

Penggunaan Reaktor Modular Untuk Pengolahan Emas Yang Ramah Lingkungan Di Tambang Rakyat Talawaan

Audreylia T. Mustamin^{#a}, Hendra Riogilang^{#b}, Steeva G. Rondonuwu^{#c}

[#]Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia

^aaudreyliamustamin04@gmail.com, ^bhendra.riogilangunsrat.ac.id, ^csteeva_rondonuwu@unsrat.ac.id

Abstrak

Kegiatan pengolahan emas pada Pertambangan Emas Skala Kecil (PESK) di Kecamatan Talawaan, Kabupaten Minahasa Utara, masih menerapkan proses sianidasi dengan sistem pelindian terbuka dan pengelolaan limbah yang belum optimal sehingga berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi eksisting pengolahan emas berbasis sianida serta menyusun rancangan reaktor modular sebagai alternatif teknologi pengolahan emas yang lebih ramah lingkungan. Penelitian menggunakan metode deskriptif-rekayasa (*descriptive engineering research*) dengan pendekatan *mixed methods*. Data diperoleh melalui observasi lapangan, wawancara, dokumentasi, dan studi literatur untuk mengidentifikasi kondisi eksisting serta menjadi dasar dalam penyusunan rancangan reaktor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pengolahan emas di Tambang Rakyat Talawaan masih menggunakan pelindian terbuka dengan pengendalian proses dan pengelolaan limbah yang belum optimal sehingga berpotensi meningkatkan pencemaran akibat penggunaan sianida. Berdasarkan kondisi tersebut, direkomendasikan reaktor modular tipe *Intensive Leach Reactor* (ILR) berbentuk silinder vertikal dengan sistem pelindian tertutup yang disesuaikan dengan karakteristik pengolahan emas di lokasi penelitian. Penerapan reaktor modular memungkinkan proses sianidasi berlangsung lebih terkendali, mengurangi potensi kehilangan larutan sianida dan pelepasan gas hidrogen sianida (HCN), serta mendukung pengelolaan limbah yang lebih baik. Dengan demikian, reaktor modular tipe ILR dapat menjadi alternatif teknologi untuk mendukung pengolahan emas yang lebih aman dan ramah lingkungan pada pertambangan emas rakyat.

Kata kunci: *Intensive Leach Reactor, pengolahan emas, pertambangan emas skala kecil, reaktor modular, sianida*

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki potensi sumber daya emas yang besar. Selain dikelola oleh perusahaan pertambangan, emas juga diusahakan melalui Pertambangan Emas Skala Kecil (PESK) yang menjadi sumber mata pencaharian masyarakat di berbagai daerah. Salah satu wilayah yang memiliki aktivitas PESK adalah Kecamatan Talawaan, Kabupaten Minahasa Utara, Provinsi Sulawesi Utara. Meskipun memberikan manfaat ekonomi, kegiatan pengolahan emas di wilayah tersebut masih menghadapi berbagai permasalahan, terutama terkait penggunaan teknologi yang sederhana dan pengelolaan limbah yang belum optimal.

Proses pengolahan emas di Tambang Rakyat Talawaan umumnya menggunakan metode sianidasi dengan sistem pelindian terbuka. Metode ini dipilih karena memiliki tingkat *recovery* emas yang tinggi, namun penerapannya masih dilakukan menggunakan tong atau tangki sederhana tanpa sistem pengendalian proses yang memadai. Selain itu, limbah cair hasil pelindian masih ditampung pada kolam terbuka, sedangkan tailing disimpan di sekitar lokasi pengolahan sehingga berpotensi mencemari tanah dan badan air apabila tidak dikelola dengan baik.

Seiring meningkatnya kebutuhan akan teknologi pengolahan yang lebih aman dan ramah lingkungan, reaktor modular menjadi salah satu alternatif yang dapat diterapkan pada kegiatan pertambangan emas skala kecil. Sistem pengolahan tertutup pada reaktor modular berpotensi mengurangi risiko pencemaran lingkungan, meningkatkan efisiensi proses pelindian, serta lebih sesuai dengan kapasitas produksi tambang rakyat. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kondisi eksisting pengolahan emas di Tambang Rakyat Talawaan serta menyusun rancangan desain reaktor modular sebagai alternatif teknologi pengolahan emas yang lebih ramah lingkungan.

