



JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

Studi Komparatif Metode *Active* dan *Passive Treatment* Terhadap Kualitas Air Dalam Pengelolaan Air Asam Tambang, PT Indexim Coalindo

Shafira Jasmine Virginisa

20513005

Dosen Pembimbing:

Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D.

Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana

Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan

Universitas Islam Indonesia

2026



DEPARTMENT
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

Comparative Study of Active and Passive Treatment Methods on Water Quality in Acid Mine Drainage Management, PT Indexim Coalindo

Shafira Jasmine Virginisa

20513005

Supervisor:

Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D.

Environmental Engineering Bachelor Program

Faculty of Civil Engineering and Planning

Universitas Islam Indonesia

2026

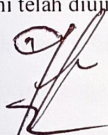
LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR

**Studi Komparatif Metode *Active* dan *Passive Treatment* Terhadap Kualitas
Air Dalam Pengelolaan Air Asam Tambang,
PT Indexim Coalindo**

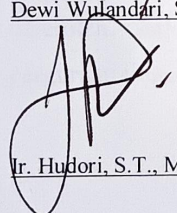
Tugas akhir ini disusun dan diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

Shafira Jasmine Virginisa
20513005

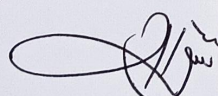
Tugas akhir ini telah diuji pada tanggal Kamis, 5 Februari 2026 dan disetujui oleh:


Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D.

(Pembimbing)


Ir. Hudori, S.T., M.T., Ph.D.

(Penguji 1)


Supriyanto, S.T., M.Sc. M.Eng., Ph.D

(Penguji 2)

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana




Arya Widhi, S.T., M.Sc.(Res.Eng.), Ph.D.

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apapun, baik di Universitas Islam Indonesia maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini adalah merupakan gagasan, rumusan dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain kecuali arahan Dosen Pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama penulis dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Program *software* komputer yang digunakan dalam penelitian ini sepenuhnya menjadi tanggungjawab saya, bukan tanggungjawab Universitas Islam Indonesia.
5. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta,

Yang membuat pernyataan,



Shafira Jasmine Virginisa

NIM: 20513005

MOTTO

(QS. An-Nur: 35)

“Allah pemberi cahaya kepada langit dan bumi, yang minyaknya menerangi walaupun tidak disentuh api. Allah membimbing kepada cahaya-Nya yang Ia kehendaki dan Allah Maha Mengetahui segala sesuatu.”

(Ibu)

“Lakukan yang mana itu baik, tanggung jawab bukti dirimu laik.”

(Penulis)

“Mereka yang bersyukur dalam proses tanpa membiarkan luka singgah itulah sebaik-baiknya upaya.”

(NCT Dream - Graduation)

*“May us stand firm through the blizzard of change.
let the passage of time, letting the present shine.
Toward the world that awaits, the journey that longed to begin.
My Graduation 그 첫걸음
많이 행복하게 될 거야”*

(NCT U - Beautiful)

*“This time you can face the rain, next time you can beat the pain.
No more tears will come again, smiling, laughing to the end”*

HALAMAN PERSEMBAHAN

الرَّحِيمِ الرَّحْمَنِ اللَّهُ بِسْمِ

Yang utama dari segalanya.

Kepada Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa. Segala puji dan sujud syukur tertuju hanya kepada-Mu. Atas setiap napas yang masih berhembus, setiap getir yang Kau ubah menjadi kekuatan, setiap langkah yang Kau arahkan, dan setiap luka yang justru menjadi jalan menuju pemahaman. Engkaulah cahaya di sela gelap, teduh di tengah badai, dan rumah bagi segala resah yang tak sempat terucap.

**Kupersembahkan karya sederhana ini kepada semesta dan semua jiwa yang
Kau titipkan di hidupku,**

terima kasih telah menjadi pelita dalam gelapku, bahu saat lelah menapak, tawa yang menyembuhkan sunyi, dan suara yang menuntunku pulang ketika arah terasa asing.

Untuk sahabat yang hadir sebagai warna, yang mengisi hari dengan tawa, dan makna dalam nada, dan untuk setiap insan yang singgah—kalian semua telah menjadi harmoni dalam simfoni perjalanan ini. Kalian adalah halaman yang tak akan pernah kulipat. Setiap kasih, doa, dan langkah kecil kalian telah menjahit makna pada kisahku. Jika hidup adalah lagu, maka kalianlah melodi yang menjadikannya utuh.

Dan akhirnya, untuk diriku sendiri—

—yang terus berjalan meski gemetar, yang bertahan di antara ragu dan harap, yang menyalakan lilin kecil di tengah badai, yang belajar mencintai proses, Terima kasih telah bertahan, telah menangis, tertawa, dan tetap berani bermimpi.

Terima kasih juga telah percaya bahwa setiap luka pun bisa menjadi indah. Semoga segala perjuangan ini kembali pada-Nya sebagai bentuk kecil dari cinta dan rasa syukur yang tak ada habisnya.

PRAKATA

Assalam'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh
Bismillahirrahmanirrahim

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah *subhanahu wa ta'ala* atas segala karunia-Nya bagi hamba-Nya, dan juga shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW. yang telah menerangi bumi sejak kedatangannya sehingga penulis mengucapkan *Alhamdulillahirrabil'alamin* atas penyelesaian tugas akhir dengan judul “Studi Komparatif Metode *Active* dan *Passive Treatment* Terhadap Kualitas Air Dalam Pengelolaan Air Asam Tambang, PT Indexim Coalindo”.

Dalam penyusunan dan penulisan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu dengan haru penghargaan penulis sampaikan kepada:

1. Bapak Prof. Ar. Dr.-Ing. Ir. Ilya Fadjar Maharika, M.A., IAI selaku Dekan Fakultas TSP UII.
2. Ibu Any Juliani, S.T., M.Sc., (Res.Eng.), Ph.D selaku Ketua Program Studi Teknik Lingkungan.
3. Ibu Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D selaku pembimbing Tugas Akhir dan Kerja Praktik yang telah berkenan meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam membimbing dan memberikan arahan, mengembangkan pengetahuan dalam penulisan, sehingga topik ini terbit di tengah kurangnya sinyal pedalaman Kalimantan.
4. Bapak Yasmu Kurniady selaku Senior Manajer QHSE PT Indexim Coalindo yang telah banyak memberi saran, dan juga Bapak Aris selaku Superintendent Environmental dan mentor lapangan.
5. Bapak Arif, Bapak Faisal, Bapak Theo, Bapak El, Mas Wisnu, Bu Ami, Bu Vita, Mba Dian dari Tim Enviro Indexim terutama Mas Irwan, Mas Jaslin dan Mas Eryan yang telah membimbing selama pengumpulan data dan memberikan pengalaman, juga pengajaran.
6. Rekan lapangan dan office Km 33 seperjuangan, Christin dari Institut Teknologi Nasional Yogyakarta, atas perkenalan singkat berujung karib, juga suka-duka *research* yang kita lalui.
7. Mas Ridwan selaku Analis Laboratorium Teknik Lingkungan FTSP UII atas segala saran dan motivasi yang telah diberikan.
8. Adek, bapak, bude, yangti, yangkong, serta seluruh sepupu, atas segala dukungan dan kasih sayangnya (dan traktirannya), dan juga seluruh kata syukur di dunia karena memiliki ibu terhebat, terkeren, terawet muda sealam semesta yang telah berkecimpung di dunia pengelolaan lingkungan dan cintanya kepada anggrek (kepada penulis juga), memberikan segala

pengetahuan, bimbingan, doa, dan juga kesabaran (serta omelan) dalam menunjukkan biodiversitas dalam kehidupan, sehingga penulis menemukan warna—dan warni.

9. Tak lupa, kepada warna dalam hidup penulis yakni teman-teman Marching Band UII dan Keluarga Besar Marching Band Yogyakarta atas segala corak dan melodi, harmoni dan simfoni (yang kalau diceritakan di sini skripsi ini bisa terasa seperti lembaran partitur mengesankan tapi mengenaskan). Jujur saja, tanpa kalian, hidup penulis mungkin hanya berisi ketukan *metronome* yang monoton dengan *tone* sumbang dan nada dasar yang tidak pernah naik kelas. *Well*, semua itu mengajarkan arti disiplin, kekompakan, dan ketawakan diri ketika gerakan salah tapi pura-pura benar.
10. Begitu pula kepada warna yang turut hadir dari sohib-sohib bibit MBS Yogyakarta dan angkatan 7 atas segala hitam yang kita maknai dan putih yang kita tekuni, sejak tahun 2014 hingga wisuda *online* (yang tidak pernah kita bayangkan sebelumnya, tapi ya sudah terlanjur terjadi)—semua itu ternyata membentuk solidaritas ulil albab yang diluar prediksi BMKG, tentu saja (*penulis juga terkejut). Berkat itu, kita mempelajari seni penting mengelola konflik sosial politik domestik skala kamar tidur tanpa perlu sidang PBB (ya, seperti tragedi pura-pura kesurupan). Solidaritas ini terbentuk bukan karena kita sempurna, tapi karena kita tetap ada—meski jadwal, emosi, dan cucian kadang tidak berpihak pada kita.

Dengan semua makna yang telah dipelajari dan usaha hingga sampai di titik ini. Terima kasih atas semua dukungan yang telah diberi, kedepannya penulis akan menjadi pribadi yang lebih baik lagi, dan terus menunjukkan sisi baru dalam diri. Penulis sadar akan kekurangan dalam skripsi ini baik materi maupun teknik penulisan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun dalam perbaikan dan penyempurnaannya. Skripsi ini ditulis untuk memberikan manfaat bagi penelitian berikutnya sebagai sumber acuan terkhusus dalam lingkup pertambangan.

Yogyakarta, 27 November 2025

Shafira Jasmine Virginisa

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Studi Komparatif Metode Active dan Passive Treatment Terhadap Kualitas Air Dalam Pengelolaan Air Asam Tambang, PT Indexim Coalindo

Mahasiswa : Shafira Jasmine Virginisa
NIM : 20513005
Program Studi : Teknik Lingkungan
Pembimbing : Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D

ABSTRAK

Air asam tambang (AAT) merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang umum terjadi pada kegiatan pertambangan batubara akibat oksidasi mineral sulfida yang menghasilkan air bersifat asam dan kaya logam terlarut. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan efektivitas metode *active treatment* menggunakan CaCO_3 dan *passive treatment* menggunakan *open limestone channel* (OLC) dalam meningkatkan kualitas air tambang berdasarkan parameter pH, TSS, Fe dan Mn, serta variabel pendukung meliputi Ca, Mg, Na, K, sulfat, dan Al. Pengambilan sampel dilakukan pada dua *settling pond* berbeda, yaitu di *Settling Pond* Kasturi 5 (*active treatment*) dan *Settling Pond* Rambai (*passive treatment*), masing-masing pada dua kali waktu sampling dengan titik pengamatan dari inlet hingga outlet. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada sistem *active treatment*, pH meningkat signifikan menjadi 6,58 di outlet, sementara pada *passive treatment* pH meningkat menjadi 7,49. Nilai TSS pada *active treatment* menurun menjadi 4–17 mg/L, sedangkan pada *passive treatment* menurun menjadi 10–27 mg/L. Konsentrasi Fe berkurang menjadi 2,4–3,4 mg/L pada *active treatment* dan 0,39–0,49 mg/L pada *passive treatment*, sedangkan Mn berkurang menjadi 0,6–0,8 mg/L pada *active treatment* dan 0,1–0,2 mg/L pada *passive treatment*. Berdasarkan hasil tersebut, kedua metode sama-sama berperan penting dalam pengendalian air asam tambang, namun pendekatan kombinatif antara *active* dan *passive treatment* direkomendasikan untuk mencapai efektivitas optimal serta keberlanjutan pengelolaan lingkungan tambang.

Kata kunci: Air asam tambang, *active treatment*, *passive treatment*.

Comparative Study of Active and Passive Treatment Methods on Water Quality in Acid Mine Drainage Management, PT Indexim Coalindo

Student : Shafira Jasmine Virginisa
Student Number : 20513005
Study Program : Teknik Lingkungan
Supervisor : Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D

ABSTRACT

Acid mine drainage (AMD) is one of the major environmental issues associated with coal mining activities, resulting from the oxidation of sulfide minerals that produce acidic water enriched with dissolved metals. This study aims to compare the effectiveness of *active treatment* using CaCO_3 and *passive treatment* using an *open limestone channel* (OLC) in improving mine water quality based on key parameters such as pH, TSS, Fe, and Mn, as well as supporting variables including Ca, Mg, Na, K, sulfate, and Al. Water sampling was conducted at two acid mine drainage treatment ponds, namely *Settling Pond Kasturi 5* (active treatment) and *Settling Pond Rambai* (passive treatment), each with two sampling periods and multiple observation points from the inlet to the outlet. The results show that in the *active treatment* system, pH significantly increased to 6.58 at the outlet, while in the *passive treatment* system, pH increased to 7.49. TSS levels in the *active treatment* decreased to 4–17 mg/L, while in the *passive treatment* they decreased to 10–27 mg/L. Fe concentrations declined to 2.4–3.4 mg/L in the *active treatment* and 0.39–0.49 mg/L in the *passive treatment*, while Mn decreased to 0.6–0.8 mg/L in the *active treatment* and 0.1–0.2 mg/L in the *passive treatment*. These findings highlight that both treatment methods play an essential role in controlling acid mine drainage, yet a combined approach integrating *active* and *passive treatment* methods is recommended to achieve optimal efficiency and sustainable environmental management in mining operations.

Keywords: *Acid mine drainage, active treatment, passive treatment.*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR LAMPIRAN	v
DAFTAR NOTASI	vi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Ruang Lingkup	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Konsep Dasar AAT	5
2.2 Parameter Fisika dan Kimia	5
2.2.1 pH (Derajat Keasaman)	6
2.2.2 TSS (<i>Total Suspended Solid</i>)	6
2.3 Karakteristik dan Sumber Ion dalam AAT	6
2.3.1 Anion utama (Sulfat, SO_4^{2-}).....	6
2.3.2 Logam berat dan metaloid (Al^{3+} , $\text{Fe}^{2+/3+}$, Mn^{2+})	7
2.3.3 Kation utama (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+)	8
2.4 Metode Pengelolaan AAT	9
2.4.1 Metode <i>Active Treatment</i>	10
2.4.2 Metode <i>Passive Treatment</i>	10
2.5 Dampak AAT terhadap Lingkungan	10
2.6 Standar Kualitas Air dan Regulasi di Indonesia	11
2.7 Penelitian Terdahulu.....	12
BAB III METODE PENELITIAN	14
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian	14
3.2 Alat dan Bahan.....	22
3.3 Prosedur Analisis Data	23
3.3.1 Jenis dan Variabel Penelitian	23
3.3.2 Survei.....	23
3.3.3 Sampling	23
3.3.4 Pengumpulan Data.....	24
3.3.5 Preparasi Sampel	25
3.3.6 Pengujian Sampel	25
3.3.7 Analisis Data	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Perhitungan Debit Air Limbah dan Air Limpasan	27

4.2	Volume <i>Settling Pond</i> (SP).....	31
4.2.1	Kriteria Desain <i>Settling Pond</i> (SP).....	31
4.2.2	Beban Pencemar	32
4.2.3	Efisiensi Removal.....	34
4.2.4	Jumlah Penggunaan Bahan Kima	36
4.3	Analisis Variabel Utama dalam Sampel	37
4.4	Analisis Variabel Pendukung dalam Sampel	40
4.4.1	Hasil Uji Ca Total.....	40
4.4.2	Hasil Konsentrasi Mg Total	41
4.4.3	Hasil Konsentrasi Na Total	42
4.4.4	Hasil Konsentrasi K Total.....	43
4.4.5	Kadar Sulfat dalam Sampel.....	44
4.4.6	Kadar Al Total dalam Sampel.....	45
4.5	Performa Kualitas AAT	46
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		48
5.1	Kesimpulan	48
5.2	Saran	48
DAFTAR PUSTAKA.....		49
LAMPIRAN		51

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Baku Mutu Air Limbah Kegiatan Pertambangan Batubara	12
Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu	12
Tabel 3.1 Baku Mutu Air Limbah Kegiatan Pertambangan Batubara	14
Tabel 3.2 Daftar Settling Pond Sebagai Studi Komparatif.....	17
Tabel 3.3 Data Pengamatan Sampling SP Rambai	20
Tabel 3.4 Data Pengamatan Sampling SP Kasturi 5	20
Tabel 3.5 Lokasi Titik Sampling.....	22
Tabel 3.6 Standar Acuan dan Metode Pengujian.....	24
Tabel 4.1 Luas Wilayah Tangkapan Hujan	27
Tabel 4.2 Data Curah Hujan Maksimum 10 Tahun	27
Tabel 4.3 Standar Deviasi.....	28
Tabel 4.4 Nilai Koreksi Variasi Rata-rata (Y_n).....	28
Tabel 4.5 Koreksi Variasi (Y_t) Periode Ulang Hujan	29
Tabel 4.6 Curah Hujan Rencana (CHR) Metode Gumbel.....	29
Tabel 4.7 Perhitungan Curah Hujan Rencana dan Intensitas Hujan	30
Tabel 4.8 Debit Pemompaan.....	30
Tabel 4.9 Jumlah Air Limbah yang Masuk Settling Pond	30
Tabel 4.10 Volume <i>Settling Pond</i> (SP)	31
Tabel 4.11 Fluktuasi Air Limbah Tambang	32
Tabel 4.12 Beban Pencemar SP Kasturi 5	33
Tabel 4.13 Beban Pencemar SP Rambai	33
Tabel 4.14 Kriteria Desain Setiap Unit Proses SP Kasturi 5	33
Tabel 4.15 Kriteria Desain Setiap Unit Proses SP Rambai	34
Tabel 4.16 Jumlah Konsumsi Bahan Kimia	36

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Peta Lokasi Kegiatan Pertambangan PT Indexim Coalindo	14
Gambar 3.2 Diagram Alir Proses Kegiatan Pertambangan	17
Gambar 3.3 Layout <i>Settling Pond</i> Kasturi 5.....	18
Gambar 3.4 Layout <i>Settling Pond</i> Rambai	19
Gambar 3.5 Titik Sampling SP Kasturi 5	21
Gambar 3.6 Titik Sampling SP Rambai	21
Gambar 4.1 Neraca Air SP Kasturi 5	31
Gambar 4.2 Neraca Air SP Rambai	32
Gambar 4.3 Kriteria Desain dan Efisiensi Reduksi SP Kasturi 5	35
Gambar 4.4 Kriteria Desain dan Efisiensi Reduksi SP Rambai	36
Gambar 4.5 Visualisasi <i>Passive Tretament (Open Limestone Channel)</i>	37
Gambar 4.6 Distribusi pH Seluruh Titik Sampling.....	38
Gambar 4.7 Distribusi TSS Seluruh Titik Sampling.....	38
Gambar 4.8 Distribusi Fe Seluruh Titik Sampling.....	39
Gambar 4.9 Distribusi Mn Seluruh Titik Sampling	40
Gambar 4.10 Hasil Uji Ca Total	41
Gambar 4.11 Hasil Uji Mg Total	42
Gambar 4.12 Hasil Uji Na Total	43
Gambar 4.13 Hasil Uji K Total.....	44
Gambar 4.14 Hasil Uji Sulfat.....	45
Gambar 4.15 Hasil Uji Al Total.....	46

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 : Hasil Uji AAT *In-situ*
- Lampiran 2 : Pengujian Sampel di Laboratorium JTL UII
- Lampiran 3 : Hasil Pengukuran Serapan Sampel di Laboratorium JTL UII
- Lampiran 4 : Peta Keseluruhan *Settling Pond*
- Lampiran 5 : Dokumentasi Sampling

DAFTAR NOTASI

AAT	= Air Asam Tambang
SP	= <i>Settling Pond</i>
pH	= <i>Power of Hydrogen</i>
TSS	= <i>Total Suspended Solid</i>
Fe	= Besi
Mn	= Mangan
Ca	= Kalsium
Mg	= Magnesium
K	= Kalium
Na	= Natrium
Al	= Aluminium
ROM	= <i>Run of Mine</i>
mg	= Miligram
L	= Liter
m ³	= <i>meter cubic</i>
µg	= mikrogram

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertambangan batubara memainkan peran penting dalam pasokan energi global, terutama sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik. Menurut tinjauan statistik pada tahun 2021, batubara menyumbang sekitar 27% dari total konsumsi energi global dan merupakan sumber energi utama, terutama di negara-negara berkembang. Akan tetapi, meskipun pertambangan batubara memberikan manfaat ekonomi, penambangan tersebut juga memiliki dampak yang signifikan terhadap lingkungan. Indonesia merupakan salah satu produsen batubara terbesar di dunia, dan masalah lingkungan yang disebabkan oleh penambangan batubara sangat mengkhawatirkan. Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2020), sejumlah besar lokasi pertambangan batubara di Indonesia berpotensi menghasilkan air asam tambang, yang mana jika tidak dikelola dengan tepat dapat mencemari badan air dan merusak ekosistem akuatik.

Air asam tambang (AAT) terbentuk karena adanya reaksi mineral sulfida, seperti pirit (FeS_2) dengan oksigen dan air, sehingga menghasilkan asam sulfat (H_2SO_4) dan melepaskan beberapa logam berat dari reaksi tersebut (Akcil & Koldas, 2006). AAT merupakan air dengan nilai pH yang rendah dan kelarutan logam yang cenderung meningkat yang terbentuk karena adanya reaksi oksidasi yang melepaskan ion H^+ ke dalam air sehingga menurunkan nilai pH air. Dalam operasi penambangan terbuka, sangat sulit menghindari pembentukan AAT jika batuan PAF (*Potential Acid Forming*) tersingkap. Karakteristik AAT yang asam dengan kelarutan logam yang tinggi berpotensi memberikan dampak negatif terhadap lingkungan.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk menurunkan tingkat keasaman dan logam terlarut pada AAT, di antaranya *active treatment* dan *passive treatment*. *Active treatment* menggunakan bahan kimia bersifat alkalin untuk menetralkan AAT dan membutuhkan pengelolaan yang intensif dan pengawasan berkelanjutan. Sebagai alternatif, AAT juga dapat ditangani melalui metode *passive treatment* yang tidak memerlukan pengoperasian dan perawatan secara reguler. Sistem ini dirancang untuk mengoptimalkan proses alami penghilangan kontaminan di dalam instalasi pengolahan, sehingga mengurangi dampak pencemaran pada ekosistem badan air penerima (Gautama, 2019).

