

Analisis Kualitas dan Kuantitas Air Limpasan Tambang Biji Nikel sebagai Dasar Penentuan Unit Pengolahan di PT X Kabupaten Morowali

Eka Wardhani^{1,2}, Ferly Maha Reni^{2*}, Nico Halomoan^{1,2}, Kancitra Pharmawati^{1,2}, Nur Latifa Ristiarandani³, Bagja Mulyana³, Heksantia Rahmadinda Yasya³

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Nasional, Bandung

²Pusat Kolaborasi Riset Daya Dukung Lingkungan Berkelanjutan BRIN- Institut Teknologi Nasional Bandung

³PT Ganeca Environmental Services, Bandung

*Koresponden email: fmahareni@gmail.com

Diterima: 30 Juni 2026

Disetujui: 6 Juli 2026

Abstract

Open-pit nickel mining activities in Morowali Regency generate surface runoff due to land-use changes, which potentially increases sediment loads and heavy metals that degrade water environmental quality. This study aims to analyze the quantity and quality of runoff water as a basis for determining appropriate treatment units to meet environmental quality standards. The methods employed include hydrological analysis for runoff discharge estimation using the Rational Method based on 15 years of maximum rainfall data, watershed delineation using DEM in ArcGIS, and water quality analysis through laboratory testing of pH, Total Suspended Solids (TSS), and heavy metals (Cu, Cd, Zn, Pb, Ni, total Cr, and Cr(VI)) in accordance with SNI and APHA standards. The results show a design runoff discharge of 23.96 m³/s with a catchment area of 2.501 km². TSS, total Cr, and Cr(VI) exceed the permissible limits, while other metal parameters remain within acceptable standards. High TSS is influenced by erosion from disturbed land surfaces, whereas Cr(VI) is attributed to the oxidation of Cr(III) in lateritic materials under tropical conditions. Based on technical evaluation, a coagulation–flocculation unit using FeSO₄ was selected due to its effectiveness in reducing TSS and Cr and its suitability for high and fluctuating flow conditions.

Keywords: *runoff, nickel, mining, TSS, Cr(VI)*

Abstrak

Aktivitas penambangan biji nikel dengan sistem tambang terbuka di Kabupaten Morowali menghasilkan limpasan permukaan akibat alih fungsi lahan, sehingga berpotensi meningkatkan beban sedimen dan logam berat yang dapat menurunkan kualitas lingkungan perairan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kuantitas dan kualitas air limpasan sebagai dasar penentuan unit pengolahan yang tepat agar memenuhi baku mutu lingkungan. Metode yang digunakan meliputi analisis hidrologi untuk estimasi debit limpasan dengan metode rasional berdasarkan data curah hujan maksimum 15 tahun, deliniasi daerah tangkapan menggunakan DEM melalui ArcGIS, serta analisis kualitas air melalui uji laboratorium parameter pH, TSS, dan logam berat (Cu, Cd, Zn, Pb, Ni, Cr total, dan Cr(VI)) mengacu pada standar SNI dan APHA. Hasil penelitian menunjukkan debit limpasan rencana sebesar 23,96 m³/detik dengan luas *catchment area* 2,501 km². Parameter TSS, Cr total, dan Cr(VI) melebihi baku mutu, sedangkan parameter logam lainnya masih memenuhi ketentuan. Tingginya TSS dipengaruhi oleh erosi lahan terbuka, sementara keberadaan Cr (VI) disebabkan oleh oksidasi Cr (III) pada material laterit dalam kondisi tropis. Berdasarkan evaluasi teknis, unit koagulasi–flokulasi menggunakan FeSO₄ dipilih karena efektif menurunkan TSS dan Cr serta sesuai untuk kondisi debit tinggi dan fluktuatif.

Kata Kunci: *limpasan, nikel, pertambangan, TSS, Cr (VI)*

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan produsen nikel terbesar di dunia dengan cadangan nikel setara dengan 23% cadangan global, yaitu sekitar 17,7 miliar ton biji dan 177,8 juta ton logam, dengan jumlah cadangan 5,2 miliar ton biji dan 57 juta ton logam yang ditemukan di Sulawesi, Maluku, Halmahera, Papua, dan Kalimantan [1]. Komoditas nikel sangat dibutuhkan di berbagai industri, seperti industri baja tahan karat (*stainless steel*), baterai, logam paduan, dan pelapisan logam. *Stainless steel* digunakan pada berbagai bidang industri hilir, mulai dari peralatan rumah tangga, transportasi, hingga konstruksi. Hal itu menyebabkan 70% nikel dunia didominasi oleh produksi nikel untuk kebutuhan *stainless steel* [2]. Nikel

dibutuhkan sebagai bahan baku utama pembuatan baterai lithium untuk kendaraan listrik dan teknologi industri hijau [3].

Perusahaan tambang bijih nikel dengan sistem terbuka (*open pit*) di Kabupaten Morowali, Sulawesi Tengah, menghasilkan banyak sedimen dari kegiatan pengupasan tanah yang memicu terbentuknya kromium trivalen (Cr^{3+}) dan kromium heksavalen (Cr^{6+}) yang bersifat toksik dan karsinogenik. Tumpukan batuan sisa pada *waste dump* berpotensi sebagai sumber pencemar logam berat, seperti Pb, Cd, Cr, Fe, Cu, Zn, dan Ni [4]. Di antara logam tersebut, Cr sebagai unsur paling berisiko karena mudah larut dan bermigrasi pada kondisi tropis dengan curah hujan tinggi. Material *overburden* yang mengandung senyawa Cr_2O_3 dan Fe berpotensi menjadi sumber rembesan Cr^{6+} dan Fe ke air permukaan maupun air tanah [5]. Alih fungsi lahan pada wilayah dengan curah hujan tinggi dapat meningkatkan limpasan permukaan karena menurunnya kemampuan tanah dalam meresapkan air hujan [6]. Air limpasan yang mengalir ke badan air berpotensi menurunkan kualitas air dan tanah di sekitarnya, serta mengganggu keseimbangan ekosistem perairan [7]. Salah satu tipe air tambang yang menjadi perhatian utama dalam industri pertambangan, yakni *High Total Suspended Solid Drainage* yang timbul akibat kehadiran mineral-mineral *clay* dengan ukuran partikel yang sangat halus sehingga sulit mengendap secara gravitasi [8].