Berbagai penelitian telah membahas penggunaan sianida dalam pengolahan emas dan dampaknya terhadap lingkungan. Namun, penelitian mengenai penerapan reaktor modular yang dirancang sesuai dengan karakteristik operasional tambang emas rakyat, khususnya di Kecamatan Talawaan, masih terbatas. Oleh karena itu, diperlukan alternatif teknologi yang tidak hanya meningkatkan efisiensi proses pelindian, tetapi juga mampu mengurangi potensi pencemaran lingkungan dan mudah diterapkan pada skala pertambangan rakyat.

Salah satu teknologi yang berpotensi diterapkan untuk meningkatkan keamanan dan efisiensi pengolahan emas adalah reaktor modular. Reaktor modular merupakan sistem pengolahan yang dirancang dalam bentuk unit proses yang fleksibel, sehingga dapat disesuaikan dengan kapasitas produksi dan karakteristik pertambangan emas skala kecil. Pada penelitian ini, tipe reaktor modular yang direkomendasikan adalah *Intensive Leach Reactor* (ILR) karena menggunakan sistem pelindian tertutup yang memungkinkan proses sianidasi berlangsung lebih terkendali. Sistem ini mampu meningkatkan efisiensi kontak antara bijih, larutan sianida, dan oksigen, mengurangi kehilangan larutan akibat penguapan maupun tumpahan, serta mendukung pengelolaan limbah yang lebih baik sehingga lebih sesuai diterapkan pada kegiatan pertambangan emas rakyat.

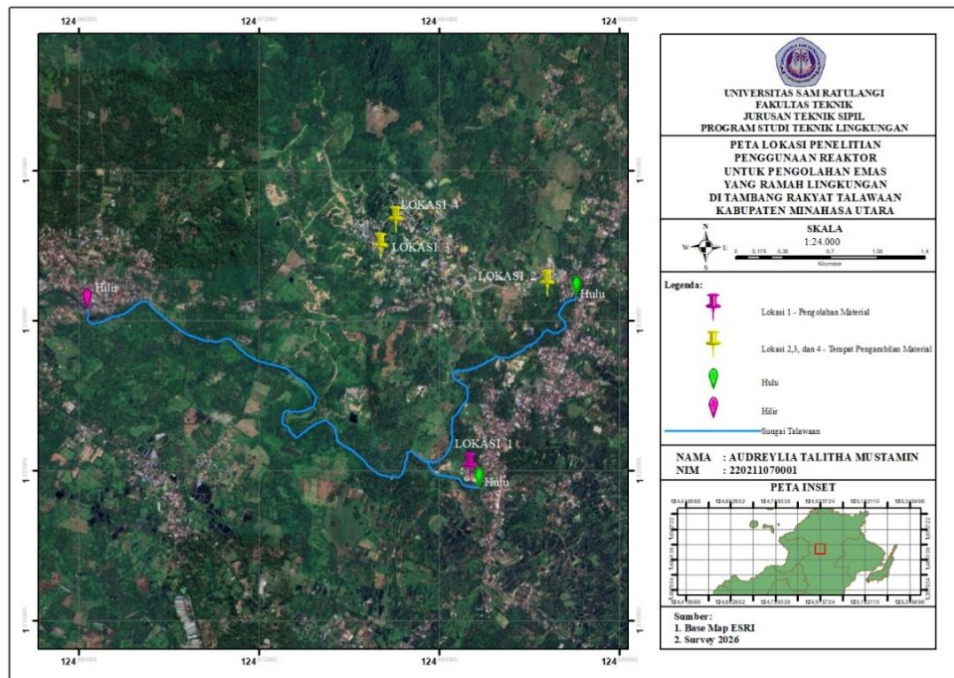
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi eksisting pengolahan emas berbasis sianida di Tambang Rakyat Talawaan serta menyusun rancangan reaktor modular tipe *Intensive Leach Reactor* (ILR) sebagai alternatif teknologi pengolahan emas yang lebih ramah lingkungan.