PT Indexim Coalindo merupakan perusahaan pertambangan batubara yang memiliki luas konsesi sebesar 24.050 ha dan berlokasi di Kabupaten Kutai Timur. Hasil model geokimia menunjukkan bahwa site ini memiliki potensi pembentukan AAT yang cukup besar. Rasio material pembentuk asam (*Potentially Acid*

Forming/PAF) dan tidak berpotensi membentuk asam (*Non Acid Forming*/NAF) yakni sebesar 81:19. Oleh karena itu, PT Indexim Coalindo terus berupaya menjaga kualitas lingkungan dengan melakukan pengembangan terhadap sistem pengelolaan AAT untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Upaya tersebut juga sebagai bentuk tanggungjawab perusahaan untuk memenuhi baku mutu lingkungan yang tertuang dalam Perda Kaltim Nomor 2 Tahun 2011. Melalui studi perbandingan pengelolaan AAT ini diharapkan menjadi acuan untuk penerapan metode yang paling efisien, berkelanjutan, dan sesuai diterapkan di area tambang batubara Indonesia.

Studi maupun monitoring kualitas AAT terutama di Indonesia masih didominasi oleh fokus parameter terbatas pada pH dan logam berat utama (Fe dan Mn), sedangkan keterkaitan antara kandungan ionik juga berperan penting untuk mengetahui keberhasilan metode pengelolaan AAT. Perbedaan karakteristik kedua metode tersebut mendorong perlunya dilakukan studi komparatif untuk menilai efektivitasnya dalam memperbaiki kualitas air (Skousen et al., 2019; Akcil & Koldas, 2006). Dengan demikian, penelitian ini mengkaji hubungan antara kandungan ion-alkali dan efektivitas dua metode pengelolaan utama (*active* dan *passive treatment*) pada AAT di lingkungan tropis.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Parameter kualitas air apa saja yang lebih signifikan membaik pada masing-masing metode?
2. Bagaimana efektivitas metode *active treatment* dibandingkan dengan *passive treatment* dalam meningkatkan kualitas air asam tambang pada *settling pond*?
3. Faktor apa saja yang memengaruhi efektivitas kedua metode tersebut di lokasi penelitian?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa tujuan sebagai berikut:

1. Menganalisis perbedaan hasil pengolahan air asam tambang pada masing-masing metode.
2. Membandingkan efektivitas metode *active treatment* dan *passive treatment* dalam meningkatkan kualitas air asam tambang, khususnya terhadap parameter pH, TSS, besi (Fe) dan mangan (Mn).

3. Mengidentifikasi faktor-faktor yang berkontribusi terhadap kinerja kedua metode dalam sistem *settling pond*.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan informasi ilmiah mengenai keefektifan metode *active* dan *passive treatment* dalam pengelolaan air asam tambang.
2. Mendukung upaya pengelolaan lingkungan pertambangan yang berkelanjutan dan sesuai dengan regulasi kualitas air.
3. Menyediakan referensi bagi penelitian lanjutan terkait perbandingan kedua metode dalam pengelolaan air asam tambang.

1.5 Ruang Lingkup

Penelitian ini hanya berfokus pada analisis kadar pH, TSS, besi (Fe), dan mangan (Mn) pada kolam air asam tambang dan tidak mencakup analisis dampak parameter terhadap ekosistem akuatik secara langsung. Ruang lingkup penelitian dibatasi pada penggunaan pHmeter untuk pengukuran pH, sedangkan TSS dan analisis kandungan logam besi (Fe) dan mangan (Mn) menggunakan *portable colorimeter*, dan pengujian laboratorium untuk parameter kalsium (Ca), kalium (K), natrium (Na), magnesium (Mg), aluminium (Al), dan sulfat. Dengan demikian, hasil penelitian ini merepresentasikan kondisi kualitas air terkait parameter yang ditentukan, namun tidak mencakup analisis parameter lain yang lebih luas.

1. Lokasi penelitian: Penelitian dilakukan pada unit *settling pond* yang menerapkan metode *active* dan *passive treatment* di PT Indexim Coalindo.
2. Jenis sampel: Sampel yang dianalisis adalah air dari setiap kompartemen *settling pond*.
3. Parameter yang diukur: Parameter utama yang diukur adalah kadar pH, TSS, besi (Fe), dan mangan (Mn) sesuai dengan baku mutu yang diatur dalam Peraturan Daerah Kaltim No.2 Tahun 2011.
4. Metode analisis: Pengukuran kadar pH menggunakan pHmeter, pengukuran kadar TSS, Fe, dan Mn menggunakan *portable colorimeter* HACH DR900 yang dikenal memiliki sensitivitas dan akurasi yang baik dalam analisis kualitas air di lapangan. Pengukuran kadar Ca, K, Na, Mg menggunakan AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometer*), pengukuran kadar Al menggunakan ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma Mass*

Spectrometry), dan pengukuran kadar sulfat menggunakan Spektrofotometri UV-Vis (*Ultraviolet-Visible*).

5. Waktu penelitian: Penelitian ini dilakukan dalam rentang waktu enam bulan mencakup pengambilan sampel di lapangan, pengujian in-situ, pengujian laboratorium, dan pengolahan data.

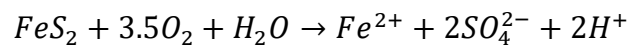
.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konsep Dasar AAT

Air Asam Tambang (AAT) adalah hasil dari reaksi oksidasi mineral sulfida, terutama pirit (FeS_2), ketika terpapar oksigen dan air. Reaksi utama yang menyebabkan pembentukan AAT dapat dinyatakan sebagai berikut:



Reaksi ini menghasilkan ion hidrogen (H^+) yang menyebabkan penurunan pH dan meningkatkan keasaman air (Younger et al., 2002). Dalam kondisi oksidatif, Fe^{2+} kemudian dapat teroksidasi menjadi Fe^{3+} , yang mempercepat proses pembentukan asam melalui reaksi berantai (Nordstrom et al., 2015). Aktivitas bakteri seperti *Acidithiobacillus ferrooxidans* berperan penting dalam mempercepat oksidasi besi dan sulfur, sehingga memperparah pembentukan AAT (Akcil & Koldas, 2006).

AAT umumnya memiliki pH rendah (di bawah 4), konduktivitas tinggi, dan kandungan ion logam berat yang signifikan. Menurut Gray (1997), keberadaan AAT di lingkungan tambang menyebabkan pencemaran air permukaan dan air tanah, meningkatkan toksisitas bagi biota akuatik, serta mempercepat degradasi ekosistem. Di Indonesia, fenomena ini sering ditemukan di area tambang batubara Kalimantan dan Sumatera, di mana sistem drainase terbuka bersentuhan langsung dengan batuan pembawa sulfida (KLHK, 2021).

2.2 Parameter Fisika dan Kimia

Parameter fisika dan kimia, seperti pH dan total suspended solid (TSS), merupakan indikator utama dalam menilai kualitas air asam tambang (Johnson & Hallberg, 2005). Kombinasi antara pH yang rendah dan TSS yang tinggi merupakan karakteristik khas AAT. Keduanya sering digunakan sebagai parameter kunci dalam mengevaluasi efektivitas metode pengolahan air tambang, baik secara aktif maupun pasif. Dalam penelitian ini, pH dan TSS dipilih sebagai parameter utama karena mampu merepresentasikan kemampuan sistem pengolahan dalam menetralisasi keasaman dan menurunkan beban partikel tersuspensi.

2.2.1 pH (Derajat Keasaman)

Tingkat keasaman atau basa dalam suatu zat, larutan, atau benda dinyatakan dalam derajat keasaman atau pH. pH merupakan singkatan dari *power of hydrogen*. pH memiliki rentang nilai 0-14. Secara umum pH normal memiliki nilai 7, jika nilai $\text{pH} < 7$ memiliki sifat asam, dan untuk nilai $\text{pH} > 7$ memiliki sifat basa. pH 0 menunjukkan derajat keasaman yang tinggi, sedangkan pH 14 menunjukkan derajat tingkat basa paling tinggi (Tri Joko, 2010).

2.2.2 TSS (*Total Suspended Solid*)

Total suspended solid (TSS) menggambarkan jumlah partikel tersuspensi di dalam air. Nilai TSS yang tinggi menurunkan kejernihan air dan dapat membawa logam berat yang teradsorpsi pada partikel-partikel tersebut (Effendi, 2003). Nilai TSS yang tinggi dalam AAT dapat disebabkan oleh erosi tanah di area tambang, serta pengendapan logam hidroksida hasil netralisasi kimia (Effendi, 2003). Partikel TSS sering menjadi media pengangkut logam berat, sehingga semakin tinggi TSS, semakin besar pula risiko penyebaran polutan ke lingkungan perairan sekitar. Selain itu, peningkatan TSS dapat menurunkan penetrasi cahaya dan menghambat proses fotosintesis fitoplankton.

2.3 Karakteristik dan Sumber Ion dalam AAT

Komposisi kimia AAT sangat bervariasi tergantung pada jenis batuan induk, mineralogi, dan proses geokimia yang terjadi. Secara umum, ion-ion yang sering ditemukan antara lain Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Al^{3+} , $\text{Fe}^{2+/3+}$, dan Mn^{2+} . Kation seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , dan K^+ berasal dari pelapukan batuan karbonat, silikat, dan feldspar di sekitar area tambang (Cravotta, 2008). Ion-ion ini bersifat *alkali* sehingga dapat menetralkan sebagian keasaman, tetapi keberadaannya yang tinggi juga menandakan proses pelindian mineral yang intens. Sementara itu, Fe, Mn, dan Al berasal dari oksidasi mineral sulfida dan hidroksida yang larut dalam kondisi asam (Younger et al., 2002). Sulfat (SO_4^{2-}) merupakan produk utama dari oksidasi pirit, dan keberadaannya dalam konsentrasi tinggi menjadi indikator khas AAT (Blowes et al., 2014).

2.3.1 Anion utama (Sulfat, SO_4^{2-})

Sulfat merupakan produk langsung dari oksidasi mineral pirit dan

merupakan komponen dominan dalam AAT (Akcil & Koldas, 2006). Konsentrasi sulfat yang tinggi dapat meningkatkan salinitas air dan menyebabkan iritasi fisiologis pada biota akuatik (Gray, 1997). Dalam kondisi anaerob, sulfat dapat direduksi menjadi sulfida oleh bakteri sulfat-reduksi, menghasilkan gas H_2S yang bersifat toksik. Oleh karena itu, keberadaan sulfat tidak hanya menjadi indikator keasaman, tetapi juga potensi aktivitas mikrobiologis dalam sistem tambang (Nordstrom et al., 2015).

Sulfat adalah salah satu jenis anion poliatomik dengan rumus kimia SO_4 yang memiliki massa molar 96,06 g/mol. Ion sulfat terdiri dari atom pusat sulfur yang dikelilinginya terdapat 4 atom oksigen didalam susunan tetrahedral. Ion sulfat memiliki muatan negatif 2 dan termasuk basa konjugat dari ion hidrogen sulfat atau bisulfat. Sulfat secara alami berada di air sebagai SO_4^{2-} , sumber sulfat sendiri dapat berasal dari atmosfer yang bersamaan dengan air hujan, pencucian batu gips ataupun *pyrite*, dan juga bisa dari pelapukan batuan beku. Limbah industri dan sumbangan dari atmosfer adalah yang paling utama. Sulfat yang disebabkan oleh bakteri bisa dimanfaatkan sebagai sumber oksigen dengan dilakukan perubahan menjadi hidrogen sulfida (H_2S) didalam keadaan anaerob. Konsentrasi sulfat diperairan alami memiliki rentang diantara 2-80 mg/L. Jika berada didekat buangan limbah industri kadar sulfat yang tinggi bisa lebih dari 400 mg/L yang menjadi penyebab air tidak sehat untuk digunakan.

Bentuk sulfur diperairan bisa berupa Sulfida (S^{2-}), Hidrogen Sulfida (H_2S), Sulfur Dioksida (SO_2), Sulfit (SO_3^{2-}), dan Sulfat (SO_4^{2-}). Apabila suatu perairan tidak memiliki oksigen, maka proses oksidasi yang terjadi dilakukan oleh bakteri aerob. Ion sulfat yang terdapat di perairan akan direduksi menjadi ion sulfit (SO_3^{2-}) yang nantinya akan terbentuk kesetimbangan dengan ion hidrogen menjadi hidrogen sulfida (H_2S). Kemudian kesetimbangan dengan ion sulfida (HS^-) akan menjadi H_2SO_4 yang berlimpah.

Oleh sebab itu, pada perairan alam umumnya kadar sulfat yang terdapat cenderung tinggi. Kadar yang tinggi didalam air menjadi penyebab gangguan pada saluran sistem metabolisme manusia dan juga menyebabkan kehilangan cairan yang berlebih. Juga bisa menjadi penyebab penyakit gangguan pencernaan, memicu adanya kanker, dan terpengaruhnya reproduksi manusia. Apabila dengan konsentrasi yang relatif tinggi, derajat keasaman air akan menurun sehingga air akan bersifat korosif pada benda logam, akan timbul kerak pada benda yang bersifat mudah korosif, dan akan terdapat bau yang kemungkinan berasal dari reduksi SO_4^{2-} menjadi H_2S .

2.3.2 Logam berat dan metaloid (Al^{3+} , $Fe^{2+/3+}$, Mn^{2+})

Ion Al, Fe, dan Mn merupakan indikator penting dari tingkat oksidasi dan

keasaman AAT. Besi (Fe) memiliki perilaku redoks yang kompleks. Dalam kondisi asam, Fe^{2+} mudah larut, sedangkan Fe^{3+} dapat mengendap sebagai $\text{Fe}(\text{OH})_3$ pada pH di atas 3,5, membentuk lapisan “yellow boy” yang menutupi dasar sungai dan menghambat aliran oksigen (Younger et al., 2002). Endapan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ menyebabkan warna merah kecoklatan di AAT. Reaksi ini menambah keasaman kembali, sehingga *passive treatment* kesulitan menstabilkan pH apabila Fe tinggi. *Active treatment* lebih efektif karena penambahan basa cepat mengendapkan Fe sebagai $\text{Fe}(\text{OH})_3$ dan menghentikan siklus asidifikasi.

Mn lebih sulit diendapkan, karena baru mengendap pada $\text{pH} > 8$. Dalam *passive system*, biasanya Mn tetap terlarut karena pH rendah dan oksidasi lambat. Sedangkan dalam *active system*, Mn dapat diendapkan dengan kontrol pH tinggi atau oksidator tambahan. LMnbihi stabil dalam kondisi tereduksi, tetapi mudah teroksidasi menjadi MnO_2 dalam kondisi netral, menimbulkan warna kehitaman pada air. Mn juga bersifat neurotoksik bila terakumulasi pada organisme akuatik (Gray, 1997).

Aluminium (Al): Larut pada $\text{pH} < 4$, dan dapat menyebabkan kerusakan fisiologis pada insang ikan dengan membentuk endapan gelatinous (Nordstrom et al., 2015). Endapan $\text{Al}(\text{OH})_3$ menambah TSS dan menurunkan kinerja saluran *passive* (menyumbat media). *Passive treatment* bisa berhasil jika pH stabil > 5 , sementara *active treatment* lebih cepat mengendapkannya.

Konsentrasi tinggi logam-logam tersebut dalam AAT menyebabkan perubahan kimia air, menurunkan pH, dan meningkatkan daya hantar listrik, yang pada akhirnya menurunkan kualitas habitat perairan (Skousen et al., 2019).

2.3.3 Kation utama (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+)

Ca dan Mg berasal dari pelapukan mineral karbonat seperti kalsit (CaCO_3) dan dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Kedua ion ini berperan penting dalam proses penetralan alami karena dapat mengikat ion H^+ dan meningkatkan pH air (Skousen et al., 2017). Selain itu, Ca dan Mg juga membantu dalam proses presipitasi logam terlarut sebagai hidroksida atau karbonat. Semakin tinggi Ca^{2+} alami dalam AAT, semakin cepat kenaikan pH dan pengendapan logam berat. Dalam *active treatment*, Ca ditambahkan dari kapur ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) atau kapur tohor (CaO). Jika Ca alami sudah tinggi, dosis bahan kimia dapat dikurangi, sehingga proses lebih ekonomis dan efisien. Mg berperan serupa Ca, namun reaksi netralisasinya lebih lambat dan lemah. Dalam *passive treatment*, dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) dapat menambah alkalinitas. Air dengan Mg tinggi menunjukkan adanya buffer alami, meskipun tidak sekuat Ca. Kombinasi Ca-Mg tinggi sering menunjukkan potensi keberhasilan *passive*

treatment.

Na dan K, sebaliknya, umumnya berasal dari pelapukan mineral silikat seperti feldspar dan mika. Keduanya bersifat inert terhadap pH dan tidak membentuk presipitat dengan ion logam, namun berkontribusi terhadap peningkatan konduktivitas listrik dan total padatan terlarut (TDS) dalam air tambang (Younger et al., 2002). Keduanya bersifat konservatif artinya tidak bereaksi menetralkan asam. Konsentrasi tinggi Na dan K sering berasal dari reaksi pelapukan feldspar atau mineral lempung, dan biasanya meningkatkan TDS (Total Dissolved Solids). Kadar Na/K tinggi dapat mengganggu keseimbangan osmotik tanaman dan menurunkan aktivitas mikroba pada *passive treatment*. Namun, dalam *active treatment*, Na/K tidak banyak memengaruhi reaksi, hanya menambah beban air limbah. Meskipun tidak toksik pada konsentrasi rendah, kadar Na dan K yang tinggi dapat mempengaruhi kesetimbangan osmotik organisme akuatik.

2.4 Metode Pengelolaan AAT

Secara umum pertambangan terbuka (open pit mining) terdiri dari area penambangan atau pit penambangan dan area timbunan batuan penutup (disposal area). Area pit penambangan merupakan area yang tidak dapat terhindar dari potensi pembentukan AAT (Abfertiawan dan Gautama, 2010). Aliran air yang berasal dari pit penambangan dialirkan ke sistem pengelolaan untuk netralisasi dan penurunan konsentrasi logam terlarut sebelum dialirkan ke badan air penerima. Sedangkan area disposal batuan penutup masih memiliki potensi terbentuknya AAT walaupun upaya pencegahan dilakukan.

Settling pond merupakan kolam pengendapan yang dirancang untuk memperlambat aliran air dan memungkinkan partikel padat serta logam mengendap karena pengaruh gravitasi. Ada dua metode untuk pengelolaan air asam tambang, yaitu pengelolaan aktif dan pengelolaan pasif. Dalam sistem aktif dan pasif, *settling pond* berfungsi sebagai unit pengolahan primer dan sekunder (Kefeni & Mamba, 2020). Efektivitas suatu kolam sangat bergantung pada desain hidrolis, waktu tinggal (*retention time*), dan jumlah kompartemen.

Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa metode *active treatment* dapat mengurangi pH dan logam berat lebih cepat, sedangkan *passive treatment* lebih cocok untuk pengelolaan jangka panjang dan daerah terpencil (Kirby et al., 1999; Skousen et al., 2017). Perbandingan efektivitas biasanya diukur berdasarkan parameter pH, TSS, Fe, dan Mn, serta efisiensi pengurangan konsentrasinya dari inlet ke outlet sistem pengelolaan.

2.4.1 Metode Active Treatment

Metode *active treatment* adalah teknik pengelolaan air asam tambang yang melibatkan penambahan langsung bahan kimia, seperti kapur, natrium hidroksida (NaOH), atau *caustic soda* (Na_2CO_3), untuk meningkatkan pH dan mengendapkan logam berat. Proses ini biasanya memerlukan peralatan mekanis dan kontrol yang ketat dan dapat menghasilkan pengurangan konsentrasi logam yang cepat dan signifikan (Skousen et al., 1998). *Active treatment* efektif untuk area pertambangan dengan emisi besar dan konsentrasi logam berat yang tinggi.

Namun, metode ini memerlukan biaya operasional dan pemeliharaan yang tinggi serta menghasilkan lumpur kimia (sludge) yang memerlukan penanganan lebih lanjut.. Efektivitas *active treatment* sangat bergantung pada dosis kimia yang tepat, target pH, dan waktu reaksi yang memadai. (Ziemkiewicz et al., 2003).

2.4.2 Metode Passive Treatment

Metode *passive treatment* merupakan pendekatan alami atau semi-alami untuk mengelola air asam tambang, yang biasanya memanfaatkan gabungan proses biologi, kimia, dan fisika yang terjadi secara alami dalam sistem seperti lahan basah buatan, cekungan sedimentasi bervegetasi, atau reaktor anaerobik. Sistem ini dirancang agar memerlukan sedikit perawatan dan sedikit energi eksternal, sehingga lebih ramah lingkungan dan lebih murah dalam jangka panjang (Hedin et al., 1994). Bentuk umum dari metode ini adalah *open limestone channel* (OLC) dan *aerobic wetlands*, yang dirancang untuk menaikkan pH dan mengendapkan logam secara bertahap.

Meskipun metode ini lebih ekonomis dan berkelanjutan, efektivitasnya sangat bergantung pada desain sistem, debit air, iklim, dan konsentrasi awal pencemar. *Passive treatment* kurang efektif pada debit besar atau perairan dengan beban pencemar tinggi karena waktu retensi air yang terbatas. Oleh karena itu, pemilihan metode ini harus disesuaikan dengan karakteristik lokasi dan kemampuan sistem untuk mempertahankan reaksi kimia yang diinginkan (Younger et al., 2002).

2.5 Dampak AAT terhadap Lingkungan

Air asam tambang (AAT) menimbulkan dampak lingkungan yang luas dan kompleks, terutama terhadap kualitas air permukaan dan air tanah di sekitar area pertambangan. Keasaman tinggi pada AAT mempercepat pelarutan logam berat yang bersifat toksik terhadap organisme akuatik (Younger et al., 2002). Saat AAT

mengalir ke sungai, pH rendah dapat menurunkan kelimpahan biota air dan mengganggu struktur komunitas ekosistem. Ion alkali (Ca, Mg, Na, K) walau tidak bersifat toksik langsung, dapat meningkatkan *total dissolved solids (TDS)* sehingga mengubah keseimbangan osmotik ekosistem perairan. Misalnya, plankton dan ikan air tawar sangat sensitif terhadap pH di bawah 5, menyebabkan berkurangnya keanekaragaman hayati di perairan yang terpapar (Gray, 1997).