Upaya untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan analisis terhadap kuantitas dan karakteristik air limpasan yang masuk ke area penambangan sebagai dasar dalam menentukan unit pengolahan yang dibutuhkan. Berdasarkan Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Nomor 1827 K/30/MEM/2018 tentang pedoman pelaksanaan kaidah teknik pertambangan yang baik, setiap kegiatan usaha pertambangan wajib memiliki kolam pengendapan (*settling pond*) sebagai bagian dari sistem pengelolaan air tambang [9]. Penelitian terdahulu mengenai pengelolaan air limpasan tambang umumnya membahas perancangan kolam pengendapan (*settling pond*) sebagai unit pengolahan utama untuk menurunkan kandungan padatan tersuspensi sebelum air dialirkan ke badan air [10] [11] [12]. Kebaruannya terletak pada lokasi studi yang memiliki tingkat alih fungsi lahan yang berbeda sehingga memengaruhi besarnya debit dan kualitas air limpasan yang dihasilkan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar teknis dalam pengelolaan air limpasan tambang agar memenuhi baku mutu *effluent* dan mengurangi potensi pencemaran terhadap badan air penerima.

2. Metode Penelitian

Penentuan Daerah Perencanaan

Daerah perencanaan yang dipilih adalah area *pit* atau lahan tambang terbuka, karena merupakan titik utama pengumpulan limpasan air hujan dari area penambangan, sehingga menjadi lokasi yang representatif untuk pengolahan air yang berpotensi mengandung padatan tersuspensi dan logam. Lokasi Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) telah ditetapkan oleh PT X dan terintegrasi dengan jaringan saluran drainase, serta berdekatan dengan Sungai Torete sebagai titik pembuangan *effluent*.

Pengumpulan Data

Pengumpulan data untuk analisis kuantitas dan karakteristik air limpasan tambang bijih nikel di PT X Kabupaten Morowali dilakukan melalui data primer dan sekunder. Data primer diperoleh dari kondisi eksisting, meliputi pengambilan sampel air limpasan dengan metode *grab sampling* saat kondisi hujan sesuai Standar Nasional Indonesia (SNI) 8995:2021 tentang Metode Pengambilan Contoh Uji Air untuk Pengujian Fisika dan Kimia [13], yang kemudian dianalisis di Laboratorium Instrumen Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Teknologi Bandung untuk parameter logam sedangkan pH, *Total Suspended Solid* (TSS), dan Kromium Heksavalen ($\text{Cr}(\text{VI})$) di PT Akalab Mahardika Indonesia. Metode analisis percobaan disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Metode Analisis Percobaan

No	Parameter	Metode Analisis
1.	pH	SNI 6989.11:2019 tentang Cara Uji Derajat Keasaman (pH) pada Air dan Air Limbah menggunakan Alat pH Meter
2.	TSS	SNI 6989.3-2019 tentang Cara Uji Padatan Tersuspensi Total (<i>Total Suspended Solids</i> , TSS) secara Gravimetri
3.	Tembaga (Cu)*	SNI 6989-84:2019 tentang Cara Uji Kadar Logam Terlarut dan Logam Total dalam Air dan Air Limbah
4.	Nikel (Ni)*	
5.	Cr total	
6.	Besi (Fe)*	

No	Parameter	Metode Analisis
7	Kobalt (Co)*	
8	Kadmium (Cd)*	APHA 24th 3111-B1, 2023 tentang Uji Kadar Logam dalam Air Menggunakan Spektrometri Serapan Atom (SSA) Nyala Udara-Asetilen
9	Seng (Zn)*	
10	Timbal (Pb)*	
11	Cr (VI)*	SNI 6989.71:2009 tentang Cara Uji Krom Heksavalen (Cr-VI) dalam Contoh Uji secara Spektrofotometri

Sumber:[14][15][16][17][18] **Keterangan:** *: sebagai konsentrasi ion logam terlarut

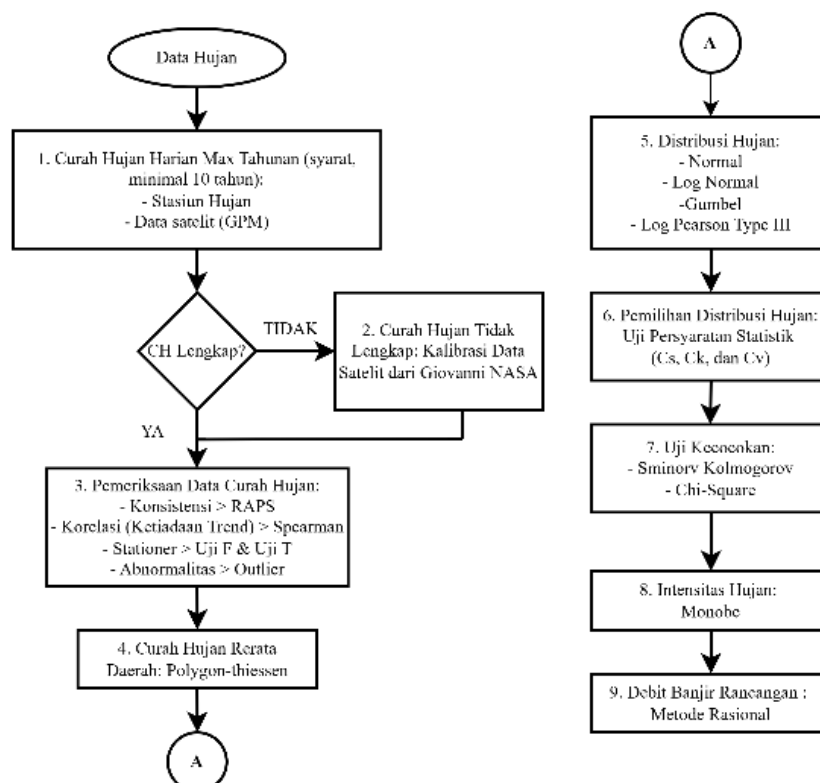
Pemilihan parameter dan metode analisis ini mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 09 Tahun 2006 tentang baku mutu air limbah usaha dan/atau kegiatan pertambangan bijih nikel, yang merupakan ukuran batas atau kadar maksimum unsur pencemar dan/atau jumlah unsur pencemar yang ditenggang keberadaannya dalam air limbah yang akan dibuang atau dilepas ke sumber air dari usaha dan/atau kegiatan pertambangan bijih nikel, sehingga memastikan bahwa air limpasan tidak melebihi batas yang diizinkan dan aman bagi lingkungan [19]. Observasi lapangan untuk mengetahui lokasi badan air terdekat dan ketersediaan lahan untuk pembangunan IPAL, yang di dokumentasikan dalam bentuk foto. Data sekunder diperoleh melalui PT X, meliputi data curah hujan harian maksimum 15 tahun terakhir, *digital elevation model* (DEM), tata guna lahan, dan dua titik stasiun hujan di area kantor dan pusat.

