaktor dengan komposisi lumpur alum dan media

bakteri 75/25; 87,5/12,5 dan 100/0 (v/v) terus mengalami kenaikan dari 7 menjadi 9 sampai akhir *bioleaching*. Keseluruhan nilai pH selama *bioleaching* dengan *P. fluorescens* dapat dilihat pada Lampiran B1.

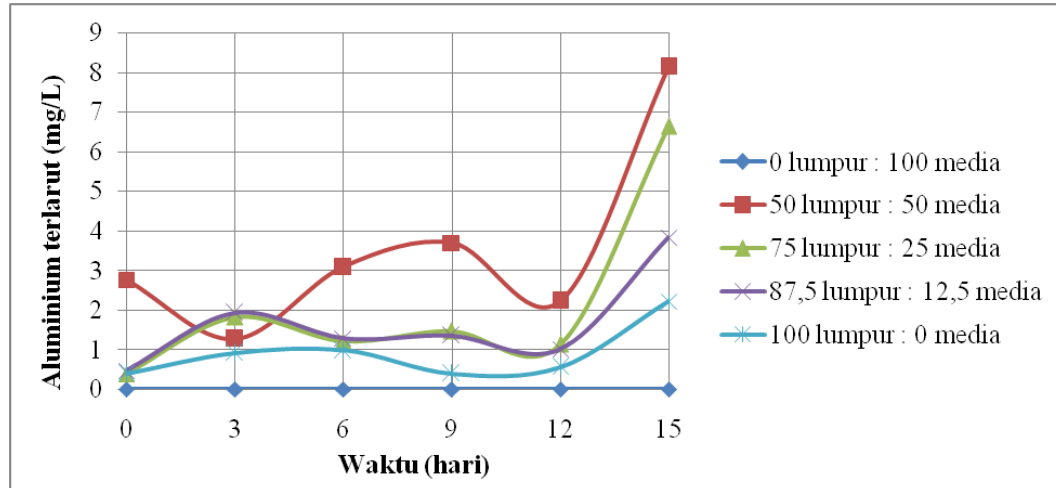
Kenaikan pH disebabkan oleh tingginya alkalinitas pada lumpur alum (353,33 mg/L). Alkalinitas adalah kemampuan air untuk menetralkan asam, disebut juga buffer atau penyangga. Proton (H^+) yang berasal dari asam organik akan mengikat gugus hidroksil dan karboksil. Semakin tinggi alkalinitas, semakin tinggi kapasitas buffer terhadap perubahan pH. Reaksi HCO_3^- dan ion H^+ dari asam organik dapat membentuk H_2O dan CO_2 untuk meningkatkan dan mempertahankan pH (U.S EPA, 2011). Reaksi yang mungkin terjadi ditunjukkan dalam Persamaan 4.2.



Gambar 4.3 Nilai pH pada Proses *Bioleaching* menggunakan *P. fluorescens*

Gambar 4.4 menunjukkan aluminium terlarut hasil proses *bioleaching* menggunakan *P. fluorescens*. Konsentrasi aluminium tertinggi pada *bioleaching* menggunakan *P. fluorescens* yaitu sebesar 8,144 mg/L dengan komposisi media 50 lumpur alum : 50 media tumbuh bakteri. Kelarutan aluminium tertinggi terjadi pada hari ke 15, pada kondisi pH 9,62. Kelarutan aluminium tertinggi tidak terjadi pada pH terendah yaitu pada pH 6 karena aluminium relatif tidak larut dalam kisaran pH netral antara 6,0 sampai dengan 8,0 (Lukasiewicz, 2016). Padatan $Al(OH)_3$ dapat larut dalam asam kuat (pH 1-2) maupun basa kuat (pH 8-14)

(Łukasiewicz, 2016). Keseluruhan konsentrasi aluminium terlarut selama *bioleaching* dengan *P. fluorescens* dapat dilihat pada Lampiran B2.



Gambar 4.4 Aluminium Terlarut Hasil Proses *Bioleaching* dengan *P. fluorescens*

Salah satu faktor yang mempengaruhi proses *bioleaching* yaitu kandungan senyawa dalam lumpur. Kandungan senyawa dalam lumpur dapat menjadi nutrisi bagi pertumbuhan bakteri seperti fosfor, nitrogen dan karbon. Namun beberapa senyawa juga dapat menghambat pertumbuhan bakteri dalam proses *bioleaching* seperti kadar logam berat. Sehingga komposisi media yang optimum untuk menentukan kadar lumpur dan nutrisi yang optimum untuk proses *bioleaching* aluminium.

Tabel 4.3 menunjukkan bahwa efisiensi tertinggi pada proses *bioleaching* dengan *P. fluorescens* terjadi pada komposisi 50 lumpur alum : 50 media tumbuh bakteri. Penurunan tertinggi terjadi pada hari ke 15 yaitu sebesar 1,02%. Sedangkan efisiensi pada reaktor dengan komposisi (lumpur alum : media tumbuh bakteri) 75/25; 87,5/12,5; 100/0 (v/v) yaitu masing-masing sebesar 0,55%; 0,24% mg/L dan 0,14%. Semakin besar komposisi lumpur maka efisiensi *bioleaching* semakin rendah. Hal tersebut dikarenakan semakin tinggi kepadatan lumpur maka semakin tinggi pula potensi toksisitasnya bagi mikroorganisme. Toksisitas dapat menghambat metabolisme bakteri untuk menghasilkan asam, sehingga konsentrasi logam yang diekstraksi rendah (Gu *et al.*, 2018).

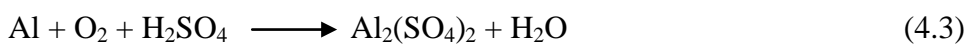
Tabel 4.3 Pengaruh Komposisi Lumpur terhadap Efisiensi *Bioleaching* Aluminium dengan *P. fluorescens* pada Hari ke-15

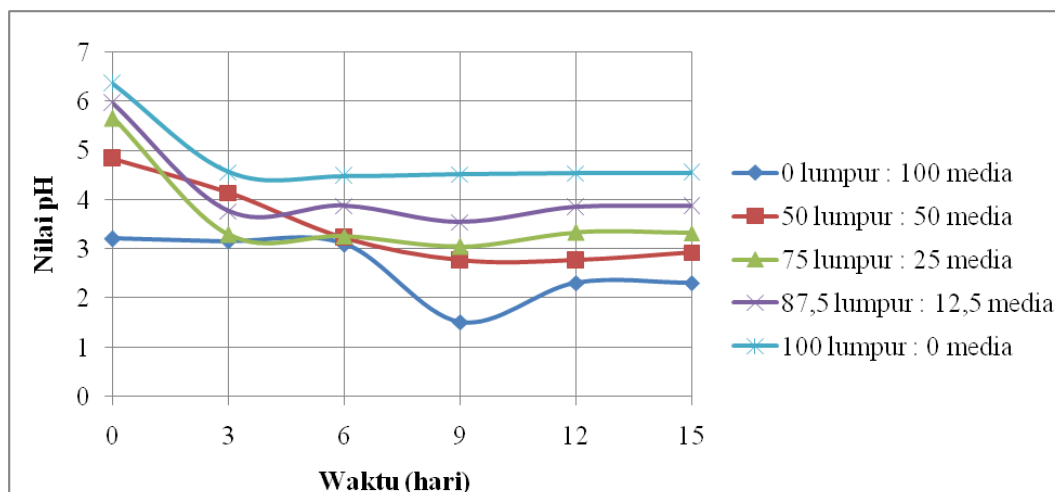
Komposisi Lumpur Alum : Media King	Konsentrasi Awal Aluminium dalam Lumpur (mg/L)	Aluminium Terlarut (mg/L)	Efisiensi <i>Bioleaching</i> (%)	pH
50/50	796,50	8,14	1,02	9,62
75/25	1.194,75	6,63	0,55	9,50
87,5/12,5	1.393,88	3,38	0,24	9,49
100/0	1.593,00	2,22	0,14	9,01

4.3.2 *Bioleaching* Aluminium dengan Bakteri *A. ferrooxidans*

Gambar 4.5 menunjukkan nilai pH selama proses *bioleaching* menggunakan *A. ferrooxidans*. Nilai pH pada reaktor komposisi 0 lumpur alum : 100 media tumbuh bakteri (v/v) menurun dari menjadi 3,12 setelah 12 hari, kemudian meningkat menjadi 5,11 hingga proses *bioleaching* berakhir. Nilai pH juga mengalami penurunan pada seluruh komposisi lumpur alum dan media tumbuh bakteri lainnya. Nilai pH menurun dari 5,07 menjadi 2,77 setelah 9 hari dalam reaktor dengan komposisi lumpur alum dan media tumbuh bakteri 50/50 (v/v). Kemudian, nilai pH sedikit meningkat sampai proses *bioleaching* berakhir pada reaktor tersebut. Nilai pH menurun dari 5 menjadi 3 dalam reaktor dengan komposisi lumpur alum dan media tumbuh bakteri 75/25 dan 87,5/12,5 (v/v) sampai akhir *bioleaching*. Nilai pH menurun dari 6 menjadi 4 dalam reaktor dengan komposisi lumpur alum dan media tumbuh bakteri 0/100 (v/v) sampai akhir *bioleaching*. Keseluruhan nilai pH selama *bioleaching* dengan *A. ferrooxidans* dapat dilihat pada Lampiran B3.

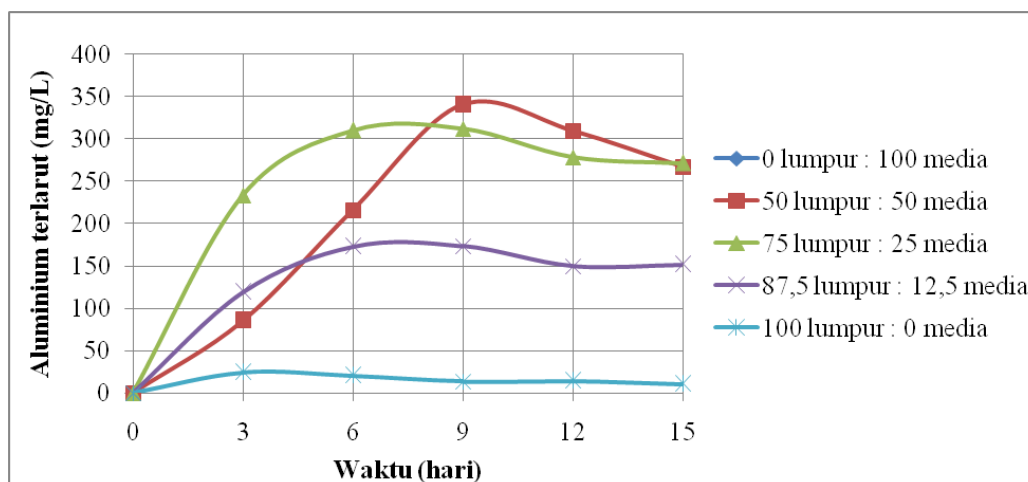
Bakteri *A. ferrooxidans* dapat menurunkan pH karena memiliki kemampuan dalam mengoksidasi unsur logam. Proses ini membebaskan sejumlah energi yang digunakan untuk membentuk senyawa yang diperlukannya. Selain energi, proses oksidasi tersebut juga menghasilkan senyawa asam sulfat. Maka aktivitas *A. ferrooxidans* akan mengubah aluminium yang tidak larut dalam air menjadi aluminium sulfat yang larut dalam air (Lin *et al.*, 2008). Al yang tidak larut dalam air mengalami reaksi oksidasi. Persamaan reaksi oksidasi Al dengan asam sulfat dapat dilihat pada Persamaan 4.3.





Gambar 4.5 Nilai pH pada Proses *Bioleaching* menggunakan *A. ferrooxidans*

Gambar 4.6 menunjukkan aluminium terlarut hasil proses *bioleaching* dengan *A. ferrooxidans*. Konsentrasi aluminium tertinggi pada *bioleaching* menggunakan *A. ferrooxidans* yaitu sebesar 304,70 mg/L dengan komposisi media 50 lumpur alum : 50 media tumbuh bakteri. Kelarutan aluminium tersebut terjadi pada hari ke 9, pada kondisi pH 2,77. Sedangkan kelarutan aluminium pada reaktor dengan komposisi lumpur alum dan media tumbuh bakteri 75/25; 87,5/12,5 dan 100/0 (v/v) pada hari ke 9, yaitu masing-masing sebesar 278,80 mg/L; 173,30 mg/L dan 13,83 mg/L. Kelarutan aluminium optimum terjadi pada pH 2 (Łukasiewicz, 2016). Keseluruhan konsentrasi aluminium terlarut selama *bioleaching* dengan *A. ferrooxidans* dapat dilihat pada Lampiran B4.



Gambar 4.6 Aluminium Terlarut Hasil Proses *Bioleaching* dengan *A. ferrooxidans*.

Tabel 4.4 menunjukkan bahwa efisiensi *bioleaching* tertinggi pada proses *bioleaching* dengan *A. ferrooxidans*. Efisiensi tertinggi terjadi pada komposisi 50 lumpur alum : 50 media (v/v) tumbuh bakteri pada hari ke-9 yaitu sebesar 42,77%. Sedangkan efisiensi *bioleaching* pada reaktor dengan komposisi lumpur alum dan media tumbuh bakteri 75/25; 87,5/12,5 dan 100/0 (v/v) pada hari ke-9 yaitu masing-masing sebesar 23,34%; 12,43%; dan 0,87%.

Reaktor dengan komposisi 50 lumpur alum : 50 media (v/v) memiliki kandungan nutrisi (FeSO_4) yang paling tinggi sehingga metabolisme bakteri *A. ferrooxidans* dapat bekerja lebih baik dibandingkan pada reaktor dengan variasi komposisi lainnya. Selain itu, pada komposisi tersebut kadar aluminium dan logam berat lainnya lebih rendah, sehingga mengurangi hambatan pada pertumbuhan bakteri. Pertumbuhan bakteri yang baik meningkatkan kadar asam sulfat yang dihasilkan dari metabolisme bakteri.

Tabel 4.4 Pengaruh Komposisi Lumpur terhadap Efisiensi *Bioleaching* Aluminium dengan *A. ferrooxidans* pada Hari ke-9

Komposisi Lumpur Alum : Media 9K	Konsentrasi Awal Aluminium dalam Lumpur (mg/L)	Aluminium Terlarut (mg/L)	Efisiensi <i>Bioleaching</i> (%)	pH
50/50	796,50	340,70	42,77	2,77
75/25	1.194,75	278,80	23,34	3,11
87,5/12,5	1.393,88	173,30	12,43	3,87
100/0	1.593,00	13,83	0,87	4,55

4.4 Uji Statistik Anova *Two Way* mengenai Pengaruh Jenis Bakteri dan Komposisi Media terhadap Tingkat Kelarutan Aluminium pada Proses *Bioleaching*

Uji statistik Anova *Two Way* dilakukan untuk mengetahui pengaruh lebih dari 1 variabel bebas (komposisi media, jenis sampah organik dan interaksi antara komposisi media dan jenis sampah organik) terhadap variabel terikat (efisiensi *bioleaching* aluminium). Uji Anova *Two Way* bertujuan untuk mengetahui signifikansi dari masing-masing variabel. Hasil uji Anova *Two way* menunjukkan variabel manakah yang paling berpengaruh terhadap efisiensi *bioleaching* aluminium.

Uji statistik Anova *Two Way* memiliki tingkat kepercayaan 95% (Kuswadi dan Mutiara, 2004). Pengaruh yang signifikan dalam uji statistik ditunjukkan dengan *P-value* yang lebih kecil dari 0,05 ($P < 0,05$). Nilai $P < 0,05$ menunjukkan bahwa variabel bebas berpengaruh secara signifikan terhadap efisiensi *bioleaching* aluminium, sebaliknya jika nilai $P > 0,05$ maka variabel bebas tidak berpengaruh secara signifikan terhadap efisiensi *bioleaching* aluminium.