Dampak AAT tidak hanya terbatas pada ekosistem akuatik, tetapi juga dapat mencemari tanah dan mempengaruhi produktivitas lahan. Air asam yang meresap ke tanah dapat melarutkan unsur hara penting seperti kalsium dan magnesium, serta meningkatkan mobilitas logam berat yang kemudian diserap oleh tanaman (Tiwary, 2001). Akibatnya, pertumbuhan vegetasi di sekitar area tambang menjadi terganggu, dan dalam jangka panjang dapat menimbulkan degradasi lahan atau bahkan desertifikasi lokal. Selain itu, endapan logam oksida dari AAT dapat menutupi permukaan sedimen sungai, mengubah struktur fisik habitat dasar perairan.

Secara sosial-ekonomi, AAT juga berpotensi menurunkan kualitas air untuk konsumsi manusia dan kegiatan pertanian. Logam berat seperti Fe dan Mn dalam konsentrasi tinggi dapat menimbulkan rasa, bau, dan warna yang tidak diinginkan pada air, serta berdampak pada kesehatan manusia bila dikonsumsi jangka panjang (Simate & Ndlovu, 2014). Oleh karena itu, pemantauan rutin kualitas air serta penerapan sistem pengolahan AAT menjadi keharusan dalam praktik pertambangan yang berkelanjutan.

2.6 Standar Kualitas Air dan Regulasi di Indonesia

Di Indonesia, standar kualitas air diatur melalui Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, yang menggantikan PP No. 82 Tahun 2001. Regulasi tersebut menetapkan baku mutu air berdasarkan peruntukannya, yaitu Kelas I hingga IV (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan [KLHK], 2021). Terdapat pula *Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 113 Tahun 2003* yang mengatur baku mutu air limbah kegiatan pertambangan batu bara. Dalam peraturan tersebut, pengawasan dan pelaporan kualitas air wajib dilakukan secara berkala oleh perusahaan tambang kepada instansi berwenang sebagai bagian dari sistem *Environmental Management and Monitoring Plan (RKL-RPL)*.

Selain PP No. 22 Tahun 2021 dan KepMen LH No.113 Tahun 2003 terdapat pula *Peraturan Daerah Kaltim Nomor 2 Tahun 2011* yang secara khusus mengatur baku mutu air limbah kegiatan pertambangan batu bara daerah Kalimantan Timur. Dalam peraturan tersebut, parameter penting seperti pH, TSS, Fe, dan Mn ditetapkan dengan batas tertentu untuk memastikan air buangan dari tambang tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan perairan.

Tabel 2.1 Baku Mutu Air Limbah Kegiatan Pertambangan Batubara

Parameter	Kadar Maksimum (mg/L)
pH	6,0-9,0
TSS	300
Besi Total (Fe)	7
Mangan Total (Mn)	4

*Peraturan Daerah Kaltim No.2 Tahun 2011

Implementasi regulasi ini juga sejalan dengan prinsip *Good Mining Practice (GMP)* dan konsep pertambangan berkelanjutan yang menekankan tanggung jawab sosial dan lingkungan. Menurut Mulyani dan Santoso (2022), kepatuhan terhadap baku mutu air bukan hanya kewajiban hukum, tetapi juga menjadi indikator utama keberlanjutan operasi tambang. Dalam konteks penelitian ini, parameter pH dan TSS yang digunakan mengacu pada ambang batas dalam regulasi nasional tersebut sebagai dasar evaluasi efektivitas metode *active* dan *passive treatment* dalam mengelola air asam tambang.

2.7 Penelitian Terdahulu

Penelitian-penelitian terdahulu terkait pengelolaan AAT di pertambangan batubar dapat dilihat pada Tabel 2.2

Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu

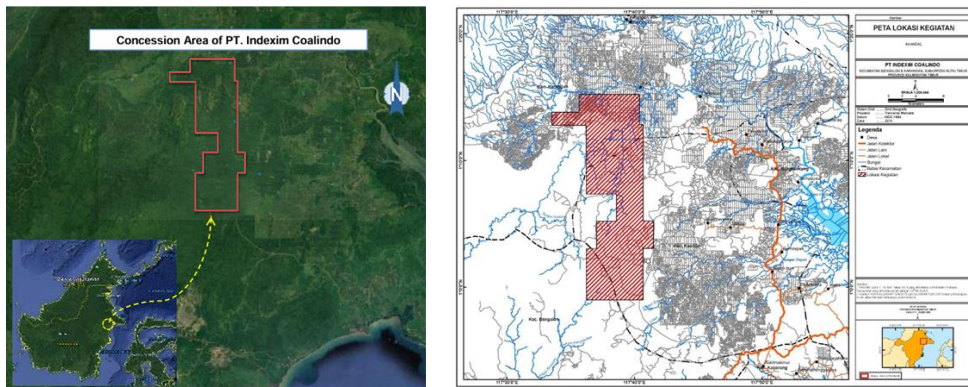
No.	Peneliti	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
1.	Indra et al., (2014)	Penerapan Metode <i>Active</i> dan <i>Passive Treatment</i> dalam Pengelolaan Air Asam Tambang Site Lati	Studi lapangan dan analisis laboratorium	<i>Active treatment</i> (kapur) mampu menaikkan pH hingga >6 dan menurunkan Fe-Mn, sedangkan <i>passive treatment</i> (wetland) efektif untuk stabilisasi kualitas air jangka panjang.
2.	Said, N. I. (2014)	Teknologi Pengolahan Air Asam Tambang	<i>Review</i> literatur (studi pustaka komparatif)	Mengulas berbagai teknologi pengolahan AAT

		Batubara “Alternatif Pemilihan Teknologi”		di Indonesia, mencakup <i>active</i> (kapur, soda ash) dan <i>passive</i> (<i>wetland</i> , <i>open</i> <i>limestone drain</i>).
3.	Rudy et al., (2018)	<i>Acid Mine Drainage in a Tropical Environment: A Case Study from the Tanjung Enim Coal Mine Site in South Sumatra, Indonesia</i>	Analisis karakteristik kimia AAT dan model reaksi geokimia pada lokasi tambang batubara tropis	Menunjukkan bahwa pH rendah dan tingginya Fe, AAl, dan sulfat di Tanjung Enim disebabkan oksidasi pirit yang intens. Unsur Ca dan Mg ditemukan sebagai hasil pelindian batuan karbonat.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Perseroan Terbatas (PT) Indexim Coalindo merupakan perusahaan yang bergerak di bidang pertambangan batubara swasta nasional yang telah berpengalaman dengan didukung oleh sumber daya manusia yang profesional dan berpengalaman di bidangnya. Perusahaan ini mendapatkan persetujuan permulaan tahap kegiatan operasi produksi pada tanggal 29 November 2010 berdasarkan Surat Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 505.K/30/DJB//2010 yang berlaku sejak tanggal 14 Agustus 2010 sampai tanggal 13 Agustus 2040. PT Indexim Coalindo berlokasi di Kabupaten Kutai Timur yang memiliki luas konsesi sebesar 24.050 ha dan kapasitas produksi batubara maksimum 30 juta ton/tahun.



Gambar 3.1 Peta Lokasi Kegiatan Pertambangan PT Indexim Coalindo

Hasil model geokimia menunjukkan bahwa site ini memiliki potensi pembentukan AAT yang cukup besar. Rasio material pembentuk asam (*Pottentially Acid Forming/PAF*) dan tidak berpotensi membentuk asam (*Non Acid Forming/NAF*) yakni sebesar 81:19. Oleh karena itu, PT Indexim Coalindo terus berupaya menjaga kualitas lingkungan dengan melakukan pengembangan terhadap sistem pengelolaan AAT untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Upaya tersebut juga sebagai bentuk tanggungjawab perusahaan untuk memenuhi baku mutu lingkungan yang tertuang dalam Peraturan Daerah Kaltim Nomor 2 Tahun 2011.

Tabel 3.1 Baku Mutu Air Limbah Kegiatan Pertambangan Batubara

Parameter	Kadar Maksimum (mg/L)
-----------	-----------------------

pH	6,0-9,0
TSS	300
Besi Total (Fe)	7
Mangan Total (Mn)	4

*Peraturan Daerah Kaltim No.2 Tahun 2011

Tidak ada keputusan dari Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan atau Gubernur Kalimantan Timur atau Bupati Kutai Timur tentang alokasi beban pencemar air Sungai Baai dan Sungai Rapak Kiri sehingga mengacu pada baku mutu air kelas 2 sesuai PP No. 22 Tahun 2021. Peruntukan air kelas dua, merupakan air yang bisa digunakan untuk prasarana/sarana rekreasi air, pembudidayaan ikan air tawar, peternakan, air untuk mengaliri pertamanan, dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaannya.

Adapun deskripsi kegiatan penambangan batubara yang berpotensi menghasilkan air limbah yaitu, pembersihan lahan (*land clearing*) dilakukan untuk mempersiapkan suatu lahan yang bebas dari pohon-pohon dan semak belukar. Pembersihan lahan akan dilakukan secara bertahap sesuai dengan kemajuan tahap penambangan. Pembersihan lahan akan dilakukan pada areal yang akan digunakan untuk bukaan tambang (*pit*), areal penimbunan tanah pucuk (*top soil*) dan batuan penutup (*waste dump area*), serta area yang akan digunakan untuk pembuatan kolam pengendapan (*settling pond/SP*).

Pengupasan tanah pucuk (*top soil*) dilakukan setelah kegiatan pembersihan lahan. Tanah pucuk dikupas dengan menggunakan bulldozer, lalu ditumpuk dan ditimbun disuatu tempat yang telah direncanakan sebelumnya dan aman dari kegiatan penambangan, agar nantinya dapat dimanfaatkan kembali dalam kegiatan revegetasi. Lokasi penimbunan lapisan tanah pucuk akan ditempatkan terpisah dari lokasi penimbunan batuan penutup. Tanah pucuk akan dipadatkan dan ditata dalam bentuk jenjang (*bench*) untuk memperkecil terjadinya erosi, serta dilakukan penanaman *cover crop* dari jenis *leguminosa* (LCC), yang berfungsi untuk menyegerakan penutupan tanah yang dapat mengurangi erosi tanah, memproduksi humus, mempertahankan kelembaban tanah, memperbaiki struktur tanah dan fiksasi nitrogen dari udara.

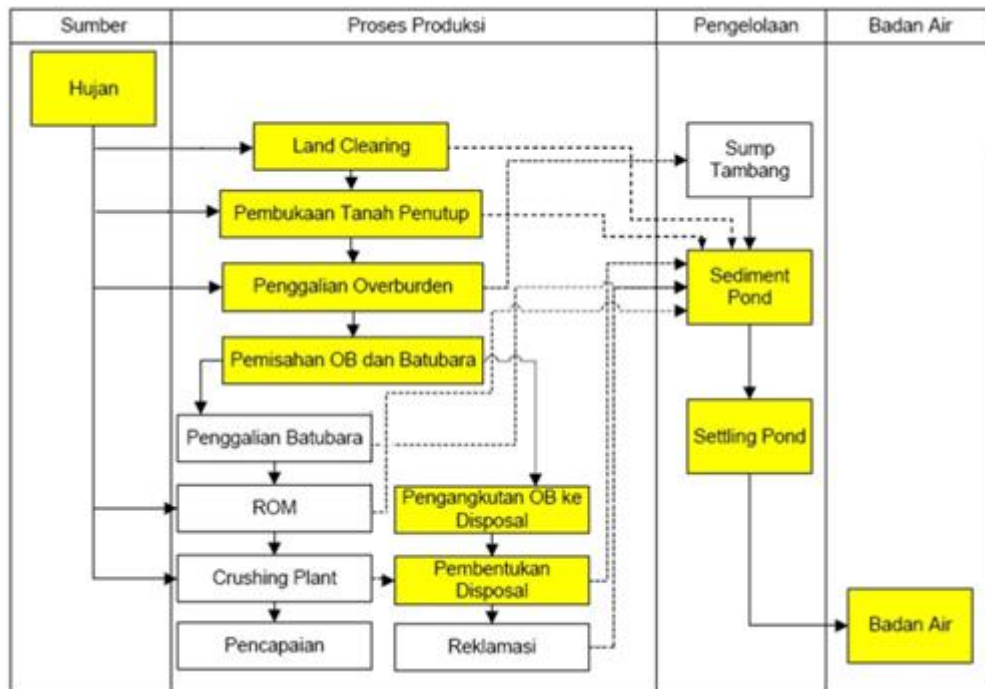
Kegiatan penggalian/pengupasan batuan penutup (*over burden*) dilakukan setelah kegiatan pengupasan tanah pucuk. Batuan penutup batubara pada umumnya terdiri dari tanah lempung, batu lempung, batu lumpur (*mudstone*), batu pasir dan batu pasir lempungan. Pada tahap awal, batuan penutup akan ditempatkan di areal penimbunan batuan penutup (*outpit dump* atau *waste dump area*) yang berada di dekat lokasi bukaan tambang dan bila ada bukaan tambang (*pit*) yang telah selesai dilakukan penambangan (*mined out*), maka penempatan batuan penutup berikutnya ditempatkan di bekas bukaan tambang tersebut (inpit

dump), metode ini umumnya disebut dengan backfilling. Areal penimbunan batuan penutup dipilih pada lokasi yang tidak mengandung batubara.

Pemisahan antara batuan penutup dan batubara dilakukan setelah penggalian batuan penutup (*over burden*). Batuan penutup akan diangkut ke disposal untuk pembentukan disposal yang selanjutnya akan direklamasi. Setelah batuan penutup diangkut sehingga tinggal lapisan batubara yang selanjutnya dilakukan penambangan.

Sistem penambangan batubara yang akan dilakukan adalah tambang terbuka (*open pit*) dengan teknik '*contour mining*', dimana penggaliannya dilakukan secara bertahap dari elevasi yang paling tinggi ke elevasi yang rendah sampai kedalaman batas penambangan yang telah ditentukan, yaitu di kedalaman pada batas akhir lereng penambangan. Dump truck akan mengangkut batubara dari lokasi tambang (*run of mine/ROM*) menuju ke lokasi penimbunan batubara sementara (*raw stockpile*) di dekat lokasi bukaan tambang. Tumpukan batubara di *raw stockpile* ini selanjutnya akan diolah di unit pengolahan batubara tersebut. Selanjutnya, batubara yang merupakan hasil olahan maupun raw material diangkut dari lokasi penimbunan sementara ke unit pengolahan dan penimbunan akhir.

Batubara yang baru ditambang disebut juga dengan batubara ROM. Batubara ROM diartikan sebagai jenis batubara yang belum sepenuhnya tersaring alias masih campur aduk. Dengan kata lain, batubara ROM adalah batubara hasil penambangan yang belum mengalami proses lebih lanjut. Sehingga jenis batubara ROM masih membutuhkan penghancuran, penyaringan, dan sejumlah proses lain.

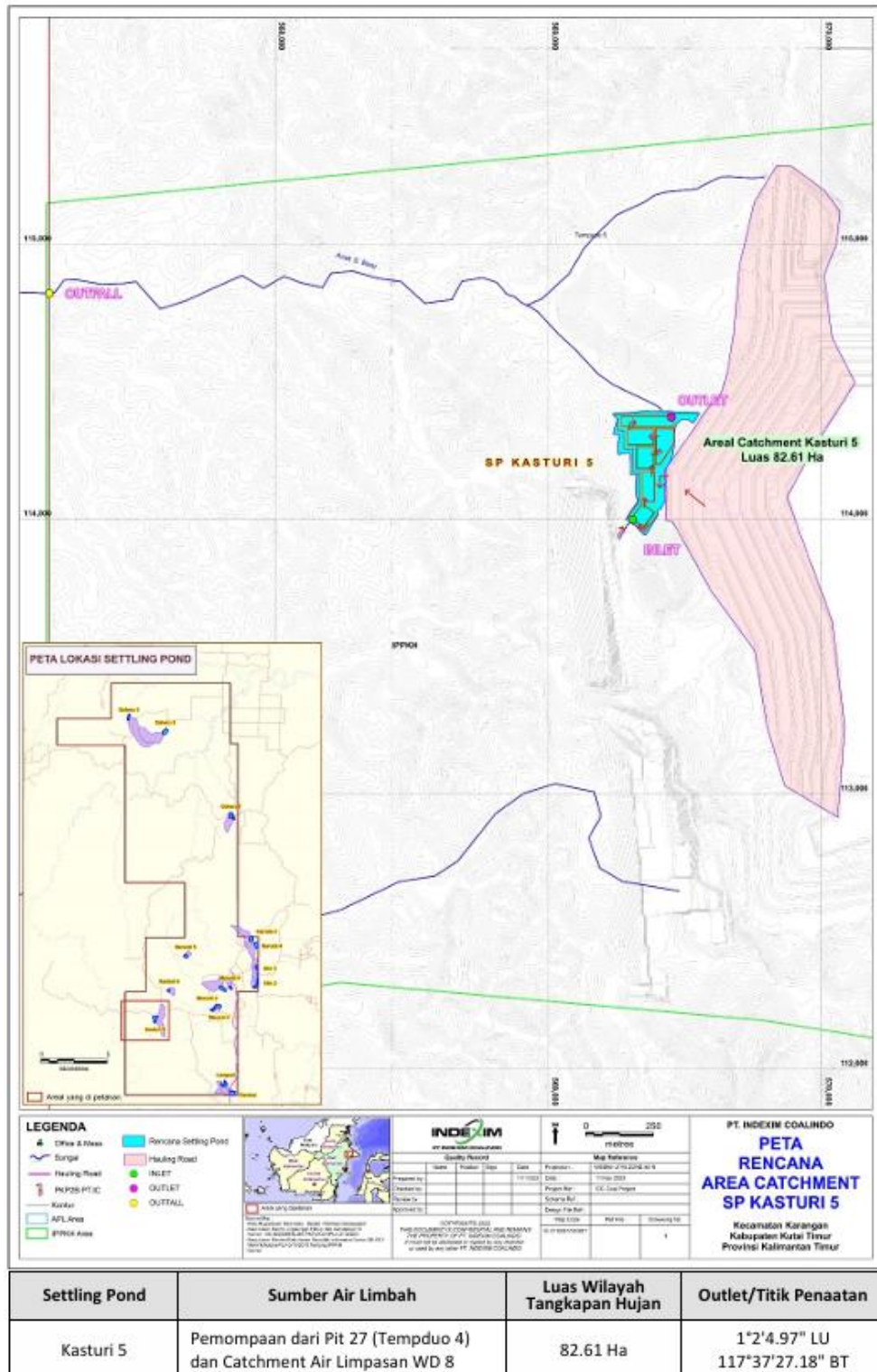


Gambar 3.2 Diagram Alir Proses Kegiatan Pertambangan yang Menghasilkan Air Limbah

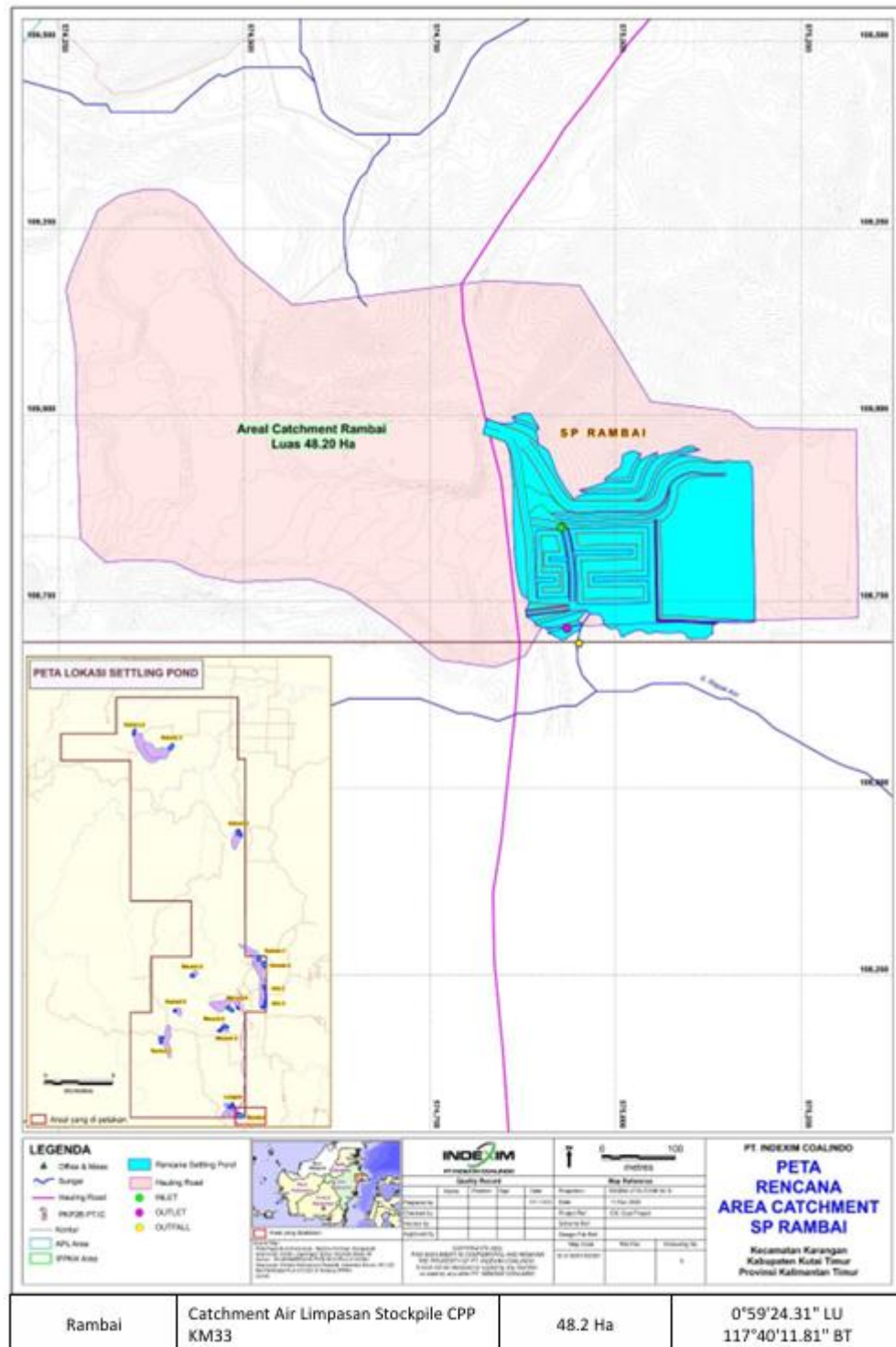
Seluruh proses ini menghasilkan air limbah yang kemudian diolah dengan SP (*settling pond*). SP akan dibangun sebelum penambangan dilakukan. Adapun SP yang digunakan sebagai perbandingan studi, yaitu SP Kasturi 5 dan SP Rambai.