Pengolahan Data dan Analisis Data

1. Analisis Kuantitas Air Limpasan

Analisis kuantitas air limpasan dilakukan untuk menentukan besarnya debit limpasan yang berpotensi masuk ke sistem pengolahan air. Perhitungan ini mengacu pada SNI 2415:2026 tentang Tata Cara Perhitungan Debit Banjir Rencana, yang mencakup tahapan analisis curah hujan, penentuan intensitas hujan, serta perhitungan debit banjir rencana [20]. Alur perhitungan kuantitas air limpasan disajikan pada

Gambar 1.



Gambar 1. Alur perhitungan kuantitas air limpasan

Secara umum, proses perhitungan diawali dengan pemeriksaan kelengkapan dan konsistensi data curah hujan. Selanjutnya, curah hujan rerata wilayah dihitung menggunakan metode poligon thiessen untuk memperoleh nilai hujan representatif pada daerah tangkapan air. Data hujan tersebut kemudian dianalisis menggunakan beberapa jenis distribusi probabilitas hujan. Pemilihan distribusi yang paling sesuai dilakukan melalui uji persyaratan statistik dan uji kecocokan distribusi. Distribusi hujan terpilih digunakan

untuk menentukan curah hujan rencana pada periode ulang tertentu. Nilai curah hujan rencana tersebut kemudian dikonversi menjadi intensitas hujan, yang selanjutnya digunakan dalam perhitungan debit banjir rencana atau debit limpasan. Tahapan perhitungan tersebut dijelaskan sebagai berikut:

a. Intensitas Hujan

Intensitas hujan merupakan tinggi atau kedalaman air hujan yang jatuh dalam satuan waktu tertentu, umumnya dinyatakan dalam mm/jam. Perhitungan intensitas hujan dilakukan menggunakan metode Mononobe karena data hujan jam-jaman tidak tersedia, sehingga data yang digunakan terbatas pada data hujan harian [21]. Semakin besar periode ulang hujan, maka nilai intensitas hujan yang dihasilkan juga semakin tinggi. Perhitungan intensitas hujan dengan menggunakan rumus Mononobe seperti disajikan pada persamaan 1.

$$I = \left(\frac{R_{24}}{24} \right) \times \left(\frac{24}{t_c} \right) \dots\dots\dots (1)$$

Dimana,

I = intensitas curah hujan (mm/jam); R_{24} = curah hujan maksimal dalam 24 jam (mm); t_c = waktu konsentrasi.

b. Debit Banjir

Metode rasional adalah salah satu metode tertua dan awalnya digunakan hanya untuk memperkirakan debit puncak (*peak discharge*) dengan luas *catchment area* < 2,5 km² [20]. Perhitungan debit banjir dengan menggunakan rumus rasional seperti disajikan pada persamaan 2.

$$Q = 0,278 \times C \times I \times A \dots\dots\dots (2)$$

Dimana,

Q = debit banjir (m³/detik); C = koefisien limpasan; I = intensitas curah hujan untuk durasi hujan sama dengan waktu konsentrasi (mm/jam); A = luas daerah tangkapan, (km²); 0,278 = faktor konversi. Penentuan *catchment area* dilakukan dengan mendelineasi batas daerah aliran yang berkontribusi terhadap titik outlet berdasarkan kondisi topografi. Sementara itu, nilai C ditentukan berdasarkan karakteristik penggunaan lahan.

2. Analisis Kualitas Air Limpasan

Analisis karakteristik awal dilakukan untuk mengetahui kondisi kualitas air limpasan sebelum diberikan perlakuan. Data hasil uji laboratorium dibandingkan dengan baku mutu sesuai Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 09 Tahun 2006. Hasil perbandingan tersebut disajikan dalam bentuk tabel dan narasi deskriptif untuk menunjukkan parameter yang telah memenuhi maupun melampaui baku mutu. Analisis ini bertujuan untuk menggambarkan tingkat pencemaran awal air limpasan serta mengidentifikasi parameter-parameter kritis yang perlu diprioritaskan dalam proses pengolahan. Selain itu, dilakukan perhitungan beban pencemaran aktual untuk mengetahui jumlah massa pencemar yang terbawa oleh aliran limpasan dalam satuan waktu tertentu. Perhitungan beban pencemaran aktual dapat dinyatakan dengan persamaan 3.

$$BPA = C \times Q \times \frac{1.000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ kg}}{10^6 \text{ mg}} \times \frac{86.400 \text{ detik}}{1 \text{ hari}} \dots\dots\dots (3)$$

Dimana,

BPA = beban pencemar aktual (kg/hari); C = konsentrasi terukur (mg/L); Q = debit (m³/detik).

3. Penentuan Unit Operasi dan Proses

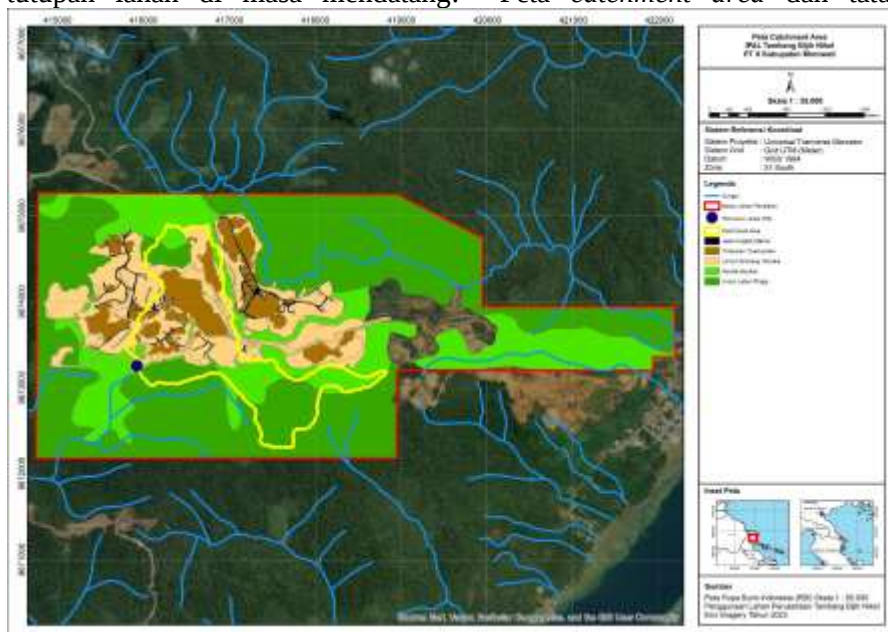
Penentuan unit operasi dan proses dilakukan berdasarkan hasil analisis karakteristik kualitas air limpasan. Parameter-parameter yang memiliki konsentrasi melebihi baku mutu dijadikan sebagai dasar utama dalam pemilihan alternatif teknologi pengolahan melalui kajian literatur yang relevan.

