

Analisis Potensi Pelepasan Kromium Hexsavalen Di Daerah Pertambangan Nikel

Analysis of Hexavalent Chromium Release Potential in Nickel Mining Areas

Kadek Nando Setiawan

Jurusan Teknik Pertambangan, Universitas Andi Djemma
kadek@unanda.ac.id

Abstrak

Ketidakteraturan penambangan sumberdaya nikel di Indonesia menyebabkan banyak masalah lingkungan yang serius. Tumpukan batuan sisa pada *waste dump* penambangan nikel berpotensi sebagai sumber rembesan logam berat ke airtanah. Tujuan penelitian ini adalah mengidentifikasi potensi pelepasan kromium *hexsavalen* yang dapat diakibatkan dari adanya kegiatan penambangan terhadap kualitas airtanah dan air permukaan sekitar daerah pertambangan nikel. *X-Ray Fluorescence (XRF)* dilakukan untuk mengetahui kandungan unsur dan mineral pada batuan. *Toxicity Characteristics Leaching Procedure (TCLP)* dilakukan untuk memperkirakan konsentrasi Cr^{6+} pada *waste dump*. AAS (*Atomic Adsorption Spectrophotometer*) untuk mengetahui kandungan Cr^{6+} pada sampel air permukaan dan airtanah. Hasil pengujian XRF kandungan Cr_2O_3 menunjukkan *waste dump* mengandung 2,409% – 2,985% Cr_2O_3 dengan rata – rata 2,729%. Hasil tersebut kemudian digunakan dalam analisis potensi pelindian laboratorium dengan TCLP, hasil menunjukkan kelarutan Cr (VI) sangat rendah yaitu dari ketiga sampel sebesar $< 0,006$ mg/l. Berdasarkan hasil tersebut maka dilakukan pengujian kandungan Cr (VI) dengan AAS pada beberapa sampel air untuk mengetahui hasil dari pelepasan atau pelindian Cr (VI) secara alami. Hasil penelitian menunjukkan konsentrasi tertinggi Cr^{6+} sebesar 0,0462 mg/L pada sampel *sediment pond* dekat *waste dump*. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa logam berat Cr (VI) pada tumpukan batuan sisa dari *waste dump* dapat tertransportasikan ke dalam air tanah maupun ke air permukaan.

Kata Kunci: kromium heksavalen, XRF, TCLP, AAS, tambang nikel

Abstract

The irregularity of nickel resource mining in Indonesia causes many serious environmental problems. Piles of waste rock in nickel mining waste dumps have the potential to be a source of heavy metal seepage into groundwater. The aim of this research is to identify the potential release of hexavalent chromium which could result from mining activities on the quality of groundwater and surface water around nickel mining areas. XRF (X-Ray Fluorescence) is carried out to determine the element and mineral content in rocks. Toxicity Characteristics Leaching Procedure (TCLP) was carried out to estimate the concentration of Cr^{6+} in waste dumps. AAS (Atomic Adsorption Spectrophotometer) to determine the Cr^{6+} content in surface water and groundwater samples. The results of XRF testing for Cr_2O_3 content show that the waste dump contains 2.409% - 2.985% Cr_2O_3 with an average of 2.729%. These results were then used in the analysis of laboratory leaching potential with TCLP, the results showed that the solubility of Cr (VI) was very low, namely < 0.006 mg/l for the three samples. Based on these results, Cr (VI) content testing was carried out with AAS on several water samples to determine the results of the natural release or leaching of Cr (VI). The research results showed that the highest concentration of Cr^{6+} was 0.0462 mg/L in sediment pond samples near the waste dump. Therefore, it can be concluded that the heavy metal Cr(VI) in piles of waste rock from waste dumps can be transported into groundwater and surface water.

Keywords: hexavalent chromium, XRF, TCLP, AAS, nickel mine

PENDAHULUAN

Provinsi Sulawesi Tenggara merupakan daerah di Indonesia dengan cadangan nikel sebesar 97,4 miliar WMT, yang tersebar pada lahan seluas 480 ribu hektar. Potensi tersebut menyebabkan jumlah perusahaan pertambangan di Sulawesi Tenggara berkembang pesat khususnya dalam beberapa tahun terakhir. Sistem penambangan nikel yang diterapkan di Indonesia ialah tambang terbuka. Ketidakteraturan penambangan sumberdaya nikel di Indonesia menyebabkan banyak masalah lingkungan yang serius. Tumpukan batuan sisa pada *waste dump* penambangan nikel berpotensi sebagai sumber pencemar logam berat seperti Pb, Cd, Cr, Fe, Cu, Zn, dan Ni

(Ngkoimani & Chaerul, 2017). Di antara unsur – unsur tersebut kromium (Cr) memiliki kapasitas terkuat untuk bermigrasi dalam kondisi iklim tertentu. Overburden yang mengandung senyawa Cr_2O_3 dan Fe yang tinggi dapat menjadi sumber rembesan kromium *heksavalen* dan besi pada air permukaan dan airtanah (Tiwary et al., 2018).