Tabel 3.2 Daftar Settling Pond Sebagai Studi Komparatif

Nama SP	Sumber Air Limbah	Luas Cakupan Area (Ha)	Outlet/Titik Penaatan	Jenis Treatment
Kasturi 5	Pemompaan dari pit 27 (Tempudo 4) dan catchment air limpasan WD 8	82,61	1°2'4.97" LU 117°37'27.18" BT	Bahan kimia CaCO ₃ , Ca(OH) ₂ , atau soda kaustik (NaOH)
Rambai	Catchment air limpasan stockpile CPP KM 33	48,20	0°59'0.5" LU 117°40'27.89" BT	Sedimentasi dan <i>open limestone channel</i>



Gambar 3.3 Layout *Settling Pond* Kasturi 5



Gambar 3.4 Layout *Settling Pond* Rambai

Penelitian ini dilakukan pada SP Kasturi 5 dan SP Rambai PT Indexim Coalindo yang memiliki aktivitas pertambangan aktif. Pemilihan lokasi dilakukan berdasarkan perbedaan metode pengelolaan air asam tambang. Penelitian ini

dilakukan pada bulan Mei hingga Juni 2025 dengan dua kali sampling. Kondisi cuaca dan musim juga dipertimbangkan karena dapat mempengaruhi kualitas air.

Metode pengambilan contoh uji untuk masing-masing parameter mengacu pada SNI 6989.57:2008 tentang metode pengambilan contoh air permukaan. Sampling kualitas air diambil berdasarkan stratifikasi yaitu kedalaman 0,2 m di masing-masing lokasi. Persiapan pengambilan sampel dilakukan dengan mempersiapkan peralatan pengambilan sampel, wadah sampel, dan APD.

Tabel 3.3 Data Pengamatan Sampling SP Rambai

Parameter	Hasil Pengamatan
Lokasi Pengambilan Sampel	SP Rambai
Waktu	09.00 WITA
Sampling ke-1	7 Mei 2025
Sampling ke-2	28 Juni 2025
Suhu	31°C
Cuaca	Cerah

Tabel 3.4 Data Pengamatan Sampling SP Kasturi 5

Parameter	Hasil Pengamatan
Lokasi Pengambilan Sampel	SP Kasturi 5
Waktu	14.30 WITA
Sampling ke-1	7 Mei 2025
Sampling ke-2	28 Juni 2025
Suhu	31°C
Cuaca	Cerah

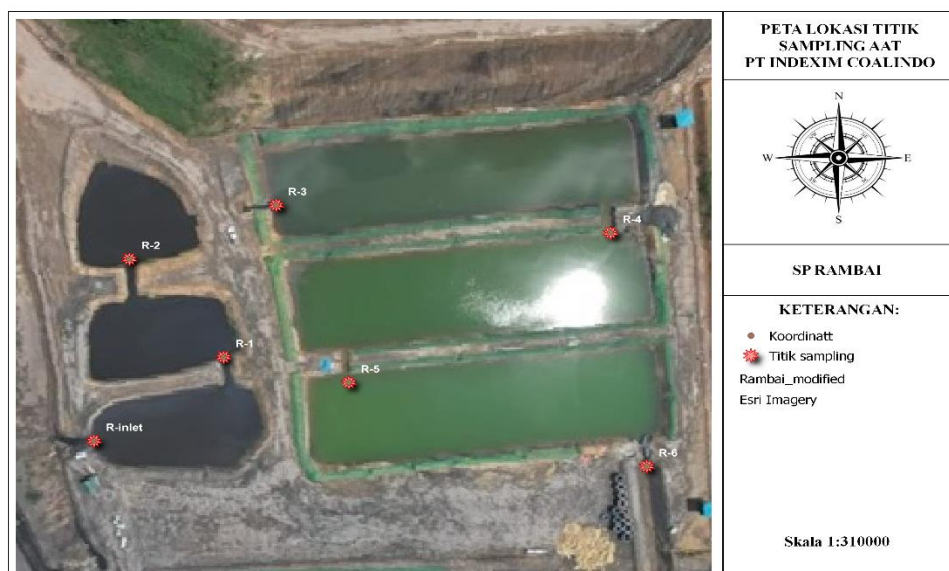
Berdasarkan Tabel 3.1 pengambilan sampel dilakukan pada jam tersebut dikarenakan waktu tersebut efisien karena pengelolaan pada SP Kasturi 5 sudah beroperasi. Pengambilan sampel dilakukan pada hari yang sama untuk menghindari faktor-faktor yang menyebabkan perbedaan situasi dan kondisi. Sampel yang tidak dianalisis di lapangan akan diawetkan untuk analisis lebih lanjut di laboratorium.

Pengambilan sampel AAT dilakukan pada setiap kompartemen SP Kasturi 5 dan SP Rambai. Tepatnya dari sampel inlet hingga outlet yang berjumlah 6 kompartemen tiap SP, sehingga jika dijumlahkan terdapat 14 sampel. Sampel inlet adalah sampel yang diambil dari bak awal sebelum melalui proses pengolahan, dan sampel outlet adalah sampel yang telah diolah atau diambil dari proses akhir pengolahan yaitu pada titik penataan. Sampel AAT diambil dengan menggunakan peralatan sederhana, yaitu tongkat sampling. Syarat peralatan sampling yang digunakan adalah harus terbuat dari bahan yang tidak mempengaruhi sifat contoh

serta bersih dan bebas dari kontaminan. Pengambilan sampel homogen dan bersifat representatif atau mewakili daerah yang sedang dipantau. Pengambilan sampel ini dilakukan untuk mengetahui tingkat efisiensi dari SP Kasturi 5 dan SP Rambai PT Indexim Coalindo.



Gambar 3.5 Titik Sampling SP Kasturi 5



Gambar 3.6 Titik Sampling SP Rambai

Titik lokasi sampling disajikan pula dalam Gambar 3.1 dan 3.2. Peta lokasi titik sampling dibuat dengan menggunakan Quantum Geographic Information System (QGIS) versi 3.22.10. Informasi peta wilayah Kutai Timur dan sebagainya didapatkan dari ESRI (*Environmental Systems Research Institute*). ESRI sendiri

merupakan sistem informasi geografis (GIS) yang berfokus pada pengumpulan, analisis, dan visualisasi data geospasial.

Tabel 3.5 Lokasi Titik Sampling

Poin Sampling	Lokasi SP	Longitude	Latitude
K5-inlet	Inlet Kasturi 5	117°37'19,536"E	1°1'37,599"N
K5-1	Kolam 1	117°37'20,715"E	1°1'39,738"N
K5-2	Kolam 2	117°37'21,433"E	1°1'42,193"N
K5-3	Kolam 3	117°37'21,946"E	1°1'43,501"N
K5-4	Kolam 4	117°37'21,879"E	1°1'45,332"N
K5-5	Kolam 5	117°37'20,553"E	1°1'46,704"N
K5-6	Kolam 6/Outlet	117°37'22,88"E	1°1'47,21"N
R-inlet	Inlet Rambai	117°40'23,406"E	0°59'1,988"N
R-1	Kolam 1	117°40'24,25"E	0°59'2,618"N
R-2	Kolam 2	117°40'23,637"E	0°59'3,354"N
R-3	Kolam 3	117°40'24,592"E	0°59'3,758"N
R-4	Kolam 4	117°40'26,767"E	0°59'3,55"N
R-5	Kolam 5	117°40'25,064"E	0°59'2,426"N
R-6	Kolam 6/Outlet	117°40'27,004"E	0°59'1,797"N

3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam menunjang penelitian ini berupa *Multi-Parameter Portable Colorimeter* HACH DR900 yang digunakan sebagai alat pengukuran *in situ* untuk variabel pendukung berupa pH, TSS, Fe, dan Mn. Dalam pengujian laboratorium, alat yang digunakan untuk preparasi sampel terdiri dari gelas ukur, kaca arloji, *hotplate*, *magnetic stirrer*, lemari asam *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS), *Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry* (ICP-MS), dan Spektrofotometer UV-Vis. SSA digunakan untuk menguji kadar Ca, Na, K, dan Mg, sedangkan ICP-MS untuk menguji Al, dan UV-Vis untuk menguji sulfat.

Selain alat yang digunakan sebagai penunjang penelitian, beberapa bahan berupa HNO₃, larutan buffer A, BaCl₂, dan kertas saring whatman 40 juga digunakan dalam penelitian ini. Adapun sampel yang dianalisis adalah sampel air yang diambil dari setiap kompartemen di *settling pond*.

3.3 Prosedur Analisis Data

3.3.1 Jenis dan Variabel Penelitian

Penelitian yang dilakukan merupakan penelitian kuantitatif yang dilakukan dengan pengambilan sampel AAT, pengujian *in situ*, dan pengujian laboratorium untuk menentukan kandungan logam berat dan variabel pendukung pada SP Kasturi 5 dan SP Rambai. Variabel yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari variabel utama dan variabel pendukung. Variabel utama dari penelitian ini yaitu parameter yang menjadi acuan perbandingan yaitu, pH, TSS, Besi (Fe), dan Mangan (Mn) yang akan diukur langsung pada saat sampling.. Variabel pendukungnya terdiri Kalsium (Ca), Mg (Magnesium), Natrium (Na), Kalium (K), Aluminium (Al), dan Sulfat (SO_4^{2-}) yang akan diuji di laboratorium.

3.3.2 Survei

Bertujuan untuk mengidentifikasi lokasi penelitian dan menentukan titik pengambilan sampel. Tahapan awal yang dilakukan dalam survei yaitu, mengobservasi dan mengidentifikasi area *settling pond* yang menerapkan metode *active* dan *passive treatment* untuk mencatat kondisi lingkungan, seperti rona lingkungan, jumlah kompartemen, aliran air, dan indikasi kontaminasi logam berat (misalnya, perubahan warna air). Selanjutnya menentukan titik-titik pengambilan sampel di setiap kompartemen dan mendokumentasi area yang akan menjadi lokasi sampling.

3.3.3 Sampling

Pengambilan sampel AAT dilakukan pada setiap kompartemen SP Kasturi 5 dan SP Rambai. Tepatnya dari sampel inlet hingga outlet yang berjumlah 6 kompartemen tiap SP, sehingga jika dijumlahkan terdapat 12 sampel. Sampling dilakukan 2x dalam rentang Mei–Juni 2025. Hal ini bertujuan untuk melihat variasi kualitas AAT antar waktu. Kondisi cuaca pada saat pengambilan sampel termasuk dalam bulan kering yang ditandai dengan intensitas curah hujan yang rendah pada kedua waktu tersebut. Pengambilan sampel AAT dilakukan pada kedalaman 0,1-0,2 m pada akhir aliran di setiap limpasan antar kolam dengan tongkat sampling. Sampel diambil pada akhir aliran di setiap limpasan karena mempresentasikan air yang telah mendapat perlakuan pada setiap prosesnya. Sampel tersebut kemudian diuji *in situ* menggunakan *Multi-Parameter Portable Colorimeter* (Hach DR 900) untuk mengetahui konsentrasi pH, TSS, Fe dan Mn.

Sampel yang telah diambil, dimasukkan ke dalam botol plastik *polyethylene* 100 mL dan diberi label. Kemudian sampel dikirim dan disimpan di Laboratorium Teknik Lingkungan UII untuk dilakukan pengawetan pada lemari pendingin yang selanjutnya akan dipreparasi untuk pengujian variabel pendukung.

3.3.4 Pengumpulan Data

Data yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer merupakan data yang diambil dari hasil analisis langsung maupun hasil analisis laboratorium. Sedangkan data sekunder merupakan data yang diperoleh dari kajian teknis perusahaan dan juga sumber yang sudah ada seperti Qgis, dan jurnal ilmiah lainnya. Standar acuan dan metode yang digunakan dalam penelitian ini dijelaskan dalam Tabel 3.3 berikut.

Tabel 3.6 Standar Acuan dan Metode Pengujian

Variabel	Parameter	Acuan	Metode	Pengujian
Variabel Utama	pH	SNI 6989.11-2019	pH meter	In situ
	TSS	USEPA Colorimetric Method	Multi-Parameter Portable Colorimeter	
	Fe	USEPA FerroVer Method		
	Mn	USEPA Periodate Oxidation Method		
Variabel Pendukung	Ca	SNI 6989.84-2019	AAS	Laboratorium
	K	SNI 6989.84-2019		
	Mg	SNI 6989.84-2019		
	Na	SNI		

	6989.84- 2019	
Al	SNI	IC-MS
	6989.82- 2018	
Sulfat	SNI	UV-Vis
	6989.20- 2019	

3.3.5 Preparasi Sampel

Preparasi sampel AAT mengacu pada standar acuan dan metode yang terdapat dalam Tabel 3.4 Sampel AAT dipipet 25 mL dan diberi 5 ml HNO₃, lalu dipanaskan menggunakan *hot plate* dengan suhu 120°C hingga timbul asap putih dan larutan menjadi jernih. Setelah itu mengukur volume sampel $\pm$ 10 mL dengan gelas ukur, dan disaring dengan kertas saring whatman 40 (pori 8,0 μ m). Sampel uji ditempatkan pada labu ukur 25 mL dan ditambahkan aquadest sampai batas. Sampel uji siap diukur ke dalam AAS dan ICP-MS. Selanjutnya preparasi 50 mL sampel AAT pada gelas ukur dan diberi 20 mL larutan Buffer A. Sampel diaduk dengan kecepatan konstan menggunakan *magnetic stirrer*, kemudian ditambah 1 sendok spatula kristal BaCl₂. Sampel uji siap diukur ke dalam Spektrofotometer UV-Vis.

3.3.6 Pengujian Sampel

Analisis Ca, Mg, Na, dan K dilakukan dengan menggunakan AAS. Panjang gelombang yang digunakan untuk masing-masing parameter adalah Ca 422,7 nm; Mg 285,2 nm; Na 589,0 nm; dan K 766,5 nm. Prinsip dasar AAS adalah interaksi antara radiasi elektromagnetik dengan sampel. SSA menggunakan metode yang sangat tepat untuk analisis zat pada konsentrasi rendah. Teknik-teknik ini didasarkan pada emisi dan absorpsi dari uap atom. Komponen kunci metode SSA adalah sistem (alat) yang dipakai untuk menghasilkan uap atom dalam sampel (Khopkar, 2008).

Analisis Al dilakukan dengan menggunakan ICP-MS dengan panjang gelombang 308,22 nm. Prinsip dasar ICP-MS adalah mengubah bentuk sampel menjadi aerosol oleh gas argon pada nebulizer, pada temperatur plasma, sampel-sampel akan tereksitasi dan akan kembali ke keadaan awal (*ground state*) sambil memancarkan sinar radiasi berupa emisi yang akan terdispersi dan berubah menjadi sinyal listrik. Sinyal listrik tersebut besarnya sebanding dengan sinar yang dipancarkan oleh besarnya konsentrasi unsur. Salah satu alat yang digunakan untuk menganalisis logam dengan

terbentuknya plasma pada tingkat kekhususan dan sensitivitas yang tinggi, serta limit deteksi yang baik untuk segala aplikasi (Deka,2020).

Analisis sulfat dilakukan dengan menggunakan Spektrofotometri UV-Vis dengan panjang gelombang 420 nm. Prinsip dasar Spektrofotometri UV-Vis adalah interaksi hubungan antara materi dengan cahaya. Pengukuran transmittan atau absorban suatu sampel dapat dilakukan oleh spektrofotometer sebagai fungsi dari panjang gelombang. Spektrofotometer ini merupakan gabungan dari spektrofotometer sinar UV (UltraViolet) dan spektrofotometer Vis (Visible) (Tira, 2023).

3.3.7 Analisis Data

Pada tahapan ini dilakukan pengolahan data dengan berbagai metode untuk menggambarkan kualitas AAT pada SP Kasturi 5 dan SP Rambai. Distribusi konsentrasi variabel utama di setiap titik sampling akan diolah dan disajikan dengan statistik deskriptif melalui *bar chart* untuk mengetahui efektivitas kedua sistem. Konsentrasi setiap titik dibandingkan pada kedua metode pengelolaan dan juga dibandingkan dengan standar baku mutu yang ada. Konsentrasi variabel pendukung juga dilengkapi untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai kandungan ion logam dan efektivitas kedua sistem pengelolaan. Meskipun terdapat perbedaan parameter yang diukur antara sampling pertama dan kedua, hal tersebut tidak mengubah fokus utama penelitian ini, karena evaluasi efektivitas pengelolaan *settling pond* dilakukan terhadap parameter pH, TSS, Fe dan, Mn. Variabel pendukung menjadi data tambahan pada pengambilan sampel kedua untuk memperkuat interpretasi kimiawi dari proses pengelolaan yang terjadi. Meskipun tidak dilakukan pada seluruh periode sampling, hasil pengujian ini tetap relevan karena menunjukkan kecenderungan karakteristik ion dalam AAT yang umum terjadi pada sistem pengelolaan serupa (Misran et al., 2020; Pratiwi et al., 2021).

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perhitungan Debit Air Limbah dan Air Limpasan

Air asam tambang yang dikelola di SP merupakan air limbah yang dihasilkan dari air hujan yang bercampur material tambang dan air tambang (*sump*) di area pertambangan. Air limpasan ini ditampung dalam kolam pengendapan (*settling pond/SP*) untuk diolah sebelum dibuang ke badan air. Jumlah air limpasan di area tambang ditentukan oleh wilayah tangkapan hujan dan intensitas hujan tertinggi dalam satuan (mm/jam).

Tabel 4.1 Luas Wilayah Tangkapan Hujan

SP	Luas Wilayah Tangkapan Hujan
Kasturi 5	82,61 Ha
Rambai	48,20 Ha

Tabel di bawah adalah data curah hujan maksimum yang digunakan untuk perhitungan debit air limpasan dan debit air limbah tambang.

Tabel 4.2 Data Curah Hujan Maksimum 10 Tahun

Curah Hujan (mm)	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Ag	Se	Ok	Nov	Des	Maksimal
2007	140	141	80	58	32	46	58	52	51	121	84	109	141
2008	56	81	60	87	30	51	32	23	5	56	62	49	87
2009	86	13	49	63	79	83	74	63	65	93	49	60	93
2010	53	37	108	35	74	83	12	38	20	44	56	97	108
2011	99	101	120	58	132	44	45	24	28	74	14	70	142
2012	151	93	127	86	86	30	49	13	16	44	58	63	151
2013	62	83	31	49	41	59	197	15	29	15	82	106	197

2014	95	40	19	75	75	69	20	0	0	26	70	45	95
2015	93	17	44	22	79	48	58	32	13	12	10	10	137
									7	5	0	5	
2016	36	49	68	75	20	14	92	46	39	20	89	38	92

Setelah mengetahui data curah hujan maksimum, dihitung standar deviasi untuk mendapatkan nilai variasi rata-rata dan variasi periode ulang hujan.

Tabel 4.3 Standar Deviasi

No	Xi	(Xi-X)	(Xi-X) ²	Fi	Fi (Xi-X) ²
1	141	16,70	278,89	1	278,89
2	87	-37,30	1391,29	1	1391,29
3	93	-31,30	979,69	1	979,69
4	108	-16,30	265,69	1	265,69
5	142	17,70	313,29	1	313,29
6	151	26,60	712,89	1	712,89
7	197	72,70	5285,29	1	5285,29
8	95	-29,30	858,49	1	858,49
9	137	12,70	161,29	1	161,29
10	92	-32,30	1043,29	1	1043,29
Rata-rata					9227,03
Standar Deviasi					35,42

Didapat nilai rata-rata Xi sebesar 124,30. Sehingga nilai standar deviasi sebesar 35,42.

Tabel 4.4 Nilai Koreksi Variasi Rata-rata (Yn)

No	Xi	(Xi-X)	(Xi-X) ²	fi	fi (Xi-X) ²
1	141	16,70	278,89	1	278,89
2	87	-37,30	1391,29	1	1391,29
3	93	-31,30	979,69	1	979,69
4	108	-16,30	265,69	1	265,69
5	142	17,70	313,29	1	313,29
6	151	26,60	712,89	1	712,89
7	197	72,70	5285,29	1	5285,29
8	95	-29,30	858,49	1	858,49
9	137	12,70	161,29	1	161,29
10	92	-32,30	1043,29	1	1043,29
Rata-rata					9227,03
Standar Deviasi					35,42

Didapat nilai rata-rata Y_n sebesar 0,4774. Sehingga nilai standar deviasi Y_n sebesar 0,95.

Tabel 4.5 Koreksi Variasi (Y_t) Periode Ulang Hujan

n (Tahun)	$\{-\ln[T-1]/T\}$	$\ln\{-\ln[T-1]/T\}$
1	-	-
2	0,6931	0,3665
3	0,4055	0,9027
4	0,2877	1,2459
5	0,2231	1,4999
10	0,1054	2,2504

Berdasarkan data di atas, langkah selanjutnya yaitu menghitung Curah Hujan Rencana (CHR) dengan Metode Gumbel untuk periode ulang 2, 3, 4, 5, dan 10 tahun dengan rumus:

$CHR = \text{Curah hujan maksimum rata-rata} + ((\text{standar deviasi} \times (\text{Koreksi variasi} - \text{Nilai koreksi variasi rata-rata}) / \text{koreksi deviasi}))$

Tabel 4.6 Curah Hujan Rencana (CHR) Metode Gumbel

CHR	Rata-rata Curah Hujan Maksimum	Standar Deviasi	Koreksi Variasi	Koreksi Variasi Rata-rata	Koreksi Deviasi	Curah Hujan Rencana (mm)
PU ₂	124,30	35,42	0,3665	0,4774	0,95	120,15
PU ₃	124,30	35,42	0,9027	0,4774	0,95	140,24
PU ₄	124,30	35,42	1,2459	0,4774	0,95	153,10
PU ₅	124,30	35,42	1,4999	0,4774	0,95	162,63
PU ₁₀	124,30	35,42	2,2504	0,4774	0,95	190,75

Berdasarkan data di atas, langkah selanjutnya yaitu menghitung intensitas hujan pada area SP yang telah ditentukan menggunakan rumus mononobe.

$$I = (R_{24}/24) \times (24/t)$$

Dimana:

I = intensitas curah hujan (mm/jam)

t = waktu lamanya hujan (jam)

R_{24} = curah hujan maksimum dalam selang waktu 24 jam (mm)

$2/3$ = angka tetapan

Tabel 4.7 Perhitungan Curah Hujan Rencana dan Intensitas Hujan

Periode Ulang	Satuan	2	3	4	5	10
Curah Hujan Rencana	mm/bulan	120,15	140,24	153,10	162,63	190,75
R24	mm/hari	4,00	4,67	5,10	5,42	6,36
Intensitas Hujan	mm/jam	0,55	0,64	0,70	0,75	0,87

Sehingga intensitas hujan untuk periode ulang 10 tahun yaitu 0,87 mm/jam. Air limpasan dihitung dengan rumus rasional, yaitu:

$$Q = 0,278 \times C \times I \times A$$

Dimana:

Q : Debit maksimum limpasan air permukaan (m³/s).

