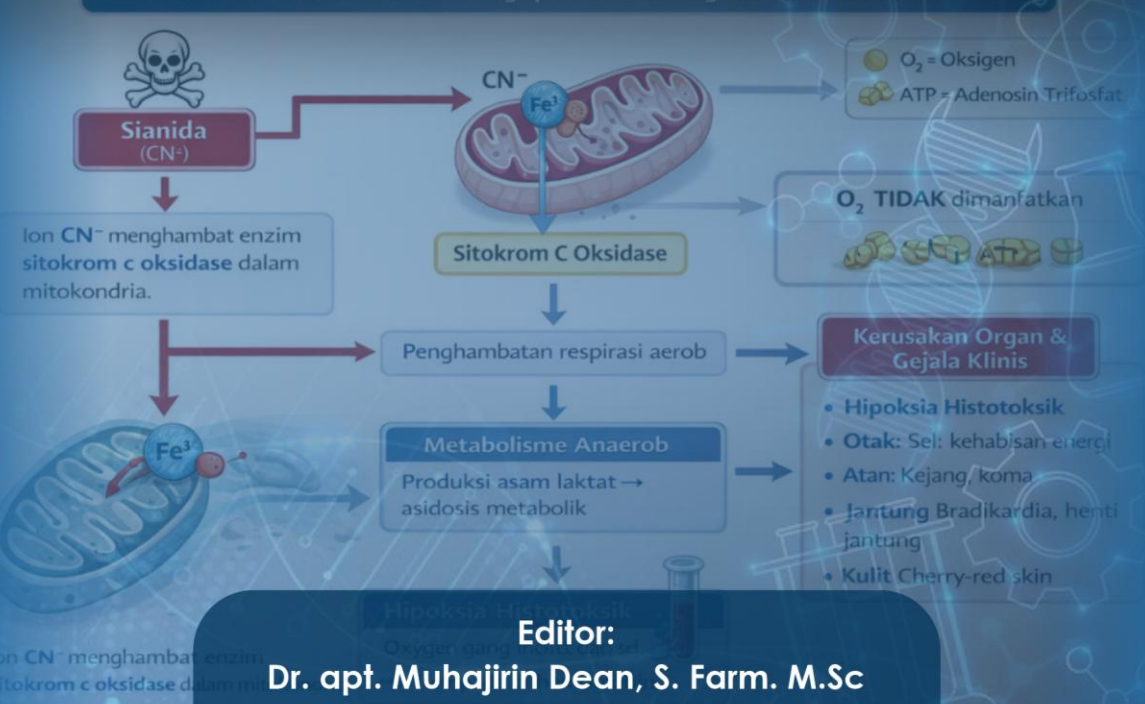




Detoksifikasi Sianida Berbasis Oksidasi

Mekanisme Reaksi, Pengolahan Limbah, dan Implikasi Toksikologi Farmasi

Mekanisme Keracunan: Mengapa Sianida Begitu Mematikan?



DETOKSIFIKASI SIANIDA BERBASIS OKSIDASI:
MEKANISME REAKSI, PENGOLAHAN LIMBAH,
DAN IMPLIKASI TOKSIKOLOGI FARMASI

Dr. apt. Muntasir, S.Sl., M.Sl.



TAHTA MEDIA GROUP

UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit.

**DETOKSIFIKASI SIANIDA BERBASIS OKSIDASI: MEKANISME REAKSI,
PENGOLAHAN LIMBAH, DAN IMPLIKASI TOKSIKOLOGI FARMASI**

Penulis:

Dr. apt. Muntasir, S.SI., M.SI.

Desain Cover:

Tahta Media

Editor:

Dr. apt. Muhajirin Dean, S. Farm. M.Sc

Proofreader:

Tahta Media

Ukuran:

viii, 126, Uk: 15,5 x 23 cm

ISBN: 978-634-262-283-4

Cetakan Pertama:

Agustus 2026

Hak Cipta 2026, Pada Penulis

Isi diluar tanggung jawab percetakan

Copyright © 2026 by Tahta Media Group

All Right Reserved

PENERBIT TAHTA MEDIA GROUP

Perumahan Mitra Utama Residence 3 Blok A no 1, Sawahan, Tempel,
Kec. Gatak, Kabupaten Sukoharjo, Jawa Tengah 57557

email: tahtaliterasimedia@gmail.com

website: <http://store.tahtamedia.co.id/>

Anggota IKAPI (216/JTE/2021)

PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat, karunia, dan kesempatan sehingga buku "Detoksifikasi Sianida Berbasis Oksidasi: Mekanisme Reaksi, Pengolahan Limbah, dan Implikasi Toksikologi Farmasi" dapat diselesaikan dengan baik. Sianida merupakan salah satu senyawa kimia yang memiliki peran strategis dalam berbagai sektor industri, terutama pertambangan emas, metalurgi, dan industri kimia. Di balik manfaatnya dalam meningkatkan efisiensi proses industri, sianida juga dikenal sebagai senyawa dengan tingkat toksisitas yang sangat tinggi sehingga memerlukan pengelolaan yang tepat untuk mencegah dampak negatif terhadap kesehatan manusia maupun lingkungan. Oleh karena itu, pemahaman yang komprehensif mengenai karakteristik sianida, mekanisme toksisitas, serta teknologi detoksifikasi menjadi kebutuhan penting bagi akademisi, peneliti, praktisi, maupun regulator.

Buku ini disusun sebagai referensi yang mengintegrasikan berbagai aspek ilmu pengetahuan mengenai sianida, mulai dari dasar-dasar kimia, mekanisme keracunan, proses sianidasi dalam industri pertambangan, hingga berbagai teknologi detoksifikasi berbasis oksidasi yang berkembang saat ini. Pembahasan tidak hanya menitikberatkan pada mekanisme reaksi kimia, tetapi juga menguraikan faktor-faktor operasional yang memengaruhi efektivitas proses pengolahan limbah, penggunaan berbagai oksidator, strategi kombinasi oksidator, serta implikasinya terhadap toksikologi farmasi dan kesehatan lingkungan. Selain menyajikan landasan teoritis yang kuat, buku ini juga memberikan gambaran mengenai penerapan teknologi detoksifikasi dalam pengolahan limbah industri, khususnya limbah pertambangan yang mengandung sianida. Dengan demikian, pembaca diharapkan memperoleh pemahaman yang utuh mengenai hubungan antara proses kimia, pengelolaan limbah, keselamatan

kerja, perlindungan lingkungan, dan upaya mewujudkan pembangunan industri yang berkelanjutan.