3. Hasil dan Pembahasan

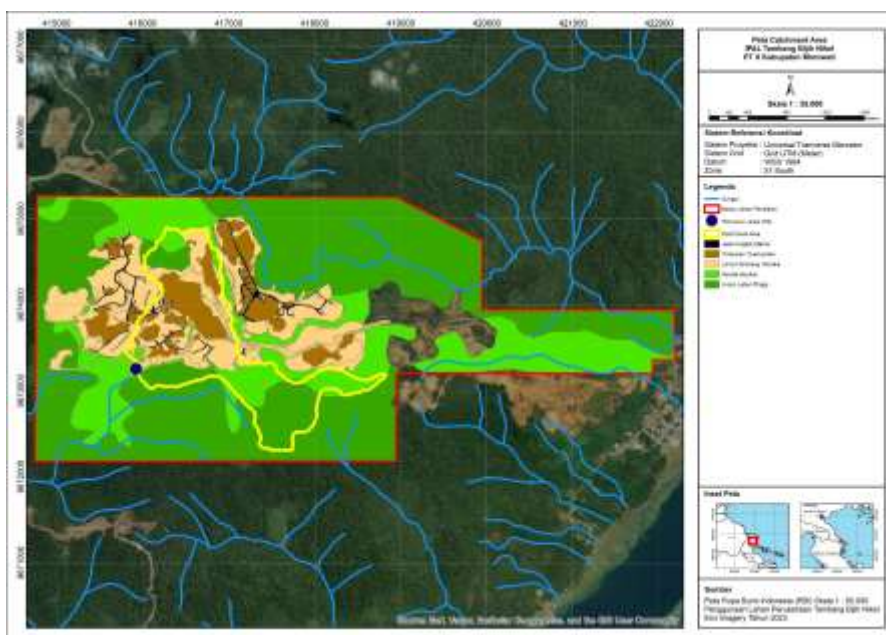
Kuantitas Air Limpasan

Perhitungan kuantitas air limpasan menggunakan metode rasional yang dipengaruhi oleh tiga parameter utama, yaitu luas *catchment area*, intensitas hujan, dan koefisien limpasan. Penentuan luas *catchment area* dilakukan melalui analisis topografi menggunakan *software* ArcGIS. Berdasarkan hasil analisis menggunakan ArcGIS, luas *catchment area* pada lokasi penelitian diperoleh sebesar 250,11 Ha atau 2,501 km² mendekati batas penerapan metode rasional berdasarkan SNI 2415:2019, yaitu ≤ 2,5 km², sehingga metode ini masih dapat digunakan untuk estimasi debit maksimum pada lokasi penelitian. Koefisien limpasan yang digunakan adalah 0,9. Nilai ini dipilih karena area penelitian di dominasi oleh

lahan tambang terbuka dan timbunan *overburden*, yang memiliki kemampuan infiltrasi relatif rendah sehingga menghasilkan limpasan permukaan yang tinggi [10]. Sebagian area penelitian masih berupa kawasan hutan sebagai sisa vegetasi alami yang belum terganggu. Namun demikian, kawasan tersebut termasuk dalam area rencana yang berpotensi terdampak oleh ekspansi kegiatan tambang, sehingga nilai koefisien limpasan yang digunakan mempertimbangkan kondisi lahan eksisting dan potensi perubahan tutupan lahan di masa mendatang. Peta *catchment area* dan tata guna lahan disajikan pada



Gambar 12.



Gambar 1. Peta *Catchment Area* dan Tata Guna Lahan

Intensitas hujan yang digunakan dalam perhitungan mengacu pada Periode Ulang Hujan (PUH) 25 tahun. Pemilihan PUH 25 tahun didasarkan pada fungsi wilayah kajian sebagai area saluran keliling tambang, sehingga diperlukan pertimbangan terhadap potensi kejadian banjir [22]. Berdasarkan hasil analisis, diperoleh intensitas hujan sebesar 38,27 mm/jam. Dengan menggunakan luas *catchment area* sebesar 2,501 km², koefisien limpasan sebesar 0,9, dan intensitas hujan sebesar 38,27 mm/jam, maka debit banjir rencana yang dihasilkan adalah 23,96 m³/detik.

Karakteristik Air Limpasan

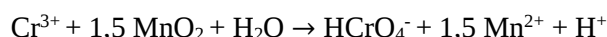
Pengujian karakteristik awal air limpasan dilakukan untuk mengetahui kondisi kualitas air sebelum proses pengolahan, dengan membandingkan parameter hasil uji terhadap baku mutu kegiatan penambangan yang mengacu pada Permen LH Nomor 09 Tahun 2006. Dalam peraturan tersebut, kegiatan penambangan bijih nikel didefinisikan sebagai kegiatan pengambilan bijih nikel yang meliputi proses penggalian, pengangkutan, dan penimbunan, baik pada tambang terbuka maupun tambang bawah tanah. Hasil uji karakteristik awal air limpasan disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Hasil Uji Karakteristik Awal Air Limpasan

Parameter	Satuan	Baku Mutu	Hasil Pengujian	Keterangan
pH	-	6-9	6,58	Memenuhi
TSS	mg/L	200	450	Tidak Memenuhi
Cu*	mg/L	2	0,095	Memenuhi
Cd*	mg/L	0,05	0,002	Memenuhi
Zn*	mg/L	5	0,094	Memenuhi
Pb*	mg/L	0,1	0,004	Memenuhi
Ni*	mg/L	0,5	0,071	Memenuhi
Cr (VI)*	mg/L	0,1	2,025	Tidak Memenuhi
Cr total	mg/L	0,5	2,593	Tidak Memenuhi
Fe*	mg/L	5	1,072	Memenuhi
Co*	mg/L	0,4	0,003	Memenuhi

Sumber: Hasil Pengujian, 2026 **Keterangan:** *: sebagai konsentrasi ion logam terlarut