Penambangan Nikel dengan sistem tambang terbuka (*open pit*) akan menghasilkan banyak sedimen dari kegiatan pengupasan tanah. Sedimen tersebut akan menjadi sumber terbentuknya kromium trivalen (Cr^{3+}) dan kromium heksavalen (Cr^{6+}). Lokasi pit, waste dump, stok pile merupakan area yang memiliki potensi tinggi terjadinya pelepasan kromium heksavalen ke lingkungan perairan sekitar. *Waste dump* merupakan tempat pembuangan material overburden yang tinggi kadar kromium, jika tempat pembuangan OB tersebut terkena curah hujan yang cukup tinggi selama bertahun - tahun maka dapat timbul air lindi yang mengandung logam berat Cr (VI) dan kontaminan lainnya.

Kromium heksavalen bersifat mudah larut dan sangat mobile daripada bentuk trivalen. Cr^{6+} sangat karsinogenik dan dikenal 100 – 1000 kali lebih beracun daripada Cr^{3+} (kromium trivalen) (Linos et al., 2011). Cr^{6+} diketahui dapat menyebabkan kanker paru-paru, rongga hidung, sinus paranasal, dan lambung, serta laring (Linos et al., 2011). Cr^{6+} dihasilkan dari proses oksidasi alami mineral pembawa Cr^{3+} . Spesies Cr dipengaruhi oleh pH dan Eh air (Henderson, 1994). Pelepasan Cr^{6+} kedalam air pada tanah laterit berkaitan dengan reaksi oksidatif Cr^{3+} dengan oksida Mn (Equeenuddin & Pattnaik, 2020; Fandeur et al., 2009). Berdasarkan sifat – sifat dan dampak yang dapat diakibatkan dari logam berat Cr (VI) maka perlu dilakukannya studi mengenai identifikasi potensi pelepasan Cr (VI) ke lingkungan perairan. Analisis XRF dapat mengidentifikasi awal tentang distribusi dan konsentrasi unsur dan senyawa yang memberikan informasi penting untuk perencanaan tindakan remediasi atau penanganan yang tepat guna melindungi lingkungan (Hanum et al., 2024). Kemudian Toxicity Characteristic Leaching Procedur (TCLP) banyak digunakan untuk menilai potensi besaran konsentrasi dalam limbah yang dapat terlepas ke dalam air (Adhikari & Mal, 2021; Lim et al., 2009; Sun et al., 2006; P. Wang et al., 2019).

Tujuan penelitian ini adalah mengidentifikasi potensi pelepasan kromium heksavalen yang dapat diakibatkan dari adanya kegiatan penambangan pada area *waste dump* terhadap kualitas airtanah dan air permukaan sekitar daerah pertambangan nikel. Identifikasi awal dilakukan dengan pengujian XRF, yang selanjutnya dilakukan uji pelindian secara laboratorium menggunakan metode TCLP serta dilakukan pengujian AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometry*) untuk mengetahui konsentrasi pelepasan logam berat Cr (VI) secara alami.

METODOLOGI

Penelitian ini merupakan penelitian lapangan yang dilanjutkan dengan analisis di laboratorium. Penelitian ini didukung oleh penelitian deskriptif dengan pendekatan kuantitatif dan kualitatif. Penelitian deskriptif yaitu menganalisis dan menyajikan data secara sistematis sehingga dapat lebih mudah untuk dipahami dan disimpulkan.

Metode Pengumpulan Data

Metode pengambilan sampel tanah dilakukan dengan teknik Purposive sampling yaitu menentukan titik sampel yang akan diambil dengan tujuan mendapatkan sampel dari lokasi yang memiliki potensi pelepasan kromium heksavalen tertinggi. Sampel tanah diambil di tumpukan batuan sisa pada *waste dump* sebanyak lima (5) sampel, sepuluh (10) sampel diambil dari *stock pile* dan satu (1) sampel tanah diambil pada pemukiman, pengambilan sampel dilakukan pada kedalaman 20 cm dari permukaan tanah. Sampel tanah dikumpulkan dengan berat masing – masing sekitar 1 Kg. Pengambilan sampel tanah mengacu pada SNI 8520:2018 tentang cara pengambilan contoh uji limbah B3 padat.