Akhirnya, semoga buku ini dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan ilmu pengetahuan, mendukung praktik pengelolaan limbah yang lebih aman dan berkelanjutan, serta mendorong lahirnya inovasi di bidang kimia lingkungan, toksikologi, dan teknologi pengolahan limbah.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	iv
DAFTAR ISI	vi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
Pendahuluan	1
1.1 Penggunaan Sianida Dalam Industri dan Pertambangan Emas.....	3
1.2 Limbah Cair Tambang Emas Sebagai Isu Lingkungan dan Kesehatan.....	5
1.3 Urgensi Detoksifikasi Sianida Pada Sistem Pengolahan Limbah.....	7
BAB 2 DASAR-DASAR KIMIA SIANIDA	9
Pendahuluan	9
2.1 Pengertian dan Klasifikasi Senyawa Sianida	10
2.2 Bentuk Sianida Dalam Larutan: HCN dan CN^-	12
2.3 Sifat Fisika dan Kimia Sianida	14
2.4 Pengaruh pH Terhadap Spesiasi, Kestabilan, Dan Toksisitas Sianida	16
2.5 Kompleks Sianida dan Perilakunya Di Lingkungan	18
BAB 3 BAHAYA PAPARAN SIANIDA : ANCAMAN TERSEMBUNYI YANG MEMATIKAN	21
Pendahuluan	21
3.1 Definisi dan Karakteristik Sianida.....	22
3.2 Sumber Paparan Sianida.....	23
3.3 Mekanisme Keracunan: Mengapa Sianida Begitu Mematikan?	25
3.4 Gejala Keracunan Sianida.....	29
3.5 Penanganan Darurat Keracunan Sianida	32
3.6 Efek Jangka Panjang dan Komplikasi	36

3.7 Pencegahan Paparan Sianida	38
BAB 4 SIANIDASI EMAS DAN PEMBENTUKAN LIMBAH	40
Pendahuluan	40
4.1 Prinsip Sianidasi Dalam Ekstraksi Emas	42
4.2 Proses Leaching Sianida Pada Bijih Emas	43
4.3 Pemisahan emas dari larutan sianida	45
4.4 Keterbatasan dan Risiko Penggunaan Sianida	47
4.5 Titik-titik Pembentukan Limbah Cair Sianida Dalam Proses Tambang	49
BAB 5 PRINSIP DETOKSIFIKASI SIANIDA BERBASIS OKSIDASI	52
Pendahuluan	52
5.1 Konsep Umum Detoksifikasi Sianida	54
5.2 Prinsip Reaksi Oksidasi Sianida	55
5.3 Jalur Pembentukan Sianat Dan Produk Reaksi Lanjut.....	57
5.4 Parameter Utama Proses Oksidasi: Konsentrasi, pH, dan Waktu Kontak	60
BAB 6 HIDROGEN PEROKSIDA SEBAGAI OKSIDATOR SIANIDA.....	62
Pendahuluan	62
6.1 Karakteristik kimia hidrogen peroksida	63
6.2 Mekanisme Oksidasi Sianida dan pH oleh H_2O_2	65
6.3 Pengaruh konsentrasi H_2O_2 terhadap penurunan sianida.....	67
6.4 Aspek Keselamatan Penggunaan H_2O_2 Dalam Pengolahan Limbah.....	68
BAB 7 KALSIMUM HIPOKLORIT SEBAGAI OKSIDATOR SIANIDA.....	71
Pendahuluan	71
7.1 Karakteristik Kalsium Hipoklorit dan Klorin Aktif.....	73
7.2 Mekanisme Oksidasi Sianida dan pH Oleh Hipoklorit	75

7.3 Pengaruh Konsentrasi $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ Terhadap Penurunan Sianida	77
7.4 Pengaruh Waktu Kontak Terhadap Efektivitas Pengolahan..	79
BAB 8 STRATEGI KOMBINASI H_2O_2 DAN $\text{Ca}(\text{OCl})_2$.....	81
Pendahuluan	81
8.1 Rasional Ilmiah Penggabungan Dua Oksidator (H_2O_2 dan $\text{Ca}(\text{OCl})_2$).....	83
8.2 Prinsip Sinergi antara H_2O_2 dan $\text{Ca}(\text{OCl})_2$	85
8.3 Kelebihan Kombinasi dibanding Oksidator Tunggal.....	88
8.4 Keterbatasan dan Kehati-hatian dalam Aplikasi Kombinasi .	90
BAB 9 PANDUAN OPERASIONAL PENGOLAHAN LIMBAH SIANIDA.....	93
Pendahuluan	93
9.1 Prinsip Penerjemahan Hasil Laboratorium ke Aplikasi Lapangan.....	95
9.2 Rekomendasi konsentrasi optimum	96
9.3 Rekomendasi pH Optimum	98
9.4 Rekomendasi waktu kontak optimum	100
9.5 Tata cara aplikasi pada limbah cair tambang emas	101
BAB 10 STUDI KASUS, DAN IMPLIKASI LINGKUNGAN	104
Pendahuluan	104
10.1 Implementasi Pengolahan Pada Sampel Lingkungan.....	106
10.2 Interpretasi Hasil Pengujian Lapangan	109
10.3 Dampak Lingkungan Dari Residu Sianida	111
10.4 Risiko Pembentukan Produk Samping Oksidasi	114
10.5 Kepatuhan Terhadap Baku Mutu Dan Pengawasan	116
DAFTAR PUSTAKA	119
DAFTAR RIWAYAT PENULIS	124