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium terhadap sampel air limpasan dapat disimpulkan bahwa sebagian besar parameter logam terlarut, seperti Cu, Cd, Zn, Pb, Ni, Fe, dan Co masih berada dibawah baku mutu yang ditetapkan. Namun, terdapat 3 parameter yang tidak memenuhi baku mutu, yaitu TSS, Cr total, dan Cr (VI). Cr total mencakup seluruh bentuk kromium yang ada di air, yaitu Cr (III) dan Cr (VI) [23]. Sebagian besar kromium di lingkungan secara alami berada sebagai Cr (III), bukan Cr (VI). Cr (III) berasal dari mineral alami yang ada dalam batuan di endapan nikel laterit yang bersifat tidak larut dalam air, membuat kadar TSS tinggi, dan memiliki toksisitas yang rendah sehingga tergolong sebagai bahan yang tidak berbahaya, sedangkan Cr (VI) bersifat mudah larut dalam air, toksik, dan berbahaya bagi makhluk hidup [24]. Tingginya konsentrasi Cr (VI) dapat disebabkan oleh keberadaan lapisan *limonite* di area *pit* yang kaya akan kromium (III) oksida (Cr_2O_3). Lapisan ini akan terakumulasi dan terpapar udara serta air hujan dalam jangka waktu lama, sehingga mengalami proses oksidasi dan membentuk Cr (VI) yang dapat meningkatkan konsentrasi kromium di lingkungan sekitar [25]. Proses oksidasi alami Cr (III) menjadi Cr (VI) terjadi akibat reaksi Cr (III) dengan oksida mangan (MnO_2) yang umumnya hadir sebagai mineral asosiasi dalam zona pelapukan atau lapisan limonit, terutama pada kondisi pH netral, menurut reaksi berikut [26]:



Tingginya konsentrasi TSS disebabkan oleh curah hujan yang tinggi sebagai faktor utama terjadinya erosi, sehingga material tanah dari area penambangan terbuka terbawa oleh aliran air [27]. Selain itu, air limpasan berpotensi untuk melarutkan partikel padatan halus yang membutuhkan waktu lama untuk pengendapan. Padatan dapat berasal dari mineral-mineral seperti pasir halus, *silt*, lempung, dan zat organik berupa asam humus dan asam vulvat [28].

Perhitungan beban pencemar aktual dilakukan untuk mengetahui jumlah massa pencemar yang terbawa oleh air limpasan dalam satuan waktu tertentu. Nilai beban pencemar aktual tidak hanya dipengaruhi oleh konsentrasi masing-masing parameter kualitas air, tetapi juga oleh debit aliran yang membawa pencemar tersebut. Hasil perhitungan beban pencemar aktual pada lokasi penelitian disajikan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Beban Pencemar Aktual

Parameter	C	BPA
	mg/L	kg/hari
TSS	1500	3.057.264
Cu*	0,095	194,03
Cd*	0,002	4,27

Zn*	0,094	191,18
Pb*	0,004	8,52
Ni*	0,071	144,74
Cr (VI)*	2,025	4.126,56
Cr total	2,593	5.284,38
Fe*	1,072	2.185,74
Co*	0,003	6,32

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

Berdasarkan hasil perhitungan, parameter TSS memiliki BPA tertinggi, sehingga menjadi parameter utama yang perlu diprioritaskan dalam pengendalian kualitas air limpasan. Tingginya beban TSS dapat disebabkan oleh kegiatan tambang terbuka yang mengubah tutupan lahan, sehingga berpotensi meningkatkan limpasan permukaan dan erosi pada area terganggu [29]. Kondisi ini juga dapat meningkatkan masukan sedimen tersuspensi dan logam berbahaya ke ekosistem sungai. Selain itu, parameter Cr (VI) dan Cr total mengindikasikan perlunya pengendalian logam dalam air limpasan, yang dapat berdampak terhadap lingkungan perairan apabila tidak diolah dengan baik. Oleh karena itu, diperlukan pengolahan air limpasan sebelum dialirkan ke badan air penerima.

Penentuan Unit Operasi dan Proses

Berdasarkan analisis karakteristik awal air limpasan, teridentifikasi bahwa parameter TSS, Cr total, dan Cr^{6+} telah melebihi baku mutu yang ditetapkan. Ketiga parameter ini perlu diturunkan konsentrasinya melalui proses pengolahan yang tepat guna memastikan kualitas air yang diolah memenuhi standar lingkungan yang berlaku. Penurunan TSS dapat dilakukan melalui unit sedimentasi yang berfungsi mengendapkan partikel diskrit dan flokulan secara gravitasi dengan efisiensi penyisihan sebesar 70-84% [30]. Namun, pengolahan air limpasan tidak dapat hanya mengandalkan proses fisik, karena Cr total dan Cr^{6+} memerlukan proses pengolahan kimia atau biologi untuk menurunkan konsentrasinya. Pemilihan unit proses dilakukan dengan mempertimbangkan 3 (tiga) aspek utama, yaitu hasil penelitian terdahulu, teknis, dan kesesuaian dengan kondisi operasional pertambangan disajikan pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Pertimbangan Pemilihan Unit Proses

Unit Proses	Hasil Penelitian Terdahulu	Teknis	Kesesuaian dengan Kondisi Operasional Pertambangan
Koagulasi-Flokulasi dengan FeSO_4	FeSO_4 efektif menurunkan Cr^{6+} karena FeSO_4 berperan sebagai reduktor sekaligus koagulan dengan efisiensi penyisihan Cr^{6+} sebesar 99,89% pada kondisi optimum pH 8, waktu kontak 5 menit, dan dosis FeSO_4 0,1 g [31]. - Penggunaan FeSO_4 mampu menghasilkan efisiensi penyisihan Cr^{6+} yang konsisten sebesar 91% pada variasi debit 8.400–64.750 m^3/hari. [32].	- Pembubuhan FeSO_4 - Kontrol dosis dan pH - Pengadukan cepat dan lambat - Pengelolaan lumpur hasil pengendapan.	Dapat diterapkan pada debit air limpasan yang besar dan fluktuatif karena dosis bahan kimia dapat disesuaikan dengan perubahan debit dan beban pencemar aktual.
Koagulasi-Flokulasi dengan Basa	Penggunaan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 50% pada pH 8 mampu menyisihkan Cr^{6+} sebesar 44,93%, sedangkan NaOH 50% sebesar 32,69%. Namun, penelitian	- Pembubuhan NaOH dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - Kontrol dosis dan pH - Pengadukan cepat dan lambat	