C : Nilai koefisien limpasan.

I : Intensitas hujan rancangan (mm/jam).

A : Daerah tangkapan hujan (Ha).

Nilai C untuk kajian teknis adalah 0,9 yaitu lahan memiliki kemiringan >15% dan tataguna lahan tutupannya adalah tanpa tumbuhan, lokasi tambang (Diktat Kuliah Penyaliran Tambang ITB, Oleh Rudy Sayoga,1999).

Tabel 4.8 Debit Pemompaan

SP	Debit Pemompaan (m³/detik)	Keterangan	Daerah Tangkapan Hujan (Ha)	Intensitas Hujan (mm/jam)
Kasturi 5	0,33	2 x Pompa MF 420 (@0,17 m ³ /detik)	82,61	0,87
Rambai	0,0007	Untuk menampung limpasan area <i>stockpile</i> CPP KM 33	48,20	0,87

Tabel 4.9 Jumlah Air Limbah yang Masuk Settling Pond

SP	Debit Air Limpasan (m³/hari)	Debit Pemompaan (m³/hari)	Debit Air Limbah (m³/hari)
Kasturi 5	4.315,59	24.987,27	29.302,86
Rambai	2.518,05	58	2.575,65

Debit air limbah tambang = air limpasan (Q) + air tambang (*sump*) yang dipompa. Sehingga perhitungan air limbah yang masuk ke SP Kasturi 5 sebesar 29.302,86 m³/hari dan SP Rambai sebesar 2.575,65m³/hari.

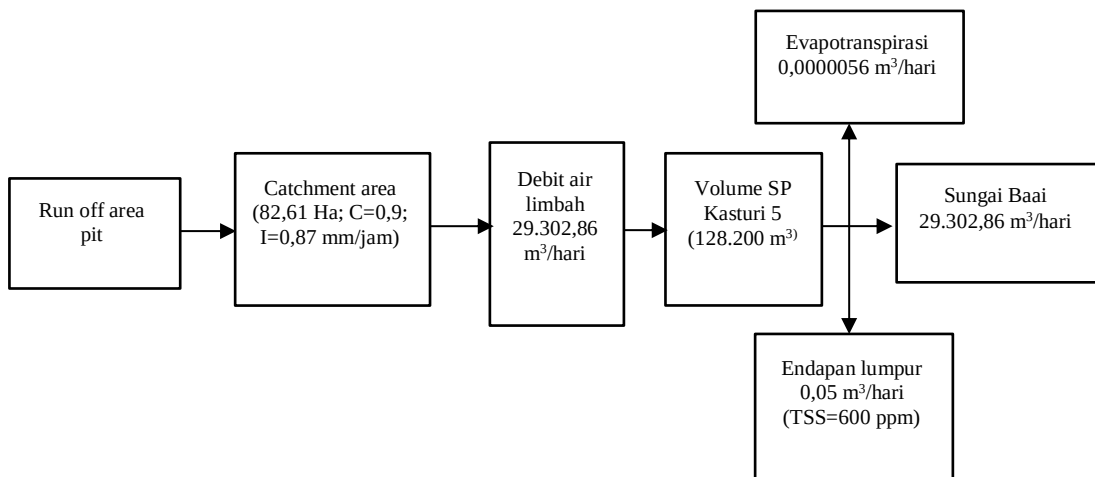
4.2 Volume *Settling Pond* (SP)

4.2.1 Kriteria Desain *Settling Pond* (SP)

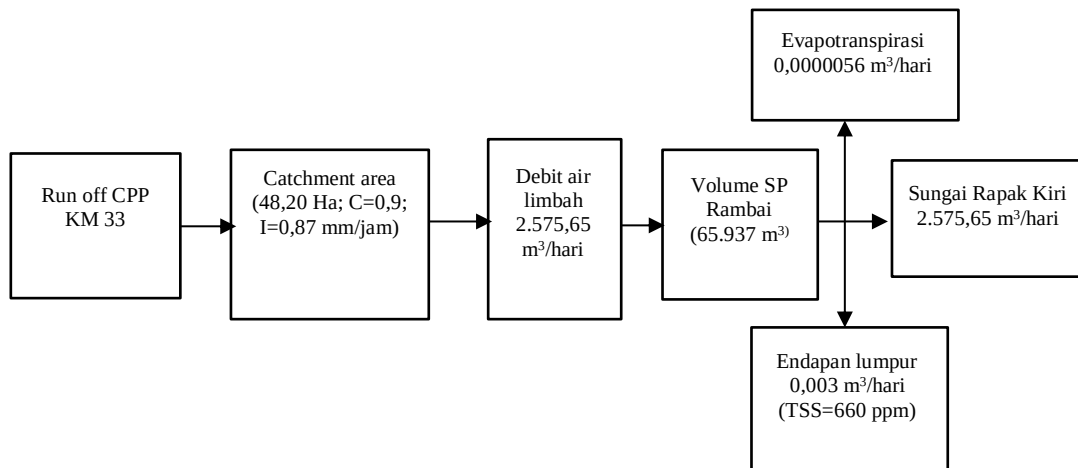
Untuk perhitungan volume SP mengacu pada KepMen ESDM No. 1827 Tahun 2018 Tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik. Dalam Kepmen ESDM No. 1827 tersebut (Halaman 95): fasilitas penampungan air tambang, serta fasilitas pengendapan memiliki kapasitas sekurang-kurangnya 1,25 (satu koma dua puluh lima) kali volume air tambang pada curah hujan tertinggi selama 84 (delapan puluh empat) jam.

Tabel 4.10 Volume *Settling Pond* (SP)

SP	Debit Air Limbah (m ³ /hari)	Volume SP (m ³)	Lama Pengendapan (Hari)
Kasturi 5	29.302,86	128.200	5
Rambai	2.575,65	65.937	22



Gambar 4.1 Neraca Air SP Kasturi 5



Gambar 4.2 Neraca Air SP Rambai

Kegiatan penambangan bersifat kontinuitas dan cenderung tetap dengan jam operasional penambangan 7 hari kerja (Senin-Minggu) selama 24 jam dengan jam puncak kegiatan 08.00 – 16.00 WIB. Sedangkan air limbah yang dihasilkan bersifat fluktuatif yang dipengaruhi air limpasan di area tambang. Sementara air limpasan secara garis besar dipengaruhi oleh elemen-elemen meteorologi yang diwakili oleh curah hujan dalam satuan (mm/jam) dan elemen-elemen daerah pengaliran yang menyatakan sifat-sifat dari daerah pengaliran. Dengan demikian, fluktuasi air limbah tambang sangat dipengaruhi oleh intensitas air hujan dan laju infiltrasi air hujan.

Tabel 4.11 Fluktuasi Air Limbah Tambang

SP	Debit Air Limbah Tambang (m³/hari)		
	Minimum	Sedang	Maksimum
Kasturi 5	29.302,86	35.163,43	43.904,56
Rambai	2.575,65	3.090,78	8.870,78

4.2.2 Beban Pencemar

Beban pencemaran air limbah adalah jumlah total unsur pencemar yang terkandung dalam air limbah, yang diukur berdasarkan debit dan konsentrasi zat pencemar. Beban ini dapat dihitung secara aktual (BPA) berdasarkan kondisi eksisting atau maksimum (BPM) untuk menentukan kapasitas daya tampung badan air dan mengendalikan pencemaran. Tinggi rendahnya beban pencemaran menunjukkan potensi dampak negatif terhadap kualitas air dan lingkungan. Beban pencemar air dihitung dengan rumus:

$$BPA = Q_i \times C_s$$

Dimana:

BPA: Beban Pencemar Air (kg/hari)

Qi: Debit air (m³/detik)

Cs: Konsentrasi parameter (mg/L)

Tabel 4.12 Beban Pencemar SP Kasturi 5

Parameter	Baku Mutu* (mg/L)	Debit Air Limbah (m ³ /hari)	Beban Pencemaran Air Limbah (kg/hari)
TSS	300	29.302,86	8.790,86
Fe Total	7	29.302,86	205,12
Mn Total	4	29.302,86	117,21

*Peraturan Daerah Kaltim No.2 Tahun 2011

Tabel 4.13 Beban Pencemar SP Rambai

Parameter	Baku Mutu* (mg/L)	Debit Air Limbah (m ³ /hari)	Beban Pencemaran Air Limbah (kg/hari)
TSS	300	2.575,65	772,70
Fe Total	7	2.575,65	18,03
Mn Total	4	2.575,65	10,30

*Peraturan Daerah Kaltim No.2 Tahun 2011

Tabel 4.14 Kriteria Desain Setiap Unit Proses SP Kasturi 5

SP Kasturi 5	Waktu Tinggal (jam)	Kecepatan Aliran (m ³ /jam)	Proses
Mudpond	24	0,3	Penampungan air <i>sump</i>
Kompartemen 1	9,5	0,4	Penambahan kapur dan tawas/PAC
Kompartemen 2	11,3	0,4	Pengendapan awal secara alami
Kompartemen 3	11,6	0,3	Pengendapan lanjutan secara alami
Kompartemen 4	20,4	0,2	Pengendapan lanjutan secara alami
Kompartemen 5	13,7	0,3	Pengendapan lanjutan secara alami

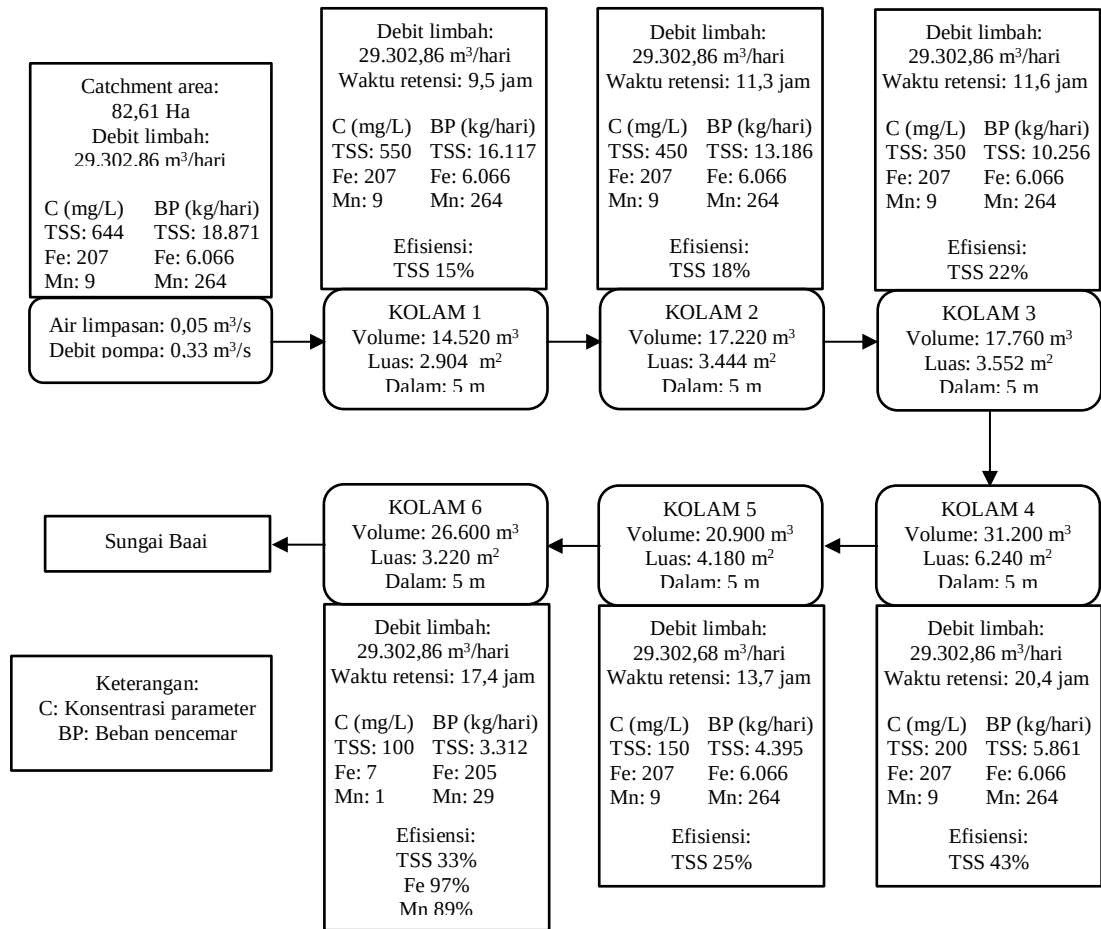
Kompartemen 6 - Outlet	17,4	0,2	Pengendapan lanjutan secara alami
------------------------	------	-----	-----------------------------------

Tabel 4.15 Kriteria Desain Setiap Unit Proses SP Rambai

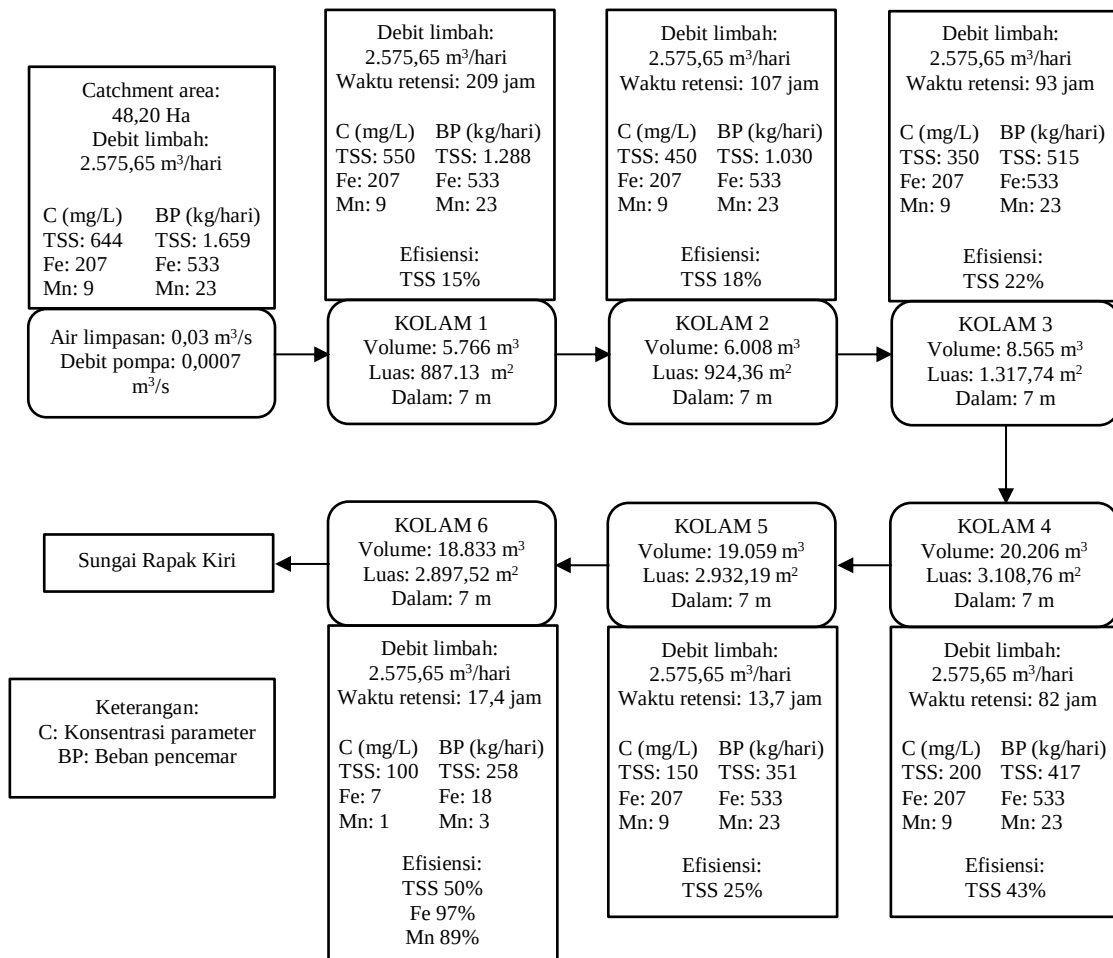
SP Rambai	Waktu Tinggal (jam)	Kecepatan Aliran (m^3/jam)	Proses
Mudpond	24	0,0007	Penampungan air <i>sump</i>
Kompartemen 1	9,5	0,4	Pengendapan awal secara alami
Kompartemen 2	11,3	0,4	Pengendapan lanjutan secara alami
Kompartemen 3	11,6	0,3	Pengendapan lanjutan secara alami
Kompartemen 4	20,4	0,2	Pengendapan lanjutan secara alami
Kompartemen 5	13,7	0,3	Pengendapan lanjutan secara alami
Kompartemen 6 - Outlet	17,4	0,2	Pengendapan lanjutan secara alami

4.2.3 Efisiensi Removal

Efisiensi reduksi/removal parameter air limbah setiap unit proses pada *settling pond* dengan pendekatan neraca massa sebagai berikut.



Gambar 4.3 Kriteria Desain dan Efisiensi Reduksi SP Kasturi 5



Gambar 4.4 Kriteria Desain dan Efisiensi Reduksi SP Rambai

4.2.4 Jumlah Penggunaan Bahan Kimia

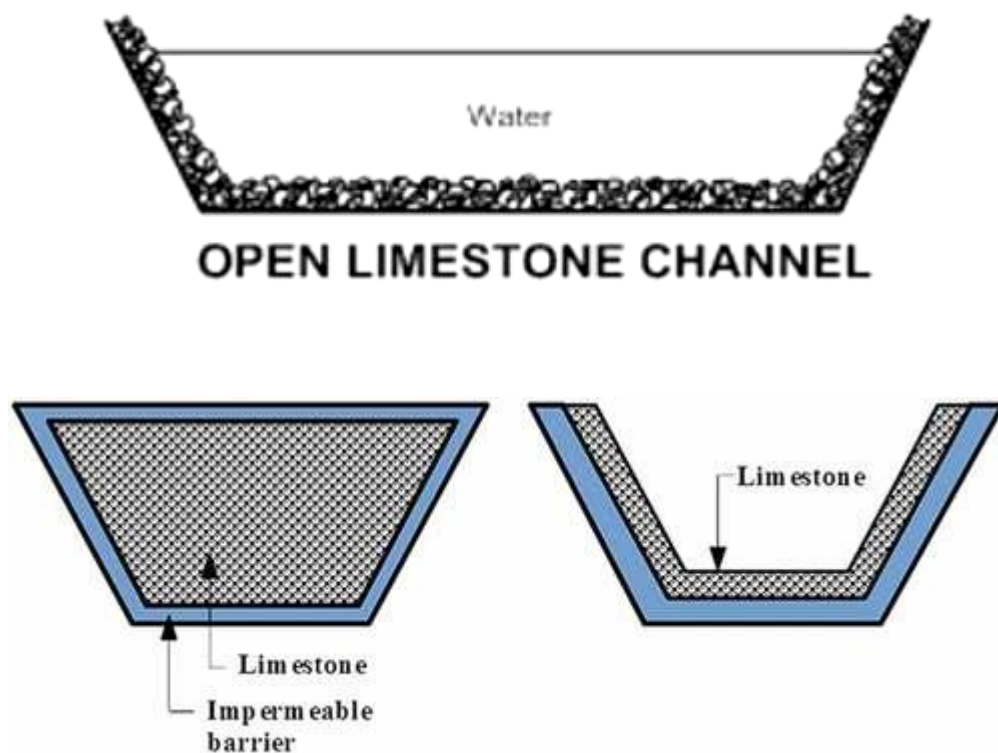
Dosis tawas untuk aplikasi di *settling pond* PT Indexim Coalindo, yang dipakai adalah 0,05 g/L dimana sebelumnya dilakukan penambahan kapur terlebih dahulu untuk menaikkan pH. Metode pemberian kapur dan koagulan dengan cara dicampur dengan air limbah dan diaduk dengan kecepatan 100 rpm. Jumlah penggunaan kapur dan koagulan (tawas/PAC) masing-masing *settling pond* adalah sebagai berikut.

Tabel 4.16 Jumlah Konsumsi Bahan Kimia

SP	Debit Air Limbah (m ³ /hari)	Kebutuhan Kapur (kg)	Kebutuhan Tawas/PAC (kg)
Kasturi 5	29.302,86	3.600	1.800
Rambai	2.575,65	-	-

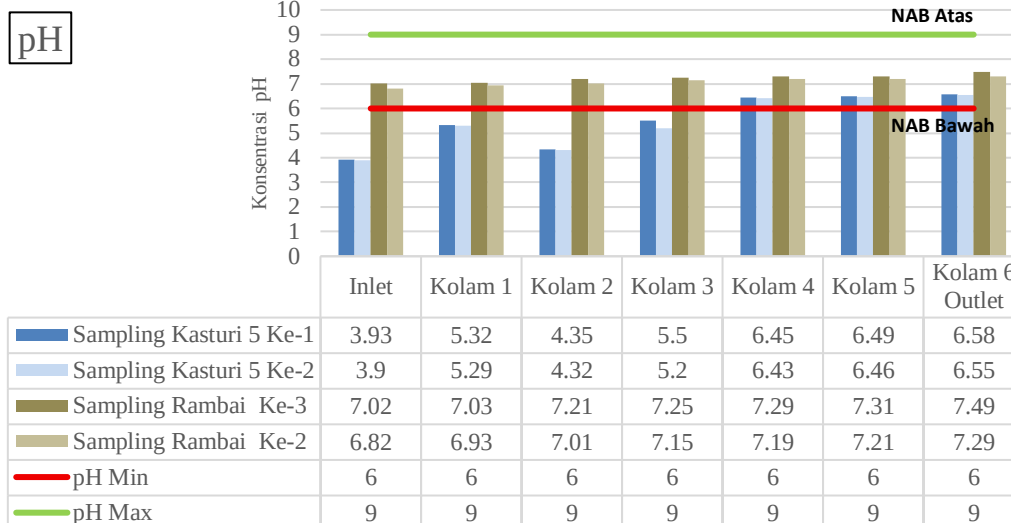
4.3 Analisis Variabel Utama dalam Sampel

Variabel utama yang digunakan sebagai studi kasus dalam perbandingan performa sistem pengelolaan yaitu pH, TSS Fe, dan Mn. Analisis dilakukan menggunakan grafik batang untuk mengetahui perubahan yang terjadi. Hasil pengukuran kualitas air pada dua kali pengambilan sampel digunakan untuk melihat kecenderungan perubahan kualitas air antara metode *active* dan *passive treatment* Gambar 4.4.