BAB 1

PENDAHULUAN

PENDAHULUAN

Sianida merupakan senyawa kimia yang memiliki peranan penting dalam berbagai aktivitas industri modern, terutama pada sektor pertambangan emas, metalurgi, elektroplating, dan sintesis kimia. Dalam industri pertambangan emas, sianida digunakan sebagai agen pelindian utama karena kemampuannya membentuk kompleks stabil dengan logam emas sehingga memungkinkan proses ekstraksi berlangsung secara efisien bahkan pada bijih berkadar rendah. Metode sianidasi hingga saat ini masih menjadi teknologi dominan dalam produksi emas global karena efisiensi pemulihan logam yang tinggi serta biaya operasional yang relatif rendah dibandingkan metode alternatif lainnya. Meskipun memberikan keuntungan ekonomi yang signifikan, penggunaan sianida juga menimbulkan konsekuensi lingkungan yang serius. Proses pelindian menghasilkan limbah cair dan tailing yang mengandung sianida bebas, kompleks logam-sianida, serta berbagai senyawa turunan yang bersifat toksik. Senyawa sianida dikenal memiliki toksisitas tinggi karena mampu menghambat enzim sitokrom c oksidase dalam rantai transpor elektron mitokondria, sehingga mengganggu respirasi seluler dan menyebabkan hipoksia jaringan. Dampak toksik ini tidak hanya terjadi pada organisme akuatik tetapi juga berpotensi memengaruhi kesehatan manusia melalui paparan air tercemar, inhalasi hidrogen sianida, maupun akumulasi tidak langsung melalui rantai makanan.

Limbah sianida dari aktivitas pertambangan emas menjadi salah satu sumber pencemar utama di lingkungan perairan, terutama pada wilayah dengan aktivitas pertambangan intensif dan pengelolaan limbah yang belum optimal. Mobilitas sianida yang tinggi dalam air serta kemampuannya mengalami transformasi kimia menjadi berbagai spesies reaktif menyebabkan senyawa ini sulit dikendalikan tanpa proses pengolahan yang memadai. Selain itu, keberadaan kompleks logam-sianida meningkatkan stabilitas senyawa tersebut di lingkungan sehingga memperpanjang potensi dampak ekologisnya.

Untuk mengurangi risiko tersebut, berbagai teknologi pengolahan limbah telah dikembangkan, salah satunya melalui pendekatan detoksifikasi berbasis oksidasi. Metode oksidasi kimia bertujuan mengubah sianida menjadi senyawa yang memiliki toksisitas jauh lebih rendah, seperti sianat, karbonat, dan nitrogen. Oksidator seperti hidrogen peroksida, hipoklorit, ozon, serta sistem oksidasi lanjutan menunjukkan kemampuan efektif dalam mendegradasi sianida melalui mekanisme reaksi redoks. Pendekatan ini banyak digunakan karena memiliki kecepatan reaksi tinggi, efisiensi konversi yang baik, serta relatif mudah diintegrasikan dalam sistem pengolahan limbah industri. Pemahaman terhadap mekanisme reaksi oksidasi menjadi aspek penting dalam optimasi proses detoksifikasi. Faktor seperti pH, konsentrasi oksidator, keberadaan katalis logam, serta bentuk spesiasi sianida sangat memengaruhi jalannya reaksi dan efisiensi degradasi. Tanpa pemahaman mekanistik yang memadai, proses pengolahan dapat menghasilkan produk samping yang masih berpotensi toksik atau menyebabkan konsumsi reagen yang tidak efisien. Oleh karena itu, kajian mekanisme reaksi menjadi landasan ilmiah dalam pengembangan teknologi detoksifikasi yang lebih efektif dan berkelanjutan.

Di sisi lain, implikasi detoksifikasi sianida tidak hanya terbatas pada aspek lingkungan, tetapi juga memiliki relevansi penting dalam bidang toksikologi farmasi. Transformasi kimia sianida selama proses oksidasi menghasilkan metabolit dengan tingkat toksisitas yang berbeda, sehingga evaluasi toksikologis diperlukan untuk memastikan bahwa produk hasil pengolahan benar-benar aman bagi organisme hidup. Berdasarkan latar belakang tersebut, kajian mengenai detoksifikasi sianida berbasis oksidasi menjadi penting untuk memahami hubungan antara proses kimia, efektivitas pengolahan limbah, serta implikasi toksikologis yang dihasilkan. Penelitian dan kajian ilmiah dalam bidang ini diharapkan mampu memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi pengolahan limbah pertambangan yang ramah lingkungan sekaligus mendukung perlindungan kesehatan manusia dan ekosistem secara berkelanjutan.

1.1 PENGGUNAAN SIANIDA DALAM INDUSTRI DAN PERTAMBANGAN EMAS

Sianida merupakan salah satu bahan kimia yang memiliki peran penting dalam berbagai sektor industri, terutama dalam industri pertambangan emas. Senyawa ini digunakan secara luas karena kemampuannya yang sangat efektif dalam melarutkan emas melalui proses pelindian (leaching), sehingga memungkinkan ekstraksi logam mulia dari bijih berkadar rendah secara ekonomis dan efisien. Metode sianidasi telah menjadi teknologi dominan dalam industri pertambangan emas global sejak akhir abad ke-19 karena tingkat recovery emas yang tinggi serta biaya operasional yang relatif lebih rendah dibandingkan metode alternatif lainnya (Zhang et al., 2022). Dalam proses pertambangan emas, larutan sianida bereaksi dengan emas membentuk kompleks larut yang stabil di dalam air, sehingga

logam emas dapat dipisahkan dari material pengotor. Penggunaan teknologi ini memungkinkan eksploitasi sumber daya mineral yang sebelumnya tidak ekonomis untuk ditambang. Namun demikian, proses tersebut menghasilkan limbah cair dan tailing yang mengandung residu sianida bebas maupun kompleks sianida logam, yang berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak dikelola secara tepat (Wang et al., 2026).

Limbah yang mengandung sianida menjadi perhatian serius karena sifat toksiknya yang tinggi terhadap organisme hidup. Sianida dapat menghambat sistem respirasi seluler dengan mengganggu enzim sitokrom oksidase, sehingga menyebabkan gangguan metabolisme hingga kematian pada organisme akuatik maupun manusia. Keberadaan sianida di lingkungan perairan bahkan dalam konsentrasi rendah dapat menimbulkan dampak ekologis yang signifikan, sehingga pengolahan limbah menjadi tahapan wajib dalam operasional pertambangan modern (Jaszczak et al., 2017).