Pada pengambilan sampel air dilakukan dengan teknik grab sampling yaitu, pengambilan sampel dengan cara sampel diambil secara langsung dari badan air yang sedang dipantau. Pengambilan sampel airtanah dilakukan pada sembilan (9) sumur penduduk dan dua (2) sumur bor di dalam area penambangan. Pengambilan sampel airtanah mengacu pada SNI 6989.58:2008. Pengambilan sampel air permukaan dilakukan pada tiga (3) lokasi yaitu dua (2) sampel pada sediment pond dekat *waste dump* dan satu (1) sampel pada sungai.

Metode Analisis Data

Analisis data yang akan dilakukan dengan pengujian laboratorium yang meliputi analisis XRF dan TCLP pada sampel tanah serta pengujian ASS pada sampel air. Hasil analisis dari beberapa data tersebut digunakan untuk memahami potensi pelepasan kromium heksavalen dari beberapa sumber ke lingkungan perairan sekitar area penambangan nikel. Beberapa analisis data yang dilakukan sebagai berikut:

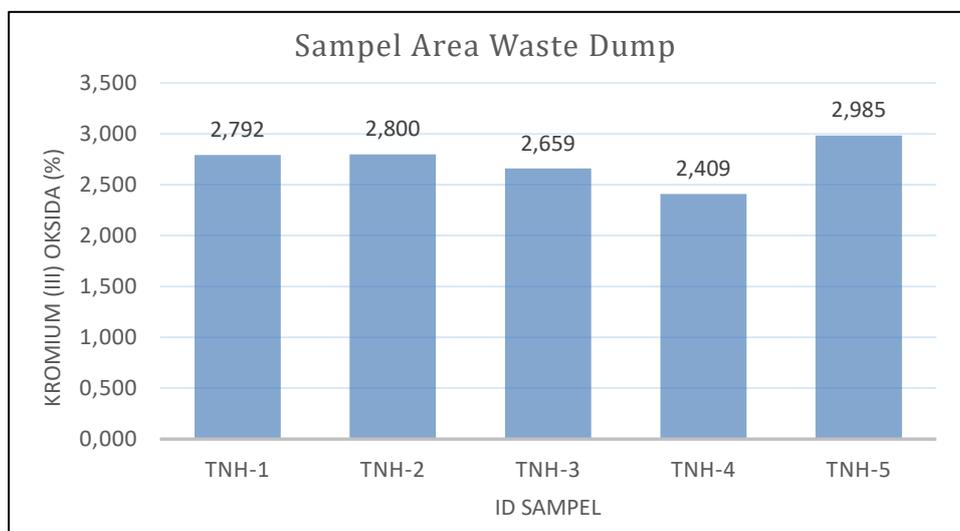
- Analisis data hasil uji geokimia tanah menggunakan metode XRF yaitu, menganalisis kadar senyawa dan unsur Cr_2O_3 pada sampel tanah. Sampel dengan nilai kadar tertinggi akan dilakukan uji TCLP.
- Analisis data hasil uji pelindian menggunakan metode TCLP yaitu, menganalisis konsentrasi Cr (VI) yang berpotensi terlindian. Hasil pelindian pada batuan sisa di waste dump penambangan, kemudian dibandingkan dengan Permen LH Nomor 09 Tahun 2006 tentang baku mutu air limbah bagi usaha dan/atau kegiatan pertambangan bijih nikel.
- Analisis data hasil uji kualitas air menggunakan metode AAS yaitu, menganalisis konsentrasi Cr (VI), yang kemudian dibandingkan dengan PP Nomor 22 Tahun 2021 tentang penyelenggaraan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup, baku mutu yang digunakan adalah baku mutu kelas satu (1).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Tanah Pada *Waste Dump*, *Stock Pile*, dan Permukiman