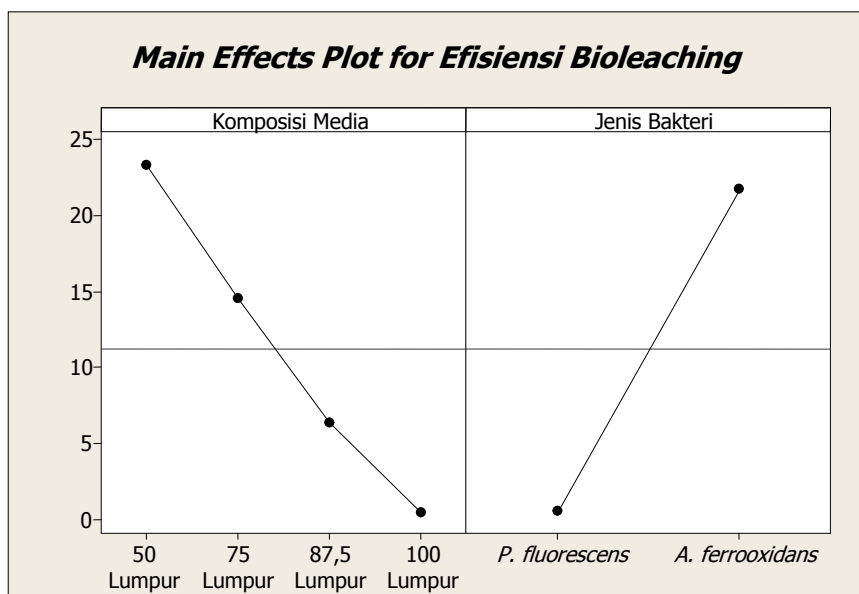
Ada tiga hipotesis awal pada analisis Anova *Two Way* dalam penentuan pengaruh jenis bakteri dan komposisi media pada proses *bioleaching* aluminium, yaitu:

- a. H_0 (a): tidak ada pengaruh variasi jenis bakteri terhadap efisiensi *bioleaching* aluminium.
- b. H_0 (b): tidak ada pengaruh variasi komposisi media terhadap efisiensi *bioleaching* aluminium.
- c. H_0 (c): tidak ada pengaruh interaksi antara variasi jenis bakteri dan variasi komposisi media terhadap efisiensi *bioleaching* aluminium.

Dari hasil uji statistik didapatkan:

- a. Untuk H_0 (a) nilai $P < 0,05$ ($P = 0,000$) maka tolak H_0 (a) sehingga ada pengaruh signifikan pada variasi jenis bakteri terhadap efisiensi *bioleaching* aluminium.
- b. Untuk H_0 (b) nilai $P < 0,05$ ($P = 0,000$) maka tolak H_0 (b) sehingga ada pengaruh signifikan pada variasi komposisi media terhadap efisiensi *bioleaching* aluminium.
- c. Untuk H_0 (c) nilai $P < 0,05$ ($P = 0,000$) maka tolak H_0 (c) sehingga ada pengaruh interaksi antara variasi jenis bakteri dan variasi komposisi media terhadap efisiensi *bioleaching* aluminium.

Hasil uji statistik Anova *Two way* dari nilai P didapatkan hasil bahwa ada pengaruh yang signifikan pada variasi komposisi media dan variasi jenis bakteri. Gambar 4.7 menunjukkan hasil uji Anova *Two Way* pada keempat variasi komposisi media, efisiensi *bioleaching* aluminium tertinggi adalah pada komposisi 50 lumpur media dan 50 media tumbuh bakteri. Sedangkan, pada kedua variasi jenis bakteri, efisiensi *bioleaching* aluminium tertinggi adalah pada reaktor berisikan bakteri *A. ferrooxidans*.



Gambar 4.7 Hasil uji Anova *Two way* mengenai pengaruh komposisi media dan jenis bakteri terhadap efisiensi *bioleaching*

A. ferrooxidans dan *P. fluorescens* memiliki kemampuan yang berbeda dalam *bioleaching* aluminium. Hal ini dibuktikan dengan didapatkan konsentrasi aluminium terlarut oleh bakteri *A. ferrooxidans* (Gambar 4.6) yang lebih tinggi dari bakteri *P. fluorescens* (Gambar 4.4). Selain itu, juga dibuktikan dengan hasil uji Anova *Two way* (Gambar 4.12), yaitu diketahui terdapat pengaruh yang signifikan pada variasi jenis bakteri terhadap efisiensi *bioleaching*. Hal tersebut dikarenakan kemampuan metabolisme *P. fluorescens* yang dapat terganggu dengan kandungan alkalinitas yang tinggi. Hasil karakterisasi lumpur alum menunjukkan kadar alkalinitas sebagai HCO_3^- yang tinggi. Proton (H^+) yang berasal dari asam-asam yang dihasilkan oleh bakteri *P. fluorescens* akan mengikat gugus hidroksil dan karboksil.

Asam yang dihasilkan oleh *P. fluorescens* berupa asam organik. Asam organik tersebut diantaranya asam sitrat, asam glukonat, asam suksinat, asam laktat, asam oksalat, asam malat dan asam format (Musafa *et al.*, 2015; Rahayu *et al.*, 2018). Asam-asam organik tersebut merupakan asam lemah. Sedangkan asam yang dihasilkan oleh *A. ferrooxidans* berupa asam sulfat yang merupakan asam kuat. Sifat kekuatan keasaman suatu senyawa erat hubungannya dengan tetapan pengionan asam atau konstanta asam (KA). Tabel 4.5 menunjukkan bahwa

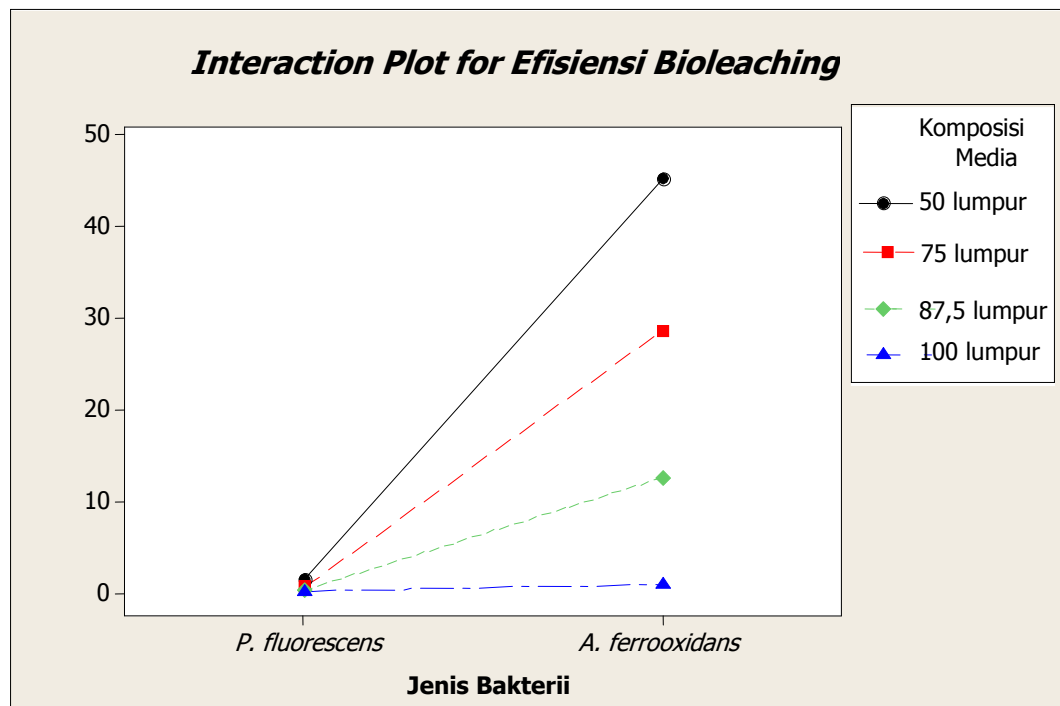
semakin tinggi nilai KA maka semakin kuat keasaman dari senyawa tersebut (Keenan *et al.*, 1990; Masduqi dan Assomadi, 2016).

Tabel 4.5 Nilai KA pada beberapa jenis senyawa

Jenis asam	Nilai KA	Sifat
Asam sulfat	besar, $1,2 \times 10^{-2}$	Asam kuat ↓ Kekuatan menurun Asam lemah
Asam format	$1,8 \times 10^{-4}$	
Asam laktat	$1,38 \times 10^{-4}$	
Asam oksalat	$5,4 \times 10^{-5}$	
Asam sitrat	$6,3 \times 10^{-6}$	
Bikarbonat	$5,6 \times 10^{-11}$	Basa Kuat

Sumber: Keenan *et al.* (1990); Masduqi dan Assomadi (2016)

Hasil uji statistik Anova *Two way* didapatkan hasil bahwa adanya pengaruh yang signifikan pada interaksi antara variasi jenis bakteri dan variasi komposisi media terhadap tingkat kelarutan aluminium pada proses *bioleaching*. Gambar 4.8 menunjukkan kombinasi variasi komposisi 50 lumpur alum dan 50 media bakteri dengan bakteri *A. ferrooxidans* memiliki efisiensi *bioleaching* aluminium tertinggi. Sehingga, reaktor dengan kombinasi variasi tersebut digunakan pada tahap selanjutnya yaitu proses *bioleaching* untuk mengetahui pengaruh bakteri *indigenous*.



Gambar 4. 8 Uji ANOVA *Two Way* mengenai Interaksi Antara Variasi Jenis Bakteri dan Komposisi Media terhadap Efisiensi *Bioleaching* Aluminium

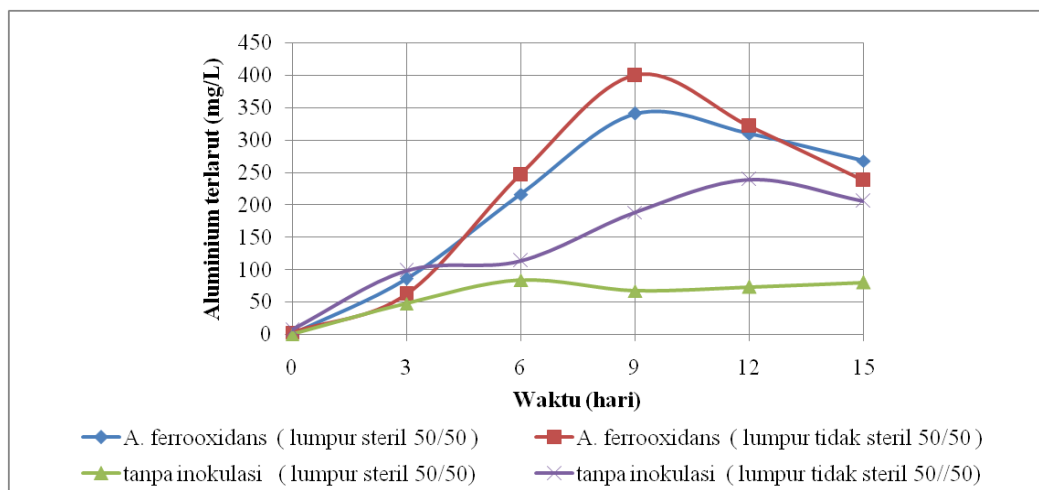
4.5 Pengaruh Bakteri *Indigenous* Lumpur Alum pada Proses *Bioleaching* Aluminium dari Limbah Lumpur Pengolahan Air Minum dengan bakteri *A. ferrooxidans*

Bakteri *A. ferrooxidans* digunakan dalam penentuan pengaruh bakteri *indigenous* pada penelitian ini. Hal tersebut dikarenakan bakteri *A. ferrooxidans* memiliki efisiensi *bioleaching* tertinggi dibandingkan dengan *P. fluorescens*. Sedangkan komposisi lumpur alum dan media tumbuh bakteri 50/50 (v/v) merupakan komposisi yang digunakan pada penelitian tahap ini. Hal tersebut dikarenakan pada komposisi tersebut bakteri *A. ferrooxidans* memiliki efisiensi *bioleaching* tertinggi.

Proses *bioleaching* menggunakan lumpur alum tanpa sterilisasi dilakukan untuk mengetahui pengaruh keberadaan bakteri *indigenous* lumpur alum pada proses *bioleaching* menggunakan *A. ferrooxidans*. Selain itu, sterilisasi saat pengaplikasian proses *bioleaching* akan membutuhkan biaya operasional yang besar, sehingga untuk menurunkan biaya operasional tersebut perlu diketahui efisiensi proses *bioleaching* tanpa sterilisasi.

Gambar 4.9 menunjukkan konsentrasi aluminium terlarut pada reaktor berisikan bakteri *A. ferrooxidans* pada media lumpur alum tanpa sterilisasi (399,67 mg/L) lebih tinggi dibandingkan dengan reaktor berisikan bakteri *A. ferrooxidans* pada media lumpur alum steril (340,70 mg/L). Hal tersebut menunjukkan bahwa bakteri *indigenous* dalam lumpur alum tidak menghambat kemampuan bakteri *A. ferrooxidans* dalam proses *bioleaching* aluminium. Keberadaan bakteri *indigenous* lumpur alum bahkan dapat meningkatkan konsentrasi aluminium terlarut pada proses *bioleaching*.

Gambar 4.9 juga menunjukkan konsentrasi aluminium terlarut pada reaktor tanpa inokulasi pada media lumpur alum tidak steril (118,50 mg/L) lebih tinggi dibandingkan dengan reaktor tanpa inokulasi pada media lumpur alum steril (67,13 mg/L). Hal tersebut menunjukkan bahwa lumpur alum mengandung bakteri *indigenous* yang berpotensi dalam proses *bioleaching* aluminium. Keseluruhan konsentrasi aluminium terlarut pada proses *bioleaching* untuk mengetahui pengaruh bakteri *indigenous* dapat dilihat pada Lampiran B5.



Gambar 4.9 Konsentrasi Aluminium Terlarut pada Proses *Bioleaching* untuk Mengetahui Pengaruh Bakteri *Indigenous*

Tabel 4.6 menunjukkan efisiensi *bioleaching* aluminium pada reaktor yang berisikan *A. ferrooxidans* pada lumpur alum steril dan lumpur tidak steril, yaitu masing-masing sebesar 42,77 % dan 50,18 %. Sedangkan, efisiensi *bioleaching* aluminium pada reaktor yang berisikan lumpur alum steril dan lumpur tidak steril tanpa inokulasi bakteri, yaitu masing-masing sebesar 23,67 % dan 8,43%.

Tabel 4.6 Efisiensi *Bioleaching* Aluminium pada Perlakuan Lumpur Alum Steril dan Tidak Steril

Perlakuan pada Lumpur Alum	Komposisi Lumpur Alum : Media 9K	Konsentrasi Awal Aluminium dalam Lumpur (mg/L)	Aluminium Terlarut (mg/L)	Efisiensi <i>Bioleaching</i> (%)	pH
Steril	<i>A. ferrooxidans</i> 50/50	796,50	340,70	42,77	2,77
Tidak steril	<i>A. ferrooxidans</i> 50/50	796,50	399,67	50,18	2,12
Tidak steril	Tanpa inokulasi 50/50	796,50	188,50	23,67	3,40
Steril	Tanpa inokulasi 50/50	796,50	67,13	8,43	4,15

Pengaruh keberadaan bakteri *indigenous* terhadap efisiensi *bioleaching* aluminium dari lumpur alum juga dianalisis dengan uji statistik. Uji statistik pada tahap ini menggunakan uji statistik Anova *One Way*. Uji statistik Anova *One Way* dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari 1 variabel bebas (jenis bakteri) terhadap variabel terikat (efisiensi *bioleaching* aluminium). Hasil uji Anova *one*

way ini menunjukkan variabel manakah yang paling berpengaruh terhadap efisiensi *bioleaching* aluminium. Uji statistik Anova *one way* ini memiliki tingkat kepercayaan 95% (Kuswadi dan Mutiara, 2004). Pengaruh yang signifikan dalam uji statistik ditunjukkan dengan *P-value* yang lebih kecil dari 0,05 ($P < 0,05$). Nilai $P < 0,05$ menunjukkan bahwa variabel bebas berpengaruh secara signifikan terhadap efisiensi *bioleaching* aluminium, sebaliknya jika nilai $P > 0,05$ maka variabel bebas tidak berpengaruh secara signifikan terhadap efisiensi *bioleaching* aluminium.