2. Metode Penelitian

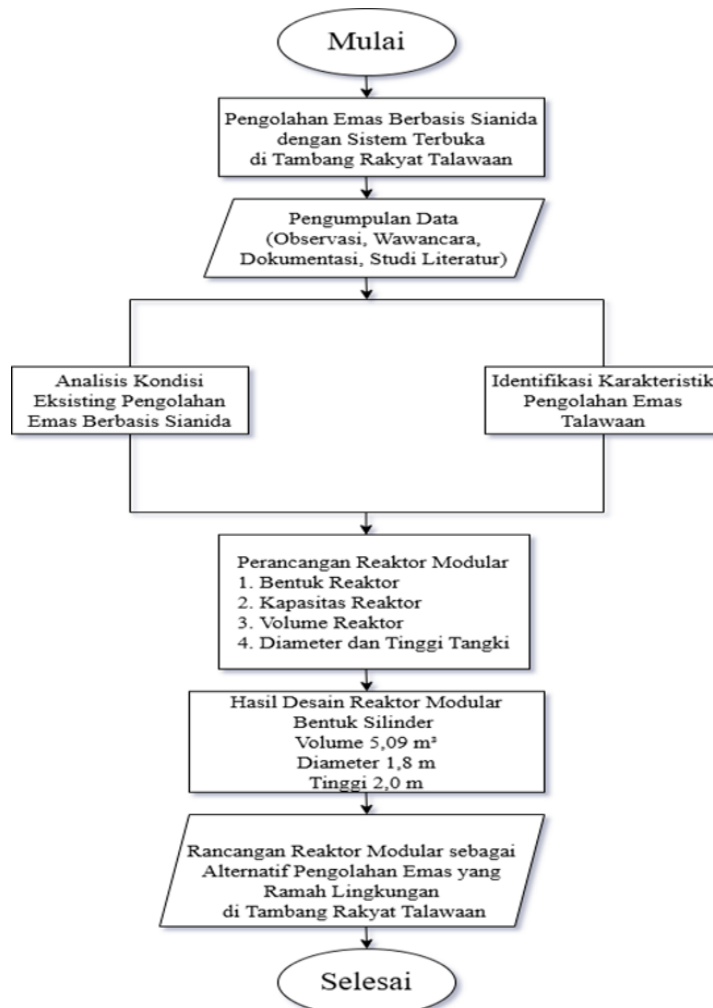
Penelitian dilaksanakan di Kecamatan Talawaan, Kabupaten Minahasa Utara, Provinsi Sulawesi Utara, yang merupakan kawasan Pertambangan Emas Skala Kecil (PESK). Metode penelitian yang digunakan adalah deskriptif-rekayasa (*descriptive engineering research*) dengan pendekatan *mixed methods* yang mengombinasikan analisis kualitatif dan kuantitatif. Data primer diperoleh melalui observasi lapangan, wawancara dengan penambang, dan dokumentasi, sedangkan data sekunder diperoleh melalui studi literatur yang berkaitan dengan pengolahan emas berbasis sianida, teknologi reaktor modular, dan pengelolaan limbah pertambangan.

Analisis kualitatif dilakukan secara deskriptif untuk mengidentifikasi dan menggambarkan kondisi eksisting pengolahan emas di lokasi penelitian, meliputi tahapan pengolahan, penggunaan bahan kimia, sistem pelindian, kondisi peralatan, serta pengelolaan limbah. Hasil observasi dan wawancara kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi permasalahan pada sistem pengolahan eksisting dan menentukan kebutuhan teknologi pengolahan yang lebih terkendali dan ramah lingkungan.

Analisis kuantitatif digunakan dalam tahap perancangan reaktor modular tipe *Intensive Leach Reactor* (ILR). Analisis ini dilakukan berdasarkan data kapasitas pengolahan dan karakteristik *slurry* untuk menentukan kebutuhan volume reaktor serta dimensi tangki yang sesuai dengan kondisi pengolahan emas di Tambang Rakyat Talawaan. Hasil analisis kualitatif dan kuantitatif selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam penyusunan rancangan reaktor modular, meliputi penentuan tipe dan bentuk reaktor, sistem pengadukan, sistem pelindian tertutup, serta integrasi dengan sistem pengelolaan limbah.



Gambar 1. Lokasi Penelitian



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kondisi Eksisting Pengolahan Emas di Tambang Rakyat Talawaan

Berdasarkan hasil observasi lapangan, proses pengolahan emas di Tambang Rakyat Talawaan masih menggunakan metode sianidasi dengan sistem pelindian terbuka. Bijih emas yang telah melalui proses penghancuran dan penggerusan dicampurkan dengan larutan natrium sianida (NaCN) di dalam tong atau tangki sederhana, kemudian dilakukan proses pelindian selama waktu tertentu sebelum emas dipisahkan menggunakan karbon aktif. Sistem yang digunakan masih bersifat sederhana dan sebagian besar belum dilengkapi dengan pengendalian proses maupun fasilitas pengolahan limbah yang memadai.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa peralatan yang digunakan terdiri atas tromol, tong pelindian, tangki vertikal, serta kolam penampungan limbah. Penyimpanan bahan baku, bahan kimia, dan tailing masih berada dalam satu kawasan sehingga berpotensi meningkatkan risiko pencemaran lingkungan. Selain itu, limbah cair hasil pelindian hanya ditampung pada kolam terbuka tanpa proses pengolahan lanjutan, sedangkan limbah padat masih ditumpuk di sekitar area pengolahan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem pengolahan yang diterapkan belum memenuhi prinsip pengelolaan lingkungan yang baik.