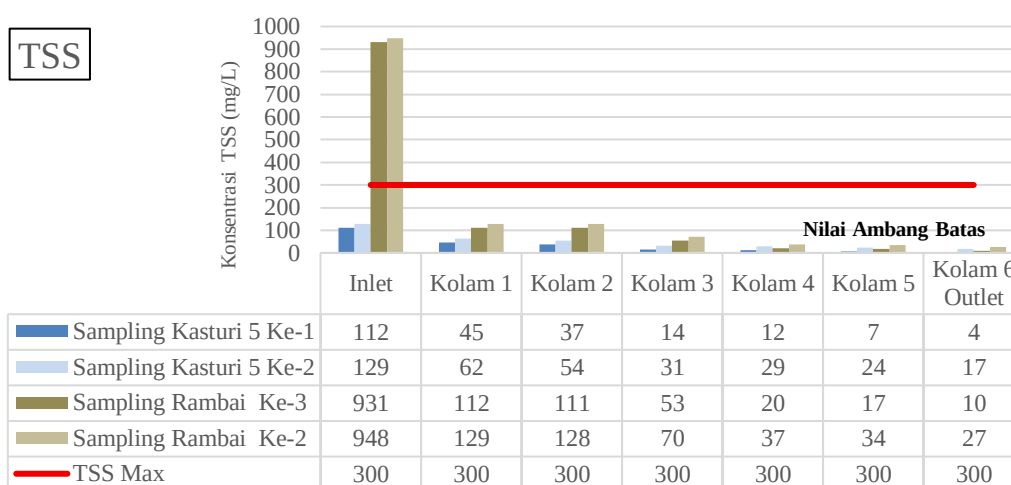
Gambar 4.5 Visualisasi *Passive Treatment* (Open Limestone Channel)

Berdasarkan hasil visualisasi Gambar 4.6, Kasturi 5 memiliki pH awal sangat asam (3,9-3,93) dan naik hingga mendekati netral di outlet (6,55-6,58). Sedangkan Rambai memiliki pH awal sudah netral (6,8-7,02), sedikit meningkat hingga 7,29-7,49 di outlet. Kedua metode menunjukkan peningkatan pH dari inlet ke outlet. Kasturi 5 secara signifikan menaikkan pH hingga 3 poin, menandakan reaksi netralisasi yang cepat dan efektif (Skousen et al., 2017). Sementara Rambai menjaga kestabilan pH, menunjukkan proses alami yang efisien dan berkelanjutan. Dengan demikian, *active treatment* lebih cocok untuk menangani pH rendah, sedangkan *passive treatment* optimal untuk mempertahankan kualitas air pada kondisi netral hingga basa (Younger et al., 2002).



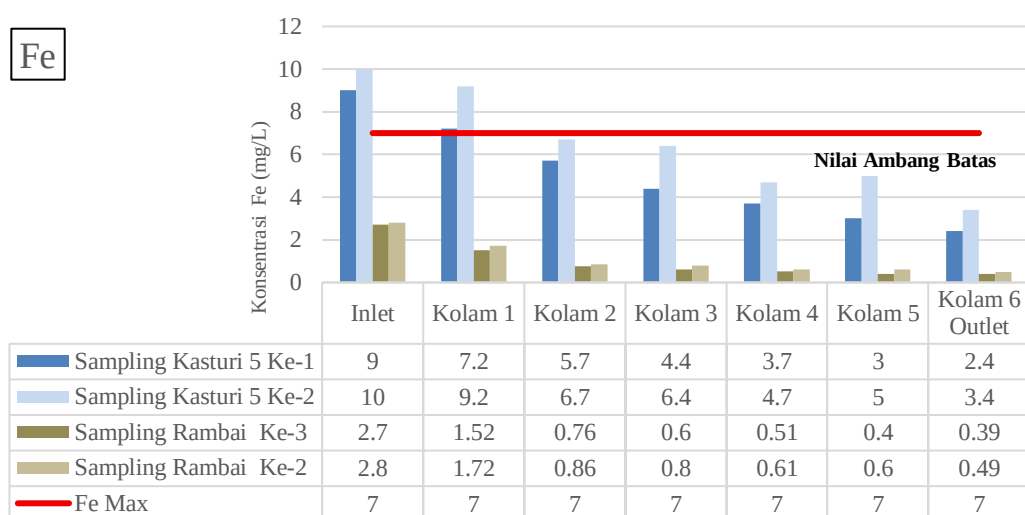
Gambar 4.6 Distribusi pH Seluruh Titik Sampling

Berdasarkan hasil visualisasi Gambar 4.7, Kasturi 5 memiliki TSS awal 112-129 mg/L dan turun menjadi 4-17 mg/l di outlet. Sedangkan Rambai memiliki TSS awal yang sangat tinggi (931-949 mg/L) dan turun hingga 10-27 mg/L di outlet. Kedua metode menunjukkan efektivitas tinggi dalam menurunkan TSS, tetapi melalui mekanisme berbeda. Sistem *active treatment* cepat menurunkan TSS karena reaksi kimia yang mempercepat sedimentasi (Johnson & Hallberg, 2005). Sebaliknya, *passive treatment* memanfaatkan sedimentasi alami, sehingga meskipun lebih lambat, mampu menurunkan TSS hingga 97%. Perbedaan kondisi awal juga berpengaruh karena air di Kasturi 5 lebih asam ($\text{pH} < 4$) sehingga reaksi netralisasi dominan, sedangkan di Rambai air lebih netral dengan kandungan partikel tinggi, memungkinkan proses pengendapan berjalan optimal secara alami (Skousen et al., 2017).



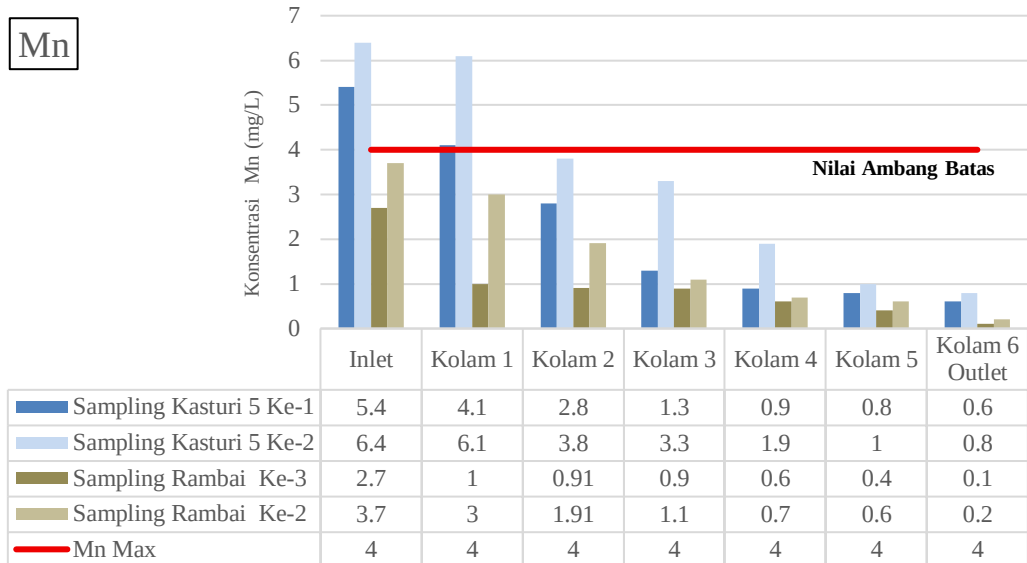
Gambar 4.7 Distribusi TSS Seluruh Titik Sampling

Berdasarkan hasil visualisasi Gambar 4.8, Kasturi 5 memiliki Fe awal yang sangat tinggi (9-10 mg/L) dan turun menjadi 2,4-3,4 mg/l di outlet. Sedangkan Rambai memiliki Fe awal 2,7-2,8 mg/L dan turun hingga 0,39-0,49 mg/L di outlet. Kedua metode berhasil menurunkan Fe jauh di bawah baku mutu lingkungan (PP No.22 Tahun 2021), namun dengan mekanisme yang berbeda. Sistem *active treatment* cepat menurunkan Fe karena reaksi kimia yang mempercepat pengendapannya (Johnson & Hallberg, 2005). Sebaliknya, *passive treatment* memanfaatkan proses alami oksidasi, sehingga meskipun presipitasi lebih lambat, tetapi mampu menurunkan Fe hingga 82,5%. Secara ekologis, outlet dari kedua sistem memiliki konsentrasi Fe di bawah baku mutu (<7 mg/L), yang berarti aman untuk lingkungan perairan dan tidak menimbulkan efek toksik bagi biota akuatik (Skousen et al., 2017).



Gambar 4.8 Distribusi Fe Seluruh Titik Sampling

Berdasarkan hasil visualisasi Gambar 4.9, Kasturi 5 memiliki Mn awal yang tinggi (5,4-6,4 mg/L) dan turun menjadi 0,6-0,8 mg/l di outlet. Sedangkan Rambai memiliki Mn awal 2,7-3,7 mg/L dan turun hingga 0,1-0,2 mg/L di outlet. Kedua metode efektif menstabilkan logam terlarut hingga di bawah baku mutu lingkungan (Perda Kaltim Nomor 2 Tahun 2011). Sistem *active treatment* cepat menurunkan Mn karena peningkatan pH dan aerasi (Ziemkiewicz et al., 2003). Sebaliknya, *passive treatment* memanfaatkan proses oksidasi alami dan aktivitas mikroorganisme pengoksidasi mangan di media *limestone* sehingga meskipun presipitasi lebih lambat, tetapi mampu menurunkan Fe hingga 94,6%. Hal ini menunjukkan bahwa Mn lebih sulit dioksidasi dibandingkan Fe (Hariani, 2017). Akan tetapi kedua sistem mampu mengendapkannya secara efisien berkat kenaikan pH dan waktu retensi yang memadai.



Gambar 4.9 Distribusi Mn Seluruh Titik Sampling

4.4 Analisis Variabel Pendukung dalam Sampel

Efektivitas metode pengolahan AAT sangat dipengaruhi oleh komposisi ionik air, terutama kandungan kation alkali dan alkali tanah. Air asam tambang dengan kandungan Ca dan Mg tinggi memiliki kapasitas penetralan alami yang lebih besar, sehingga metode *passive treatment* dapat bekerja lebih efektif. Sebaliknya, AAT dengan Ca/Mg rendah dan pH sangat asam memerlukan *active treatment* menggunakan bahan alkali eksternal (Skousen et al., 2017). Kandungan Na dan K yang tinggi tidak berkontribusi terhadap netralisasi dan dapat meningkatkan total padatan terlarut, yang berpotensi mengurangi efisiensi sistem pasif (Younger et al., 2002).

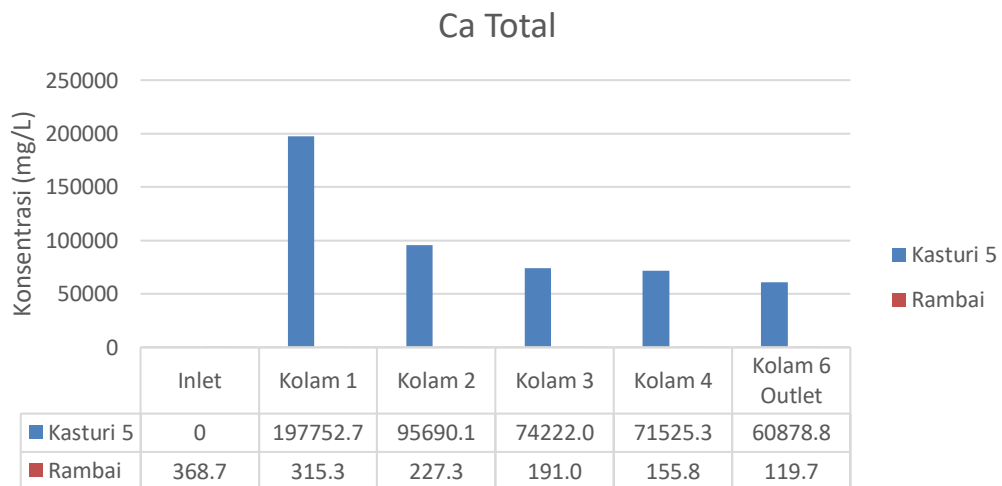
Sistem pengolahan *active treatment* lebih efektif untuk kondisi asam yang ekstrem dengan kandungan Fe, Mn, Al, dan SO_4^{2-} tinggi, karena mampu meningkatkan pH secara cepat dan mengendapkan logam berat secara kimia (Hariani, 2017). Sementara itu, *passive treatment* efektif pada AAT dengan Ca dan Mg tinggi serta beban logam rendah, karena proses biologis dan reaksi karbonat masih dapat bekerja stabil. Dengan demikian, analisis komposisi ionik (Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, Al, dan sulfat) menjadi dasar penting dalam menentukan metode pengolahan AAT yang paling efisien dan ramah lingkungan.

4.4.1 Hasil Uji Ca Total

Berdasarkan Gambar 4.10, konsentrasi kalsium (Ca) pada sistem *active treatment* menunjukkan pola penurunan dari inlet hingga outlet. Nilai

tertinggi tercatat di Kolam 1 (197.752,7 mg/L) yang kemungkinan besar dipengaruhi oleh penambahan CaCO_3 secara langsung ke dalam sistem dimana CaCO_3 disuspensikan agar cepat bereaksi dengan air asam. Setelahnya, terjadi penurunan bertahap dari kolam 2 hingga outlet (60.878,8 mg/L) yang menandakan proses presipitasi dan sedimentasi dari ion Ca yang telah bereaksi membentuk endapan seperti CaSO_4 atau CaCO_3 baru (Younger et al., 2002).

Sementara itu, pada sistem *passive treatment*, kadar Ca sangat rendah (368,7 mg/L) menjadi 119,7 mg/L di outlet, namun perubahannya lebih stabil dan lambat dikarenakan mekanisme OLC bergantung pada reaksi kontak antara air asam dan permukaan batu gamping alami, bukan pada reaksi langsung dengan serbuk kapur (Ziemkiewicz et al., 2003). Secara umum, kadar Ca yang tinggi di awal dan menurun di akhir menunjukkan proses netralisasi yang berjalan baik pada kedua metode dengan efisiensi yang lebih cepat pada metode *active treatment*.



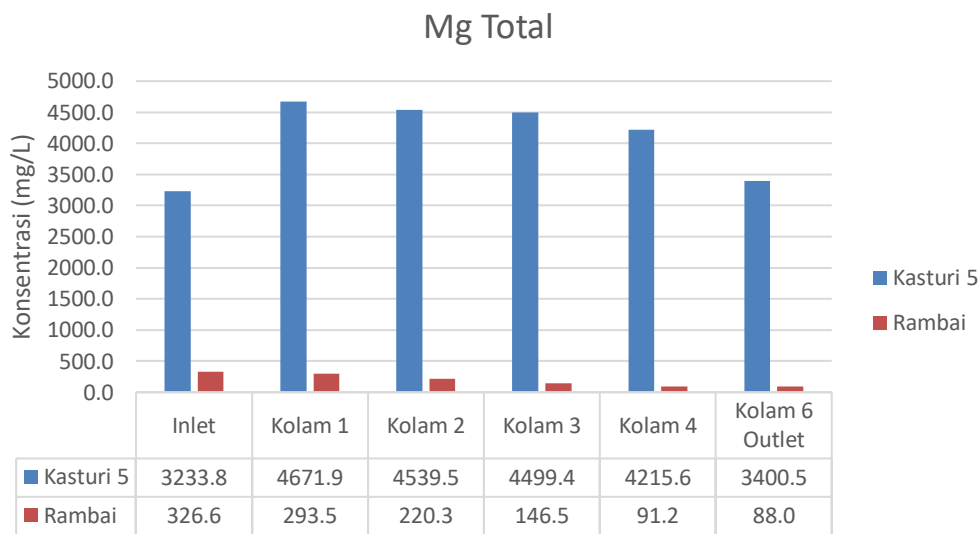
Gambar 4.10 Hasil Uji Ca Total

4.4.2 Hasil Konsentrasi Mg Total

Berdasarkan Gambar 4.11, konsentrasi Mg pada sistem *active treatment* menunjukkan nilai cukup tinggi dan relatif stabil, berkisar antara 3.233,8 mg/L hingga 4.671,9 mg/L, dengan sedikit penurunan di bagian outlet 3.400,5 mg/L). Hal ini menunjukkan bahwa magnesium tidak banyak terlibat dalam reaksi netralisasi utama, namun berperan sebagai buffer tambahan dalam menjaga kestabilan pH (Younger et al., 2002). Penurunan kecil di akhir menunjukkan kemungkinan presipitasi sebagai $\text{Mg}(\text{OH})_2$ pada

pH basa.

Sementara itu, pada sistem *passive treatment*, kadar Mg sangat rendah (sekitar 88,0–326,6 mg/L) dan relatif stabil dari inlet hingga outlet. Nilai yang kecil ini menandakan bahwa batu kapur pada OLC tidak melepaskan magnesium secara signifikan, mengingat reaksi kontakannya terbatas dan dominan hanya pada kalsium karbonat. Secara umum, nilai Mg pada metode *active treatment* lebih tinggi karena pengadukan dan pencampuran material kapur yang lebih intensif memungkinkan pelepasan ion Mg dari bahan kapur yang digunakan (Ziemkiewicz et al., 2003).

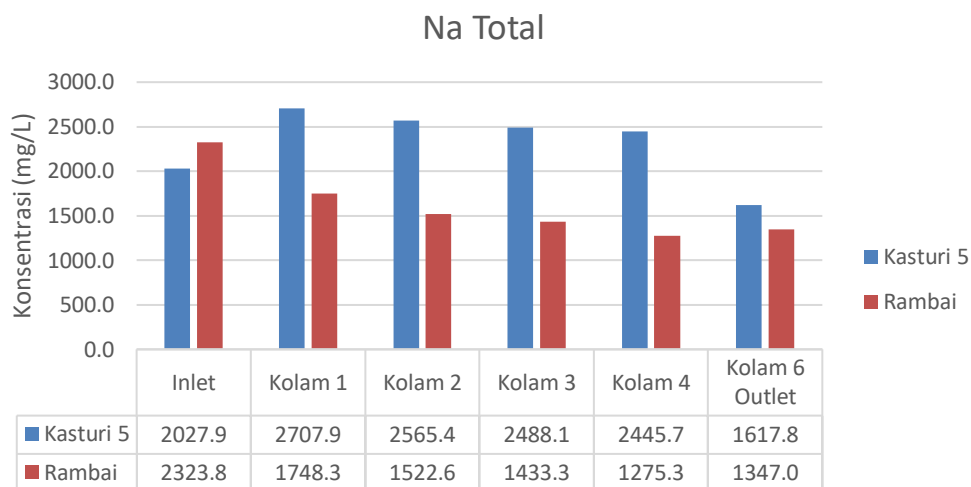


Gambar 4.11 Hasil Uji Mg Total

4.4.3 Hasil Konsentrasi Na Total

Berdasarkan Gambar 4.12, konsentrasi natrium (Na) di sistem *active treatment* tergolong rendah dan berfluktuasi kecil dari 2.027,9 mg/L di inlet menjadi 1.617,8 mg/L di outlet, menunjukkan bahwa proses pengolahan tidak terlalu memengaruhi kandungan Na. Ion ini bersifat konservatif dan tidak terlibat langsung dalam reaksi netralisasi asam, sehingga keberadaannya lebih merefleksikan komposisi alami air tambang (Younger et al., 2002).

Pada sistem *passive treatment*, kadar Na juga rendah dan menurun dari 2.323,8 mg/L di inlet menjadi 1.347,0 mg/L di outlet. Penurunan ini mungkin disebabkan oleh proses adsorpsi ringan pada permukaan batu kapur atau pengendapan senyawa sekunder (Ziemkiewicz et al., 2003). Secara umum, perubahan pada Na bersifat minimal pada kedua sistem, menegaskan bahwa ion ini tidak menjadi parameter utama dalam menilai efektivitas pengelolaan air asam tambang.

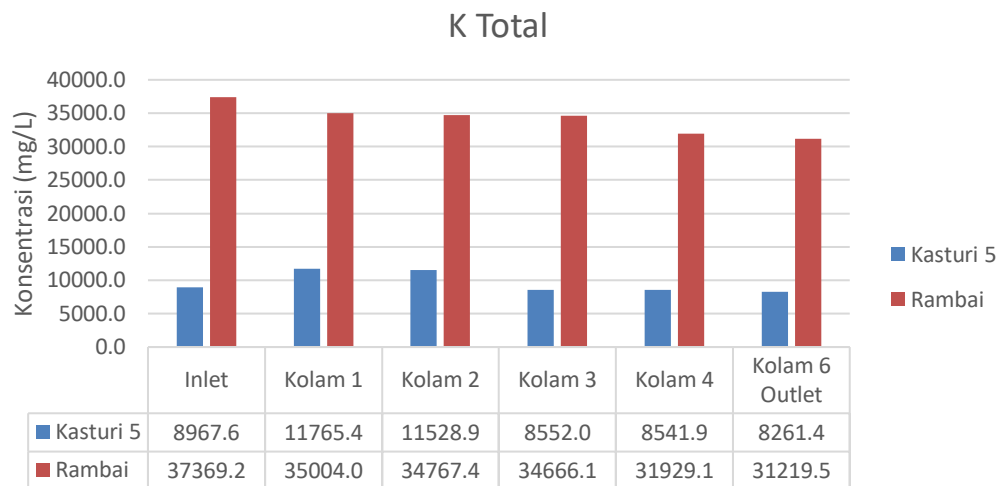


Gambar 4.12 Hasil Uji Na Total

4.4.4 Hasil Konsentrasi K Total

Berdasarkan Gambar 4.13, konsentrasi kalium (K) pada sistem *active treatment* menunjukkan tren penurunan bertahap dari 8967,6 mg/L di inlet menjadi 8.261,4 mg/L di outlet. Penurunan ini mengindikasikan bahwa sebagian ion K mungkin ikut teradsorpsi atau terperangkap dalam sedimen karbonat yang terbentuk selama proses pengendapan logam (Younger et al., 2002). Di sisi lain, sistem *passive treatment* memiliki kadar K yang jauh lebih tinggi di awal (37.369,2 mg/L) dan menurun hingga 31.219,5 mg/L di outlet.