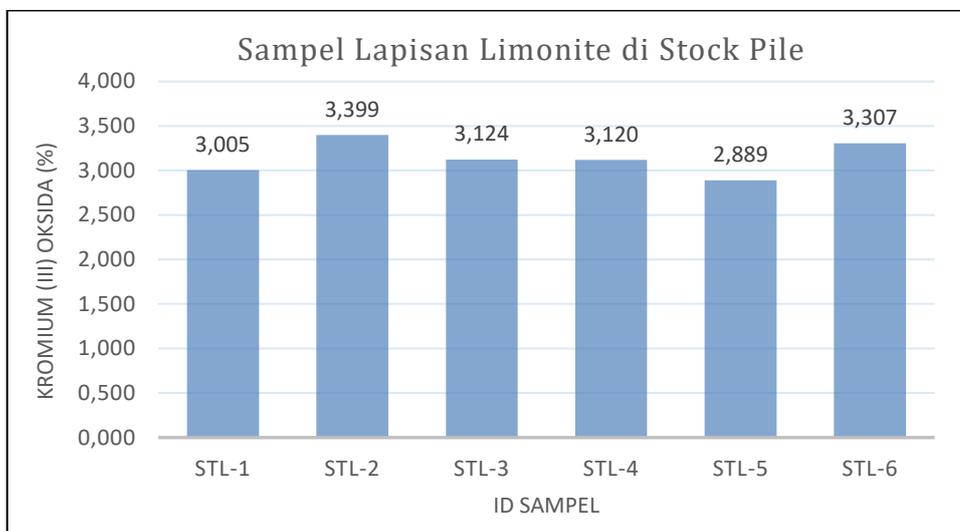
Overburden (OB) pada *waste dump* adalah sumber utama pelindian logam berat ke dalam air permukaan dan airtanah. OB mengandung berbagai konsentrasi unsur dan mineral yang menjadi sumber pelindian logam berat. Untuk mengetahui kandungan Cr^{6+} pada material *waste dump* maka dilakukan uji XRF menggunakan alat Epsilon 4. Pengujian juga dilakukan pada sampel tanah area stock pile untuk mengetahui kandungan Cr^{6+} pada material limonite dan saprolite. Sebagai data pembanding dilakukan pengambilan sampel tanah area permukiman sekitar tambang.

Sampel tanah yang di ambil kemudian dilakukan preparasi sampel dikeringkan di oven listrik selama ± 60 menit dengan suhu 105°C , sampel yang kering dimasukkan ke mesin Jaw Crusher sampai ukuran menjadi -10 mm, setelah di crushing tanah dimasukkan kedalam alat Splitter untuk mereduksi sampel atau membagi sampel menjadi 2 bagian, sampel yang dari Splitter kemudian ditaruh kedalam Ring Bowl Dishmill dan diletakkan kedalam mesin Dishmill untuk dihaluskan selama ± 8 menit sampai berukuran 200 mesh. Terakhir sampel dimasukkan kedalam holder pada mesin Epsilon untuk pembacaan hasil. Hasil analisis kandungan mineral pembawa kromium pada sampel material *waste dump* dapat dilihat pada Gambar 1.



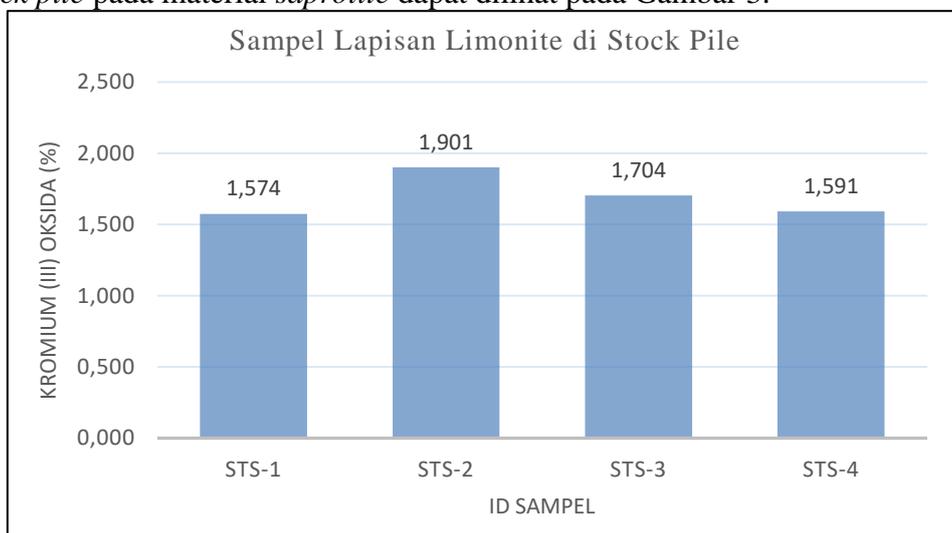
Gambar 1. Hasil Pengujian Kandungan Cr_2O_3 Pada Material *Waste Dump*

Hasil pengujian kandungan Cr_2O_3 menunjukkan *waste dump* mengandung 2,409% – 2,985% Cr_2O_3 dengan rata – rata 2,729% yang dapat menjadi sumber pencemaran kromium heksavalen pada air permukaan dan air tanah karena batuan pembawa Cr_2O_3 terekspos lama di area *waste dump* yang kontak langsung dengan oksigen dan air. Hasil pengujian Cr_2O_3 di area *stock pile* pada material limonite dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil Pengujian Kandungan Cr_2O_3 Pada Material *Waste Dump*