Tabel 1. Hasil Pengamatan Langsung

NO.	Aspek Pengamatan	Hasil pengamatan
1	Metode Pengolahan	Menggunakan kombinasi metode sederhana (tromol/tong) dan penggunaan tangki vertikal pada beberapa unit
2	Peralatan	Terdiri dari tromol, tong, tangki/silo vertikal, serta peralatan pendukung lainnya
3	Penyimpanan bahan baku	Disimpan dalam karung dan diletakkan di area terbuka
4	Proses pengolahan emas menggunakan sianida	Pada beberapa unit, proses pengolahan masih dilakukan menggunakan tong dengan sistem terbuka.
5	Limbah padat (tailing)	Disimpan dalam karung dan di tumpuk di sekitar area pengolahan
6	Limbah cair	Ditampung pada kolam terbuka dengan kondisi air berwarna keruh
7	Sistem pengelolaan limbah	Limbah cair ditampung dalam tiga kolam terbuka secara bertahap, namun tidak terlihat adanya sistem pengolahan lanjutan yang optimal
8	Tata letak area	Area pengolahan, penyimpanan bahan, dan limbah berada dalam satu kawasan
9	Kondisi operasional	Kegiatan pengolahan dilakukan pada beberapa unit secara bersamaan
10	Kondisi area kerja	Permukaan tanah terbuka dan cenderung becek pada kondisi tertentu

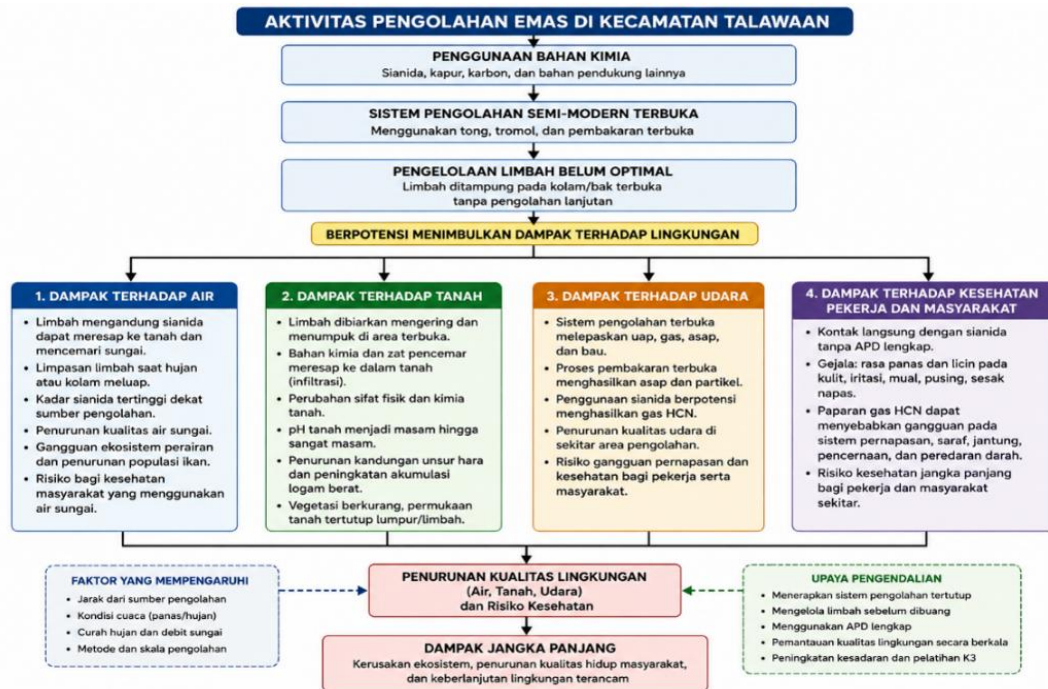
3.2. Dampak Lingkungan Akibat Sistem Pengolahan Eksisting

Penggunaan sistem pelindian terbuka menyebabkan larutan sianida berpotensi mengalami kehilangan akibat penguapan maupun tumpahan selama proses pengolahan. Pada kondisi pH yang tidak terkontrol atau berada di bawah pH 10, sianida bebas dapat bereaksi membentuk gas hidrogen sianida (HCN) yang bersifat sangat toksik. Gas HCN dapat terlepas ke udara selama proses pelindian terbuka sehingga meningkatkan risiko paparan terhadap pekerja dan masyarakat di sekitar area pengolahan. Selain membahayakan kesehatan, pelepasan HCN juga menyebabkan berkurangnya efisiensi penggunaan sianida dalam proses ekstraksi emas.