Hal ini mengindikasikan bahwa OLC tidak hanya memengaruhi ion logam berat, tetapi juga memungkinkan difusi alami unsur hara seperti kalium. Karena kontaknya bersifat alami dan lambat, proses pelarutan mineral tanah atau batuan di sekitarnya masih dapat terjadi, menyebabkan kadar K relatif tinggi di seluruh sistem (Ziemkiewicz et al., 2003). Secara keseluruhan, *active treatment* lebih efektif menurunkan kadar K, sedangkan *passive treatment* mempertahankannya dalam kisaran yang lebih stabil.

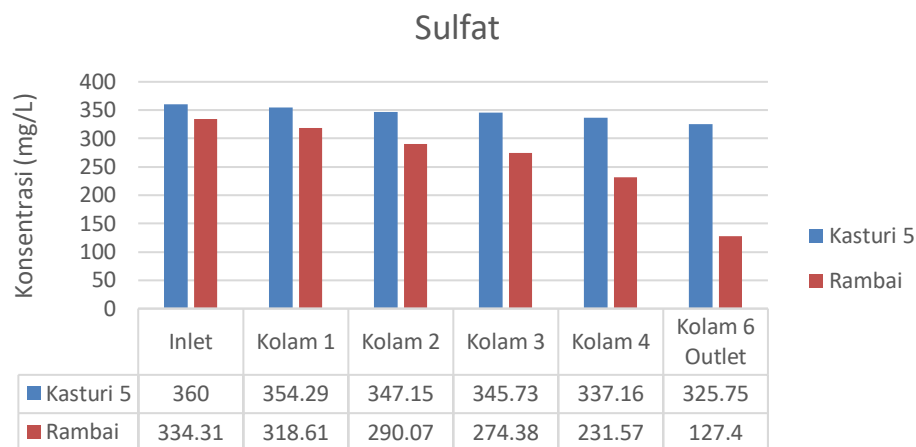


Gambar 4.13 Hasil Uji K Total

4.4.5 Kadar Sulfat dalam Sampel

Parameter sulfat menjadi salah satu indikator penting keberhasilan pengelolaan air asam tambang. Berdasarkan Gambar 4.14, konsentrasi sulfat pada sistem *active treatment* menurun signifikan dari 360 mg/L di inlet menjadi 325,75 mg/L di outlet, menandakan terjadinya reaksi antara ion sulfat dengan kalsium hasil pelarutan kapur yang membentuk endapan gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Younger et al., 2002). Penurunan ini relatif kecil namun konsisten, mencerminkan reaksi kimia yang cepat dan efektif.

Pada sistem *passive treatment*, penurunan kadar sulfat lebih besar dan bertahap dari 334,31 mg/L di inlet hingga 127,40 mg/L di outlet, menunjukkan bahwa sistem OLC mampu menurunkan sulfat dengan mekanisme difusi dan presipitasi alami. Penurunan yang lebih signifikan dibandingkan sistem *active* dapat disebabkan oleh waktu kontak yang lebih panjang dan proses biologis tambahan, seperti aktivitas bakteri pereduksi sulfat (Ziemkiewicz et al., 2003). Dengan demikian, meskipun reaksi awal lebih lambat, sistem *passive* memberikan hasil akhir yang lebih optimal untuk pengurangan sulfat.

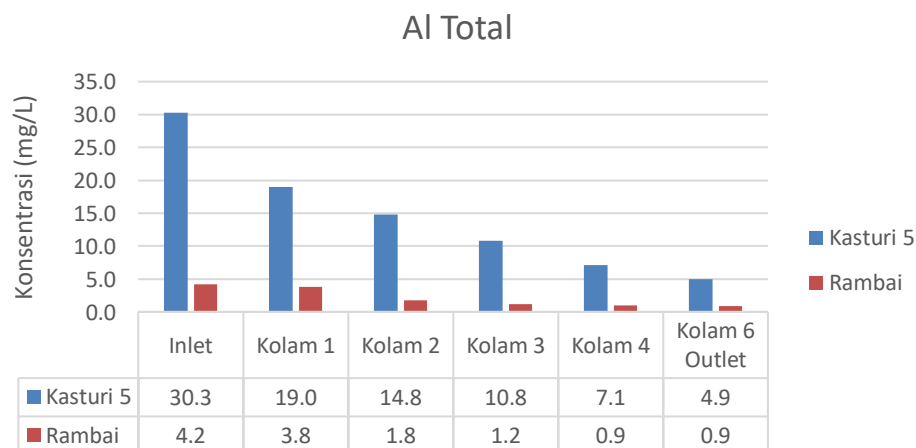


Gambar 4.14 Hasil Uji Sulfat

4.4.6 Kadar Al Total dalam Sampel

Berdasarkan Gambar 4.15, konsentrasi aluminium menunjukkan penurunan di kedua sistem, dengan tren yang lebih tajam pada *active treatment*. Pada sistem *active*, nilai Al berkurang dari 30,3 mg/L di inlet menjadi 4,9 mg/L di outlet, menunjukkan presipitasi efektif akibat kenaikan pH dari reaksi netralisasi CaCO_3 . Aluminium yang semula larut dalam kondisi asam ($\text{pH} < 4$) akan mengendap sebagai $\text{Al}(\text{OH})_3$ ketika pH meningkat di atas 5,5 (Younger et al., 2002).

Pada sistem *passive*, kadar Al juga menurun dari 4,2 mg/L di inlet menjadi 0,9 mg/L di outlet, namun prosesnya lebih bertahap. Penurunan ini menandakan bahwa sistem OLC cukup efektif meningkatkan pH secara perlahan hingga memungkinkan terbentuknya endapan $\text{Al}(\text{OH})_3$ di kolam-kolam akhir (Ziemkiewicz et al., 2003). Meskipun efektivitasnya sedikit di bawah *active treatment*, mekanisme alami pada OLC cenderung lebih stabil dan berkelanjutan dalam jangka panjang (Johnson & Hallberg, 2005).



Gambar 4.15 Hasil Uji Al Total

Secara keseluruhan, data menunjukkan bahwa *active treatment* (CaCO_3) bekerja lebih cepat dan efisien dalam meningkatkan konsentrasi Ca dan menurunkan logam seperti Al melalui reaksi netralisasi yang langsung dan intensif. Namun, *passive treatment* (OLC) menunjukkan kemampuan yang lebih baik dalam penurunan sulfat dan kestabilan ion-ion pendukung seperti K dan Mg, berkat waktu tinggal yang lebih panjang dan interaksi alami antar komponen batuan.

Dengan demikian, kedua sistem memiliki keunggulan masing-masing: *active treatment* unggul dalam reaksi cepat dan peningkatan pH, sedangkan *passive treatment* unggul dalam efisiensi jangka panjang dan kestabilan kualitas air keluaran.

4.5 Performa Kualitas AAT

Pemantauan performa setiap sistem dilakukan 2 kali untuk dilakukan evaluasi, sehingga diharapkan hasil evaluasi dapat digunakan dalam melakukan perbaikan sistem yang lebih baik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *active treatment* memberikan peningkatan pH yang sangat cepat dan signifikan, terutama pada kondisi air yang sangat asam seperti Kasturi 5. Peningkatan pH dari 3,90–3,93 menjadi 6,55–6,58 menunjukkan bahwa reaksi netralisasi berjalan efektif, sejalan dengan temuan Skousen et al. (2017) bahwa pemberian kapur menghasilkan peningkatan pH yang cepat dan stabil. Pada Rambai, yang memiliki pH awal netral (6,80–7,02), peningkatan pH ke rentang 7,29–7,49 menunjukkan bahwa sistem yang digunakan lebih berfungsi sebagai stabilisasi akhir, bukan netralisasi utama.

Untuk TSS, Kasturi 5 dan Rambai keduanya menunjukkan penurunan besar, namun Rambai memiliki beban awal jauh lebih tinggi (931–949 mg/L) dibandingkan Kasturi (112–129 mg/L). Meskipun demikian, keduanya berhasil mencapai nilai rendah di outlet (4–27 mg/L). Hal ini sesuai dengan teori *passive treatment* bahwa sedimentasi alami dapat mengurangi TSS secara signifikan bila waktu retensi memadai (Skousen et al., 2017).

Pada parameter Fe dan Mn, kedua lokasi menunjukkan penurunan tajam. Kasturi 5 mengalami penurunan Fe dari 9–10 mg/L menjadi 2,4–3,4 mg/L, sementara Rambai turun dari 2,7–2,8 mg/L menjadi 0,39–0,49 mg/L. Penurunan Mn pun signifikan, terutama pada Rambai yang mencapai nilai akhir 0,1–0,2 mg/L. Hal ini mendukung literatur yang menyatakan bahwa kombinasi oksidasi, netralisasi, dan pengendapan mampu menurunkan logam terlarut secara efektif (Johnson & Hallberg, 2005).

Perbedaan efektivitas kedua metode dipengaruhi oleh mekanisme reaksi, waktu retensi, dan kondisi geokimia awal AAT. Pengelolaan *active treatment* efektif karena reaksi netralisasi antara alkalin dan ion H^+ berlangsung cepat dan koagulasi dan flokulasi mempercepat pengendapan padatan tersuspensi (Skousen et al., 2017). Namun metode ini memiliki kelemahan berupa biaya operasional tinggi dan pemeliharaan rutin (Hedin, 2020). Sebaliknya *passive treatment* bergantung pada proses alami seperti pelarutan batu kapur, aktivitas mikroba sulfat-reduksi, dan sedimentasi alami (Skousen et al., 2017), akan tetapi keunggulan pengelolaan ini mencakup biaya operasional rendah, tidak membutuhkan energi eksternal, dan dapat berfungsi jangka panjang dengan perawatan minimal (Younger et al., 2002).

Secara keseluruhan, temuan penelitian mendukung penelitian sebelumnya bahwa *active treatment* lebih unggul untuk peningkatan pH, sementara *passive treatment* memiliki keunggulan ekonomis dan berpotensi efektif untuk pengurangan TSS jika dirancang dengan benar. Kombinasi kedua metode dapat menghasilkan hasil optimum, misalnya dengan menggunakan *active treatment* untuk penyesuaian pH cepat, diikuti *passive treatment* untuk stabilisasi kualitas air.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Nilai pH pada metode *active treatment* menunjukkan peningkatan signifikan dari inlet dengan pH 3,1–3,3 menuju outlet di kisaran 6,7–7,1, sedangkan pada *passive treatment*, kenaikan pH juga terjadi dari pH 3,2–3,4 di inlet menjadi sekitar 6,1–6,5 di outlet. Kadar TSS pada *active treatment* menurun drastis dari 112–129 mg/L di inlet menjadi 4–17 mg/L di outlet, sementara pada *passive treatment*, nilai TSS awal jauh lebih tinggi (931–948 mg/L) namun juga menurun signifikan hingga 10–27 mg/L di outlet. Konsentrasi Fe pada *active treatment* menurun dari 9–10 mg/L di inlet menjadi 2,4–3,4 mg/L di outlet, sedangkan pada *passive treatment* penurunan Fe lebih besar dari 2,7–2,8 mg/L di inlet menjadi 0,39–0,49 mg/L di outlet. Berdasarkan nilai baku mutu AAT dalam Perda Kaltim Nomor 2 Tahun 2011 bahwa pH, TSS, Fe, dan Mn tidak melebihi ambang batas yang ditetapkan.
2. *Active treatment* bekerja lebih cepat dalam menaikkan pH dan menurunkan kadar logam (Fe, Mn, dan Al) serta TSS, dikarenakan reaksi netralisasi langsung dan cepat. Sedangkan *passive treatment* bekerja lebih lambat tetapi lebih stabil, dengan penurunan yang konsisten pada sulfat dan Mn, serta menjaga pH tetap netral.
3. Faktor yang berkontribusi terhadap kinerja kedua metode pada *active treatment* dikarenakan reaktivitas kimia yang tinggi (CaCO_3) dan waktu reaksi yang cepat, sehingga penurunan logam dan peningkatan pH signifikan, sedangkan *passive treatment* unggul karena stabilitas geokimia dan biologis dengan proses sedimentasi yang lebih lambat tetapi konsisten, sehingga menghasilkan air netral dengan beban ionik lebih rendah.

5.2 Saran

Adapun saran yang perlu diperhatikan bagi peneliti selanjutnya yang memiliki ketertarikan mengenai pengelolaan air asam tambang khususnya dalam metode *active treatment* dan *passive treatment* cocok untuk penanganan cepat atau kondisi ekstrem (pH sangat rendah, logam tinggi), sedangkan *passive treatment* lebih cocok untuk pengendalian jangka panjang dengan biaya dan risiko lingkungan lebih rendah. Kombinasi keduanya bahkan dapat menghasilkan sistem pengolahan air asam tambang yang efisien seperti *active treatment* di awal untuk netralisasi cepat, diikuti *passive system* untuk stabilisasi akhir.

DAFTAR PUSTAKA

- Akcil, A., & Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): Causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 14(12-13), 1139-1145.
- Badan Standarisasi Nasional. 2019. Cara Uji Kadar Logam Terlarut dan Logam Total Secara Spektrometri Serapan Atom (SSA)-nyala. SNI 6989.84:2029. Jakarta: BSN.
- Blowes, D. W., Ptacek, C. J., Jambor, J. L., & Weisener, C. G. (2014). The geochemistry of acid mine drainage. In *Treatise on Geochemistry* (pp. 131–190). Elsevier.
- Cravotta, C. A. (2008). Dissolved metals and associated constituents in abandoned coal-mine discharges, Pennsylvania, USA. *Applied Geochemistry*, 23(2), 203–226.
- Effendi, H. (2003). *Telaah Kualitas Air: Bagi Pengelolaan Sumberdaya dan Lingkungan Perairan*. Kanisius.
- Gray, N. F. (1997). Environmental impact and remediation of acid mine drainage: A management problem. *Environmental Geology*, 30(1–2), 62–71.
- Hedin, R. S., Nairn, R. W., & Kleinmann, R. L. (1994). Passive treatment of coal mine drainage. Bureau of Mines Information Circular 9389.
- Johnson, D. B., & Hallberg, K. B. (2005). Acid mine drainage remediation options: A review. *Science of the Total Environment*, 338(1–2), 3–14.
- Kefeni, K. K., & Mamba, B. B. (2020). Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. *Journal of Cleaner Production*, 260, 120970. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120970>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2021). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*. KLHK.
- Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 113 Tahun 2003 tentang Baku Mutu Air Limbah Kegiatan Pertambangan Batu Bara.
- Kirby, C. S., Thomas, H. M., Southam, G., & Donald, R. (1999). Relative contributions of biological and chemical mechanisms to Fe(II) oxidation in constructed wetlands. *Hydrobiologia*, 384(1-3), 187–196.
- Misran, A., Syahrani, I., & Prasetyo, D. (2020). Analisis kualitas air asam tambang pada sistem pengendapan di area tambang batubara Kalimantan Selatan. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 16(3), 129–140.
- Mulyani, R., & Santoso, D. (2022). Evaluasi penerapan baku mutu air tambang pada kegiatan penambangan batubara di Kalimantan Timur. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 18(2), 75–84.
- Nordstrom, D. K., & Alpers, C. N. (1999). Geochemistry of Acid Mine Waters. In *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits* (pp. 133-160). Society of Economic Geologists.

- Pratiwi, D., Yuliani, N., & Sari, R. (2021). Kajian kualitas air asam tambang di area pengolahan batubara Sumatera Selatan. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 7(2), 56–65.
- Peppas, A., Komnitsas, K., & Halikia, I. (2000). Use of organic covers for acid mine drainage control. *Minerals Engineering*, 13(5), 563-57
- Peraturan Daerah Kalimantan Timur No.2 Tahun 2011 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air.
- Simate, G. S., & Ndlovu, S. (2014). Acid mine drainage: Challenges and opportunities. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(3), 1785–1803.
- Skousen, J., Ziemkiewicz, P., & McDonald, L. M. (2017). Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and technologies. *The Extractive Industries and Society*, 4(1), 241–249. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2016.12.001>
- Tiwary, R. K. (2001). Environmental impact of coal mining on water regime and its management. *Water, Air, and Soil Pollution*, 132(1–2), 185–199.
- Younger, P. L., Banwart, S. A., & Hedin, R. S. (2002). *Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation*. Springer.
- Ziemkiewicz, P. F., Skousen, J. G., & Simmons, J. (2003). Long-term performance of passive and active acid mine drainage treatment systems. *Mine Water and the Environment*, 22(4), 183–190.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Uji AAT *In-situ*

1. Hasil Uji pH SP Kasturi 5 dengan Hach DR900

Sampel Label SP Kasturi 5	Baku Mutu		Sampling ke-1	Sampling ke-2
	pH Min	pH Max		
K in	6.0	9.0	3.93	3.90
K1	6.0	9.0	5.32	5.29
K2	6.0	9.0	4.35	4.32
K3	6.0	9.0	5.50	5.20
K4	6.0	9.0	6.45	6.43
K5	6.0	9.0	6.49	6.46
K Out	6.0	9.0	6.58	6.55

2. Hasil Uji pH SP Rambai dengan Hach DR900

Sampel Label SP Rambai	Baku Mutu		Sampling ke-1	Sampling ke-2
	pH Min	pH Max		
R in	6.0	9.0	7.02	6.82
R1	6.0	9.0	7.03	6.93
R2	6.0	9.0	7.21	7.01
R3	6.0	9.0	7.25	7.15
R4	6.0	9.0	7.29	7.19
R5	6.0	9.0	7.31	7.21
R Out	6.0	9.0	7.49	7.29

3. Hasil Uji TSS SP Kasturi 5 dengan Hach DR900

Sample Label SP Kasturi 5	Baku Mutu	Sampling ke-1	Sampling ke-2
		(mg/L)	(mg/L)
K in	300	112	129
K1	300	45	62
K2	300	37	54
K3	300	14	31
K4	300	12	29
K5	300	7	24
K Out	300	4	17

4. Hasil Uji TSS SP Rambai dengan Hach DR900

Sample Label SP Kasturi 5	Baku Mutu	Sampling ke-1	Sampling ke-2
		(mg/L)	(mg/L)
K in	300	931	948

K1	300	112	129
K2	300	111	128
K3	300	53	70
K4	300	20	37
K5	300	17	34
K Out	300	10	27

5. Hasil Uji Fe SP Kasturi 5 dengan Hach DR900

Sample Label SP Kasturi 5	Baku Mutu	Sampling ke-1 (mg/L)	Sampling ke-2 (mg/L)
K in	7.0	9.0	10.0
K1	7.0	7.2	9.2
K2	7.0	5.7	6.7
K3	7.0	4.4	6.4
K4	7.0	3.7	4.7
K5	7.0	3.0	5.0
K Out	7.0	2.4	3.4

6. Hasil Uji Fe SP Rambai dengan Hach DR900

Sample Label SP Rambai	Baku Mutu	Sampling ke-1	Sampling ke-2
R in	7.0	2.7	2.8
R1	7.0	1.52	1.72
R2	7.0	0.76	0.86
R3	7.0	0.6	0.8
R4	7.0	0.51	0.61
R5	7.0	0.4	0.6
R Out	7.0	0.39	0.49

7. Hasil Uji Fe Mn Kasturi 5 dengan Hach DR900

Sample Label SP Kasturi 5	Baku Mutu	Sampling ke-1 (mg/L)	Sampling ke-2 (mg/L)
K in	4.0	5.4	6.4
K1	4.0	4.1	6.1
K2	4.0	2.8	3.8
K3	4.0	1.3	3.3
K4	4.0	0.9	1.9
K5	4.0	0.8	1.0
K Out	4.0	0.6	0.8

8. Hasil Uji Mn SP Rambai dengan Hach DR900

Sample Label SP Rambai	Baku Mutu	Sampling ke-1	Sampling ke-2
R in	4.0	2.7	3.7
R1	4.0	1.0	3.0
R2	4.0	0.91	1.91
R3	4.0	0.9	1.1
R4	4.0	0.6	0.7
R5	4.0	0.4	0.6
R Out	4.0	0.1	0.2

Lampiran 2. Pengujian Sampel di Laboratorium JTL UII

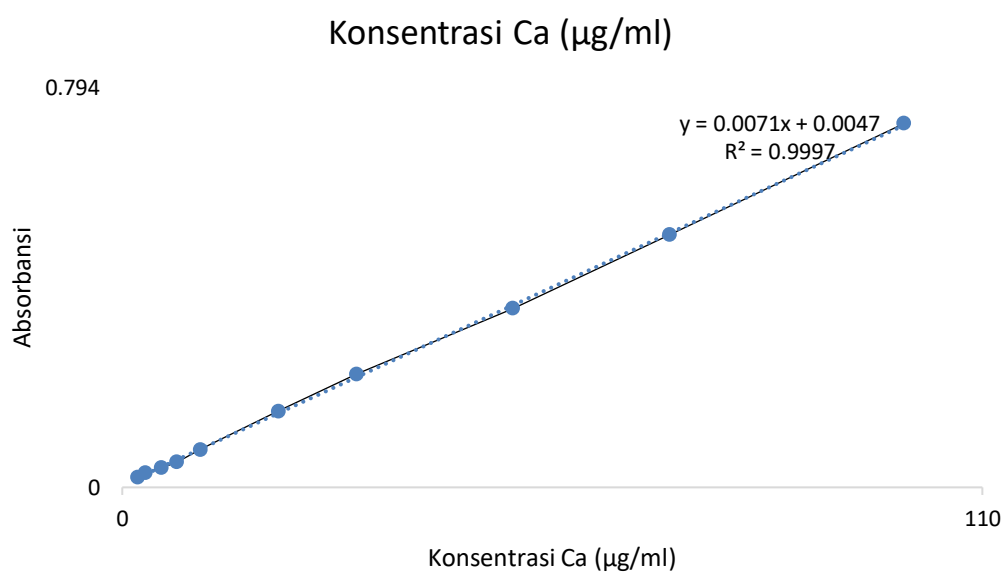
Sample Label	Parameter	Instrumen	Mean Abs.	Pengenceran
K in	Ca	AAS	0.0013	10 x
	Mg		0.6105	10 x
	Na		0.5011	10 x
	K		0.5606	10 x
	Al	ICP-MS	435256.55	10 x
	Sulfat	UV-Vis	0.216	10 x
K1	Ca	AAS	0.0329	10 x
	Mg		0.8365	200 x
	Na		0.5704	10 x
	K		0.7262	10 x
	Al	ICP-MS	172958.16	10 x
	Sulfat	UV-Vis	0.212	10 x
K2	Ca	AAS	0.2779	10 x
	Mg		0.8157	10 x
	Na		0.5559	10 x
	K		0.7122	10 x
	Al	ICP-MS	270469.13	10 x
	Sulfat	UV-Vis	0.207	10 x
K3	Ca	AAS	0.2166	10 x
	Mg		0.8094	10 x
	Na		0.5480	10 x
	K		0.5360	10 x
	Al	ICP-MS	232744.00	10 x
	Sulfat	UV-Vis	0.206	10 x
K4	Ca	AAS	0.2089	10 x
	Mg		0.7648	10 x
	Na		0.5437	10 x
	K		0.5354	10 x
	Al	ICP-MS	221723.93	10 x
	Sulfat	UV-Vis	0.200	10 x
K Out	Ca	AAS	0.1785	10 x
	Mg		0.6367	10 x
	Na		0.4593	10 x
	K		0.5188	10 x
	Al	ICP-MS	156990.38	10 x
	Sulfat	UV-Vis	0.192	10 x
R in	Ca	AAS	0.1981	10 x
	Mg		0.6736	10 x