Hasil pengujian kandungan Cr_2O_3 menunjukkan material *limonite* pada *stock pile* mengandung 2,889% – 3,399% Cr_2O_3 dengan rata – rata 3,141%. Lapisan limonite memiliki kandungan Cr_2O_3 tertinggi daripada lapisan *soil* dan *saprolite*. Lintjewas, dkk (2019) menyatakan bahwa kadar Cr_2O_3 semakin tinggi pada bagian *limonite* dan semakin menurun kadarnya ketika mendekati batuan dasar (*bed rock*). Hasil pengujian Cr_2O_3 di area *stock pile* pada material *saprolite* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil Pengujian Kandungan Cr_2O_3 Pada Material *Waste Dump*

Potensi Pelepasan Kromium Heksavalen

Pengujian TCLP dilakukan pada 3 sampel yaitu 2 sampel dengan kandungan Cr (VI) tertinggi pada *waste dump* (TNH-2 dan TNH-5) serta 1 sampel pada tanah pemukiman (TNH-6). Pengujian diawali dengan penentuan pH dan diekstraksi pada larutan pada vessel yang ditempatkan pada alat ekstraktor dan siap diekstrak selama 18 jam dengan kecepatan $30 \text{ rpm} \pm 2$. Terakhir larutan disaring dan siap di analisa. Hasil menunjukkan kandungan Cr (VI) yang terlarutkan sangat rendah. Kelarutan Cr (VI) pada dari ketiga sampel sebesar $< 0,006 \text{ mg/l}$.

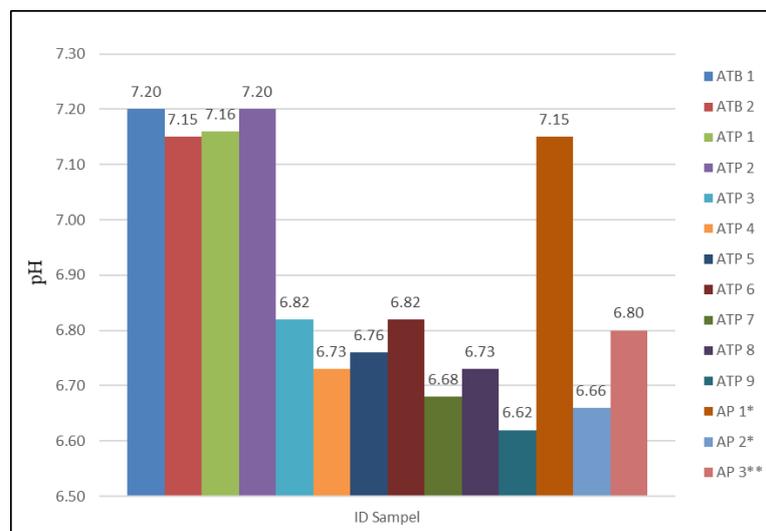
Berdasarkan hasil pengujian TCLP konsentrasi Cr (VI) yang terlarutkan masih rendah, hal ini disebabkan oleh pH fluida yang digunakan dalam pengujian TCLP yaitu $4,93 \pm 0,05$. Hal tersebut diperjelas oleh penelitian Gunkel, dkk. 2014 yang menyatakan bahwa adsorpsi ion kromat oleh oksida Mn, Fe, dan Al meningkat dengan menurunnya pH. Sehingga pada pH rendah Cr (VI) diserap oleh oksida Mn dan dapat menghambat pelepasan Cr (VI), selain itu hal ini dapat dikaitkan dengan fakta bahwa dengan penurunan pH, aktivitas ion Fe^{2+} menjadi lebih banyak yang memfasilitasi reduksi Cr (VI) menjadi Cr (III) (Equeenuddin dan Pattnaik, 2020). Ada beberapa faktor yang mempengaruhi pelepasan logam pada pengujian TCLP seperti ukuran partikel, waktu pengujian, dan pH.

Tabel 1. Hasil Pengujian TCLP

Parameter	Satuan	Kode Sampel		
		TNH 2	TNH 5	TNH 6*
Cr (VI)	mg/l	< 0,006	< 0,006	< 0,006