Selain potensi pembentukan HCN, limbah cair hasil pelindian masih ditampung pada kolam terbuka tanpa proses detoksifikasi sebelum dibuang ke lingkungan, sedangkan tailing ditumpuk di sekitar area pengolahan. Kondisi tersebut meningkatkan risiko pencemaran tanah dan badan air akibat residu sianida yang masih terkandung di dalam limbah. Di sisi lain, penggunaan alat pelindung diri oleh sebagian pekerja belum dilakukan secara optimal sehingga meningkatkan potensi paparan bahan kimia selama proses pengolahan berlangsung.

Hasil observasi menunjukkan bahwa sistem pengolahan yang diterapkan saat ini masih berorientasi pada peningkatan produksi, sedangkan aspek keselamatan kerja dan perlindungan

lingkungan belum menjadi perhatian utama. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem pengolahan yang mampu mengendalikan proses sianidasi secara lebih efektif, mempertahankan pH operasi pada kisaran yang aman, mengurangi pembentukan gas HCN, serta mendukung pengelolaan limbah yang lebih baik. Dalam penelitian ini, kebutuhan tersebut diakomodasi melalui penggunaan reaktor modular tipe *Intensive Leach Reactor* (ILR) dengan sistem pelindian tertutup yang memungkinkan proses berlangsung lebih terkendali.



Gambar 3. Dampak Lingkungan

3.3. Pemilihan Reaktor Modular Tipe *Intensive Leach Reactor* (ILR)

Berdasarkan karakteristik pengolahan emas di Tambang Rakyat Talawaan, teknologi yang direkomendasikan adalah reaktor modular tipe *Intensive Leach Reactor* (ILR). Reaktor modular dipilih karena memiliki konstruksi yang fleksibel sehingga dapat disesuaikan dengan kapasitas produksi pertambangan emas skala kecil. Sistem modular juga memungkinkan proses instalasi, pemeliharaan, maupun pengembangan kapasitas dilakukan dengan lebih mudah dibandingkan sistem pengolahan konvensional.

ILR menggunakan sistem pelindian tertutup dengan agitasi mekanik sehingga kontak antara bijih, larutan sianida, dan oksigen berlangsung lebih optimal. Dibandingkan sistem pelindian terbuka, teknologi ini mampu meningkatkan efisiensi proses, mengurangi kehilangan larutan sianida akibat penguapan, serta meminimalkan potensi pencemaran lingkungan. Selain itu, ukuran reaktor yang relatif kompak dan kemudahan pengoperasian menjadikan ILR lebih sesuai diterapkan pada kegiatan pertambangan emas rakyat.

Tabel 2. Spesifikasi Reaktor ILR untuk Tambang Rakyat Talawaan

Komponen	Spesifikasi
Tipe Reaktor	<i>Intensive Leach Reactor</i> (ILR)
Sistem Operasi	Sianidasi tertutup
Kapasitas Pengolahan	Disesuaikan dengan kapasitas pengolahan tambang rakyat
Volume Reaktor	Disesuaikan dengan volume <i>slurry</i> dan kebutuhan ruang pengadukan
Dimensi Reaktor	Disesuaikan dengan kapasitas dan kebutuhan proses pelindian
Material Reaktor	Material yang tahan terhadap kondisi proses sianidasi
Sistem Pengadukan	Agitator mekanik untuk menjaga homogenitas <i>Slurry</i>

Komponen	Spesifikasi
Pengendalian Proses	Pengendalian kondisi sianidasi dan pH selama proses pelindian
Pengelolaan Limbah	Terintegrasi dengan detoksifikasi, sedimentasi, dan <i>constructed wetland</i>

3.4. Perancangan Reaktor Modular Tipe ILR

Perancangan reaktor modular tipe *Intensive Leach Reactor* (ILR) dilakukan berdasarkan kondisi eksisting dan karakteristik pengolahan emas di Tambang Rakyat Talawaan. Penentuan rancangan mempertimbangkan kapasitas pengolahan, karakteristik slurry, kebutuhan ruang pengadukan, serta kondisi operasional sianidasi. Berdasarkan hasil analisis tersebut, reaktor dirancang dalam bentuk silinder vertikal dengan kapasitas yang disesuaikan dengan kegiatan pengolahan emas skala kecil di lokasi penelitian.