Hipotesis awal pada tahap ini, yaitu H_0 (a): tidak ada pengaruh signifikan dari keberadaan bakteri *indigenous* lumpur alum terhadap efisiensi *bioleaching* aluminium. Hasil uji statistik didapatkan bahwa untuk H_0 (a) nilai $P < 0,05$ ($P = 0,000$) maka tolak H_0 (a), sehingga ada pengaruh signifikan dari keberadaan bakteri *indigenous* lumpur alum terhadap efisiensi *bioleaching* aluminium. Data hasil uji statistik Anova *One Way* mengenai pengaruh bakteri *indigenous* pada proses *bioleaching* dapat dilihat pada Lampiran D1

Terdapat banyak bakteri yang dapat mereduksi kadar aluminium di lingkungan. Bakteri tersebut dapat berasal dari kultur laboratorium maupun berasal dari bakteri *indigenous* (Thatoi *et al.*, 2014). Sumber air baku yang diolah di IPAM Karangpilang berasal dari Kali Surabaya (Bhaskoro dan Ramadhan, 2018). Sehingga, bakteri *indigenous* yang terdapat dalam lumpur dapat berasal dari Kali Surabaya. Namun, karena pada tahap ini digunakan media tumbuh bakteri berupa media 9K yang memiliki pH rendah (pH 3), maka hanya bakteri-bakteri *indigenous* lumpur alum tertentu yang dapat hidup pada media tersebut.

Bakteri selain *A. ferrooxidans* yang dapat hidup di media 9K yaitu *A. thiooxidans* (Song *et al.*, 2008). Penelitian terdahulu oleh Wen *et al.* (2013) mengenai *bioleaching* logam berat menggunakan bakteri *indigenous* dari lumpur saluran pembuangan air, hasil identifikasi dapat ditemukan bakteri *A. ferrooxidans* dan *A. thiooxidans*. *A. thiooxidans* merupakan bakteri pengoksidasi sulfur (Pathak *et al.*, 2009). Mekanisme *bioleaching* dengan *A. thiooxidans*, yaitu senyawa sulfur yang tereduksi dalam lumpur dioksidasi menjadi asam sulfat yang dapat menurunkan nilai pH lumpur. Penurunan pH dapat meningkatkan kelarutan logam (Pathak *et al.*, 2009). Reaksi yang terjadi pada mekanisme *bioleaching* dengan *A.*

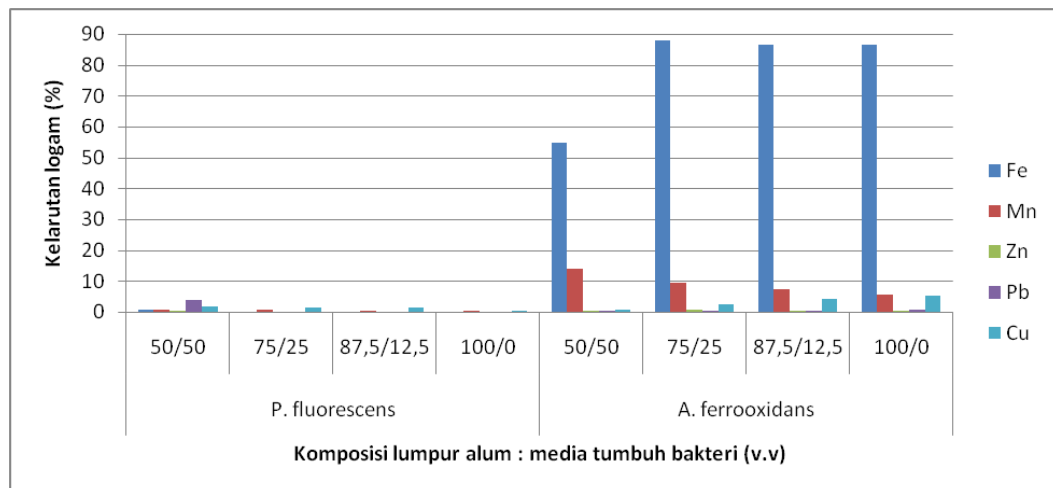
thiooxidans dapat dilihat pada Persamaan 4.4.



Pada reaksi (4.3) bakteri *A. thiooxidans* berperan aktif mempercepat oksidasi senyawa sulfur yang biasanya berlangsung sangat lambat tanpa bakteri (Pathak *et al.*, 2009).

4.6 Kelarutan Logam Lainnya (Fe, Mn, Zn, Pb, dan Cu) pada Proses *Bioleaching* dengan *P. fluorescens* dan *A. ferrooxidans*

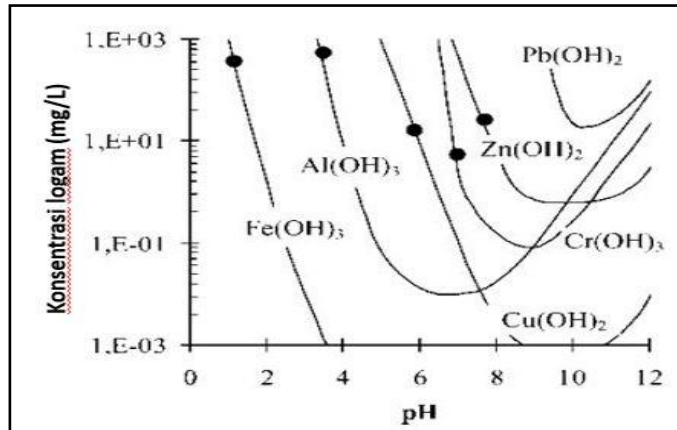
Karakterisasi lumpur alum menunjukkan adanya kandungan logam lain pada lumpur alum, yaitu logam Fe, Mn, Zn, Pb, dan Cu (Tabel 4.1). Proses asidifikasi dengan *bioleaching* adalah proses nonselektif dengan terlarutnya aluminium dan logam-logam lain serta kandungan organik pada lumpur (Prabhu *et al.*, 2014). Sehingga pada penelitian ini juga dilakukan analisis logam Fe, Mn, Zn, Pb, dan Cu yang larut dalam proses *bioleaching*. Persentase kelarutan logam Fe, Mn, Zn, Pb, dan Cu pada *bioleaching* dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Persentase Kelarutan Logam Fe, Mn, Zn, Pb, dan Cu pada Proses *Bioleaching* Hingga Hari ke-15

Gambar 4.10 menunjukkan bahwa Aluminium hasil *recovery* masih mengandung logam-logam lain dalam konsentrasi yang lebih rendah. Kelarutan logam-logam tersebut dikarenakan masing-masing logam memiliki kondisi pH tertentu untuk larut (Gambar 4.11). Persentase kelarutan logam tertinggi terjadi pada logam Fe,

yaitu hingga 88,46%, sedangkan logam Mn, Cu, Zn dan Pb memiliki persentase kelarutan masing-masing sebesar 13,84%; 5,31%; 0,72%; dan 0,86%. Data kelarutan logam Fe, Mn, Cu, Zn dan Pb secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran B9.



Gambar 4.11 Grafik kelarutan logam dan nilai pH
 Sumber: Marchioretto *et al.* (2005)

Tingkat kemurnian aluminium hasil *recovery* dari logam-logam pengotor penting untuk diketahui sehingga dapat dilakukan pengembangan penelitian untuk peningkatan kemurnian aluminium hasil *recovery* di tahap selanjutnya.

4.7 Konsentrasi Karbon, Nitrogen dan Fosfor pada Proses *Bioleaching* dengan *P. fluorescens* dan *A. ferrooxidans*

4.7.1 Rasio C:N:P (BOD:N:P)

Rasio C:N:P (BOD:N:P) optimum untuk pertumbuhan bakteri adalah 100:5:1 (Springer, 1993). Rasio C:N:P (BOD:N:P) pada reaktor *bioleaching* pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.7 untuk *P. fluorescens* dan Tabel 4.8 untuk *A. ferrooxidans*. Tabel 4.7 dan 4.8 menunjukkan rasio C:N:P (BOD:N:P) pada seluruh variasi media belum memenuhi rasio C:N:P (BOD:N:P) optimum untuk pertumbuhan bakteri. Reaktor yang memiliki rasio C:N:P (BOD:N:P) yang mendekati rasio optimum terdapat pada reaktor berisikan komposisi lumpur alum dan media tumbuh bakteri 100/0 untuk *P. fluorescens* dan 50/50 untuk *A. ferrooxidans*

Tabel 4.7 Rasio C:N:P (BOD:N:P) pada Reaktor *Bioleaching* dengan *P. fluorescens* Hari ke-0

Parameter	Komposisi Lumpur Alum : Media Tumbuh Bakteri (v/v)			
	50:50	75:25	87,5:12,5	100:0
C (BOD) (mg/L)	3600	1.200	1.080	720
N (mg/L)	25	21	19	15
P (mg/L)	7	5	4	3
Rasio C:N:P (BOD:N:P)	554 : 4 : 1	258 : 4 : 1	277 : 5 : 1	226 : 5 : 1

Tabel 4.8 Rasio C:N:P (BOD:N:P) pada Reaktor *Bioleaching* dengan *A. ferrooxidans* Hari ke-0

Parameter	Komposisi lumpur alum : media tumbuh bakteri (v/v)			
	50:50	75:25	87,5:12,5	100:0
C (BOD) (mg/L)	839	1.193	1.663	1.792
N (mg/L)	28	23	19	15
P (mg/L)	8	5	4	3
C:N:P (BOD:N:P)	110 : 4 : 1	234 : 4 : 1	395 : 5 : 1	550 : 5 : 1

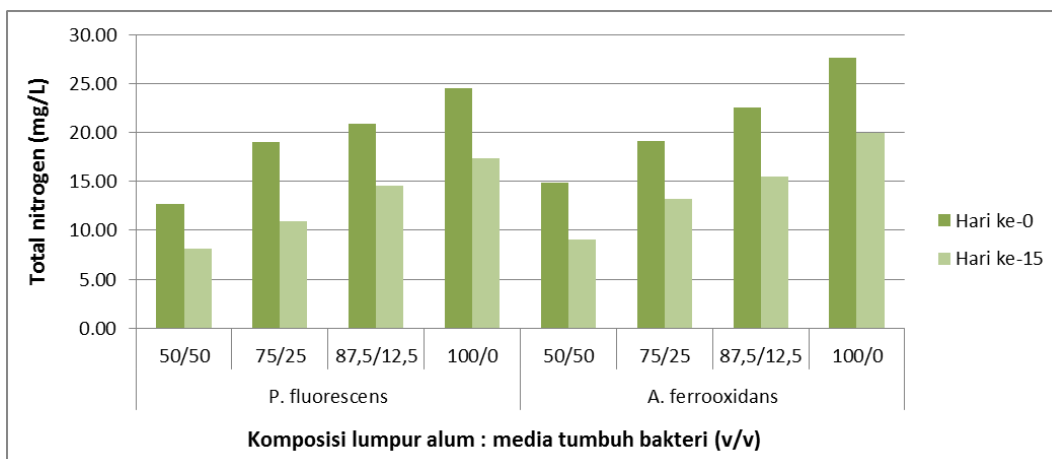
Tabel 4.7 menunjukkan reaktor yang berisikan bakteri *P. fluorescens* memiliki rasio C:N:P (BOD:N:P) yang semakin mendekati rasio optimum seiring dengan meningkatnya komposisi lumpur alum. Hal tersebut dikarenakan media Kings sebagai media tumbuh bakteri *P. fluorescens* memiliki kandungan *glycerin* yang cukup tinggi (15 mL/L). Kandungan *glycerin* tersebut yang meningkatkan kadar C dalam media *bioleaching*. Sehingga pada reaktor yang berisikan media Kings yang lebih banyak memiliki kadar C yang berlebih. Namun jika dibandingkan dengan efisiensi *bioleaching* dengan *P. fluorescens*, reaktor dengan rasio C:N:P (BOD:N:P) yang paling mendekati nilai optimum (100 lumpur alum : 0 media tumbuh bakteri) memiliki efisiensi *bioleaching* paling rendah. Hal tersebut dikarenakan walaupun memiliki rasio C:N:P (BOD:N:P) optimum, komposisi tersebut memiliki kadar aluminium yang paling tinggi. Sehingga pertumbuhan bakteri terhambat oleh toksisitas dari kadar aluminium yang tinggi dalam lumpur.

Tabel 4.8 menunjukkan reaktor yang berisikan bakteri *A. ferrooxidans* memiliki rasio C:N:P (BOD:N:P) yang semakin mendekati rasio optimum seiring dengan menurunnya komposisi lumpur alum. Hal tersebut dikarenakan sumber C

pada media *bioleaching* dengan bakteri *A. ferrooxidans* hanya berasal dari lumpur alum. Sehingga semakin tinggi komposisi lumpur alum, sumber C semakin berlebih. Jika dibandingkan dengan efisiensi *bioleaching* dengan *A. ferrooxidans*, komposisi yang memiliki rasio C:N:P (BOD:N:P) memiliki efisiensi *bioleaching* tertinggi. Hal tersebut dikarenakan pada komposisi tersebut memiliki rasio C:N:P (BOD:N:P) yang mendekati optimum dan memiliki kadar aluminium terendah (toksisitas rendah).

4.7.2 Perubahan Unsur N pada Proses *Bioleaching*

Gambar 4.12 menunjukkan konsentrasi N dalam lumpur alum mengalami penurunan pada hari ke-0 hingga hari ke-15 pada seluruh variasi komposisi lumpur alum dan jenis bakteri. Keseluruhan nilai N dapat dilihat pada Lampiran B6. Persentase penurunan konsentrasi N pada reaktor dengan bakteri *P. fluorescens* pada komposisi lumpur alum dan media 50/50; 75/25; 87,5/12,5 dan 100/0 masing-masing sebesar 36,24%; 42,26%; 30,38% dan 29,20%. Sedangkan konsentrasi N pada reaktor dengan bakteri *A. ferrooxidans* pada komposisi lumpur alum dan media 50/50; 75/25; 87,5/12,5 dan 100/0 masing-masing sebesar 38,99%; 30,92%; 31,19% dan 27,82%.