Permasalahan ini semakin kompleks pada kegiatan pertambangan emas skala kecil dan tradisional (Artisanal and Small-Scale Gold Mining/ASGM), termasuk di beberapa wilayah Indonesia, di mana pengelolaan limbah sering kali belum memenuhi standar lingkungan. Aktivitas tersebut berkontribusi terhadap degradasi lingkungan serta meningkatkan risiko paparan sianida terhadap masyarakat sekitar tambang (Meutia et al., 2022). Oleh karena itu, pengembangan teknologi pengolahan limbah yang efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan menjadi kebutuhan mendesak untuk mendukung keberlanjutan industri pertambangan.

Seiring meningkatnya kesadaran terhadap dampak lingkungan, berbagai teknologi pengolahan limbah sianida terus dikembangkan, termasuk metode fisik, biologis, dan kimia. Di antara metode tersebut, proses oksidasi kimia menjadi salah satu pendekatan yang paling

banyak diterapkan karena mampu mengubah sianida menjadi senyawa yang kurang toksik dengan waktu reaksi relatif cepat serta efisiensi tinggi pada skala (Matebese et al., 2024). Dengan demikian, kajian mengenai mekanisme detoksifikasi sianida berbasis oksidasi menjadi penting untuk mendukung praktik pertambangan emas yang lebih aman dan berkelanjutan.

1.2 LIMBAH CAIR TAMBANG EMAS SEBAGAI ISU LINGKUNGAN DAN KESEHATAN

Kegiatan pertambangan emas menghasilkan limbah cair dalam jumlah besar yang umumnya berasal dari proses sianidasi bijih emas. Limbah ini mengandung berbagai zat berbahaya, termasuk sianida bebas, kompleks logam-sianida, logam berat, serta senyawa kimia lain yang terbentuk selama proses ekstraksi. Keberadaan komponen tersebut menjadikan limbah cair tambang emas sebagai salah satu sumber pencemar lingkungan yang signifikan, terutama apabila sistem pengolahan limbah tidak berjalan optimal. Air limbah pertambangan yang mengandung sianida dapat memasuki badan air permukaan maupun air tanah dan menimbulkan dampak jangka panjang terhadap kualitas lingkungan (Wang et al., 2026).

Dari aspek lingkungan, sianida memiliki mobilitas tinggi di perairan dan dapat mengalami transformasi kimia maupun biologis yang menghasilkan berbagai spesies dengan tingkat toksisitas berbeda. Senyawa ini dapat membentuk kompleks stabil dengan logam seperti tembaga dan besi, sehingga memperpanjang keberadaannya di lingkungan dan meningkatkan potensi akumulasi dalam ekosistem perairan. Kondisi tersebut menyebabkan gangguan terhadap organisme akuatik, termasuk penurunan keanekaragaman

hayati dan gangguan rantai makanan di wilayah sekitar tambang (Jaszczak et al., 2017).

Selain dampak ekologis, limbah cair tambang emas juga menjadi isu kesehatan masyarakat. Paparan sianida melalui air minum, udara, maupun kontak langsung dapat mengganggu sistem respirasi seluler karena kemampuannya menghambat kerja enzim sitokrom oksidase dalam mitokondria. Paparan kronis dalam konsentrasi rendah sekalipun berpotensi menimbulkan gangguan neurologis, pernapasan, dan metabolisme pada manusia. Studi mengenai pencemaran sianida di wilayah pertambangan emas menunjukkan adanya risiko paparan terhadap masyarakat yang tinggal di sekitar area pertambangan, terutama pada aktivitas tambang skala kecil yang belum memiliki sistem pengelolaan limbah memadai (Kohio et al., 2025). Permasalahan ini semakin kompleks pada kegiatan pertambangan emas rakyat atau *artisanal and small-scale gold mining* (ASGM), yang banyak ditemukan di negara berkembang, termasuk Indonesia. Praktik pengolahan emas pada sektor ini sering dilakukan dengan teknologi sederhana tanpa pengendalian limbah yang baik, sehingga meningkatkan potensi pencemaran lingkungan dan ancaman kesehatan masyarakat lokal. Kondisi tersebut memperlihatkan bahwa persoalan limbah cair tambang emas tidak hanya berkaitan dengan aspek teknis pengolahan, tetapi juga mencakup dimensi sosial, ekonomi, dan tata kelola lingkungan (Meutia et al., 2023).

Oleh karena itu, pengelolaan limbah cair tambang emas menjadi isu strategis dalam upaya mewujudkan pertambangan berkelanjutan. Berbagai teknologi pengolahan telah dikembangkan untuk menurunkan kadar sianida dan kontaminan lainnya sebelum limbah dilepaskan ke lingkungan, termasuk metode fisik, kimia, dan biologis. Implementasi teknologi pengolahan yang efektif tidak hanya

bertujuan memenuhi standar regulasi lingkungan, tetapi juga untuk meminimalkan risiko kesehatan manusia serta menjaga keberlanjutan ekosistem di sekitar wilayah pertambangan (Vaca-escobar et al., 2024).

1.3 URGENSI DETOKSIFIKASI SIANIDA PADA SISTEM PENGOLAHAN LIMBAH

Penggunaan sianida dalam proses ekstraksi emas memberikan efisiensi tinggi dalam pelindian logam mulia, namun sekaligus menghasilkan limbah cair yang mengandung senyawa beracun dengan potensi dampak lingkungan yang serius. Sianida dalam limbah pertambangan dapat berada dalam bentuk sianida bebas maupun kompleks logam-sianida yang memiliki tingkat toksisitas tinggi terhadap organisme hidup. Keberadaan senyawa tersebut menjadikan proses detoksifikasi sebagai tahapan penting dalam sistem pengolahan limbah sebelum air buangan dilepaskan ke lingkungan agar tidak menimbulkan pencemaran berkepanjangan (Wang et al., 2026).