Bentuk silinder vertikal dipilih karena mendukung proses pencampuran slurry secara lebih merata dan sesuai dengan penggunaan agitator mekanik. Reaktor menggunakan sistem pelindian tertutup sehingga proses sianidasi dapat berlangsung dalam kondisi yang lebih terkendali dibandingkan sistem pengolahan eksisting. Sistem ini juga memungkinkan pengendalian proses yang lebih baik serta mengurangi kontak langsung antara larutan sianida dengan lingkungan.

Rancangan reaktor modular selanjutnya diintegrasikan dengan sistem pengelolaan limbah yang terdiri atas unit detoksifikasi, sedimentasi, dan *constructed wetland*. Integrasi tersebut bertujuan agar limbah hasil proses pelindian tidak langsung dilepaskan ke lingkungan, tetapi terlebih dahulu melalui tahapan pengolahan untuk mengurangi kandungan bahan pencemar. Dengan demikian, rancangan reaktor modular tidak hanya mempertimbangkan aspek proses pengolahan emas, tetapi juga aspek keselamatan dan perlindungan lingkungan.

3.5. Kelebihan dan Keterbatasan Reaktor Modular

Reaktor modular tipe *Intensive Leach Reactor* (ILR) menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan sistem pelindian terbuka yang digunakan pada pengolahan emas rakyat di Kecamatan Talawaan. Sistem pelindian tertutup memungkinkan proses sianidasi berlangsung dalam kondisi yang lebih terkendali sehingga kehilangan larutan sianida akibat penguapan dan tumpahan dapat diminimalkan. Selain itu, proses agitasi mekanik meningkatkan kontak antara bijih, larutan sianida, dan oksigen sehingga efisiensi pelindian dan *recovery* emas berpotensi lebih tinggi dibandingkan metode konvensional.

Dari aspek lingkungan, reaktor modular mendukung pengelolaan limbah yang lebih baik karena larutan proses dapat dikendalikan dan diarahkan ke unit pengolahan sebelum dibuang ke lingkungan. Sistem tertutup juga membantu mengurangi potensi pembentukan dan pelepasan gas hidrogen sianida (HCN) dengan menjaga kondisi operasi, terutama pH larutan, sehingga risiko paparan terhadap pekerja dan lingkungan dapat ditekan. Selain itu, desain modular memudahkan proses instalasi, pemeliharaan, maupun peningkatan kapasitas melalui penambahan unit reaktor sesuai kebutuhan produksi.

Meskipun memiliki berbagai keunggulan, penerapan reaktor modular tipe ILR juga memiliki beberapa keterbatasan. Investasi awal yang dibutuhkan relatif lebih besar dibandingkan penggunaan tong pelindian konvensional karena memerlukan tangki, sistem agitasi, pompa, dan perlengkapan pendukung lainnya. Pengoperasian reaktor juga membutuhkan operator yang memahami pengendalian parameter proses seperti konsentrasi sianida, pH, waktu pelindian, dan kecepatan agitasi agar kinerja reaktor tetap optimal. Selain itu, pemeliharaan peralatan mekanis, seperti motor penggerak dan impeller, harus dilakukan secara berkala untuk menjaga keandalan sistem.

Secara keseluruhan, keunggulan reaktor modular tipe ILR dalam meningkatkan efisiensi proses, mengurangi risiko pencemaran lingkungan, dan mendukung keselamatan kerja lebih besar dibandingkan keterbatasannya. Dengan dukungan pelatihan operator dan pengelolaan operasional yang baik, teknologi ini berpotensi menjadi alternatif yang layak diterapkan pada kegiatan Pertambangan Emas Skala Kecil di Kecamatan Talawaan.

3.6. Perbandingan Sistem Eksisting dan Reaktor Modular

Berdasarkan hasil analisis kondisi eksisting dan rancangan reaktor modular tipe *Intensive Leach Reactor* (ILR), dilakukan perbandingan antara sistem pengolahan emas yang saat ini diterapkan di Tambang Rakyat Talawaan dengan sistem pengolahan yang diusulkan. Perbandingan ini bertujuan untuk mengevaluasi peningkatan kinerja proses, keselamatan kerja, dan aspek lingkungan setelah penerapan reaktor modular.