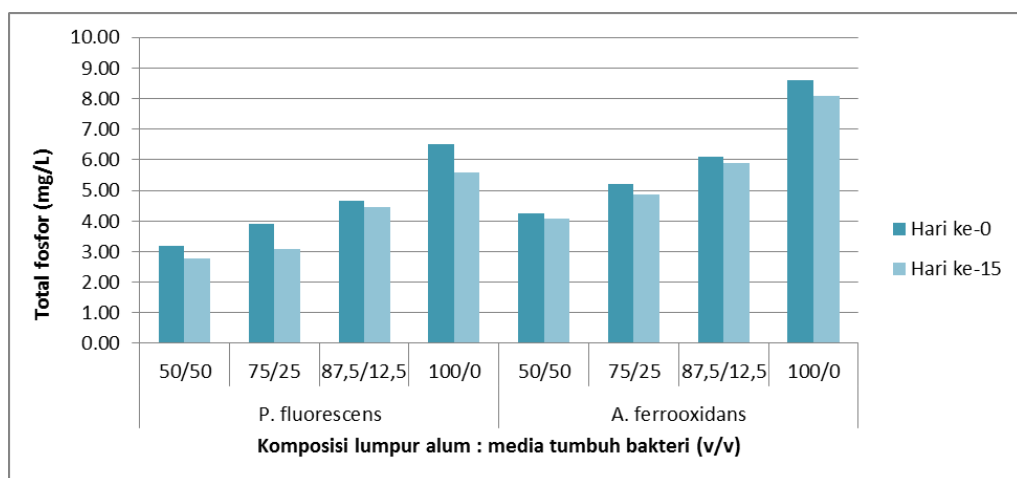
Gambar 4.12 Konsentrasi Total Nitrogen dalam Lumpur Alum

Senyawa-senyawa nitrogen terdapat dalam bentuk terlarut atau sebagai bahan tersuspensi. Jenis nitrogen di air meliputi nitrogen organik, amonia, nitrit dan nitrat (Seni, 1989). Kadar N mengalami penurunan karena adanya kehilangan

nitrogen akibat terjadinya proses nitrifikasi. Saat nitrifikasi, bakteri mengubah amonium menjadi nitrat sehingga kadar nitrat mengalami peningkatan. Namun, unsur nitrat langsung digunakan oleh bakteri untuk tujuan sintesis biomolekul mengandung N penyusun sel, atau respirasi nitrat. Adapun unsur N memiliki peranan yang sangat penting dalam penyusunan asam nukleat, asam amino dan enzim-enzim (Trihadiningrum, 2012; Shewfelt, 2005). Selain itu, penurunan kadar N dapat disebabkan karena seiring bertambahnya waktu kadar nitrogen organik berkurang karena dikonversi menjadi ammonia. Ammonia tersebut kemudian terlepas ke udara dalam bentuk amonia bebas. Sehingga konsentrasi nitrogen yang terukur berkurang (Effendi, 2003).

4.7.3 Perubahan Unsur P pada Proses *Bioleaching*

Gambar 4.13 menunjukkan konsentrasi P mengalami penurunan pada hari ke-0 hingga hari ke-15 pada seluruh variasi komposisi lumpur alum dan jenis bakteri. Keseluruhan nilai P dapat dilihat pada Lampiran B7. Persentase penurunan konsentrasi P pada reaktor dengan bakteri *P. fluorescens* pada komposisi lumpur alum dan media 50/50; 75/25; 87,5/12,5 dan 100/0 masing-masing sebesar 13,20%; 20,51%; 4,29% dan 13,85%. Sedangkan konsentrasi P pada reaktor dengan bakteri *A. ferrooxidans* pada komposisi lumpur alum dan media 50/50; 75/25; 87,5/12,5 dan 100/0 masing-masing sebesar 4,6%; 6,3%; 3,2% dan 5,8%.

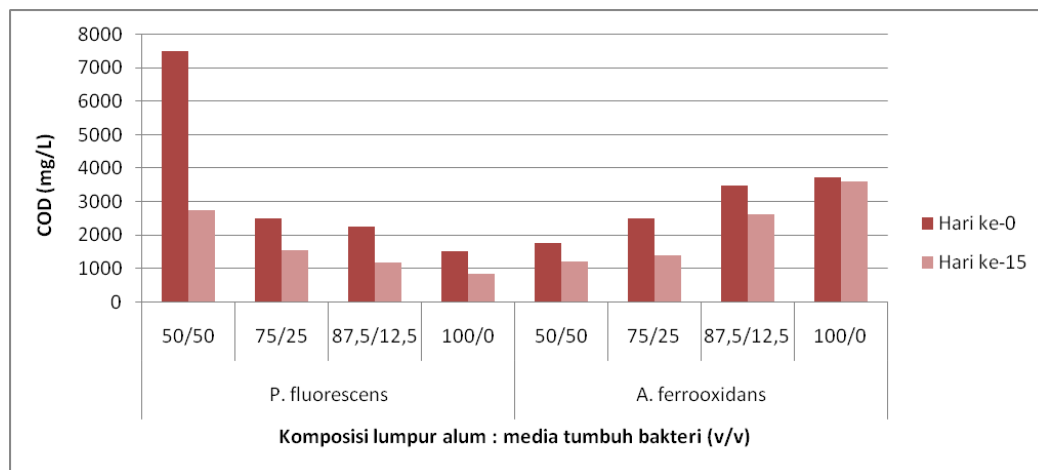


Gambar 4.13 Konsentrasi Total Fosfor dalam Lumpur Alum

Fosfor merupakan salah satu bahan kimia yang sangat penting bagi makhluk hidup. Penurunan kadar P pada proses *bioleaching* dapat disebabkan oleh aktivitas bakteri. Fosfor dibutuhkan untuk membentuk beberapa bagian sel, seperti asam nukleat, fosfolipida dan koenzim. Unsur ini dapat diperoleh bakteri dari senyawa-senyawa organik (misalnya garam-garam natrium dan kalium fosfat) atau dari senyawa organiknya (misalnya nukleotida) (Trihadiningrum, 2012)

4.7.4 Perubahan Konsentrasi COD pada Proses *Bioleaching*

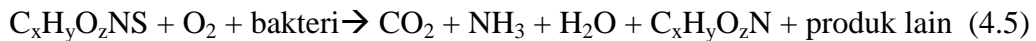
Gambar 4.14 menunjukkan konsentrasi COD mengalami penurunan pada hari ke-0 hingga hari ke-15 pada seluruh variasi komposisi lumpur alum dan jenis bakteri. Keseluruhan nilai COD dapat dilihat pada Lampiran B8. Persentase penurunan konsentrasi COD pada reaktor dengan bakteri *P. fluorescens* pada komposisi lumpur alum dan media 50/50; 75/25; 87,5/12,5 dan 100/0 masing-masing sebesar 63,60%; 38,80%; 48,00%; dan 45,33%. Sedangkan konsentrasi TP pada reaktor dengan bakteri *A. ferrooxidans* pada komposisi lumpur alum dan media 50/50; 75/25; 87,5/12,5 dan 100/0 masing-masing sebesar 31,09%; 43,69%; 24,88% dan 3,62%.



Gambar 4.14 Konsentrasi COD dalam Lumpur Alum

Nilai COD menunjukkan jumlah kebutuhan oksigen yang ekuivalen dengan kandungan bahan organik pada air limbah yang dapat dioksidasi oleh oksidan kimia yang kuat (APHA, 1992). Oksidasi bahan organik menghasilkan CO₂ dan H₂O. Nilai COD akan semakin menurun akibat proses oksidasi dan

sebagian bahan organik dikonversi menjadi sel-sel baru. Semua senyawa organik yang dibutuhkan oleh organisme mengandung unsur C, baik yang diperlukan untuk metabolisme (karbohidrat, protein, lemak), maupun yang diperlukan untuk membentuk komponen-komponen sel. Mekanisme penguraian senyawa organik oleh bakteri dapat dilihat pada Persamaan 4.5.



Berdasarkan Persamaan 4.5, bakteri merombak bahan organik menjadi senyawa organik yang lebih sederhana seperti CO_2 dan NH_3 . Adanya penguraian senyawa organik menjadi senyawa yang lebih sederhana secara tidak langsung dapat menurunkan nilai COD (Alvenda, 2009).

4.8 Potensi Pengaplikasian Proses *Bioleaching* Aluminium dari Limbah Lumpur Pengolahan Air Minum

Tingginya konsentrasi aluminium pada lumpur alum (5.900 mg/L) dapat dipisahkan dan digunakan kembali sebagai koagulan aluminium untuk proses koagulasi pada IPAM dan IPAL atau digunakan pada proses lain. Selain itu, pemisahan aluminium dari lumpur alum dapat mengurangi potensial toksisitas timbunan *landfill* lumpur alum akibat akumulasi dan lepasnya aluminium ke lingkungan (Ahmad *et al.*, 2016a). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *bioleaching* dapat menjadi teknologi alternatif sebagai tahap awal *recovery* aluminium untuk koagulan alum.

Pengaplikasian *bioleaching* aluminium dari limbah lumpur pengolahan air minum dapat dilakukan dengan menggunakan bakteri *A. ferrooxidans*. Hal tersebut dikarenakan bakteri *A. ferrooxidans* dapat menciptakan kondisi asam untuk kelarutan aluminium yang tinggi. Kemudian pengaplikasian *bioleaching* aluminium dari limbah lumpur pengolahan air minum dapat dilakukan pada komposisi lumpur alum dan media 9K 50/50 (v/v). Namun pada komposisi tersebut rasio C:N:P (BOD:N:P) belum mengandung rasio C:N:P (BOD:N:P) yang optimum (Tabel 4.8). Sehingga perlu dilakukan upaya penambahan kadar N dan P pada pengaplikasiannya.

Sterilisasi lumpur alum saat pengaplikasian proses *bioleaching* aluminium akan membutuhkan biaya operasional yang besar, namun berdasarkan hasil penelitian ini proses sterilisasi pada lumpur alum tidak perlu dilakukan. Hal tersebut dikarenakan bakteri *indigenous* pada lumpur alum juga memiliki kemampuan dalam proses *bioleaching* aluminium. Namun, teknologi *bioleaching* ini memiliki kelemahan yaitu logam terlarut hasil proses *bioleaching* tidak murni logam aluminium untuk *recovery* koagulan alum. Hasil penelitian ini menunjukkan bahawa hasil *bioleaching* mengandung logam-logam lain. Oleh karena itu, dibutuhkan proses lanjutan berupa pemisahan aluminium terlarut dari logam pengotor. Hal tersebut perlu dilakukan untuk mendapatkan koagulan aluminium hasil *recovery* dengan tingkat kemurnian tinggi.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan di atas, maka kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini adalah:

1. Lumpur Alum IPAM Karangpilang mengandung aluminium yang tinggi yaitu sebesar 5.900 mg/L. Kadar aluminium yang tinggi tersebut berpotensi untuk dilakukan *recovery*. Selain itu, lumpur alum juga mengandung senyawa organik yaitu BOD, COD, N dan P yang masing masing 2.345 mg/L, COD 4.914 mg/L, N 9,3 mg/L, dan P 2,05 mg/L. Uji toksisitas menunjukkan bahwa lumpur alum tidak bersifat toksik pada bakteri *P. fluorescens* dengan konsentrasi lumpur 100%; 87,5%; 75% dan 50%. Sedangkan pada lumpur alum dengan konsentrasi 87,5% dan 100% pertumbuhan bakteri *A. ferrooxidans* mulai terhambat.
2. Kelarutan aluminium tertinggi yaitu sebesar 340,70 mg/L. Kelarutan tertinggi terjadi pada reaktor dengan komposisi 50% media pertumbuhan bakteri : 50 % lumpur alum menggunakan bakteri *A. ferrooxidans* dengan efisiensi *bioleaching* sebesar 42.77%.
3. *Bioleaching* aluminium menunjukkan bahwa bakteri *indigenous* dalam lumpur alum dapat meningkatkan kelarutan aluminium pada proses *bioleaching*. Kelarutan aluminium tertinggi yaitu sebesar 399,67 mg/L. Kelarutan tertinggi terjadi pada reaktor dengan komposisi 50% media pertumbuhan bakteri : 50 % lumpur alum tidak steril menggunakan bakteri *A. ferrooxidans*.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian, maka saran untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Melakukan identifikasi bakteri *indigenous* dalam lumpur alum yang memiliki potensi dalam proses *bioleaching* aluminium.
2. Melakukan penelitian lanjutan mengenai *bioleaching* dengan variasi

konsentrasi penambahan unsur C, N dan P dalam lumpur alum untuk mendapatkan kondisi optimum bagi pertumbuhan bakteri.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, I., Hayat, S., Ahmad, A., dan Samiullah, I.A. (2005), "Effect of Heavy Metal on Survival of Certain Groups of Indigenous Soil Microbial Population", *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, Vol. 9, No. 1, hal. 115–121.
- Ahmad, T., Ahmad, K., dan Alam, M. (2016a), "Sustainable Management of Water Treatment Sludge Through 3'R' Concept", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 124, hal. 1–13.
- Ahmad, T., Ahmad, K., dan Alam, M. (2016b), "Characterization of Water Treatment Plant's Sludge and Its Safe Disposal Options", *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 35, hal.950–955.
- Alvenda, E. (2009), *Penggunaan Tanaman Kangkung (Ipomoea aquatic) Forsk.) dan Genjer (Limnocharis flava (L.) Buch.) dalam Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit*, Tesis, Pascasarjana Biologi, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- APHA, AWWA. (2012), *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 22nd ed*, Washington DC.
- Az-Zahra, S., Rahmawati dan Wardhani, E. (2014), "Karakteristik Kualitas Air Baku dan Lumpur sebagai Dasar Perencanaan Instalasi Pengolahan Lumpur IPA Badak Singa PDAM Tirtawening Kota Bandung", *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, Vol. 2, No.2, hal.1-10.
- Babel, S. dan Dacera, D.M. (2006), "Heavy Metal Removal from Contaminated Sludge for Land Application: A review", *Waste Management*, Vol. 26, hal. 988-1004.
- Balamurugan, D., Udayasooriyan, C., dan Kamaladevi, B. (2014), "Chromium (VI) reduction by *Pseudomonas putida* and *Bacillus subtilis* isolated from contaminated soils", *International Journal of Environmental Sciences*, Vol. 5, No. 3, hal. 522 – 529.