Analisis Kandungan Cr (VI) Pada Perairan Sekitar Tambang

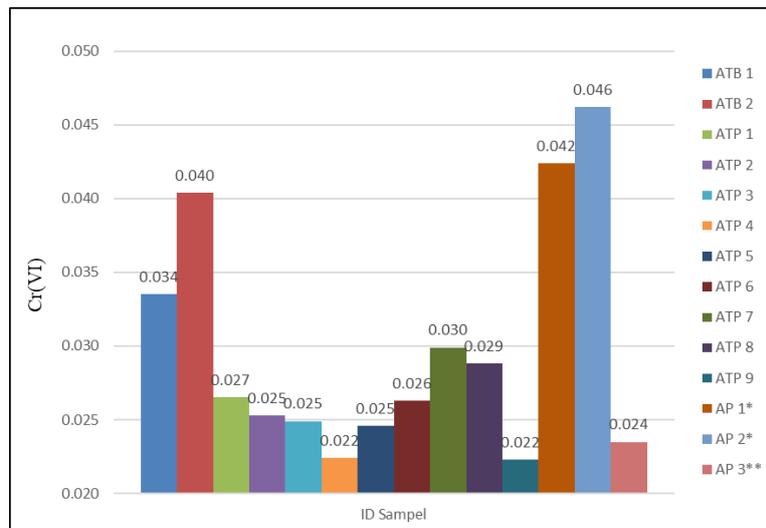
Setelah dilakukan semua pengujian pada sampel tanah, mulai dari identifikasi XRF untuk mengetahui kandungan mineral Cr_2O_3 , kemudian dilakukan pelindian laboratorium dengan pengujian TCLP untuk mengetahui potensi pelepasan Cr (VI) ke perairan. Berdasarkan hasil tersebut dilakukan pengujian kandungan Cr (VI) pada beberapa sampel air untuk mengetahui hasil dari pelepasan atau pelindian Cr (VI) secara alami. Pengambilan sampel airtanah dan air permukaan di daerah penelitian sebanyak 15 titik, pengambilan sampel secara acak dan diharapkan dapat mewakili wilayah penelitian. Pengambilan sampel dilakukan pada sumur bor (ATB), sumur gali penduduk (ATP), *sediment pond* (AP*), dan sungai (AP**).



Gambar 4. Hasil Pengukuran pH Pada Sampel Air

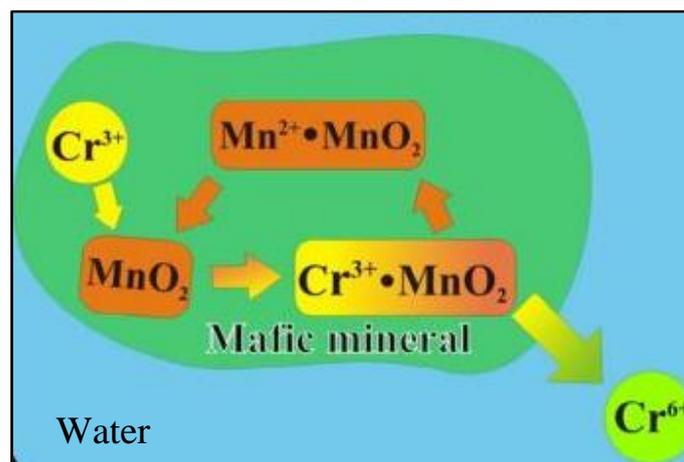
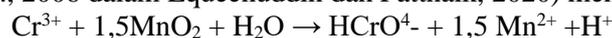
Pada gambar 4 menunjukkan hasil pengukuran pH pada sampel air, dimana pH air di daerah cenderung netral yaitu berkisar antara 6,62 – 7,20. Rata – rata pH air tanah di daerah pemukiman penduduk (ATP 1 – ATP 9) adalah 6,84 lebih rendah dibandingkan air tanah di area dalam tambang (ATB 1 & ATB 2) yaitu 7,18. Hal tersebut karena perbedaan kedalaman sumur pengambilan sampel air tanah antara sampel air tanah sumur bor dalam tambang dan sumur penduduk warga. Kedalaman pengambilan sampel pada sumur penduduk berkisar 0,9 – 2,8 m sedangkan pada sumur bor dalam tambang berkisar 9,4 - 16,2 m. Jenis lapisan tanah pada akuifer sumur penduduk adalah lapisan limonite dimana memiliki karakteristik tinggi kandungan Fe sehingga membuat pH air tanah nya lebih rendah daripada air tanah sumur bor dalam tambang yang berada pada lapisan saprolite sampai dengan bad rock yang memiliki kandungan Fe rendah

sehingga nilai pH cenderung netral. Kemudian pada Gambar 5 menunjukkan hasil pengujian kandungan Cr (VI) pada sampel air tanah dan air permukaan.