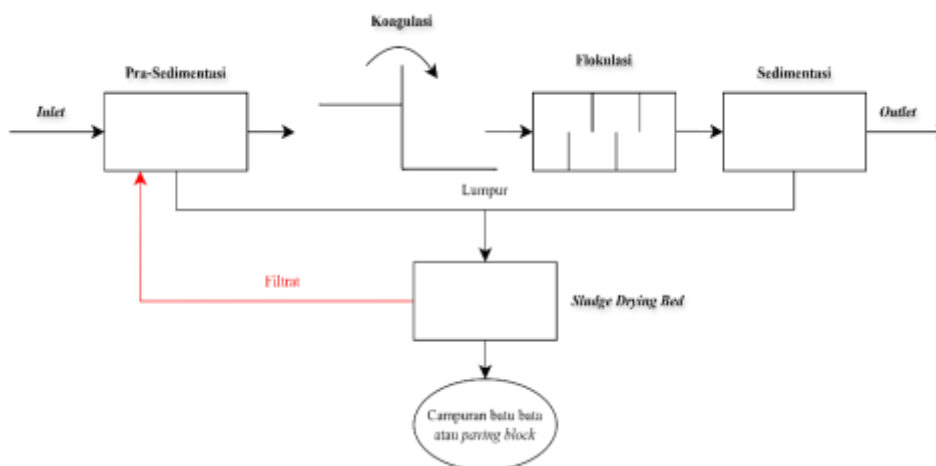
Unit Proses	Hasil Penelitian Terdahulu	Teknis	Kesesuaian dengan Kondisi Operasional Pertambangan
	tersebut juga menunjukkan bahwa presipitasi tunggal belum cukup optimal untuk menyisihkan Cr^{6+} dalam konsentrasi tinggi, sehingga diperlukan kombinasi proses [33].	• Pengelolaan lumpur hasil pengendapan.	
Koagulasi-Flokulasi dengan Kombinasi Garam Asam-Basa	Penyisihan kromium menggunakan metode reduksi-presipitasi kimia. Kondisi optimum reduksi Cr^{6+} diperoleh pada pH 2, waktu kontak 5 menit, dan dosis natrium metabisulfit 80 mg/L. Setelah reduksi, Cr^{3+} diendapkan menggunakan presipitan, dengan hasil terbaik diperoleh pada kombinasi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan NaOH dosis 100 mg/L. Kombinasi tersebut mampu menyisihkan $\text{Cr}(\text{III})$ sebesar 99,7% dengan volume lumpur 7 mL/L [34].	• Pembubuhan bahan kimia dilakukan secara bertahap melalui reduksi dan presipitasi. • Kontrol dosis dan pH • Pengadukan cepat dan lambat • Pengelolaan lumpur hasil pengendapan.	Kurang efisien untuk diterapkan dengan debit air limpasan yang besar dan fluktuatif, karena proses ini membutuhkan dua jenis bahan kimia, yaitu reduktor dan presipitan. Hal ini dapat meningkatkan biaya operasional dan membutuhkan waktu proses yang lebih panjang, karena pengolahan harus dilakukan melalui tahapan reduksi terlebih dahulu sebelum dilanjutkan dengan presipitasi.
Fitoremediasi	Fitoremediasi menggunakan eceng gondok terbukti dapat menurunkan Cr total dan Cr^{6+}: • Eceng gondok fase sedang mampu menurunkan Cr^{6+} dari 0,56 ppm menjadi 0,2050 ppm selama 7 hari dengan efektivitas 63,39% [35]. • Waktu tinggal 10 hari mampu menurunkan Cr total menjadi 0,081 ppm dan Cr^{6+} menjadi 0,045 ppm, dengan efektivitas masing-masing 94,022% dan 91,477% [36].	• Waktu tinggal yang cukup lama • Area yang luas • Aklimatisasi tanaman • Pengaturan jumlah tanaman • Pemeliharaan kondisi tanaman • pemanenan biomassa secara berkala	Kurang sesuai dengan debit limpasan yang fluktuatif karena efektivitas prosesnya sangat bergantung pada waktu tinggal, jumlah dan kondisi tanaman, fase pertumbuhan, serta kemampuan adaptasi tanaman terhadap air limbah. Pada saat debit meningkat, terutama ketika curah hujan tinggi, waktu kontak antara air limbah dan akar tanaman menjadi lebih singkat sehingga proses penyerapan dan akumulasi logam berpotensi tidak berlangsung optimal. Selain itu, untuk mempertahankan waktu tinggal selama beberapa hari pada debit yang besar, diperlukan kolam dengan luas dan volume yang sangat besar.

Sumber: Hasil Analisis, 2026

Unit proses yang dipilih adalah koagulasi-flokulasi menggunakan FeSO_4 . Pemilihan ini didasarkan pada kemampuan FeSO_4 yang berperan ganda sebagai reduktor Cr^{6+} sekaligus membantu proses koagulasi, sehingga sistem pengolahan menjadi lebih sederhana dan praktis dibandingkan alternatif reduksi-presipitasi

yang memerlukan pembubuhan reduktor dan presipitasi secara bertahap. Selain itu, koagulasi-flokulasi dengan FeSO_4 lebih sesuai diterapkan pada IPAL air limpasan tambang dengan debit besar dan fluktuatif karena dosis bahan kimia dapat disesuaikan dengan perubahan debit dan beban pencemar aktual. Fitoremediasi tidak dipilih sebagai unit utama karena memerlukan waktu tinggal yang panjang, area yang luas, aklimatisasi dan pemeliharaan tanaman, serta pemanenan biomassa secara berkala. Sementara itu, presipitasi basa langsung memiliki efisiensi penyisihan Cr^{6+} yang lebih rendah, sedangkan kombinasi garam asam-basa memerlukan tahapan proses yang lebih kompleks, kontrol pH yang lebih ketat, serta penggunaan lebih dari satu jenis bahan kimia, sehingga kurang efisien dari segi biaya dan waktu dibandingkan penggunaan FeSO_4 . Skema unit pengolahan terpilih disajikan pada **Gambar 3**.

Unit pengolahan lumpur pada ketiga alternatif direncanakan menggunakan *sludge drying bed*. Unit ini dipilih karena masih tersedianya area yang memadai di lokasi studi dengan dukungan sinar matahari yang cukup untuk proses pengeringan lumpur, dan biaya lebih murah. Berdasarkan Lampiran IX PP No. 22 Tahun 2021 mencantumkan *sludge* IPAL dari fasilitas IPAL terpadu pada kawasan industri dengan kode limbah B108d dan kategori bahaya 2, sehingga lumpur hasil pengolahan perlu diuji terlebih dahulu sebelum ditentukan mekanisme pemanfaatan atau pengelolaannya [37]. Pemanfaatan lumpur hasil sedimentasi tipe I dan II sebagai bahan baku alternatif untuk pembuatan material bangunan non-struktural. Lumpur yang telah dikeringkan pada *sludge drying bed* dapat diolah lebih lanjut melalui pengayakan dan dicampur dengan bahan pengikat, seperti semen untuk dijadikan *paving block* [38]. Selain itu, lumpur kering juga dapat dicampur dengan tanah liat untuk dijadikan bahan baku batu bata [39]. Namun, sebelum digunakan sebagai bahan baku konstruksi, lumpur perlu melalui pengujian *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP) guna memastikan bahwa potensi pelindian logam berat dari material olahan berada di bawah batas baku mutu yang ditetapkan [40].