- Balram, P. (2010), *Text Book of Environmental Chemistry Bioleaching*, I.K. International, New Delhi.
- Barakwan, R.A., Trihadiningrum, Y. dan Bagastyo, A.Y. (2019), "Characterization of Alum Sludge from Surabaya Water Treatment Plant, Indonesia", *Journal of Ecological Engineering*, Vol. 20, No. 5, hal. 7–13.
- Barragan, B.E., Carlos, C., Carman, dan Marquez, M. (2007), "Biodegradation of Azo Dyes by Bacteria Inoculated on Solid Media", *Dyes and pigments*, Vol. 75, No. 1, hal. 73-81.
- Bauer, A.W., Kirby, W.M.M., Sherris, J.C., dan Turk, M. (1996), "Antibiotic Susceptibility Testing by a Standardized Single Disk Method", *American Journal of Clinical Pathology*, Vol. 45, hal. 493–496.
- Bhaskoro, R.G.K. dan Ramadhan, T. (2018), "Evaluasi Kinerja Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) Karangpilang I PDAM Surya Sembada Kota Surabaya Secara Kuantitatif", *Jurnal Presipitasi : Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, Vol. 15, No. 2, hal. 62-68.
- Brandl, H. (2001), *Biotechnology Second: Chapter 8. Microbial Leaching of Metal*, WILEY-VCH Verlag GmbH, Switzerland.
- Brandl, H., Lehmann, S., Faramarzi, M.A., dan Martinelli, D. (2008), "Biomobilization of Silver, Gold, and Platinum Form Solid Waste Materials by HCN-forming Microorganisms", *Hydrometallurgy*, Vol. 94, No. 1, hal. 14-17.
- Bruins, M.R., Kapil, S., dan Oehme, F.W. (2000), "Microbial Resistance to Metals in The Environment", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Vol. 45, No. 3, hal.198–207.
- Camargo, F.P., Tonello, P.S., dos Santos, A.C.A., dan Duarte, I.C.S. (2016), "Removal of Toxic Metals from Sewage Sludge Through Chemical, Physical, and Biological Treatments-A Review", *Water, Air, and Soil Pollution*, Vol. 227, No. 433, hal. 1-11.
- Cen, S.Y. dan Lin, J.W. (2001), "Effect of Substrate Concentration on

- Bioremediation of Metal Contaminated Sediment”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 82, No. 1, hal. 77-89.
- Cerqueira, M.B.R., Caldas, S.S., dan Primel, E.G. (2014), “New Sorbent in The Dispersive Solid Phase Extraction Step of Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged, and Safe for The Extraction of Organic Contaminants in Drinking Water Treatment Sludge”, *Journal of Chromatography A*, Vol. 133, No. 6, hal. 10–22.
- Chen, S., Qiu, G., Qin, W., dan Lan, Z. (2008), “Bioremediation of Sphalerite by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* cultured in 9K medium modified with pyrrhotite”, *Journal of Central South University of Technology*, Vol. 15, No. 4, hal. 503–507.
- Cheng, Y., Guo, Z., Liu, X., Yin, H., Qiu, G., Pan, F., dan Liu, H. (2009), “The Bioremediation Feasibility for Pb/ Zn Smelting Slag and Community Characteristics of Indigenous Moderate Thermophilic Bacteria”, *Bioresource Technology*, Vol. 100, No. 10, hal. 2737-2740.
- Cherifi, M., Boutemine, N., Laefer, D.F., dan Hazourli, S. (2016), “Effect of Sludge pH and Treatment Time on The Electrokinetic Removal of Aluminum from Water Potabilization Treatment Sludge”, *Comptes Rendus Chimie*, Vol. 19, hal. 511–516.
- Cho, K.S., Ryu, H.W., Lee, I.S., and Choi, H.M. (2002), “Effects of Solids Concentration on Bacterial Leaching of Heavy Metals from Sewage Sludge”, *Journal of the Air and Waste Management Association*, Vol. 52, hal. 237-243.
- Ciric, L., Philip, J.C. dan Whiteley, A.S. (2010), “Hydrocarbon Utilization Within a Diesel Degrading Bacterial Consortium”, *FEMS Microbiology Letters*, Vol. 303, No. 1, hal 116-122.
- CLSI (2015), *Performance Standards for Antimicrobial Susceptibility Testing; Twenty-Fifth Informational Supplement*, Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI), USA.
- Dahhou, M. (2017), “Drinking Water Sludge of The Moroccan Capital: Statistical

- Analysis of Its Environmental Aspects”, *Journal of Taibah University for Science*, Vol. 11, No. 5, hal. 749–758.
- Dassanayake, K.B., Jayasinghe, G.Y., dan Surapaneni, A. (2015), “A Review on Alum Sludge with Special Reference to Agricultural Applications and Future Challenges”, *Waste Management Journal*, Vol. 38, hal. 321-335.
- Deng, X., Chai, L., Yang, Z., Tang, C., Wang, Y., dan Shi, Y. (2013), “Bioleaching Mechanisms of Heavy Metals in The Mixture of Contaminated Soil and Slag Using Indigenous *Penicillium chrysogenum* Strain F1”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 248, hal. 107–114.
- Donnarumma, G., Buommino, E., Fusco, A., Paoletti, I., Auricchio, L., dan Tufano, M.A. (2010), “Effect of Temperature on The Shift of *Pseudomonas fluorescens* from An Environmental Microorganism to A Potential Human Pathogen”, *International Journal of Immunopathology and Pharmacology*, Vol. 23, hal. 227–234.
- Effendi, H. (2003), *Telaah Kualitas Air Bagi Pengelolaan Sumber Daya Lingkungan Perairan*, Kanisius, Yogyakarta.
- Ehrlich, H.L. (1992), *Metal Extraction and Ore Discovery, in Lederberg (Eds) Encyclopedia of Microbiology, Vol 3*, Academic Press, San Diego.
- Fahmy, M., Hussein, H., Amer, R., dan Bestawy, E.E. (2010), “Bioremediation of Heavy Metals from Sewage Sludge Using Isolated Indigenous Bacteria”, *Journal of Biotechnology*, Vol. 150, hal. 251-251.
- Farooq, U., Anjum, F.M., Zahoor, T., Rahman, S.U., Randhawa, M.A., Ahmed, A., dan Akram, K. (2012), “Optimization of Lactic Acid Production from Cheap Raw Material: Sugarcane Molasses”, *Pakistan Journal of Botany*, Vol. 44, No. 1, hal. 333-338.
- Fass, R., Geva, J., Shalita, Z.P., White, M.D., Fleming, J.C. (1994), *Bioleaching Method for the Extraction of Metals from Coal Fly Ash using Thiobacillus*, United States Patent: US005278069A.
- Fatimah. (2007), “Uji Produksi Biosurfaktan oleh *Pseudomonas Sp.* pada Substrat yang Berbeda”, *Berkalah Penelitian Hayati*, Vol. 12, hal.181–185.

- Firrizqy, M.I. dan Oktaviani, S., (2017), *Studi Pengelolaan Lumpur Karangpilang 3 PDAM Surya Sembada Kota Surabaya*, Department of Environmental Engineering, ITS, Surabaya.
- Fonti, V., Dell' Anno, A., dan Beolchini, F. (2016), "Does Bioleaching Represent A Biotechnological Strategy for Remediation of Contaminated Sediments?", *Science of the Total Environment*, Vol. 503, No. 564, hal. 302-319.
- Funari, V., Makinen, J., Salminen, J., Braga, R., Dinelli, E., dan Revitzer, H. (2017), "Metal removal from Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash: A Comparison Between Chemical Leaching and Bioleaching", *Waste Management*, Vol. 60, hal. 397–406.
- Gentina, J.C. dan Acevedo, F. (2013), "Application of Bioleaching to Copper Mining In Chile", *Electronic Journal of Biotechnology*, Vol. 16, No. 3.
- Greenwood, D. (1995), *Antibiotics Susceptibility (Sensitivity) Test, Antimicrobial and Chemotherapy*, Mc Graw Hill Company, United State of America.
- Gu, T., Rastegar, S.O., Mousavi, S.M., Li, M., dan Zhou, M. (2018), "Advances in Bioleaching for Recovery of Metals and Bioremediation of Fuel Ash and Sewage Sludge", *Bioresource Technology*, Vol. 261, hal. 428-440.
- Hadi, A. (2005), *Prinsip Pengelolaan Pengambilan Sampel Lingkungan*, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Imamuddin, H. (2011), "Uji Resistensi Bakteri Terhadap HgCl₂, yang diisolasi dari Tanah Penambangan Emas di Pongkor, Jawa Barat", *Berita Biologi*, Vol. 10, No. 4, hal. 425-430 .
- Isa, I. (2004), *Bioleaching Logam Berat Timbal dari Sedimen Tercemar oleh Pseudomonas fluorescens, Thiobacillus ferrooxidans, Escherchia coli dan Bacillus sp (Studi Pendekatan Ekperimental Laboratorik)*, Disetrasi, Program Studi Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Pascasarjana Universitas Airlangga.
- Jadhav, U.U. dan Hocheng, H. (2012), "A Review of Recovery of Metals from Industrial Waste", *Journal of Achievement in Materials and*

- Manufacturing Engineering*, Vol. 54, No. 2, hal. 159-167.
- Jeffries, M. dan Mills, D. (1996), *Freshwater Ecology, Principles and Application*, John Wiley and Sons, United Kingdom.
- Keeley, J., Jarvis, P., dan Judd, S.J. (2014), “Coagulant Recovery from Water Treatment Residuals: A Review of Applicable Technologies”, *Environmental Science & Technology*, Vol. 44, hal. 2675–2719.
- Keeley, J., Jarvis, P., Smith, A.D., dan Judd, S.J. (2016), “Coagulant Recovery and Reuse for Drinking Water Treatment,” *Water Research*, Vol. 88, hal. 502-509.
- Keenan, C.W. (1990), *General College Chemistry (Sixth Ed.)*, McGRAW-HILL, New York.
- Kementrian Lingkungan Hidup Republik Indonesia (2014), “*Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia No. 5/2014 mengenai Standar Kualitas Air Limbah*”, Kementrian Lingkungan Hidup, Jakarta, Indonesia.
- Kings, E. O., Ward, M. K. M., dan Raney, D. E. (1954), “Two Simple Media for The Demonstration of Pyocyanin And Fluorescein”, *Journal of Laboratory and Clinical Medicine*, Vol. 44, hal. 301-307.
- Krewski, D., Yokel, R. A., Nieboer, E., Borchelt, D., Cohen, J., Harry, J., Kacew, S., Lindsay, J., Mahfouz, A. M., dan Rondeau, V. (2007), “Human Health Risk Assessment for Aluminium, Aluminium Oxide, and Aluminium Hydroxide”, *Journal of Toxicology Environmental Health, Part B, Critical Reviews*, Vol. 11, No. 2, hal. 147.
- Kurniawan, S.B. (2018), *Karakterisasi Bakteri Brochothrix thermosphacta dan Vibrio alginolyticus serta Potensinya untuk Mereduksi Aluminium dalam Air Limbah*, Tesis, Program Studi Magister Teknik Lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Lin, Z., Zhou, Q.G., dan Hua, H.Y. (2008), “Bioleaching of Pyrite by *A. ferrooxidans* and *L. ferriphilum*”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol.18, No.6, hal. 1415-1420.
- Liu, R., Zhao, Y., Sibille, C., dan Ren, B. (2016), “Evaluation of Natural Organic

- Matter Release from Alum Sludge Reuse in Wastewater Treatment and Its Role in P Adsorption”, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 302, hal. 120–127.
- Lloyd, J.R. (2002), “Bioremediation of Metal: The Application of Microorganism that Make and Break Minerals”, *Microbial Today*, Vol. 29, hal 67-69.
- Maiden, P., Hearn, M.T.W., Boysen, R.I., Chier, P., Warnecke, M., dan Jackson, W.R. (2015), *Alum sludge re-use investigation (100S-42) prepared by GHD and Centre for Green Chemistry (Monash University) for the Smart Water Fund*, ACTEW Water & Seqwater, Victoria.
- Marchioretto, M.M., Bruning, H., dan Rulkens, W. (2005), “Heavy Metals Precipitation in Sewage Sludge”, *Separation Science and Technology*, Vol. 40, hal. 3393-3405.
- Maria, R., Silva, P., Rodriguez, A.A., Montes, J.M., Oca, D. dan Moreno, D.C. (2009), “Biosorption of Chromium, Copper, Manganese, and Zinc by *Pseudomonas aeruginosa* AT18 Isolated from A Site Contaminated with Petroleum”, *Bioresource Technology*, Vol. 100, No. 4, hal. 1533-1538.
- Masduqi, A. dan Assomadi, A.F. (2016), *Operasi dan Proses Pengolahan Air*, ITS Press, Surabaya.
- Metcalf dan Eddy (1985), *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse, 3rd. Ed*, McGraw-Hill Inc., New York, USA.
- Mishra, D., dan Rhee, Y.H. (2014), “Microbial Leaching of Metals from Solid Industrial Wastes”, *Journal of Microbiology*, Vol. 52, No. 1, hal. 1–7.
- Mold, M., Umar, D., King, A., dan Exley, C. (2018), “Aluminium in Brain Tissue in Autism”, *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, Vol. 46, hal. 76-82.
- Mortula, M., Bard, S.M., Walsh, M.E., dan Gagnon, G.A. (2009), “Aluminum Toxicity and Ecological Risk Assessment of Dried Alum Residual into Surface Water”, *Journal of Civil Engineering*, Vol. 36, hal. 127-136.
- Mubarok, M.A., Pratama, B.E., dan Chaerun, S.K. (2016), “Bioleaching Nikel

- dari Bijih Limonit Pulau Gag menggunakan Bakteri Mixotrof”, *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, Vol. 12, No. 1, hal. 69-79.
- Mulyadi, M., Wuryanti, dan Sarjono, P.R. (2017), “Konsentrasi Hambat Minimum (KHM) Kadar Sampel Alang-Alang (*Imperata cylindrica*) dalam Etanol Melalui Metode Difusi Cakram”, *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, Vol. 20 No. 3, hal. 130 – 135.
- Musafa, M.K., Aini, L.Q., dan Prasetya, B. (2015), “Peran Mikoriza Arbuskula dan Bakteri *Pseudomonas fluorescens* dalam Meningkatkan Serapan P dan Pertumbuhan Tanaman Jagung pada Andisol”, *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, Vol. 2, No. 2, hal. 191-197.
- New Jersey Department of Environmental Protection (2012), *New Jersey Sludge Sampling and Analytical Guidance Document*, Division of Water Quality Bureau of Pretreatment and Residuals, New Jersey.
- Olson, G.J. (1991), “Rate of Pyrite Bioleaching by *Thiobacillus ferrooxidans*: Results of an Interlaboratory Comparison”, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 57, No. 3, hal. 642-644.
- Owuama, C.I. (2017), “Determination of Minimum Inhibitory Concentration (MIC) and Minimum Bactericidal Concentration (MBC) Using A Novel Dilution Tube Method”, *African Journal of Microbiology Research*, Vol. 11, No. 23, hal. 977-980.
- Pascal, G., Frederique, G., Romain, G., Julian, T., Jeremy, O., Jean, V. (2013), “Dryness Limit: A Useful Parameter to Assess Sludge Dewatering”, *Journal of Cake Filtration-Desaturation*, Vol. 42, No. 3, hal. 123-127.
- Pathak, A., Dastidar, M.G., dan Sreekrishnan, T.R. (2009), “Bioleaching of Heavy Metals from Sewage: A Review”, *Journal of Environmental Management*, Vol. 90, hal. 2343–2353.
- Prabhu, S.V., Arulvel, R., Selvam, A.K., dan Chandra, Y.V. (2014), “Fungal and Bacterial Bioleaching Studies On Bauxite”, *International Journal of Bioprocess Technology*, Vol. 1, No. 1, hal. 42-46.
- Pradhan, D., Pal, S., Sukla, L.B., Chaudhury, G.R. dan Das, T. (2008),

- “Bioleaching of Low-Grade Copper Ore Using Indigenous Microorganisms”, *Indian Journal of Chemical Technology*, Vol. 15, hal. 588-592.
- Pratiwi, S.T. (2008), *Mikrobiologi Farmasi*, Erlangga, Jakarta.
- Prihartanto (2008), “Pengaruh Fluktuasi Debit terhadap Pola Fluktuasi Karbon di Sungai Surabaya”, *Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia*, Vol. 10, No. 2, hal. 106-111.
- Primadipta, I.W. (2017), *Bioremediasi Lumpur Alum menggunakan Pseudomonas fluorescens dan Aspergillus niger dengan Penambahan Serbuk Gergaji sebagai Bulking Agent*, Tugas Akhir, Departemen Teknik Lingkungan, FTSP-ITS, Surabaya.
- Purwanti, I.F., Abdullah, S.R.S., Hamzah, A., Idris, M., Basri, H., Mukhlisin, M., dan Latif, M.T. (2015), “Biodegradation of Diesel by Bacteria Isolated from *Scirpus mucronatus* Rhizosphere in Diesel-Contaminated Sand”, *Journal of Advanced Science*, Vol. 2, No. 1, hal.140-143.
- Qomaruddin, Karnaningrum, N. dan Vanany, I. (2013), “Analisa Resiko Clearator IPAM Karang Pilang III PDAM Surya Sembada Kota Surabaya”, *Prosiding Seminar Nasional Manajemen Teknologi XVII*, hal D-7-1 sampai D-7-11.
- Rahayu, Y.S., Yuliani dan Trimulyono, G. (2018), “Isolation and Identification of Phosphate Solubilizing Bacteria and Hydrocarbon Degradation Bacteria in Lapindo Mud Sidoarjo - East Java – Indonesia”, *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 13, No. 8, hal. 2318 – 2327.
- Ranjbar, L., Eslami, A., Yazdanbakhsh, A., dan Saghi, M.H. (2017), “Toxicity Assessment of Tehran Water Treatment Sludges using Bioassay Tests”, *Toxin Reviews*, hal. 1-8.
- Rasulov, B.A., Yili, A., and Aisa, H.A. (2013), “Biosorption of Metal Ions by Exopolysaccharide Produced by *Azotobacter chroococcum* XU1”, *Journal of Environmental Protection*, hal. 989-993.
- Rawlings, D.E., Dew, D., dan du Plessis C. (2003), “Biomining of metal-containing ores and concentrates”, *Trends in Biotechnology*, Vol. 21, No.