Urgensi detoksifikasi sianida juga berkaitan dengan karakteristik kimianya yang reaktif serta kemampuannya mengganggu sistem respirasi seluler melalui penghambatan enzim sitokrom oksidase. Paparan sianida dalam konsentrasi tertentu dapat menyebabkan gangguan fisiologis serius pada manusia maupun biota akuatik. Selain itu, sianida dapat mengalami transformasi di lingkungan menjadi berbagai spesies kimia dengan stabilitas berbeda, sehingga meningkatkan kompleksitas pengelolaan limbah dan menuntut teknologi pengolahan yang mampu menguraikan senyawa tersebut secara efektif (Jaszczak et al., 2017).

Pada limbah tambang emas, residu sianida sering ditemukan dalam tailing yang tersimpan dalam jangka waktu panjang. Studi

geokimia menunjukkan bahwa senyawa sianida dapat tetap berada dalam sistem limbah tambang dan berpotensi terlepas kembali ke lingkungan melalui proses pelindian alami atau perubahan kondisi lingkungan. Hal ini menunjukkan bahwa tanpa proses detoksifikasi yang memadai, limbah pertambangan dapat menjadi sumber pencemar jangka panjang bagi tanah dan sumber air di sekitar area tambang (Welman-purchase et al., 2024).

Selain aspek lingkungan, detoksifikasi sianida juga menjadi kebutuhan penting dalam mendukung praktik pertambangan berkelanjutan. Teknologi pengolahan limbah modern menekankan pengurangan risiko toksik melalui penerapan metode yang mampu mengubah sianida menjadi senyawa yang lebih stabil dan kurang berbahaya. Berbagai pendekatan telah dikembangkan, termasuk metode kimia, biologis, dan kombinasi teknologi, yang bertujuan meningkatkan efisiensi pengolahan sekaligus meminimalkan dampak ekologis dari aktivitas pertambangan (Matebese et al., 2024). Oleh karena itu, pengembangan sistem detoksifikasi yang efektif dan terintegrasi menjadi langkah strategis untuk memastikan keseimbangan antara pemanfaatan sumber daya mineral dan perlindungan lingkungan secara berkelanjutan (Kohio et al., 2025).

BAB 2

DASAR-DASAR KIMIA SIANIDA

PENDAHULUAN

Sianida merupakan salah satu senyawa kimia yang memiliki peranan penting dalam berbagai proses industri, khususnya pada sektor pertambangan emas, metalurgi, serta industri kimia. Keberhasilan penggunaan sianida dalam proses ekstraksi logam didasarkan pada kemampuannya membentuk kompleks stabil dengan berbagai logam, terutama emas dan tembaga, sehingga meningkatkan efisiensi proses pelindian. Namun demikian, sifat reaktif dan toksisitas tinggi dari senyawa ini menjadikan pemahaman mengenai dasar-dasar kimia sianida sangat penting, terutama dalam konteks pengelolaan limbah dan perlindungan lingkungan (Vaca-escobar et al., 2024). Pemahaman mengenai kesetimbangan ini menjadi dasar penting dalam analisis perilaku sianida pada sistem perairan maupun proses pengolahan limbah (Jaszczak et al., 2017). Selain kesetimbangan asam-basa, sianida juga memiliki kemampuan tinggi untuk membentuk kompleks koordinasi dengan berbagai logam transisi. Kompleksasi ini memengaruhi stabilitas kimia sianida serta menentukan tingkat ketersediaan hayati (*bioavailability*) di lingkungan. Studi termodinamika menunjukkan bahwa pembentukan kompleks logam-sianida sangat dipengaruhi oleh kondisi kimia larutan, termasuk konsentrasi ion logam dan parameter kesetimbangan reaksi,

yang pada akhirnya berperan dalam menentukan efektivitas metode pengolahan limbah (Kyle & Hefter, 2015).

Dalam sistem lingkungan alami maupun limbah industri, spesiasi sianida menjadi faktor utama yang menentukan perilaku transportasi, transformasi, dan degradasinya. Analisis spesiasi memungkinkan identifikasi bentuk sianida bebas maupun kompleks yang memiliki tingkat toksisitas berbeda. Oleh karena itu, pendekatan pemodelan spesiasi kimia banyak digunakan untuk memahami dinamika sianida dalam air limbah tambang serta untuk merancang strategi pengolahan yang lebih efektif dan terkontrol (Bakatula & Tutu, 2016).

Seiring meningkatnya perhatian terhadap dampak lingkungan dari limbah pertambangan, kajian mengenai sifat fisika-kimia, spesiasi, serta perilaku kompleks sianida menjadi landasan ilmiah dalam pengembangan teknologi detoksifikasi. Pemahaman mendalam terhadap aspek kimia dasar ini tidak hanya membantu menjelaskan mekanisme reaksi pengolahan limbah, tetapi juga mendukung pemilihan metode pengolahan yang sesuai dengan kondisi operasional dan karakteristik limbah. Dengan demikian, pembahasan pada bab ini difokuskan pada konsep fundamental kimia sianida sebagai dasar teoritis bagi proses detoksifikasi dan pengelolaan limbah berbasis oksidasi (Alvillo-Rivera et al., 2021).

2.1 PENGERTIAN DAN KLASIFIKASI SENYAWA SIANIDA

Sianida merupakan kelompok senyawa kimia yang mengandung gugus fungsi sianida ($-\text{C}\equiv\text{N}$), yaitu ikatan rangkap tiga antara atom karbon dan nitrogen yang memiliki karakter kimia sangat reaktif. Senyawa ini dapat ditemukan dalam bentuk alami maupun sintetis dan banyak digunakan dalam berbagai proses industri, terutama metalurgi, pelapisan logam, serta ekstraksi emas melalui proses

sianidasi. Sifat kimia unik dari gugus sianida memungkinkan pembentukan kompleks stabil dengan berbagai logam, sehingga menjadikan senyawa ini sangat efektif dalam proses pelindian logam mulia (Vaca-Escobar et al., 2024).

Secara umum, sianida dapat diklasifikasikan berdasarkan bentuk kimia dan tingkat kestabilannya di lingkungan perairan. Klasifikasi utama meliputi sianida bebas (*free cyanide*), sianida kompleks lemah (*weak acid dissociable/WAD cyanide*), dan sianida kompleks kuat (*strong metal–cyanide complexes*). Sianida bebas terdiri atas hidrogen sianida (HCN) dan ion sianida (CN⁻) yang berada dalam kesetimbangan asam–basa di dalam larutan. Bentuk ini merupakan spesies paling toksik karena mudah diserap oleh organisme hidup dan memiliki mobilitas tinggi di lingkungan (Jaszczak et al., 2017).