Gambar 2. Skema Unit Pengolahan Terpilih

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis kuantitas dan kualitas air limpasan pada kegiatan penambangan bijih nikel di Kabupaten Morowali, diperoleh bahwa debit limpasan rencana sebesar 23,96 m³/detik dengan luas daerah tangkapan 2,501 km² yang dihitung menggunakan metode rasional. Hasil uji kualitas air menunjukkan bahwa parameter TSS, Cr total, dan Cr (VI) melebihi baku mutu yang ditetapkan, sedangkan parameter logam lainnya masih memenuhi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa perubahan tutupan lahan akibat aktivitas tambang menjadi faktor utama peningkatan sedimen, sementara keberadaan Cr(VI) dipengaruhi oleh proses oksidasi Cr (III) pada material laterit di lingkungan tropis. Berdasarkan evaluasi teknis terhadap beberapa alternatif unit pengolahan, sistem koagulasi–flokulasi menggunakan FeSO_4 dipilih karena dinilai paling efektif dalam menurunkan konsentrasi TSS dan kromium serta sesuai untuk kondisi debit yang tinggi dan fluktuatif pada area tambang.

5. Daftar Pustaka

- [1] D. D. Radhica and R. A. A. Wibisana, “Proteksionisme Nikel Indonesia dalam Perdagangan Dunia,” *Journal of Trade Development and Studies*, vol. 7, pp. 74–84, 2023, doi: 10.24252/RIR.V2I1.15422.

- [2] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, “Kementerian ESDM RI - Media Center - Arsip Berita - Potensi Menjanjikan, Nikel RI Bakal Laris Manis Pikat Investor.” Accessed: Jul. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/potensi-menjanjikan-nikel-ri-bakal-laris-manis-pikat-investor>
- [3] D. N. Sunuhadi, Ernowo, P. M. Hilman, and T. Suseno, “Availability of Indonesian nickel reserves and efforts to improve reserves resistance and its impact to economic growth,” *Mineral Economics*, vol. 37, no. 3, pp. 601–617, Sep. 2024, doi: 10.1007/S13563-024-00443-0/METRICS.
- [4] L. O. Ngkoimani and Muh. Chaerul, “Impacts of Nickel Laterite Post-Mining Activities on The Level of Heavy Metal Contamination in River Sediments,” 2017, doi: 10.2991/ICEST-17.2017.78.
- [5] Tiwary, R. K., Binu Kumari, and D. B. Singh. "Water quality assessment and correlation study of physico-chemical parameters of Sukinda chromite mining area, Odisha, India." *Environmental Pollution: Select Proceedings of ICWEES-2016*. Singapore: Springer Singapore, 2017. 357-370.
- [6] A. I. P. Yuswandi and E. Wardhani, “Analisis Dampak Peningkatan Air Larian (Run Off) Pada Tahap Konstruksi dan Operasi di Pabrik Sepatu PT.X Kabupaten Cirebon,” *Jurnal Serambi Engineering*, vol. 9, no. 4, Sep. 2024, Accessed: Jun. 30, 2026. [Online]. Available: <https://jse.serambimekkah.id/index.php/jse/article/view/520>
- [7] Saputro, Alvito Nugroho, Era Nitika Sari, and Fairus Atika Redanto Putri. "Analisis Penyelesaian Limbah Tambang Nikel di Konawe Utara yang Mencemari Laut Sekitarnya." *Prosiding SENASTITAN: Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan*. Vol. 4. 2024.
- [8] Abfertiawan, Muhammad Sonny, et al. "High total suspended solid (TSS) removal for coal mining water using electrocoagulation." *IMWA 2023–Y Dyfodol| the Future*. International Mine Water Association), Newport, Wales, UK, 2023. 1-5.
- [9] Keputusan Menteri ESDM Nomor 1827K/30/MEM/2018, “Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik,” 2018.
- [10] H. Zulkarnain, Y. L. O. Priana, R. Gunawan, L. Husain, and A. B. Widiarta, “Desain Settling Pond Pada Sistem Tambang Terbuka Di Penambangan,” *Mining Science and Technology Journal*, vol. 3, pp. 79–84, 2024.
- [11] M. Dwiarsiana, O. Sugarbo, and H. Helmi, “Analisis Kualitas Air Tambang Nikel Berdasarkan Nilai Total Suspended Solids (TSS) dan Dewatering Di Blok X Pada PT. Stargate Pasific Resources, Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara,” *GEODA*, vol. 04, no. 01, pp. 66–76, 2025.
- [12] D. A. Al Fiah, N. Fidayanti, Novalisae, Y. Iashania, and N. M. A. Ganang, “Rancangan Settling Pond Mahalona Blok Petea di PT. Vale Indonesia Tbk,” *INNOVATIVE: Journal Of Social Science Research*, vol. 4, pp. 8155–8162, 2024.
- [13] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 8995:2021 Metode Pengambilan Contoh Uji untuk Pengujian Fisika dan Kimia*. Jakarta, 2019. Accessed: May 30, 2026. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/680206396/SNI-SNI-8995-2021-Metode-Pengambilan-Air-Publish>
- [14] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 6989.11:2019 Air dan Air limbah - Bagian 11: Cara Uji Derajat Keasaman (pH) dengan Menggunakan pH Meter*. Jakarta, 2019.
- [15] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 06-6989.3-2019 Air dan Air limbah - Bagian 3: Cara Uji Padatan Tersuspensi Total (Total Suspended Solid, TSS Secara Gravimetri)*. 2019.
- [16] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 6989.84-2019 Air dan Air Limbah-Bagian 84: Cara Uji Kadar Logam Terlarut dan Logam Total secara Spektrometer Serapan Atom (SSA)-Nyala*. Jakarta, 2019.
- [17] American Public Health Association, *Analisis Logam dalam Air dan Air Limbah menggunakan Metode Direct Air-Acetylene Flame Method*. 2023. Accessed: Jun. 30, 2026. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/1016732253/APHA-Standard-Method-for-the-Examination-of-Water-and-Waste-Water-24th-Edition>
- [18] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 6989.71:2009 Air dan Air limbah - Bagian 71: Cara Uji Krom Heksavalen (Cr-VI) dalam Contoh Uji Secara Spektrofotometri*. Jakarta, 2004.
- [19] Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No 09 Tahun 2006, “Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Pertambangan Bijih Nikel,” Sep. 13, 2006 Accessed: Mar. 31, 2026. [Online]. Available: <https://jdih.kemenkoinfra.go.id/id/peraturan-menteri-negara-lingkungan-hidup-no-09-tahun-2006>
- [20] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 2415:2026 Tata Cara Perhitungan Debit Banjir Rencana*. Jakarta, 2026.
- [21] B. Triatmodjo, *Hidrologi Terapan*, 7th ed. Yogyakarta: Beta Offset Yogyakarta, 2008.