1, hal. 38-44.

- Razif, M. dan Persada, S. F. (2015), "The Fluctuation Impacts of BOD, COD and TSS in Surabaya Rivers to Environmental Impact Assessment (EIA) Sustainability on Drinking Water Treatment Plant in Surabaya City", *International Journal of ChemTech Research*, Vol. 8, No. 8, hal. 143–151.
- Sajjad, W., Zheng, G., Din, G., M, X., Rafiq, M. and Xu, W. (2019), "Metals Extraction from Sulfide Ores with Microorganisms: The Bioleaching Technology and Recent Developments", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 72, No 3, hal. 559-579.
- Sawyer, C. N., Mc Carty, P. L., dan Parkin, G. (1996), *Chemistry for Environmental Engineering*, McGraw – Hill, New York.
- Scales, B.S., Dickson, R.P., Lipuma, J.J., dan Huffnagle, G.B. (2014), "Microbiology, Genomics, and Clinical Significance of The *Pseudomonas fluorescens* Species Complex, An Unappreciated Colonizer Of Humans", *Clinical Microbiology Reviews*, Vol. 27, No. 4, hal. 927–948.
- Seni, M.S. (1989), *Kimia Lingkungan*, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan Dirjen Pendidikan Tinggi PAU, IPB, Bogor.
- Shah, S.S., Sponchiado, S.R., Palmieri, M.C., dan Bevilaqua, D. (2017), "Bioleaching of Aluminum from Bauxite Ore using Adapted Strain of *Penicillium Simplicissimum*", *Journal of Microbial and Biochemical Technology*, Vol. 9, No. 6, hal. 119-129.
- Shaikh S.M., Ahmed, A.A. dan Ahmed, S.A. (2018), "Impact of Pulp Density on Extraction of Metals, by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Pseudomonas fluorescens* from Bauxite Ore", *Journal of Pure and Applied Microbiology*, Vol. 12, No. 3, hal. 1647-1654.
- Shewfelt, K., Lee, H. dan Zytner, R.G. (2005), "Optimization of Nitrogen for Bioventing of Gasoline Contaminated Soil", *Journal of Environmental Engineering and Science*, Vol. 4, hal. 29–42.
- Silverman, M.P. dan Lundgren, D.G. (1959), "Studies on The Chemoautotrophic Iron Bacterium *Ferrobacillus ferrooxidans*: I. An Improved Medium and

- A Harvesting Procedure for Securing High Cell Yields”, *Journal of Bacteriology*, Vol. 77, hal. 642–647.
- Solisio, C., Lodi, A., dan Veglio, F. (2002), “Bioleaching of Zinc and Aluminium from Industrial Waste Sludges by Means of *Thiobacillus ferrooxidans*”, *Waste Management*, Vol. 22, hal. 667–675.
- Song, C., Zhou, Q.C., Qing, Q.W., dan Yue, L.Z. (2008), “Bioleaching of sphalerite by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* cultured in 9K medium modified with pyrrhotite”, *Journal of Central South University of Technology*, Vol. 15, hal. 503–507.
- Springer, A.M. (1993), *Industrial Environmental Control, Pulp and Paper Industry. 2nd Edition*, TAPPI Press, Atlanta, Georgia.
- Sugiharto, T. (2009), *Analisis Varians*, Universitas Gunadarma, Jakarta
- Sumarwoto, O. (2001), *Ekologi, Lingkungan dan Pembangunan*, Djambatan, Jakarta.
- Susanto, Sudrajat, D., Ruga, R. (2012), “Studi Kandungan Bahan Aktif Tumbuhan Meranti Merah (*Shorea Leprosula* Miq) sebagai Sumber Senyawa Antibakteri”, *Mulawarmnan Scientific*, Vol. 11, No. 2, hal. 181-90.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H. dan Vigil, S.A. (1993), *Integrated Solid Waste Management Engineering Principle and Management Issue*, McGraw Hill Inc., New York.
- Thakur, S.I. (2006), *Environmental Biotechnology: Basic Concepts and Application*, 2nd, I.K. International Publishing House Pvt, New Delhi, India.
- Thatoi, H., Das, S., Mishra, J., Rath, B.P., dan Das, N. (2014), “Bacterial Chromate Reductase, a Potential Enzyme for Bioremediation of Hexavalent Chromium: A Review”, *Journal of Environmental Management*, Vol. 146, No. 1, hal. 383-399.
- Thomas, D.V., Ravindran, V., dan Ravindran, G. (2008), “Nutrient Digestibility and Energy Utilisation of Diets Based on Wheat, Sorghum or Maize by The Newly Hatched Broiler Chick”, *Journal British Poultry Science*, Vol. 49,

No. 4, hal. 429-435.

- Trihadiningrum, Y. (2012), *Mikrobiologi Lingkungan*, ITS Press, Surabaya.
- Trollip, D.L., Hughes, J.C., dan Titshall, L.W. (2013), "Sources of Manganese in The Residue from A Water Treatment Plant", *Water SA - African Journals Online*, Vol. 39, No. 2, hal. 265-270.
- Urik, M., Bujdos, M., Milova-Ziakova, B., Mikusova, P., Slovak, M., dan Matus, P. (2015), "Aluminium Leaching from Red Mud by Filamentous Fungi", *Journal of inorganic biochemistry*, Vol. 152, hal. 154-159.
- Urik, M., Polak, F., Pifkova, I., Korenkova, L., Littera, P., dan Matus, P. (2018), "Aluminium Leaching by Heterotrophic Microorganism *Aspergillus niger*: An Acidic Leaching?", *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 43, hal. 2369–2374.
- U.S. EPA. (2011), "*Drinking Water Treatment Plant Residuals Management Technical Report*", hal. 192.
- Usman, H. dan Akbar, R.P.S. (2000), *Pengantar Statistika*, Bumi Aksara, Jakarta.
- Uwimana, A., Nhapi, I., Wali, U. G., Hoko, Z., dan Kashaigili, J. (2010), "Sludge Characterization at Kadahokwa Water Treatment Plant, Rwanda", *Water Science and Technology: Water Supply*, Vol. 10, No. 5, hal. 848–859.
- Vyas, P. dan Gulati, A. (2009), "Organic Acid Production In Vitro and Plant Growth Promotion In Maize Under Controlled Environment By Phosphate-Solubilizing *Fluorescent pseudomonas*", *BMC Microbiology*, Vol. 9, No. 174, hal. 1-15.
- Wen, Y.M., Cheng, Y., Tang, C., dan Chen, Z.L. (2013), "Biorecovery of Heavy Metals from Sewage Sludge Using Indigenous Iron-Oxidizing Microorganisms", *Journal of Soils and Sediments*, Vol. 13, hal. 166–175.
- Widawati, S., Suliasih, dan Muharam, A. (2015), "Pengaruh Air Laut terhadap Populasi Bakteri Biofertilizer, P Tersedia dalam Tanah, dan Pertumbuhan Bayam (*Amaranthus sp.*)", *Jurnal Hortikultura*, Vol. 25, No. 3, hal. 1-7.
- Wong, J.W., Xiang, L., Gu, X.Y., dan Zhou, L.X. (2004), "Biorecovery of Heavy Metals from Anaerobically Digested Sewage Sludge Using FeS₂ as An

- Energy Source”, *Chemosphere*, Vol. 55, No.1, hal. 101-107.
- Xiang, L., Chan, L.C., dan Wong, J.W.C. (2000), “Removal of Heavy Metals from Anaerobically Digested Sewage Sludge by Isolated Indigenous Iron Oxidizing Bacteria”, *Chemosphere*, Vol. 41, hal. 283–287.
- Yousef, G., Manouchehr, O., dan Reza, S.A. (2009), “Microbiological Leaching of Al from the Waste of Bayer Process by Some Selective Fungi, Iran”, *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, Vol. 28, No. 1, hal. 109-115.
- Yudo, S. dan Said, N.I, (2019), “Kondisi Kualitas Air Sungai Surabaya Studi Kasus: Peningkatan Kualitas Air Baku PDAM Surabaya”, *Jurnal Teknologi Lingkungan*, Vol. 20, No 1, hal. 19-28.
- Yustinah, Gozan, M., Hermansyah, H., dan Alamsyah, R. (2016), “Pengaruh jenis sumber nitrogen pada pembuatan polyhydroxybutyrate dari glukosa menggunakan bakteri *Bacillus cereus*”, *Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2016*, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jakarta.
- Zahang, G.L., Wu, Y.T., Qian, X.P., dan Meng, Q. (2005), “Biodegradation of Crude Oil by *Pseudomonas aeruginosa* in The Presence of Rhamnolipids”, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE B*, Vol. 6, No. 8, hal. 725-730.
- Zhao, Y.Q., Babatunde, A.O., Hu, Y.S., Kumar, J.L.G., dan Zhao, X.H. (2011), “Pilot Field-Scale Demonstration of a Novel Alum Sludge-Based Constructed Wetland System for Enhanced Wastewater Treatment”, *Process Biochemistry*, Vol. 46, No. 1, hal. 278–283.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN A

PROSEDUR ANALISIS LABORATORIUM

Lampiran A.1 Analisis Kadar Air

Alat dan Bahan:

1. Sampel lumpur alum PDAM
2. Cawan porselen
3. Oven
4. Desikator

Prosedur Analisis:

1. Cawan porselen dimasukkan ke oven 105°C selama 1 jam.
2. Cawan porselen dimasukkan ke desikator selama 15 menit.
3. Sampel lumpur alum dimasukkan dalam cawan porselen ditimbang dengan neraca analitik (A).
4. Sampel lumpur alum dalam cawan porselen dioven selama 1 jam dalam suhu 105°C.
5. Lumpur kering dalam cawan porselen didesikator selama 15 menit.
6. Lumpur alum dan cawan ditimbang dengan neraca analitik (B).
7. Dihitung kadar air sampel dengan rumus:

$$\frac{A - B}{A} \times 100\%$$

8. Lumpur alum disimpan.

Lampiran A.2 Analisis *Chemical Oxygen Demand* (COD) dengan Metode *Close Reflux* dan *Colorimetric*

Alat dan Bahan:

Alat : *vial* atau tabung COD, *digester*, dan *spectroquant*.

Bahan : *Digestion solution*, *sulfuric acid reagent*, larutan standar *Potassium Hydrogen Phthalate* (KHP)

Prinsip Kerja:

Pemanasan sampel dengan menggunakan *digester* menyebabkan perubahan Cr (VI) menjadi Cr (III) karena ion dikromat mengoksidasi COD pada sampel.

Prosedur Kerja Pembuatan Reagent:

- *Digestion Solution*

Mengeringkan serbuk $K_2Cr_2O_7$ sebanyak 10,216 g ke dalam oven pada suhu $105^\circ C$ selama 2 jam. Kemudian melarutkan 10,216 g $K_2Cr_2O_7$ ke dalam 500 mL aquadest, menambahkan H_2SO_4 pekat sebanyak 167 mL dan menambahkan 33,3 g $HgSO_4$. Menunggu hingga dingin lalu mengencerkan hingga volume 1000 mL.

- *Sulfuric Acid Reagent*

Menambahkan Ag_2SO_4 ke dalam H_2SO_4 pekat dengan komposisi 5,5 gr $Ag_2SO_4 / Kg H_2SO_4$. Mendinginkan selama 1-2 hari hingga larut sempurna.

- Larutan Standar *Potassium Hydrogen Phthalate* (KHP)

Melarutkan 425 mg KHP ke dalam 500 mL aquadest. Larutan ini memiliki nilai COD sebesar 1000 mg O_2/L .

Analisis:

1. Menyiapkan *vial* dalam keadaan bersih. Cara membersihkan *vial* adalah membilas dan kocok dengan air kran 1 kali, aquadest 2 kali lalu dikeringkan.
2. Menambahkan 1,5 mL *digestion solution* (larutan dikromat) ke dalam *vial*.
3. Menambahkan 2,5 mL *sulphuric acid reagent* (larutan $Ag_2SO_4 + H_2SO_4$) ke dalam *vial*.
4. Menambahkan 1 mL sampel, tutup dengan rapat lalu dikocok hingga homogen. Setelah dikocok, pastikan tutup *vial* tetap dalam keadaan rapat.
5. Menghidupkan *digester*, kemudian atur suhunya hingga $148^\circ C$.
6. Masukkan *vial* ke dalam *digester*, lalu tekan tombol *run/enter*.
7. Setelah 2 jam, turunkan suhu *digester* dan tunggu hingga 15-20 menit. Lalu angkat *vial* dari *digester*, kemudian dikocok hingga homogen, lalu diamkan hingga suhunya turun seperti suhu ruang, dan seluruh suspensi dalam larutan telah mengendap.
8. Menghidupkan *spectroquant* dengan panjang gelombang 500 μm , lalu atur metode untuk mengukur COD dengan memasukkan angka 023. Baca pada *spektroquant* dengan panjang optimum yang telah didapatkan.
9. Masukkan hasil pembacaan absorbansi ke dalam persamaan regresi untuk

mendapatkan konsentrasi COD.

Lampiran A.3 Analisis pH

Peralatan dan Bahan:

Alat : pH meter, *beaker glass*, *magnetic stirrer*, erlenmeyer 100 mL, gelas ukur 50 mL

Bahan : Sampel dan aquadest

Prinsip Kerja:

Potensiometri merupakan cara analisis pH berdasarkan pengukuran pada beda potensial.

Prosedur Analisis:

1. Menyiapkan sampel sebanyak 10 mL.
2. Membilas batang silinder pH meter dengan larutan aquadest dan mengeringkannya menggunakan tisu.
3. Menyalakan pH meter lalu mencelupkan pH meter ke dalam sampel.
4. Menunggu angka pembacaan pH hingga stabil dan muncul tulisan *ready*, kemudian mencatat pH yang muncul pada layar pH meter.

Lampiran A.4 Analisis *Biochemical Oxygen Demand* (BOD)

Prinsip Kerja:

Metode ini digunakan untuk mengetahui tingkat biodegradabilitas pada lumpur alum dengan metode *winkler*.

Prosedur Kerja Pembuatan Reagent:

- Larutan *Buffer* Fosfat
Campur dan larutkan KH_2PO_4 0,85 g, K_2HPO_4 0,2175 G, $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,334 g dan NH_4Cl 0,17 g ke dalam 100 mL aquadest dengan menggunakan labu pengencer 100 mL.
- Larutan Pereaksi Oksigen
Campur dan larutkan 40 g NaOH, 15 g KI dan 2 g NaN_3 ke dalam 100 mL aquadest dengan menggunakan labu pengencer 100 mL.