Sianida kompleks lemah terbentuk melalui interaksi antara ion sianida dengan logam seperti seng, kadmium, atau nikel. Kompleks ini relatif tidak stabil pada kondisi asam dan dapat melepaskan kembali sianida bebas ke lingkungan. Oleh karena itu, kelompok WAD cyanide sering menjadi parameter penting dalam pemantauan kualitas limbah tambang emas karena berpotensi meningkatkan risiko toksisitas apabila terjadi perubahan kondisi kimia lingkungan (Bakatula & Tutu, 2016). Sebaliknya, sianida kompleks kuat terbentuk dengan logam seperti besi dan kobalt yang menghasilkan senyawa dengan stabilitas tinggi, misalnya ferrocyanide dan ferricyanide. Kompleks jenis ini memiliki kecenderungan lebih rendah untuk melepaskan sianida bebas dalam kondisi lingkungan normal, namun tetap dapat terdegradasi melalui proses fotokimia atau oksidasi tertentu. Stabilitas kompleks logam-sianida dipengaruhi oleh faktor termodinamika dan kesetimbangan kimia dalam larutan, termasuk konstanta pembentukan kompleks dan kondisi redoks sistem (Kyle & Hefter, 2015). Karakteristik fisika-kimia ini menjadi faktor penting

dalam evaluasi risiko lingkungan dan kesehatan pada sistem pengolahan limbah maupun area pertambangan (Vaca-Escobar et al., 2024).

Pemahaman mengenai pengertian dan klasifikasi sianida sangat penting sebagai dasar dalam menentukan metode analisis, pengolahan, dan detoksifikasi yang tepat. Setiap bentuk sianida memiliki perilaku kimia, stabilitas, serta tingkat toksisitas yang berbeda, sehingga pendekatan pengelolaan limbah harus mempertimbangkan spesiasi kimia yang dominan. Kajian klasifikasi ini menjadi landasan konseptual bagi pengembangan teknologi pengolahan biologis maupun kimia yang bertujuan menurunkan risiko pencemaran lingkungan akibat limbah yang mengandung sianida (Alvillo-Rivera et al., 2021).

2.2 BENTUK SIANIDA DALAM LARUTAN: HCN DAN CN^-

Dalam sistem perairan, sianida umumnya berada dalam dua bentuk utama yang saling berkesetimbangan, yaitu hidrogen sianida (HCN) dan ion sianida (CN^-). Kedua spesies ini dihubungkan oleh reaksi kesetimbangan asam-basa yang sangat dipengaruhi oleh kondisi pH larutan. Hidrogen sianida merupakan asam lemah yang dapat terdisosiasi menghasilkan ion sianida dan ion hidrogen, sehingga distribusi kedua bentuk tersebut berubah sesuai kondisi kimia lingkungan. Pemahaman mengenai bentuk sianida dalam larutan menjadi aspek fundamental dalam kimia lingkungan karena menentukan mobilitas, volatilitas, serta potensi toksisitas senyawa tersebut (Jaszczak et al., 2017).

Pada kondisi pH rendah hingga netral, bentuk HCN cenderung lebih dominan dibandingkan ion CN^- . HCN memiliki sifat volatil dan mudah menguap ke atmosfer, sehingga meningkatkan risiko paparan

DAFTAR PUSTAKA

- Abdalla, O. A. E., Suliman, F. O., Al-Ajmi, H., Al-Hosni, T., & Rollinson, H. (2010). Cyanide from gold mining and its effect on groundwater in arid areas, Yanqul mine of Oman. *Environmental Earth Sciences*, 60, 885–892. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0225-z>
- Alvillo-Rivera, A., Garrido-Hoyos, S., Buitron, G., Thangarasu-Sarasvathi, P., & Rosano-Ortega, G. (2021). Biological treatment for the degradation of cyanide : A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 1418–1433. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.030>
- Amaouche, H., Chergui, S., Halet, F., Yeddou, A. R., Chergui, A., Nadjemi, B., & Ould-Dris, A. (2019). Removal of cyanide in aqueous solution by oxidation with hydrogen peroxide catalyzed by copper oxide. *Water Science and Technology*, 80(1), 126–133. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.254>
- Bakatula, E. N., & Tutu, H. (2016). *Characterization and Speciation Modelling of Cyanide in Effluent from an Active Slimes Dam*. 140–147.
- Bas, A. D., Ghali, E., & Choi, Y. (2017). A review on electrochemical dissolution and passivation of gold during cyanidation in presence of sulphides and oxides. *Hydrometallurgy*, 172(September), 30–44. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.06.021>
- Cacciuttolo, C., Cano, D., & Custodio, M. (2023). Socio-Environmental Risks Linked with Mine Tailings Chemical Composition : Promoting Responsible and Safe Mine Tailings Management Considering Copper and Gold Mining Experiences from Chile and Peru. *Toxics*, 11(5), 462. <https://doi.org/10.3390/toxics11050462>

- Donato, D. B., Nichols, O., Possingham, H., Moore, M., D, P. F. R., & Noller, B. N. (2007). A critical review of the effects of gold cyanide-bearing tailings solutions on wildlife. *Environment International*, 33(7), 974–984. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.04.007>
- Eden, G. E., Hampson, B. L., & Wheatland, A. B. (1950). Destruction of cyanide in waste waters by chlorination. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 69, 244–249. <https://doi.org/10.1002/jctb.5000690805>
- Freitas, J., & Horta, D. (2023). *Impacts of cyanide in gold mining and cyanide removal methodologies in liquid waste from gold processing*. 59(September).
- Fungene, T., Groot, D. R., Mahlangu, T., & Sole, K. C. (2018). Decomposition of hydrogen peroxide in alkaline cyanide solutions. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 118(12), 1259–1264. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n12a4>
- Ganji, S. M. S. A., & Hayati, M. (2018). Selecting an appropriate method to remove cyanide from the wastewater of Moteh gold mine using a mathematical approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(23), 23357–23369. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2424-1>
- Goyburo-Chavez, C., Mendez-Ruiz, J. I., Jimenez-Oyola, S., Romero-Crespo, P., Gutierrez, L., & Valverde-Armas, P. E. (2024). Pilot-scale reverse osmosis treatment of gold cyanidation effluent for the removal of cyanide, heavy metal(loid)s, and ionic species. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9(February), 100688. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100688>
- Guzman, L., Segarra, M., Chimenos, J. ., M.A Fernandez, & Espiell, F. (1999). Gold cyanidation using hydrogen peroxide. *Hydrometallurgy*, 52(1), 21–35. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(99\)00006-7](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(99)00006-7)