Tabel 3. Perbandingan Input-Proses-Output Pengolahan

Tahapan	Sistem Pengolahan Eksisting	Pengolahan Reaktor Modular
Sistem pelindian	Menggunakan sistem terbuka	Menggunakan Sistem Tertutup
Pengendalian proses	Masih bergantung pada pengalaman operator	Kondisi proses lebih mudah dikendalikan
Pengadukan	Belum menggunakan agitasi mekanik yang optimal	Menggunakan agitator mekanik untuk meningkatkan homogenitas slurry
Pengendalian Sianida	Berpotensi mengalami kehilangan akibat sistem terbuka	Penggunaan sianida lebih terkendali dalam sistem tertutup
Potensi HCN	Pelepasan HCN lebih berisiko Ketika kondisi proses tidak terkontrol	Potensi pembentukan dan pelepasan HCN dapat diminimalkan melalui pengendalian proses
Efisiensi Pelindian	Relatif bervariasi	Berpotensi lebih tinggi karena kontak bijih, sianida, dan oksigen lebih optimal
Limbah padat	Belum melalui pengelolaan yang optimal	Dipisahkan dan diarahkan untuk pengelolaan lebih lanjut
Limbah cair	Ditampung pada kolam terbuka	Dialirkan melalui sistem pengolahan limbah
Detoksifikasi	Belum tersedia	Dilengkapi unit detoksifikasi
Kondisi Akhir Limbah	Belum melalui pengolahan lanjutan yang memadai	Melalui detoksifikasi, sedimentasi, dan <i>constructed wetland</i> sebelum dilepas ke lingkungan

4. Kesimpulan

1. Berdasarkan hasil observasi dan wawancara, pengolahan emas di Tambang Rakyat Talawaan telah menggunakan metode sianidasi, namun masih menerapkan sistem pelindian terbuka dengan pengendalian proses dan pengelolaan limbah yang belum optimal. Kondisi tersebut berpotensi menimbulkan pencemaran tanah, air, dan udara akibat residu sianida serta meningkatkan risiko pembentukan dan pelepasan gas hidrogen sianida (HCN). Oleh karena itu, diperlukan sistem pengolahan yang lebih terkendali melalui penerapan reaktor modular.
2. Berdasarkan hasil analisis kualitatif dan kuantitatif terhadap karakteristik pengolahan emas di Tambang Rakyat Talawaan, dirancang reaktor modular tipe *Intensive Leach Reactor* (ILR)

berbentuk silinder vertikal dengan sistem pelindian tertutup dan agitasi mekanik. Rancangan tersebut disesuaikan dengan kapasitas pengolahan dan karakteristik *slurry* di lokasi penelitian serta diintegrasikan dengan sistem pengelolaan limbah. Penerapan reaktor modular dapat mendukung proses sianidasi yang lebih terkendali, mengurangi potensi kehilangan larutan sianida dan pelepasan gas HCN, serta meningkatkan pengelolaan limbah dibandingkan sistem pengolahan eksisting.