Prosedur Analisis:

A. Pembuatan air pengencer

Air pengencer ini tergantung banyaknya sampel yang akan dianalisis dan pengencerannya, prosedurnya:

1. Menambahkan 1 mL larutan *Buffer* Fosfat per liter air.
2. Menambahkan 1 mL larutan Magnesium Sulfat per liter air.
3. Menambahkan 1 mL larutan Kalium Klorida per liter air.
4. Menambahkan 1 mL larutan Feri Klorida per liter air.
5. Menambahkan 10 mg bubuk inhibitor.
6. Melakukan aerasi minimal selama 2 jam.
7. Menambahkan 1 mL larutan benih per liter air

B. Prosedur BOD:

1. Menyiapkan 1 buah labu takar 500 mL dan tuangkan sampel sesuai dengan perhitungan pengenceran, tambahkan air pengencer sampai batas labu.
2. Menyiapkan 2 botol winkler 300 ml dan 2 buah botol winkler 150 mL.
3. Menuangkan air dalam labu takar tadi ke dalam botol winkler 300 ml dan 150 ml sampai tumpah.
4. Menuangkan air pengencer ke botol winkler 300 ml dan 150 ml sebagai blanko hingga tumpah.
5. Memasukkan kedua botol winkler 300 mL ke dalam inkubator 20°C selama 5 hari
6. Kedua botol winkler 150 mL yang berisi air dianalisis oksigen terlarutnya dengan prosedur sebagai berikut:
 - a. Menambahkan 1 mL larutan Mangan Sulfat.
 - b. Menambahkan 1 mL larutan Pereaksi Oksigen.
 - c. Menutup botol dengan hati-hati agar tidak ada gelembung udara lalu bolak-balikkan beberapa kali.
 - d. Membiarkan gumpalan mengendap selama 5-10 menit.
 - e. Menambahkan 1 mL Asam Sulfat pekat, tutup dan bolak-balikkan.
 - f. Menuangkan 100 ml larutan ke dalam erlenmeyer 250 mL.
 - g. Menambahkan 3-4 tetes indikator amilum dan titrasi dengan Natrium Tiosulfat. hingga warna biru hilang

7. Setelah 5 hari, analisis kedua larutan dalam botol winkler 300 mL dengan analisis oksigen terlarut
8. Hitung Oksigen terlarut dan BOD dengan rumus berikut:

$$OT (mgO_2/L) = \frac{a \times N \times 8000}{1000 mL}$$

$$BOD_{5^{20}} \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{[(X_0 - X_5) - (B_0 - B_5)] \times (1 - P)}{P}$$

$$P = \frac{mL \text{ sampel}}{\text{volume hasil pengenceran (500 mL)}}$$

Keterangan:

- X_0 = Oksigen terlarut sampel pada $t = 0$
- X_5 = Oksigen terlarut sampel pada $t = 5$
- B_0 = Oksigen terlarut blankol pada $t = 0$
- B_5 = Oksigen terlarut blankol pada $t = 5$
- P = Derajat pengenceran

Lampiran A.5 Analisis Kadar Al, Mn, Fe, Pb, Cr, Cu, dan Zn

Alat dan Bahan:

1. Lumpur kering
2. Aquadest

Prosedur Analisis:

1. Lumpur kering ditambahkan dengan aquadest 15 mL.
2. Diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 15 menit.
3. Pembacaan logam aluminium dan Al, Fe, Pb, Cr, Cu, dan Zn dengan alat *Inductively Coupled Plasma (ICP)*.

Lampiran A.6. Prosedur Analisis Total Kjeldahl Nitrogen (TKN)

Peralatan :

1. Neraca analitik
2. Labu kjeldahl
3. Pipet ukur 10 ml

4. Beaker Glass
5. Gelas ukur
6. Labu pengencer 100 mL
7. Spatula kaca

Bahan :

1. Larutan campuran CuSO_4
2. Aquades
3. Garam signet
4. Nessler

Pembuatan Reagen :

a. Campuran CuSO_4

Dibuat dengan mencampurkan 1,55 g CuSO_4 anhidrat, 96,9 g Na_2SO_4 anhidrat dan 1,55 g selen kemudian dihaluskan.

b. H_2SO_4 pekat

Digunakan langsung dari botolnya tanpa dituang ke beaker glass.

c. Nessler

Campur dan haluskan 50 gram serbuk HgI_2 dan 35 gram KI kemudian dilarutkan dengan 80 gram NaOH yang sudah dilarutkan dengan aquades hingga 500 mL. Biarkan mengendap dan diambil supernatannya.

d. Garam Signet

Larutkan 50 gram K.Na.Tartrat ke dalam 500 mL aquades, kemudian ditambahkan 5 mL larutan nessler sebagai pengawet.

Prosedur kerja analisis :

1. 1 mL sampel masukkan ke dalam labu kjehdahl
3. Tambahkan 10 ml reagen $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ pekat
4. Panaskan dengan alat Kjehdahl selama 4 jam hingga warna berubah hijau
5. Dinginkan hasil destilasi. Kemudian encerkan menjadi 100 mL, setelah itu ambil 1 mL dan masukkan ke dalam labu erlenmeyer 100 mL
6. Encerkan larutan menjadi 25 mL dengan menggunakan aquades
7. Tambahkan 0,6 mL garam signet dan 0,5 ml nessler
8. Diamkan selama 10 menit
9. Lakukan tahap sebelumnya pada aquades dan blanko

10. Baca dengan spektrofotometer dengan panjang gelombang sesuai dengan hasil kalibrasi yaitu 395 nm
11. Hitung total kjehdahl nitrogen dengan rumus dari kurva kalibrasi

Lampiran A.7 Analisis Nitrat (Metode Spektrofotometri)

Peralatan :

1. Neraca analitik
2. Pipet ukur 5 mL
3. Pipet ukur 10 mL
4. Labu Erlenmeyer 100 mL
5. Spektrofotometer

Bahan :

1. H₂SO₄ pekat
2. Brucin asetat 0,05 N

Pembuatan Reagen :

- a. Brucine Asetat 0,5%

Larutkan 0,5 gram serbuk brucine dengan 100 mL acetic acid glacial (CH₃COOH) di dalam labu pengencer 100 mL, kocok hingga larut sempurna.

- b. H₂SO₄ pekat

- c. Larutan Standar Nitrat (100 ppm atau 100 mg/L)

Timbang dengan teliti 721,8 mg KNO₃ kemudian larutkan ke dalam aquades sebanyak 1 L di dalam labu pengencer 1 L.

Kalibrasi :

Sebelum melakukan kalibrasi maka terlebih dahulu dilakukan penentuan panjang gelombang maksimum untuk analisis nitrat-nitrogen.

Prosedur kerja analisis :

1. Masukkan 1 mL sampel lumpur alum ke dalam labu pengencer 100 mL
2. Encerkan menjadi 100 mL dengan menggunakan aquades kemudian ambil 2 ml dan masukkan ke dalam labu erlenmeyer 100 ml
3. Tambahkan 2 ml brucin asetat
4. Tambahkan 4 ml H₂SO₄ pekat
5. Aduk dan didiamkan selama 10 menit

6. Baca dengan spektrofotometer dengan panjang gelombang sesuai dengan hasil kalibrasi panjang gelombang yaitu 400 nm
7. Blanko yang digunakan adalah larutan sampel (tanpa reagen)
8. Hitung nilai nitrat dengan rumus dari kurva kalibrasi

Lampiran A.8 Analisis Nitrit (Metode Spektrofotometri)

Peralatan :

1. Pipet ukur 10 mL
2. Labu erlenmeyer 100 mL
3. Labu pengencer 100 mL
4. Spektrofotometer

Bahan :

1. Sulfanic acid
2. Larutan NED

Pembuatan Reagen :

a. Sulfanic Acid

1 gram *sulfanic acid* ditambah 5 ml HCl pekat kemudian dilarutkan dalam aquades sampai 100 ml.

b. NED dihydrochloride

100 *NED dihydrochloride* kemudian larutkan dalam aquades sampai 100 ml

Kalibrasi :

Sebelum melakukan kalibrasi maka terlebih dahulu dilakukan penentuan panjang gelombang maksimum untuk analisis nitrit-nitrogen.

Prosedur kerja analisis :

1. 1 mL sampel diencerkan sampai 100 ml dengan aquades menggunakan labu pengencer 100 ml
2. diambil 25 ml larutan dengan gelas ukur dan dimasukkan ke erlenmeyer 250 mL
3. Tambahkan 0,5 mL sulfanic acid, kocok, lalu diamkan selama 2 menit
4. Tambahkan 0,5 mL larutan NED, diamkan selama 10 menit
5. Baca pada spektrofotometer dengan panjang gelombang sesuai dengan hasil kalibrasi yaitu 520 nm

6. Blanko yang digunakan adalah aquades dengan penambahan reagen seperti pada sampel
7. Hasil absorbansi spektrofotometer diplotkan pada persamaan hasil kalibrasi

LAMPIRAN B
HASIL ANALISIS

Lampiran B.1. Keseluruhan Nilai pH Selama *Bioleaching* dengan *P. fluorescens*

Perbandingan Komposisi Media (Lumpur Alum : Media Kings (% v/v))	Nilai pH pada Hari ke-					
	0	3	6	9	12	15
0 lumpur : 100 media	7,25	6,00	5,01	4,32	3,12	4,14
50 lumpur : 50 media	7,57	6,44	6,03	9,19	9,30	9,19
75 lumpur : 25 media	7,71	8,33	9,17	9,48	9,65	9,50
12,5 lumpur : 87,5 media	7,63	8,93	9,55	9,59	9,60	9,49
100 lumpur : 0 media	7,85	9,30	9,45	9,30	9,18	9,01

Lampiran B.2. Keseluruhan Konsentrasi Aluminium Terlarut Selama *Bioleaching* dengan *P. fluorescens*

Perbandingan Komposisi Media (Lumpur Alum : Media Kings (% v/v))	Konsentrasi Aluminium Terlarut (mg/L) pada Hari ke-					
	0	3	6	9	12	15
50 lumpur : 50 media	2,766	1,268	3,087	3,700	2,228	8,144
75 lumpur : 25 media	0,382	1,820	1,204	1,465	1,133	6,630
12,5 lumpur : 87,5 media	0,471	1,933	1,291	1,356	1,012	3,832
100 lumpur : 0 media	0,394	0,914	0,978	0,397	0,565	2,220

Lampiran B.3. Keseluruhan Nilai pH Selama *Bioleaching* dengan *A. ferrooxidans*

Perbandingan Komposisi Media (Lumpur Alum : Media 9K (% v/v))	Nilai pH pada Hari ke-					
	0	3	6	9	12	15
0 lumpur : 100 media	3,21	3,16	3,10	1,52	2,31	2,31
50 lumpur : 50 media	4,84	4,14	3,23	2,77	2,77	2,93
75 lumpur : 25 media	5,66	3,29	3,26	3,05	3,34	3,33
12,5 lumpur : 87,5 media	5,96	3,77	3,88	3,55	3,85	3,87
100 lumpur : 0 media	6,36	4,56	4,48	4,52	4,54	4,55

Lampiran B.4. Keseluruhan Konsentrasi Aluminium Terlarut Selama *Bioleaching* dengan *A. ferrooxidans*

Perbandingan Komposisi Media (Lumpur Alum : Media 9K (% v/v))	Konsentrasi Aluminium Terlarut (mg/L) pada Hari ke-					
	0	3	6	9	12	15
50 lumpur : 50 media	0,03	85,95	216,17	340,70	309,70	267,40
75 lumpur : 25 media	0,03	233,90	310,30	312,40	278,80	271,50
12,5 lumpur : 87,5 media	0,03	119,20	173,30	173,90	150,23	151,70
100 lumpur : 0 media	0,09	24,75	20,54	13,83	14,28	11,01

Lampiran B.5. Keseluruhan Konsentrasi Aluminium Terlarut pada Proses *Bioleaching* untuk Mengetahui Pengaruh Bakteri *Indigenus*

Perbandingan Komposisi Media (Lumpur Alum : Media 9K (% v/v))	Konsentrasi Aluminium Terlarut (mg/L) pada Hari ke-					
	0	3	6	9	12	15
<i>A. ferrooxidans</i> (lumpur steril 50/50)	0,03	85,95	216,17	340,70	309,70	267,40
<i>A. ferrooxidans</i> (lumpur tidak steril 50/50)	3,12	62,01	246,40	399,67	321,50	237,90
tanpa inokulasi (lumpur steril 50/50)	0,03	47,59	83,96	67,13	73,11	80,12
tanpa inokulasi (lumpur tidak steril 50//50)	6,91	98,50	113,50	188,50	238,80	205,30

Lampiran B.6. Keseluruhan Konsentrasi Nitrogen selama *Bioleaching*

Jenis Bakteri	Komposisi media (lumpur alum : media bakteri (% v/v))	NO ₃ (mg/L)		NO ₂ (mg/L)		N organik (mg/L)		N Total (mg/L)	
		H 0	H 15	H0	H15	H0	H15	0	15
<i>P. fluorescens</i>	100 : 0	15,10	10,54	4,85	3,56	4,57	3,26	24,52	17,36
	87,5 : 12,5	14,51	8,11	3,15	3,83	3,24	2,61	20,90	14,55
	75 : 25	13,50	6,43	2,60	2,36	2,90	2,18	19,00	10,97
	50 : 50	8,01	4,51	2,38	1,80	2,33	1,80	12,72	8,11
<i>A. ferrooxidans</i>	100 : 0	16,80	11,56	5,90	4,56	4,90	3,80	27,60	19,92
	87,5 : 12,5	14,51	9,04	4,60	3,44	3,46	3,05	22,57	15,53
	75 : 25	12,90	7,90	3,26	2,90	2,95	2,40	19,11	13,20
	50 : 50	9,45	4,85	2,94	2,29	2,51	1,95	14,90	9,09

Lampiran B.7. Keseluruhan Konsentrasi Fosfor selama *Bioleaching*

Jenis Bakteri	Komposisi Media (Lumpur Alum : Media Bakteri (% v/v))	Total P (mg/L) hari ke-	
		0	15
<i>P. fluorescens</i>	50 : 50	3,18	2,76
	75 : 25	3,90	3,10
	87,5 : 12,5	4,66	4,46
	100 : 0	6,50	5,60
<i>A. ferrooxidans</i>	50 : 50	4,26	4,06
	75 : 25	5,21	4,88
	87,5 : 12,5	6,10	5,90
	100 : 0	8,60	8,10

Lampiran B.8. Keseluruhan Konsentrasi COD selama *Bioleaching*

Jenis Bakteri	Komposisi media (lumpur alum : media bakteri (% v/v))	COD (mg/L) hari ke-	
		0	15
<i>P. fluorescens</i>	50 : 50	1500	820
	75 : 25	2250	1170
	87,5 : 12,5	2500	1530
	100 : 0	7500	2730
<i>A. ferrooxidans</i>	50 : 50	1747	1200
	75 : 25	2486	1400
	87,5 : 12,5	3468	2600
	100 : 0	3736	3600

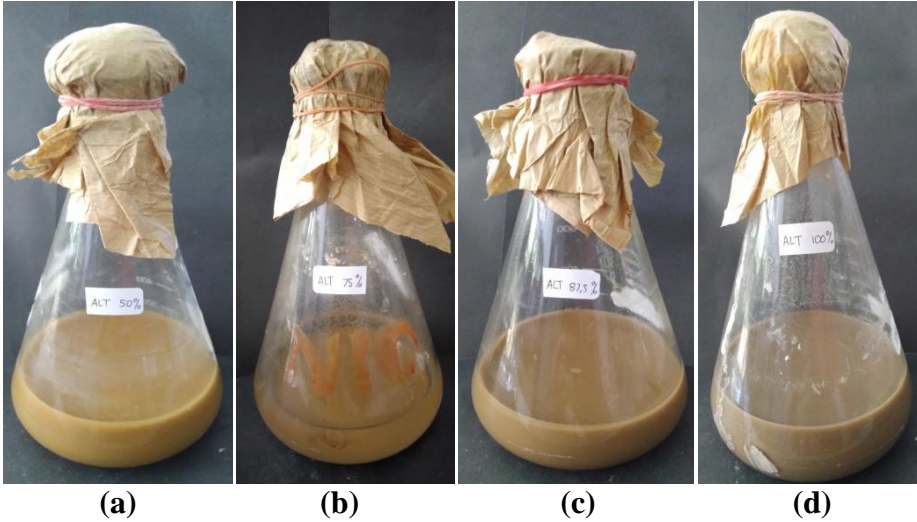
Lampiran B.9. Konsentrasi Fe, Mn, Cu, Zn dan Pb terlarut oleh *P. fluorescens* dan *A. ferrooxidans* pada Proses *Bioleaching* dari Lumpur Alum.