Gambar 5. Hasil Pengujian Kandungan Cr (VI) Pada Sampel Air

Hasil pengujian kandungan Cr (VI) pada sampel air tanah maupun air permukaan didalam area tambang (ATB1, ATB2, AP1, dan AP2) menunjukkan lebih tinggi dibandingkan sampel air di luar area tambang (ATP1 – ATP9). Dimana kandungan Cr (VI) pada airtanah di dalam tambang sekitar 0,037 mg/l dan pada *sediment pond* sekitar 0,044 mg/l sedangkan kandungan Cr (VI) pada sumur penduduk sekitar 0,26 mg/l dan pada air sungai yaitu 0,24 mg/l. Konsentrasi Cr (VI) masih dibawah baku mutu kelas 1 yaitu 0,05 mg/L, tetapi nilai tersebut mengindikasikan telah terjadinya pencemaran. Menurut penelitian dari Dokou, dkk. (2018) konsentrasi kondisi alami Cr (VI) pada batuan ultramafik berkisar 0,02 mg/L sehingga sampel air di sedimen pond 2 kali lipat lebih besar dari kondisi alaminya. Terbentuknya kromium heksavalen Cr (VI) pada *sediment pond* berkaitan dengan reaksi oksidatif Cr (III) dengan oksida Mn (Gambar 6). Oksida mangan adalah agen utama yang bertanggung jawab untuk oksidasi Cr (III) menjadi Cr (VI) dalam air dengan nilai pH antara 6,5 dan 8,5 (Apte dkk., 2006 dalam Equeenuddin dan Pattnaik, 2020) menurut reaksi berikut:

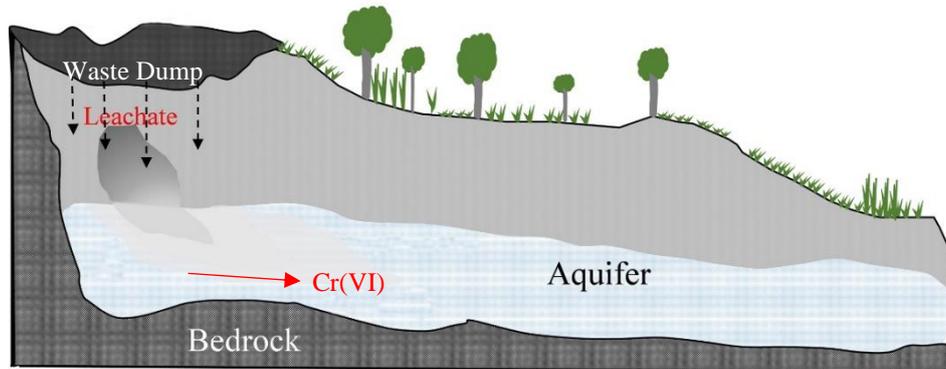


Gambar 6. Proses Oksidasi Cr (III) Menjadi Cr (VI)

Menurut Ndung'u dkk. (2010) Oksidasi alami Cr (III) menjadi Cr (VI) oleh Mn hidroksida, kemungkinan dibentuk oleh aktivitas mikroba. Konsentrasi Cr (VI) dan keseimbangan antara dua spesies Cr dalam lingkungan berair dikendalikan oleh proses seperti adsorpsi/desorpsi pada permukaan mineral, pengendapan/pelarutan dari mineral kaya Cr, dan transformasi redoks. Menurut Gunkel dkk (2014) menyatakan bahwa sampel air yang diambil di tambang pada musim kemarau lebih tinggi konsentrasi Cr (VI) nya dari pada pengambilan pada musim hujan karena

adanya proses pemekatan. Pada musim penghujan sampel air permukaan yang diambil sudah mengalami pengenceran yang diakibatkan oleh curah hujan yang tinggi dan akan mempengaruhi konsentrasi logam. hal ini menunjukkan bahwa batuan sisa di *waste dump* merupakan sumber pencemar potensial terhadap air permukaan maupun air tanah.

Mekanisme transportasi kontaminan, *waste dump* diasumsikan sebagai sumber pencemaran yang memiliki konsentrasi Cr (VI) tinggi, kemudian terjadi proses *leached* dari logam berat Cr (VI) menuju akuifer. Gambar 7 menunjukkan ilustrasi proses pencemaran dari *waste dump*.



Gambar 7. Proses Pencemaran Airtanah (modifikasi dari Abiriga, dkk. 2020)

Dari gambar diatas menunjukkan kontaminan Cr (VI) dari *waste dump* terinfiltrasi masuk kedalam akuifer melalui proses gravitasi. *transport* kontaminan dipengaruhi oleh proses hidrogeokimia seperti adsorpsi/desorpsi, reaksi pertukaran ion, pelarutan dan pengendapan, reaksi redoks, pH dan aktivitas mikroba (Adhikari dan mal, 2021). Proses tersebut dapat menyebabkan pengurangan konsentrasi kontaminan atau polutan dalam larutan tanah karena kontak dengan partikel atau butir tanah, dimana adveksi membuat kontaminan bergerak mengikuti kecepatan airtanah, sedangkan dispersi hidrodinamik kontaminan bergerak diakibatkan oleh proses difusi karena adanya gradien konsentrasi yang mengakibatkan gerak Brown serta mekanisme dispersi.