- Han, W., Yang, H., & Tong, L. (2022). Cyanide removal for ultrafine gold cyanide residues by chemical oxidation methods. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 32(12), 4129–4138. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(22\)66083-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(22)66083-7)
- Jaszcak, E., Polkowska, Ż., Narkowicz, S., & Namieśnik, J. (2017). Cyanides in the environment—analysis—problems and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(19), 15929–15948. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9081-7>
- Johnson, C. A., Grimes, D. J., Leinz, R. W., & Ry, R. O. (2008). Cyanide speciation at four gold leach operations undergoing remediation. *Environmental Science & Technology*, 42(4), 1038–1044. <https://doi.org/10.1021/es702334n>
- Khodadad, A., Teimoury, P., Abdolahi, M., & Samiee, A. (2008). Detoxification of Cyanide in a Gold Processing Plant Tailings Water Using Calcium and Sodium Hypochlorite. *Mine Water Environ*, 27, 52–55. <https://doi.org/10.1007/s10230-007-0024-2>
- Knopf, B., Rüdell, H., Hansknecht, D., Klawonn, T., & Kreuzer, K. (2021). Determination of low environmental free cyanide concentrations in freshwaters. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 16244–16252.
- Kohio, E. N. B., Sossou, S. K., & Karoui, H. (2025). *Environmental Cyanide Pollution from Artisanal Gold Mining in Burkina Faso : Human Exposure Risk Analysis Based on a Conceptual Site Model*.
- Kuyucak, N., & Akcil, A. (2013). Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes. *Minerals Engineering*, 50–51, 13–29. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.05.027>
- Kyle, J. H., & Hefter, G. (2015). A critical review of the thermodynamics of hydrogen cyanide and copper(I)–cyanide complexes in aqueous solution. *Hydrometallurgy*, 154(April), 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.03.012>

- Matebese, F., Mosai, A. K., Tutu, H., & Tshentu, Z. R. (2024). Mining wastewater treatment technologies and resource recovery techniques: A review. *Heliyon*, 10(3), e24730. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24730>
- Meutia, A. A., Bachriadi, D., & Gafur, N. A. (2023). *Environment Degradation , Health Threats , and Legality at the Artisanal Small-Scale Gold Mining Sites in Indonesia*.
- Meutia, A. A., Lumowa, R., & Sakakibara, M. (2022). *Indonesian Artisanal and Small-Scale Gold Mining — A Narrative Literature Review*.
- Mulyani, H., & Prasadja, M. E. (2014). Study of chlorination application in tapioca wastewater cyanide removal. *Waste Technology*, 2(2), 41–43. <https://doi.org/10.14710/2.2.41-43>
- Muntasir, Sjahrul, M., Zakir, M., & Raya, I. (2016). Elimination Cyanide with Hydrogen Peroxide (H₂O₂) and Calcium Hypochlorite (Ca(OCl)₂) on Gold Mine Waste from North Luwu, South Sulawesi. *American Journal of Environmental Protection*, 5(4), 97–102. <https://doi.org/10.11648/j.ajep.20160504.14>
- Sarla, M., Pandit, M., Tyagi, D. K., & Kapoor, J. C. (2004). Oxidation of cyanide in aqueous solution by chemical and photochemical process. *Journal of Hazardous Materials*, 116(1–2), 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.06.035>
- Tavasoli, E., Asadollahfardi, G., & Khodadadi, A. (2019). Simulation of cyanide oxidation using calcium and sodium hypochlorite in the Moteh Gold Mine Tailing Dam , Iran. *Desalination and Water Treatment*, 145, 273–279. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23639>
- Teixeira, S. J., Casteleiro, C. M. L., Rodrigues, R. G., & Guerra, M. D. (2018). Entrepreneurial intentions and entrepreneurship in European countries. *International Journal of Innovation Science*, 10, 22–42. <https://doi.org/doi.org/10.1108/IJIS-07-2017-0062>
- Vaca-escobar, K., Arregui-almeida, D., & Espinoza-montero, P. (2024).

- Chemical , ecotoxicological characteristics , environmental fate , and treatment methods applied to cyanide- containing wastewater. *Npj Clean Water*, 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41545-024-00392-9>
- Vaidya, R., Kodam, K., A, V. G., & Rao, K. S. M. (2010). Validation of an in situ solidification/stabilization technique for hazardous barium and cyanide waste for safe disposal into a secured landfill. *Journal of Environmental Management*, 91(9), 1821–1830. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.04.002>
- Wang, P., Chen, A., Lian, H., Ahmadzai, S. M., Chang, F., Pan, Y., Chen, Y., Zhang, B., Zeng, H., & Wei, C. (2026). A review of cyanide-containing wastewater: Sources, hazard and treatment methods. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 14(2), 121344. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2026.121344>
- Welman-purchase, M. D., Castillo, J., Gomez-arias, A., Matu, A., & Hansen, N. (2024). Science of the Total Environment First insight into the natural biodegradation of cyanide in a gold tailings environment enriched in cyanide compounds. *Science of the Total Environment*, 906(May 2023), 167174. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167174>
- Zhang, Y., Cui, M., Wang, J., Liu, X., & Xianjun Lyu. (2022). A review of gold extraction using alternatives to cyanide: Focus on current status and future prospects of the novel eco-friendly synthetic gold lixiviant. *Minerals Engineering*, 176, 107336. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107336>

DAFTAR RIWAYAT PENULIS



Dr. Muntasir, S.Si., Apt. M.Si lahir di Ujung Pandang, 16 Agustus 1970, memulai perjalanan pendidikannya sebagai mahasiswa Farmasi Universitas Hasanuddin angkatan 1990, yang berhasil diselesaikan gelar Sarjana Farmasi (S1) pada tahun 1996. Pada tahun 1996 resmi terdaftar sebagai apoteker dan Apoteker pada tahun 1997.