Referensi

- Andrawina, Ernawati, R., Cahyadi, T. A., Waterman, S. B., & Amri, N. A. 2020. Penerapan metode *constructed wetland* dalam upaya pengelolaan limbah air asam tambang pada penambangan batubara berdasarkan *literature review*. Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi (ReTII XV), 201–207.
- Anwar, D., Tualeka, A. R., & Lailiyah, S. 2024. Hubungan antara kepatuhan penggunaan APD (Alat Pelindung Diri) dengan dampak paparan sianida di area HLO (*Heap Leach Operation*) PT Bumi Suksesindo. Media Gizi Kesmas, 13, 110–115.
- Badan Pusat Statistik. 2022. Statistik Pertambangan Indonesia 2022. Jakarta: Badan Pusat Statistik.
- Binnemans, K., & Jones, P. T. 2023. The Twelve Principles of Circular Hydrometallurgy. Sustainable Metallurgy, 9, 1–25.
- Bouty, A. A., Riogilang, H., & Mangangka, I. R. 2022. Analisa potensi pencemaran merkuri pada Sungai Ongkag Dumoga akibat kegiatan pertambangan emas tanpa izin (PETI). TEKNO, 20(82).
- Cheng, Y., Watari, T., Seccatore, J., Nakajima, K., Nansai, K., & Takaoka, M. 2023. A review of gold production, mercury consumption, and emission in artisanal and small-scale gold mining (ASGM). Resources Policy, 81, 103370.
- Gekko Systems. 2024. InLine Leach Reactor (ILR).
- Hentschel, T., Hruschka, F., & Priester, M. 2003. Artisanal and Small-Scale Mining: Challenges and Opportunities.
- Hilson, G., & Monhemius, A. J. 2006. Alternatives to cyanide in the gold mining industry: What prospects for the future? Journal of Cleaner Production, 14(12–13), 1158–1167.
- Hohmann, L., Kössl, K., Kockmann, N., Schembecker, G., & Bramsiepe, C. 2017. Modules in process industry – A life cycle definition. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 111, 115–123.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2018. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.101 Tahun 2018 tentang Pedoman Pemulihan Lahan Terkontaminasi Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3). Jakarta: KLHK.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2021. Pertambangan Emas Skala Kecil (PESK): Tantangan dalam Akses Pembiayaan. Jakarta: KLHK.
- Kuyucak, N., & Akcil, A. 2013. Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes. Minerals Engineering, 50–51, 13–29.
- Longley, R. J., McCallum, J., & Katsikaros, P. 2003. Intensive cyanidation: Onsite application of the InLine Leach Reactor to gravity gold concentrates. Minerals Engineering, 16(5), 411–419.
- Majalis, A. N., Mohar, R. S., Novitasari, Y., & Hardianti, A. 2022. Pengolahan tailing sianidasi bijih emas dengan proses oksidasi-presipitasi. Jurnal Ilmu Lingkungan, 20(4), 757–768.
- Manoppo, N. N. A., Riogilang, H., & Riogilang, H. 2024. Identifikasi kadar merkuri (Hg) dan arsen (As) di Sungai Desa Tobongon Kabupaten Bolaang Mongondow Timur. TEKNO, 22(89).
- Marsden, J., & House, C. 2006. The Chemistry of Gold Extraction (2nd ed.). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Meutia, A. N., Mohar, R., Novitasari, Y., & Hardianti, A. 2022. Pengolahan tailing sianidasi bijih emas dengan proses oksidasi-presipitasi pada kondisi *batch* dalam skala laboratorium. Jurnal Ilmu Lingkungan, 20(4), 757–768.
- Morhaban, V. F., Tiara, W., Firdaus, Rizki, A., & Nasir, M. 2025. Dampak penambangan emas terhadap pencemaran sungai di Indonesia. Jurnal Kesehatan Lingkungan, 5(1), 42–53.
- Novendra, D. M., Lesawengan, L., & Kandowanko, N. 2021. Dampak pertambangan emas bagi kehidupan ekonomi masyarakat Bolaang Mongondow Timur. Jurnal Ilmiah Society, 1(1).
- Pitoy, M. M. 2015. Sianida: Klasifikasi, toksisitas, degradasi, analisis (studi pustaka). Jurnal MIPA Unsrat Online, 4(1), 1–4.
- Rahmalia, T., Widodo, W., Basuki, N. I., Putra, E., & Ernowo. 2024. Karakteristik mineralisasi endapan emas daerah Tatelu, Minahasa Utara. Bulletin of Geology, 8(3), 1387–1396.
- Rahayu, D. P., & Faisal. 2021. Eksistensi pertambangan rakyat pasca pemberlakuan perubahan Undang-Undang tentang pertambangan mineral dan batubara. Jurnal Pembangunan Hukum Indonesia, 3(3), 337–353.

- Rifai, R. F., Riogilang, H., & Supit, C. 2020. Identifikasi dan analisis penyebaran sianida pada tambang rakyat di Desa Buyat, Bolaang Mongondow, Sulawesi Utara. *Jurnal Sipil Statik*, 8(6).
- Sultan, S. N., Abidjulu, J., & Kolengan, H. S. J. 2015. Analisis kandungan merkuri dan sianida di daerah aliran Sungai Talawaan, Sulawesi Utara. *Jurnal Ilmiah Sains*, 15(1), 70–73.
- Sundari, O., Munawar, A., & Barchia, M. F. 2025. Cyanide potential pollution in rice fields as affected by traditional gold mine process using the tong technique. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1463(1), 012011.
- Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., & Zurbrügg, C. 2014. *Compendium of Sanitation Systems and Technologies* (2nd rev. ed.). Dübendorf, Switzerland: Eawag.
- Vymazal, J. 2010. Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water*, 2(3), 530–549.