R1	Na		0.5313	10 x
	K		0.1404	200 x
	Al	ICP-MS	155076.53	10 x
	Sulfat	UV-Vis	0.198	10 x
	Ca		0.1672	10 x
	Mg	AAS	0.6484	10 x
	Na		0.4726	10 x
	K		0.1334	200 x
R2	Al	ICP-MS	174906.49	10 x
	Sulfat	UV-Vis	0.187	10 x
	Ca		0.1597	10 x
	Mg	AAS	0.6469	10 x
	Na		0.4496	10 x
	K		0.1327	200 x
	Al	ICP-MS	126447.11	10 x
	Sulfat	UV-Vis	0.167	10 x
R3	Ca		0.1214	10 x
	Mg	AAS	0.6053	10 x
	Na		0.4405	10 x
	K		0.1324	200 x
	Al	ICP-MS	109856.21	10 x
	Sulfat	UV-Vis	0.156	10 x
	Ca		0.1170	10 x
	Mg	AAS	0.5966	10 x
R4	Na		0.4244	10 x
	K		0.1243	200 x
	Al	ICP-MS	109184.74	10 x
	Sulfat	UV-Vis	0.126	10 x
	Ca		0.0880	10 x
	Mg	AAS	0.5961	10 x
	Na		0.4317	10 x
	K		0.1222	200 x
R Out	Al	ICP-MS	79975.38	10 x
	Sulfat	UV-Vis	0.053	10 x

Lampiran 3. Hasil Pengukuran Serapan Sampel di Laboratorium JTL UII

1. Hasil Uji Ca Total dengan AAS

Sample Label	Conc (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.
Table Blank	-	-	0.0000
Standard 7	2.0000	-	0.0197
Standard 5	3.0000	-	0.0292
Standard 6	5.0000	-	0.0390
Standard 7	7.0000	-	0.0501
Standard 8	10.0000	-	0.0748
Standard 8	20.0000	-	0.1510
Standard 9	30.0000	-	0.2250
Standard 10	50.0000	-	0.3550
Standard 9	70.0000	-	0.5010
Standard 10	100.0000	-	0.7220

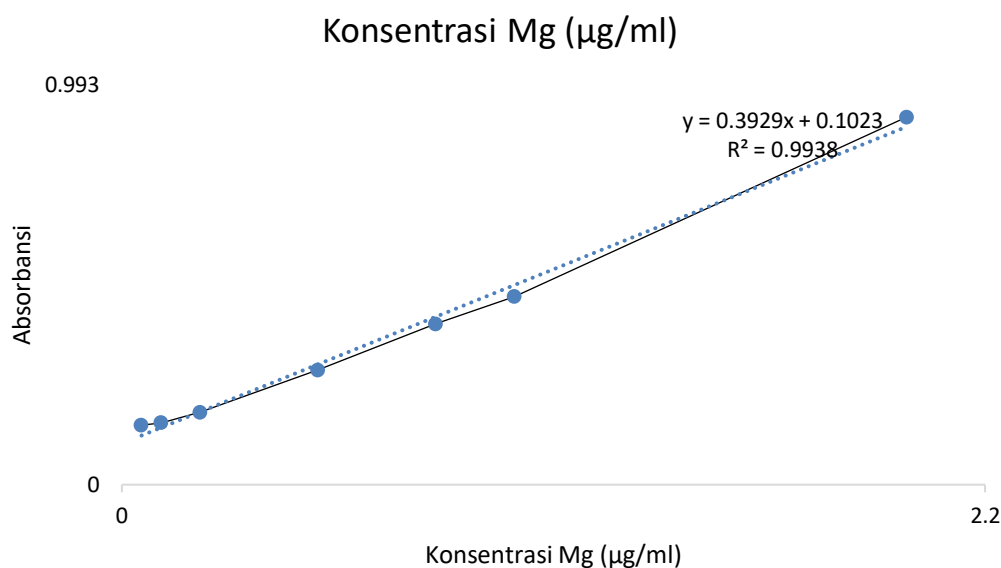


Sample Label	Conc (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.
Sample Blank		HIGH	-0.0007
K in	<1.23	13.00	0.0013
K1	3.955	3.23	0.0329
K2	38.276	0.47	0.2779
K3	29.689	7.13	0.2166
K4	28.610	1.16	0.2089
K Out	24.352	1.47	0.1785
R in	0.147	4.22	0.0057
R1	0.126	3.00	0.0056

R2	0.091	0.72	0.0053
R3	0.076	1.42	0.0052
R4	0.062	1.10	0.0051
R Out	0.048	1.21	0.0050

2. Hasil Uji Mg Total dengan AAS

Sample Label	Conc (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.
Table Blank	-	-	0.0000
Standard 1	0.050	-	0.1477
Standard 2	0.100	-	0.1536
Standard 3	0.200	-	0.1800
Standard 4	0.500	-	0.2843
Standard 5	0.800	-	0.3991
Standard 6	1.000	-	0.4662
Standard 7	2.000	-	0.9120

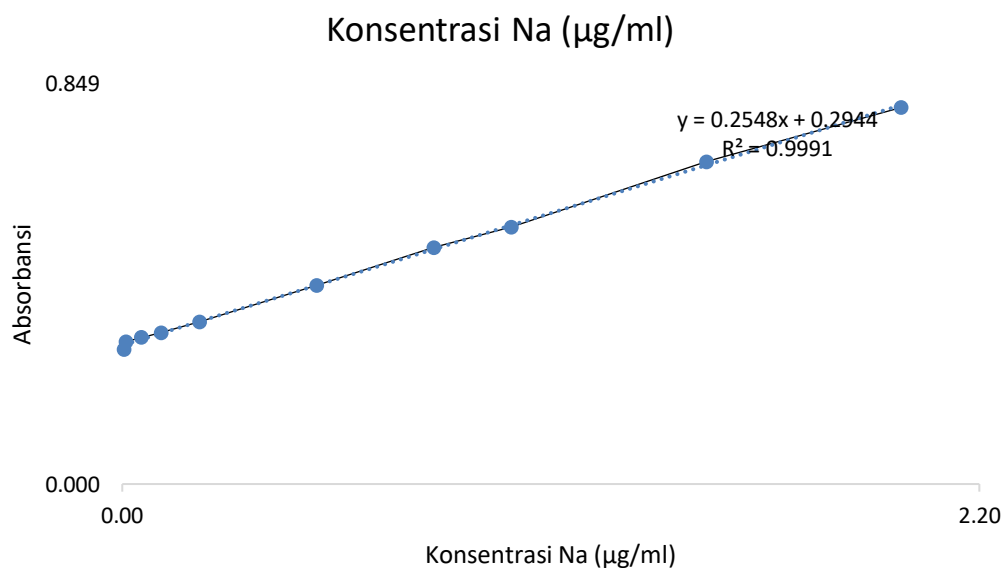


Sample Label	Conc (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.
Sample Blank		HIGH	-0.0272
K in	1.294	0.48	0.6105
K1	1.869	0.96	0.8365
K2	1.816	0.19	0.8157
K3	1.800	0.53	0.8094
K4	1.686	1.20	0.6367
K Out	1.360	1.02	0.6105

R in	0.131	0.30	0.1536
R1	0.117	0.08	0.1484
R2	0.088	0.26	0.1369
R3	0.059	0.25	0.1253
R4	0.036	0.27	0.1166
R Out	0.035	0.14	0.1161

3. Hasil Uji Na Total dengan AAS

Sample Label	Conc (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.
Table Blank	-	-	0.0000
Standard 1	0.0050	-	0.2850
Standard 2	0.0100	-	0.3020
Standard 3	0.0500	-	0.3110
Standard 4	0.1000	-	0.3210
Standard 5	0.2000	-	0.3440
Standard 6	0.5000	-	0.4220
Standard 7	0.8000	-	0.5020
Standard 8	1.0000	-	0.5450
Standard 9	1.5000	-	0.6840
Standard 10	2.0000	-	0.7990

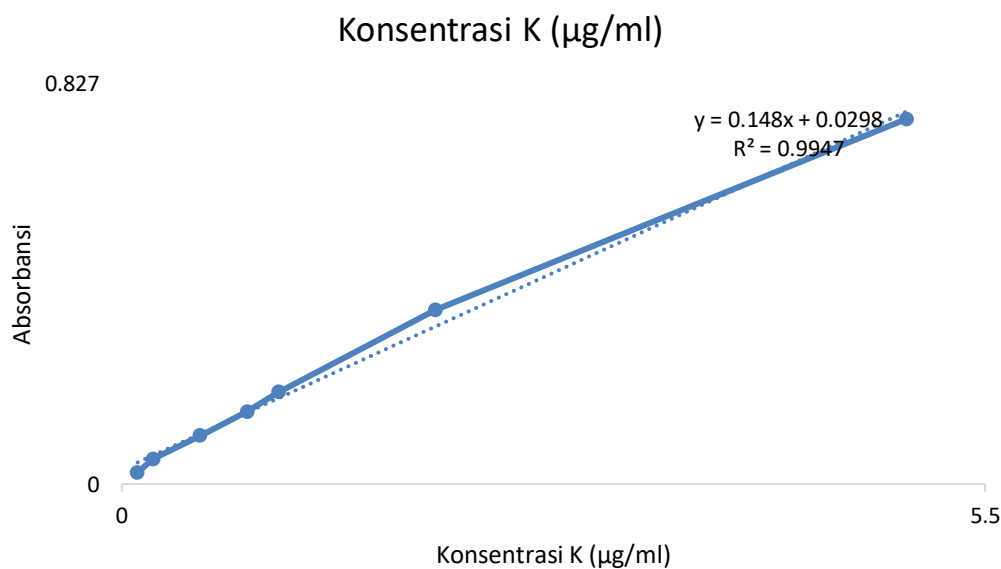


Sample Label	Conc (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.
Sample Blank		HIGH	-0.0032

K in	0.811	0.73	0.5011
K1	1.083	0.48	0.5704
K2	1.026	0.87	0.5559
K3	0.995	0.52	0.5480
K4	0.978	1.04	0.5437
K Out	0.647	1.18	0.4593
R in	0.930	1.35	0.5313
R1	0.699	2.75	0.4726
R2	0.609	0.16	0.4496
R3	0.573	1.67	0.4405
R4	0.510	2.58	0.4244
R Out	0.539	0.59	0.4317

4. Hasil Uji K Total dengan AAS

Sample Label	Conc (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.
Table Blank	-	-	0.0000
Standard 1	0.100	-	0.0237
Standard 2	0.200	-	0.0514
Standard 3	0.500	-	0.1001
Standard 4	0.800	-	0.1496
Standard 5	1.000	-	0.1899
Standard 6	2.000	-	0.3601
Standard 7	5.000	-	0.7544

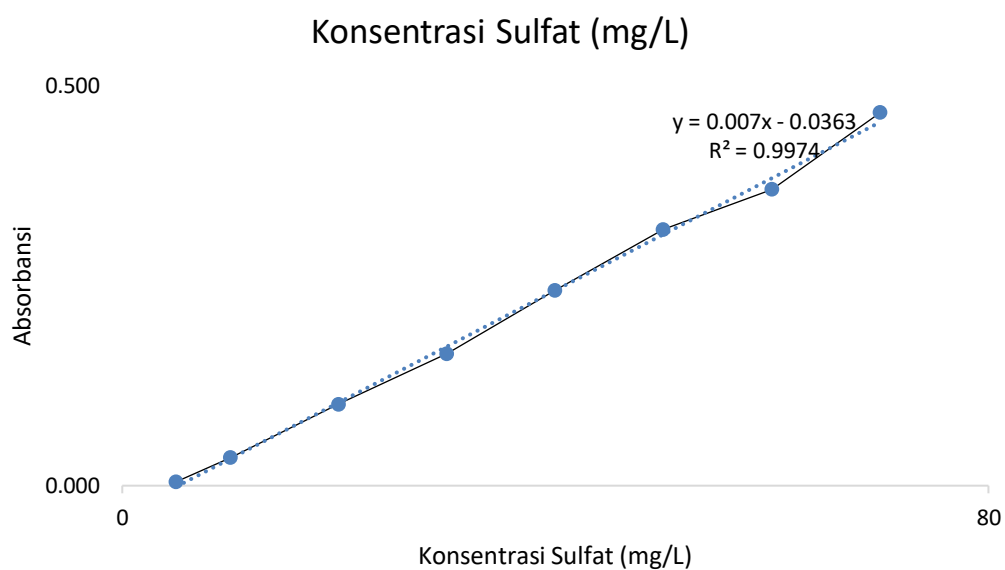


Sample Label	Conc (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.
Sample Blank		HIGH	-0.0028

K in	3.587	0.44	0.5606
K1	4.706	0.55	0.7262
K2	4.612	0.50	0.7122
K3	3.421	1.11	0.5360
K4	3.417	0.86	0.5354
K Out	3.305	0.75	0.5188
R in	0.747	0.98	0.1404
R1	0.700	1.65	0.1334
R2	0.695	0.10	0.1327
R3	0.693	0.94	0.1324
R4	0.639	1.23	0.1243
R Out	0.624	1.42	0.1222

5. Hasil Uji Sulfat dengan UV-VIS

Sample Label	Conc (mg/L)	%RSD	Mean Abs.
Table Blank	-	-	0.0000
Standard 1	5	-	0.005
Standard 2	10	-	0.035
Standard 3	20	-	0.102
Standard 4	30	-	0.165
Standard 5	40	-	0.244
Standard 6	50	-	0.320
Standard 7	60	-	0.370
Standard 8	70	-	0.466

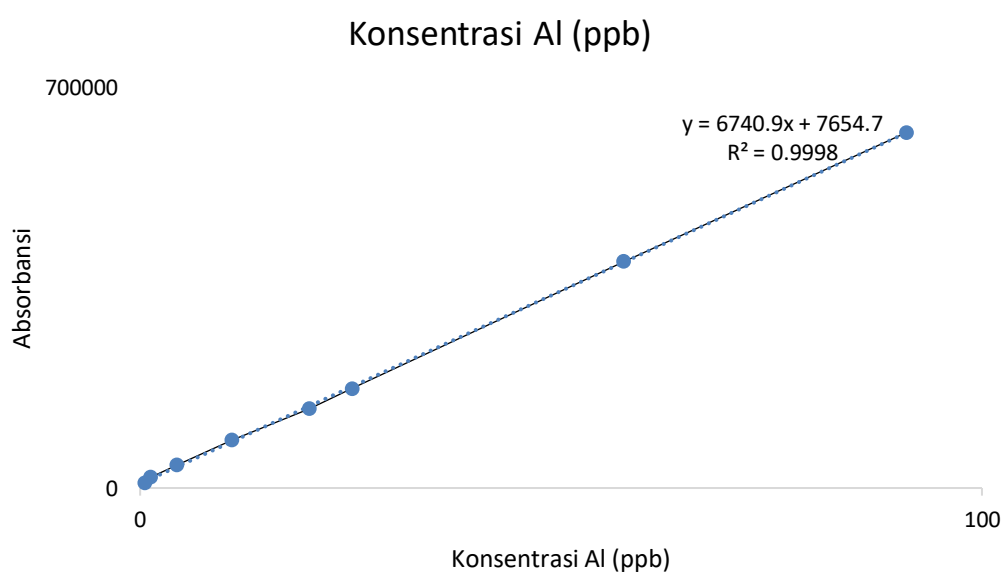


Sample Label	Conc (mg/L)	Mean Abs.
--------------	-------------	-----------

Sample Blank		
K in	360.00	0.216
K1	354.29	0.212
K2	347.15	0.207
K3	345.73	0.206
K4	337.16	0.200
K Out	325.75	0.192
R in	334.31	0.198
R1	318.61	0.187
R2	290.07	0.167
R3	274.38	0.156
R4	231.57	0.126
R Out	127.40	0.053

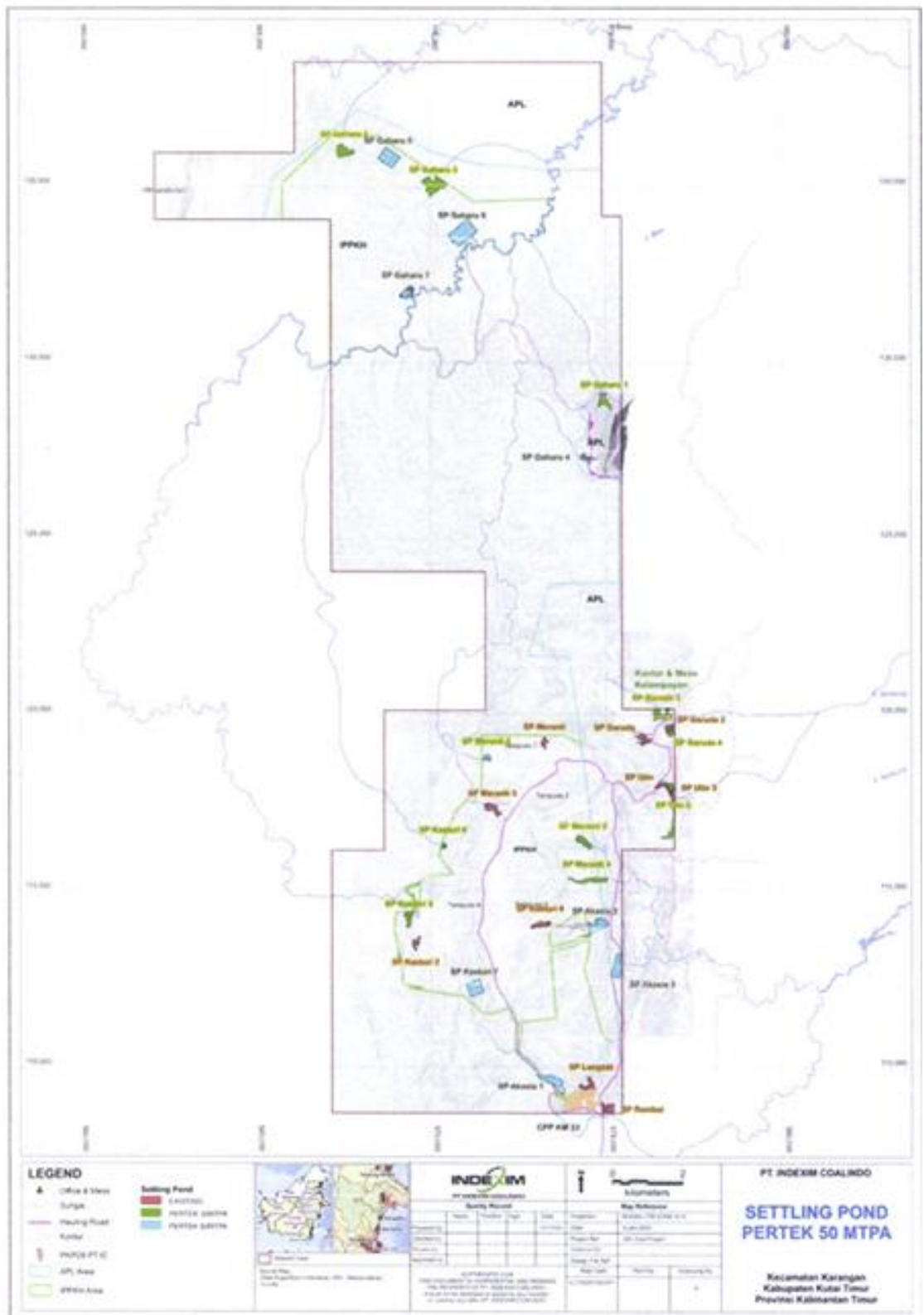
6. Hasil Uji Al Total dengan ICP-MS

Sample Label	Conc (mg/L)	%RSD	Mean Abs.
Table Blank	-	-	0.0000
Standard 0.5 ppb	0.564	-	8714.90
Standard 1 ppb	1.229	-	18990.45
Standard 5 ppb	4.347	-	39921.54
Standard 10 ppb	10.892	-	83858.95
Standard 20 ppb	20.114	-	138786.69
Standard 25 ppb	25.211	-	173956.02
Standard 50 ppb	57.474	-	396570.87
Standard 100 ppb	91.058	-	622025.08



Sample Label	Conc (µg/ml)	Mean Abs.
Sample Blank		
K in	12.105	89256.55
K1	7.611	58958.16
K2	5.906	47469.13
K3	4.315	36744.00
K4	2.829	26723.93
K Out	1.978	20990.38
R in	1.694	19076.53
R1	1.521	17906.49
R2	0.711	12447.11
R3	0.475	10856.21
R4	0.375	10184.74
R Out	0.344	9975.38

Lampiran 2. Peta Keseluruhan Settling Pond



Lampiran 3. Dokumentasi Sampling



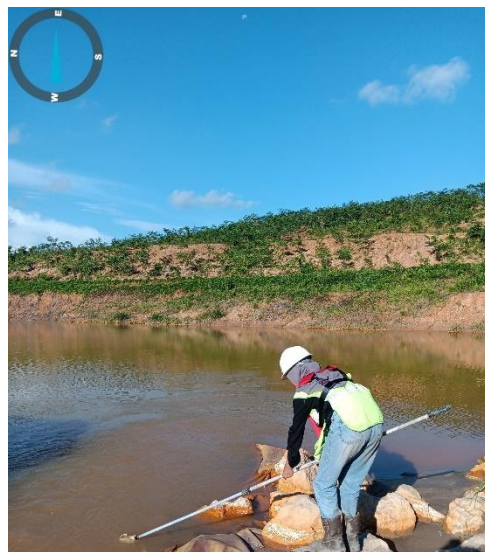
(Sampling air di inlet SP Rambai)



(Sampling air di outlet SP Kasturi 5)



(Sampling air SP Rambai)



(Sampling air SP Kasturi 5)



(Sampling air SP Rambai)