- [22] Y. E. Putri, "Analisa Penyaliran Air Tambang Batu Kapur PT. Semen Baturaja (Persero) di Pabrik Baturaja," *Jurnal Desiminasi Teknologi*, vol. 2, no. 1, 2014, doi: 10.52333/DESTTEK.V2I1.185.
- [23] S. Kwak, J. C. Yoo, D. H. Moon, and K. Baek, "Role of clay minerals on reduction of Cr(VI)," *Geoderma*, vol. 312, pp. 1–5, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.GEODERMA.2017.10.001.
- [24] M. Prameswati, S. Kasmiyati, and S. Sucahyo, "Pengaruh Mangan (Mn) terhadap Oksidasi Kromium Trivalen dan Pertumbuhan *Tagetes* sp.," *Ber. Biol.*, vol. 21, no. 3, pp. 313–325, Dec. 2022, doi: 10.14203/BERITABIOLOGI.V21I3.4190.
- [25] K. N. Setiawan, "Analisis Potensi Pelepasan Kromium Hexavalent Di Daerah Pertambangan," *Jurnal Teknologi Mineral FT UNMUL*, vol. 12, no. 1, Jun. 2024.
- [26] S. M. Equeenuddin and B. K. Pattnaik, "Hydrogeochemical evolution of hexavalent chromium at the Sukinda ultramafic complex in eastern part of India," *Geochemistry*, vol. 80, no. 4, p. 125633, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.CHEMER.2020.125633.
- [27] Fahrudin, *Pengelolaan Limbah Pertambangan Secara Biologis*. Celebes Media Perkasa, 2018. Accessed: Oct. 23, 2025.
- [28] Zhao, Y. Ma, J. Fang, L. Hu, and X. Li, "Particle size distribution and total suspended solid concentrations in urban surface runoff," *Science of The Total Environment*, vol. 815, p. 152533, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.152533.
- [29] R. Oktian, R. Hambali, and B. D. A. Sandy, "Studi Pengaruh Perubahan Tutupan Lahan Akibat Pembangunan Kawasan Perumahan terhadap Limpasan Permukaan di Kota Pangkal Pinang," *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, pp. 157–158, Dec. 2025, doi: 10.56860/jtsda.v5i2.165.
- [30] F. Rosariawari, E. M. Wijayanto, and A. U. Farahdiba, "Penyisihan Total Suspended Solid (TSS) Air Sungai dengan Hidraulik Koagulasi Flokulasi," *Jurnal Envirotek*, vol. 11, no. 2, pp. 53–59, Oct. 2019, doi: 10.33005/ENVIROTEK.V11I2.12.
- [31] R. Mardiyanti, D. N. Basir, A. N. Musallam, and M. Al Mustawa, "Optimasi Proses Reduksi dan Flokulasi Cr(VI) oleh FeSO₄ pada Limbah Simulasi Elektroplating," *Venn: Journal of Sustainable Innovation on Education, Mathematics and Natural Sciences*, vol. 5, no. 2, pp. 312–322, Feb. 2026, doi: 10.53696/VEEN.V5I2.405.
- [32] R. Reonald, A. Wibowo, and A. Rachmanto, "Analisis Pengaruh Debit dan Dosis FeSO₄ Terhadap Penghilangan Cr⁶⁺ Pada Sistem Pengolahan Air Limbah Industri Pertambangan Nikel," *Environmental Engineering Journal ITATS*, vol. 6, no. 1, pp. 11–19, Feb. 2026, Accessed: Jun. 10, 2026. [Online]. Available: <https://ejurnal.itats.ac.id/envitats/article/view/8420>
- [33] F. Mulyadi, Y. Pratama, and L. Apriyanti, "Penyisihan Kandungan Kromium Hexavalen (Cr⁶⁺) pada Limbah Hasil Analisis COD dengan Metoda Presipitasi oleh NaOH dan Ca(OH)₂," *Rekayasa Hijau: Jurnal Teknologi Ramah Lingkungan*, vol. 4, no. 1, pp. 9–13, Jun. 2020, doi: 10.26760/JRH.V4I1.9-13.
- [34] Dr. C. R. Ramakrishnaiah and P. B., "Hexavalent Chromium Removal from Industrial Wastewater by Chemical Precipitation Method," *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, vol. 2, pp. 599–603, 2012, [Online]. Available: www.ijera.com
- [35] I. Nursari, N. Jafar, F. Nullah Yusuf, and Moh. S. Said, "Analisis Pengaruh Fase Tumbuh Tanaman Eceng Gondok Terhadap Kemampuan Fitoremediasi Cr⁶⁺ Pada Limbah Cair Pertambangan Nikel," *Jurnal Geomine*, vol. 7, no. 1, pp. 23–29, May 2019, doi: 10.33536/JG.V7I1.337.
- [36] M. A. Fadhili and T. T. Anastasia, "Penurunan Logam Krom Air Limbah Industri Pertambangan Nikel dengan Variasi Waktu Tinggal Fitoremediasi (Studi kasus: di Pertambangan Nikel Sulawesi Selatan)," *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, vol. 12, no. 2, pp. 526–535, Aug. 2024, doi: 10.26418/JTLLB.V12I2.77369.
- [37] Pemerintah Republik Indonesia, *Lampiran IX Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021*. Jakarta, 2021.
- [38] E. Siswoyo, A. H. Prayitno, and N. S. Rahma, "Paving Block Ramah Lingkungan Berbasis Lumpur dari Instalasi Pengolahan Air Minum," *Jurnal Permukiman*, vol. 17, no. 1, pp. 9–15, May 2022, doi: 10.31815/JP.2022.17.9-15.
- [39] I. A. Budjang, H. Sutrisno, and M. Dini, "Pemanfaatan Limbah Lumpur PDAM Gunung Poteng Kota Singkawang Sebagai Bahan Pengganti Tanah Liat Pada Pembuatan Batu Bata," *Jurnal Ilmu Lingkungan*, vol. 21, no. 1, pp. 22–28, Jan. 2023, doi: 10.14710/JIL.21.1.22-28.
- [40] N. A. Sulityowati, "Kuat Tekan Dan Pelindian Logam Berat Paving Block dari Limbah Bahan Berbahaya Beracun Pengolahan Logam Terkait dengan Standar Nasional Indonesia," *Jurnal Permukiman*, vol. 13, no. 2, pp. 69–79, Nov. 2018, doi: 10.31815/JP.2018.13.69-79.