Jenis Bakteri	Jenis Logam	Komposisi Lumur Alum : Media Bakteri	Konsentrasi Awal Logam dalam Lumpur Alum (mg/L)	Konsentrasi Logam Terlarut (mg/L)	Persentase Kelarutan Logam (%)
<i>A. ferrooxidans</i>	Fe	50/50	513.00	281.80	54.93
		75/25	769.50	677.90	88.10
		87,5/12,5	897.94	776.32	86.46
		100/0	1026.00	887.50	86.50
	Mn	50/50	140.54	19.45	13.84
		75/25	210.80	19.76	9.37
		87,5/12,5	245.99	17.65	7.18
		100/0	281.07	15.48	5.51
	Zn	50/50	54.00	0.11	0.20
		75/25	81.00	0.58	0.72
		87,5/12,5	94.52	0.49	0.52
		100/0	108.00	0.57	0.53
	Pb	50/50	5.81	0.02	0.26
		75/25	8.71	0.04	0.45
		87,5/12,5	10.16	0.05	0.53
		100/0	11.61	0.10	0.86
	Cu	50/50	1.45	0.01	0.76
		75/25	2.18	0.05	2.43
		87,5/12,5	2.54	0.11	4.17
		100/0	2.90	0.15	5.31
<i>P. fluorescens</i>	Fe	50/50	513.00	3.62	0.71
		75/25	769.50	1.36	0.18

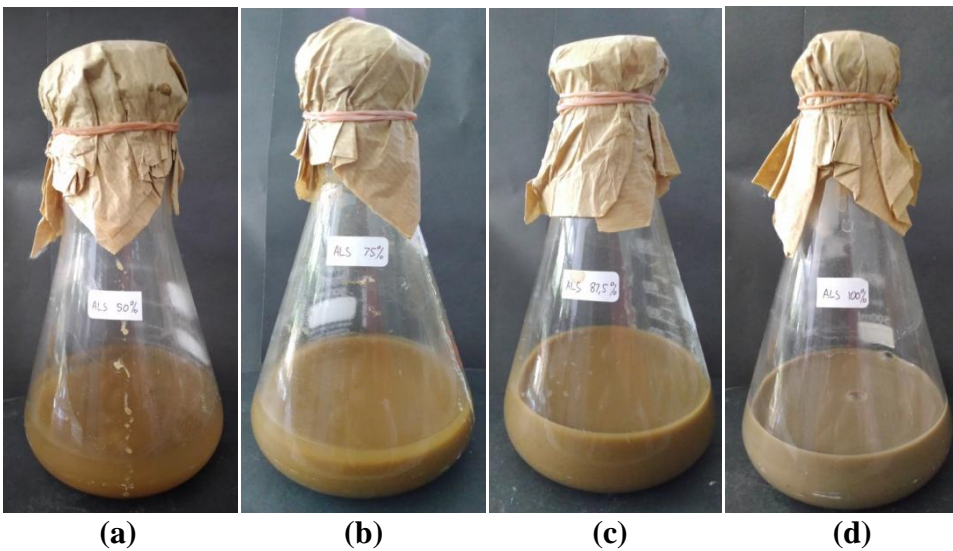
Jenis Bakteri	Jenis Logam	Komposisi Lumur Alum : Media Bakteri	Konsentrasi Awal Logam dalam Lumpur Alum (mg/L)	Konsentrasi Logam Terlarut (mg/L)	Persentase Kelarutan Logam (%)
		87,5/12,5	897.94	1.36	0.15
		100/0	1026.00	0.34	0.03
	Mn	50/50	140.54	0.84	0.60
		75/25	210.80	1.16	0.55
		87,5/12,5	245.99	1.16	0.47
		100/0	281.07	0.84	0.30
	Zn	50/50	54.00	0.22	0.41
		75/25	81.00	0.06	0.08
		87,5/12,5	94.52	0.06	0.07
		100/0	108.00	0.02	0.02
	Pb	50/50	5.81	0.22	3.86
		75/25	8.71	0.00	0.05
		87,5/12,5	10.16	0.00	0.04
		100/0	11.61	0.00	0.03
	Cu	50/50	1.45	0.02	1.59
		75/25	2.18	0.03	1.47
		87,5/12,5	2.54	0.03	1.26
		100/0	2.90	0.01	0.30

LAMPIRAN C
DOKUMENTASI

Lampiran C.1. Reaktor *Bioleaching* menggunakan Bakteri *A. ferrooxidans*

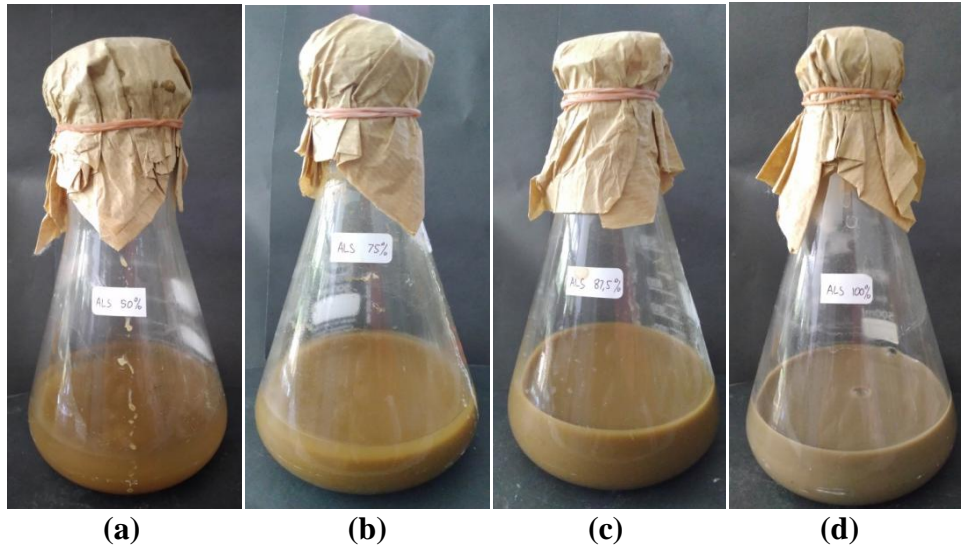


Gambar C1.1 Reaktor *Bioleaching* menggunakan *A. ferrooxidans* pada perbandingan komposisi media (Medium 9K : lumpur alum tidak steril (% v/v)) (a) 50:50; (b) 27:75; (c) 12,5:87,5; (d) 0:100



Gambar C1.2 Reaktor *Bioleaching* menggunakan *A. ferrooxidans* pada perbandingan komposisi media (Medium 9K : lumpur alum steril (% v/v)) (a) 50:50 ;(b) 27:75 ;(c) 12,5 : 87,5; (d) 0:100

Lampiran C.2. Reaktor *bioleaching* menggunakan bakteri *P. fluorescens*



Reaktor *Bioleaching* menggunakan *P. fluorescens* pada perbandingan komposisi media (Medium Kings : lumpur alum steril (% v/v)) (a) 50:50 ;(b) 27:75 ;(c) 12,5 : 87,5; (d) 0:100

LAMPIRAN D

UJI STATISTIK

D1. Uji Statistik Anova *Two Way* mengenai Pengaruh Jenis Bakteri dan Komposisi Media terhadap Tingkat Kelarutan Aluminium pada Proses *Bioleaching*

General Linear Model: Efisiensi Bioleaching versus Komposisi Media, Jenis Bakteri

Factor	Type	Levels	Values
Komposisi Media	fixed	4	1, 2, 3, 4
Jenis Bakteri	fixed	2	1, 2

Analysis of Variance for Efisiensi Bioleaching, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Komposisi Media	3	1785.93	1785.93	595.31	148.56	0.000
Jenis Bakteri	1	2713.41	2713.41	2713.41	677.12	0.000
Komposisi Media*Jenis Bakteri	3	1592.46	1592.46	530.82	132.46	0.000
Error	16	64.12	64.12	4.01		
Total	23	6155.92				

S = 2.00183 R-Sq = 98.96% R-Sq(adj) = 98.50%

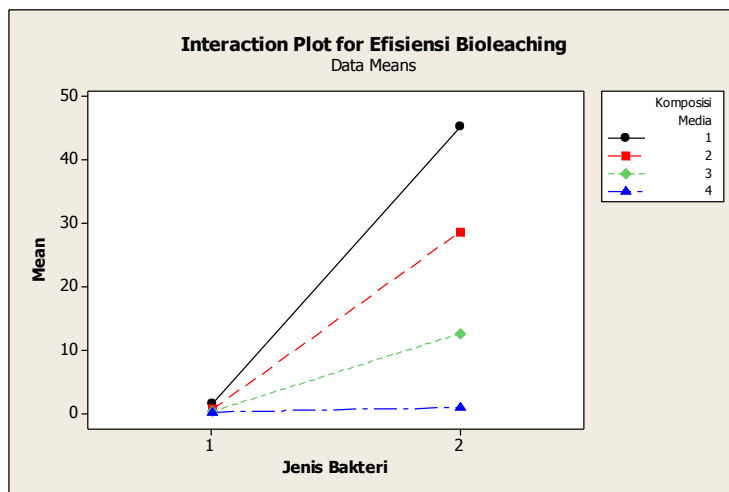
Keterangan Faktor:

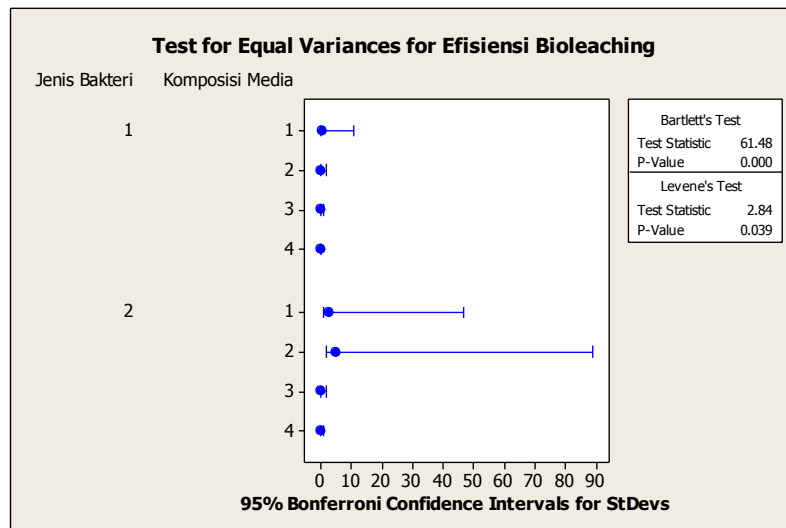
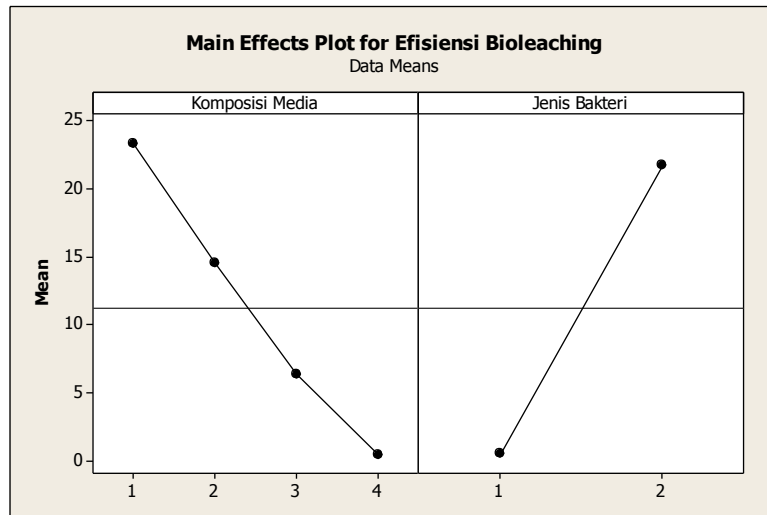
A. Komposisi Media

- 1 = 50 lumpur alum : 50 media tumbuh bakteri (v/v)
- 2 = 75 lumpur alum : 25 media tumbuh bakteri (v/v)
- 3 = 87,5 lumpur alum : 12,5 media tumbuh bakteri (v/v)
- 4 = 100 lumpur alum : 0 media tumbuh bakteri (v/v)

B. Jenis Bakteri

- 1 = *P. fluorescens*
- 2 = *A. ferrooxidans*



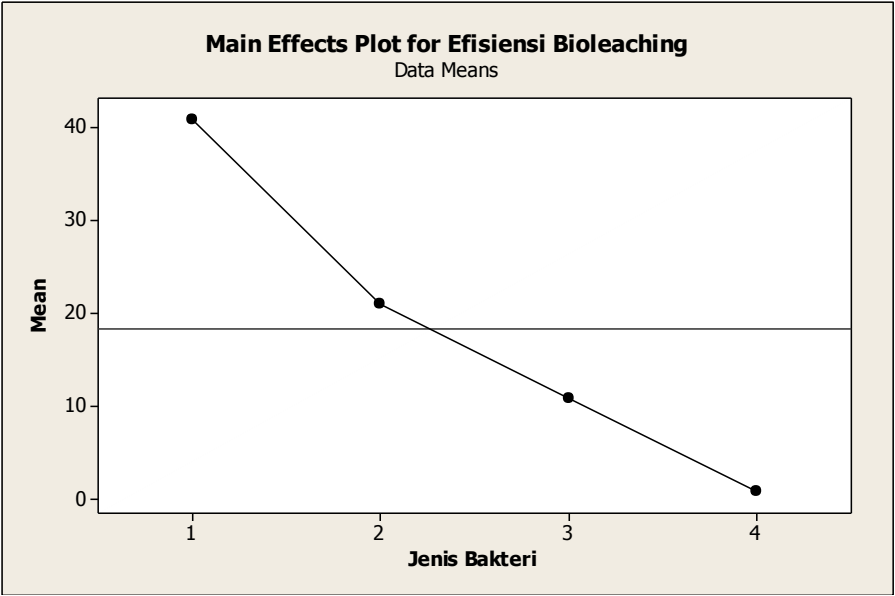


D2. Uji Statistik Anova *One Way* mengenai Pengaruh Jenis Bakteri dan Komposisi Media terhadap Tingkat Kelarutan Aluminium pada Proses *Bioleaching*

One-way ANOVA: Efisiensi Bioleaching versus Jenis Bakteri

Source	DF	SS	MS	F	P
Jenis Bakteri	3	2605.95	868.65	319.07	0.000
Error	8	21.78	2.72		
Total	11	2627.73			

S = 1.650 R-Sq = 99.17% R-Sq(adj) = 98.86%



BIOGRAFI PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Triadna Febriani Aabidah. Penulis lahir di Surabaya, pada tanggal 21 Februari 1995. Penulis mengenyam pendidikan dasar pada tahun 2001-2007 di SD Kemala Bhayangkari 1 Surabaya. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan SLTP di SMPN 21 Surabaya pada tahun 2007-2010. Pendidikan SLTA dijalani oleh penulis pada tahun 2010-2013 di SMAN 1 Surabaya. Penulis kemudian melanjutkan studi di Jurusan Ilmu dan Teknik Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga dan lulus pada tanggal 31 Agustus 2017. Penulis terdaftar sebagai mahasiswa magister di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan, ITS dengan NRP 03211750012006 terhitung mulai tanggal 23 Januari 2018. Penulis sangat menghargai adanya saran dan masukan yang membangun. Penulis dapat dihubungi melalui email dengan alamat triadnafebruari@gmail.com.