KESIMPULAN

Waste dump pertambangan nikel memiliki potensi sebagai sumber pelepasan kromium heksavalen ke air tanah maupun air permukaan, lapisan limonite memiliki kandungan senyawa kromium (III) oksida (Cr_2O_3) yang tinggi, dimana lapisan *limonite* biasanya memiliki kadar nikel yang rendah dan dibuang di area *waste dump* dalam jangka waktu yang lama, sehingga akan terekspose dan terakumulasi di area *waste dump* dan membentuk logam berat terlarut berupa Cr(VI) yang berpotensi terjadi pengayaan secara konsentrasi serta dapat berdampak buruk bagi ekosistem lingkungan sekitar pertambangan jika tidak dikendalikan dengan baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada seuruh pihak yang telah terlibat dalam membantu penulis untuk menyelesaikan artikel ini. Penulis juga berterimakasih kepada pihak jurnal Teknologi Mineral FT UNMUL yang sudah berkesan menerima artikel ini untuk diterbitkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhikari, K., & Mal, U. (2021). Evaluation of contamination of manganese in groundwater from overburden dumps of Lower Gondwana coal mines. *Environmental Earth Sciences*, 80(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09293-9>
- Dokou, Z., Karatzas, G. P., Nikolaidis, N. P., & Kalogerakis, N. (2018). Modeling the Groundwater Flow and Hexavalent Chromium Transport in the Asopos River Basin. September.

- Equeenuddin, S. M., & Pattnaik, B. K. (2020). Hydrogeochemical evolution of hexavalent chromium at the Sukinda ultramafic complex in eastern part of India. *Chemie Der Erde*, 80(4), 125633. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125633>
- Fandeur, D., Juillot, F., Morin, G., Livi, L., Cognigni, A., Webb, S. M., Ambrosi, J. P., Fritsch, E., Guyot, F., & Brown, G. E. (2009). XANES evidence for oxidation of Cr (III) to Cr (VI) by Mn-oxides in a lateritic regolith developed on serpentinized ultramafic rocks of New Caledonia. *Environmental Science and Technology*, 43(19), 7384–7390. <https://doi.org/10.1021/es900498r>
- Gunkel-Grillon, P., Laporte-Magoni, C., Lemestre, M., & Bazire, N. (2014). Toxic chromium release from nickel mining sediments in surface waters, New Caledonia. *Environmental chemistry letters*, 12(4), 511-516.
- Hanum, F. F., Salamah, S., Sanuhung, A. R., & Wardhana, B. S. (2024). Study on The Potential Contamination of Heavy Metals: Analysis of Cr and Pb Contents From Power Plants in Indonesia Using the Batch Leaching Method. *Jurnal Sains Natural*, 14(1), 53-61. <https://doi.org/10.31938/jsn.v14i1.689>
- Lim, M., Han, G. C., Ahn, J. W., You, K. S., & Kim, H. S. (2009). Leachability of arsenic and heavy metals from mine tailings of abandoned metal mines. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 6(11). <https://doi.org/10.3390/ijerph6112865>
- Linos, A., Petralias, A., Christophi, C. A., Christoforidou, E., Kouroutou, P., Stoltidis, M., Veloudaki, A., Tzala, E., Makris, K. C., & Karagas, M. R. (2011). Oral ingestion of hexavalent chromium through drinking water and cancer mortality in an industrial area of Greece - An ecological study. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 10(1), 1–8. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-10-50>
- Lintjewas, L., Setiawan, I., & Al Kausar, A. (2019). Profil Endapan Nikel Laterit di Daerah Palangga, Provinsi Sulawesi Tenggara. *RISSET Geologi dan Pertambangan*, 29(1), 91-104.
- Ngkoimani, L. O., & Chaerul, M. (2017, September). Impacts of Nickel Laterite Post-Mining Activities on The Level of Heavy Metal Contamination in River Sediments. In 2nd International Conference on Education, Science, and Technology (ICEST 2017) (pp. 240-242). Atlantis Press.
- Sun, Y., Xie, Z., Li, J., Xu, J., Chen, Z., & Naidu, R. (2006). Assessment of toxicity of heavy metal contaminated soils by the toxicity characteristic leaching procedure. *Environmental Geochemistry and Health*, 28(1–2). <https://doi.org/10.1007/s10653-005-9014-0>
- Tiwary, R. K., Kumari, B., & Singh, D. B. (2018). Water Quality Assessment and Correlation Study of Physico-Chemical Parameters of Sukinda Chromite Mining Area, Odisha, India. 357–370. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5792-2_29
- Wang, P., Sun, Z., Hu, Y., & Cheng, H. (2019). Leaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact. *Science of the Total Environment*, 695. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133893>