Selama masa kuliah aktif dalam organisasi kemahasiswaan, menjabat sebagai Ketua Himpunan Mahasiswa Farmasi FMIPA Unhas pada 1993 dan Wakil Ketua Senat FMIPA pada 1994. Pada periode 1999-2001, ia melanjutkan studi magister (S2) di bidang Ilmu Kimia Universitas Hasanuddin. Karier pengajaran dimulainya sebagai dosen di Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan (FKIP) Universitas Nusa Cendana pada tahun 2000, mutasi ke Fakultas Kesehatan Masyarakat (FKM) Universitas Nusa Cendana mulai 2002 hingga 2023. Di sela-sela itu, ia sempat bekerja di Akademi Farmasi Kebangsaan selama 2019-2021. Pada tahun 2016, Dr. Muntasir menyelesaikan program doctoral di Program Studi Ilmu Kimia Universitas Hasanuddin Makassar, dengan kajian utama tentang pencemaran Sianida. Sejak awal 2022 menjabat sebagai staf pengajar tetap di Program Studi Farmasi, Fakultas Kedokteran dan Kedokteran Hewan (FKKH) Universitas Nusa Cendana. Dr. Muntasir memiliki keahlian luas dalam mengajar berbagai mata kuliah, antara lain: Biokimia; Kimia Analisis Kualitatif; Kimia Analisis Kuantitatif; Metode Pemisahan; Analisis Instrumen; Kimia Medisinal; Kimia Kesehatan; Biokimia Gizi; Biomedik I dan II; serta Kewirausahaan Kesehatan. Ia memiliki sertifikat dosen bidang keahlian Biomedik dan sejak 2016 mengajar di program Magister (S2),

dengan mata kuliah seperti Biokimia Gizi; Sistem Informasi Pelayanan Kesehatan; serta Kebijakan dan Manajemen Kesehatan.

Email : muntasir@staf.undana.ac.id, munbasrypps@yahoo.com

Wa : 081339360835

Alamat Rumah di Kupang : Perumahan RSS Baumata Blok C No. 2 Baumata Barat. Kecamatan Taebenu Kabupaten Kupang, Nusa Tenggara Timur, 85361

Rumah di Makassar : Jl. Babul Jannah no. 23 Maccini. Makassar. Sulawesi Selatan. 90144

Buku Referensi dan book Chapter yang sudah dituliskan dan dipublikasikan, yaitu:

1. Muntasir. 2018. Kewirausahaan Bidang Kesehatan ISBN 978-602-5668-68-5. Penerbit Litera Nusa Inspirasi. Bandung;
2. Muntasir. 2019. Kimia Kesehatan ISBN 978-602-6478-47-4 Penerbit LP2M Universitas Nusa Cendana. Kupang;
3. Muntasir. 2019. Manajemen Logistik Kesehatan ISBN 978-623-7276-47-0. Penerbit Litera Nusa Inspirasi. Bandung;
4. Herniwati, Muntasir., dkk. 2020. Etika Hukum Kesehatan. ISBN: 978-623-92777-8-9
5. Wahyuddin, E. Muntasir, dkk. 2021. Dari lontara pabbura ke pharmaceutical care : refleksi akademisi dan alumni Fakultas Farmasi Universitas Hasanuddin dalam penanganan Covid-19 ISBN [978-979-5303-35-0](#)
6. Zulkarnain Hamson, Muntasir, dkk. 2021. Informasi Teknologi di Dunia Ilmu Kesehatan ISBN 978-623-6290-38-5. Penerbit Media Sains Indonesia
7. Muntasir dkk, 2021. Antibiotik dan Resistensi Antibiotik.; ISBN 978-623-98733-6-3
8. Muntasir, 2021. Biomedik. ISBN 978-623-285-700-1.

9. Muntasir, 2022. Inovasi Alat Musik Sasando Elektrik, ISBN 978-623-99679-2-5
10. Muntasir dkk, Imu Biomedik Dasar, 2022. ISBN 978-623-8050-10-9
11. Dr. Sri Syatriani, SKM., M.Kes., Dr. Apt. Muntasir, S.Si, M.Si dkk. 2023. Surveilans Kesehatan Masyarakat. ISBN 978-623-8050-35-2
12. Muntasir, dkk. 2024. Biokimia Farmasi, ISBN 978-623-8050-46-8
13. Marthen Robinson Pellokila, Intje Picauly, Muntasir. Dkk. 2024. Determinan Gizi dan Kesehatan Masyarakat di Wilayah Lahan Kering Kepulauan. ISBN. 978-623-8798-77-3
14. A.Ifriany Harun, Maswati Baharuddin, Muntasir. dkk.2025. Mikrobiologi Farmasi. ISBN 978-634-7107-01-5
15. Muntasir. dkk 2025. One Health Dan Etnofarmakologi Tanaman Pencegah Rabies. ISBN 978-634-7107-07-7
16. Dr. Pius Weraman, SKM., M.Kes., Dr. Muntasir, S.Si., Apt., M.Si., dkk. Buku Monograf. [Inovasi penanggulangan tuberkulosis dengan TCM](#). ISBN 978-634-7107-05-3.
17. Anif Usni Faizah, S.Kep., Ns Heri Nugroho, S.T., M.Kes Dr. Rahmiwati Marsinun Latief. M.Si. Kons Agus Santoso, M.Pd. Ir. Sri Indah Setiyaningsih MSM, ST, MT Dr. Muntasir, S.Si., Apt., M.Si Moh. Jufriyanto, S.Kep., Ns., M.Kep Aprilian Catur Firmansah, A.Md. 2025. Pengelola Laboratorium. ISBN : 978-634-96363-0-8

Detoksifikasi Sianida Berdasarkan Oksidasi

Mekanisme Reaksi, Pengolahan Limbah,
dan Implikasi Toksikologi Farmasi

Buku ini disusun sebagai referensi yang mengintegrasikan berbagai aspek ilmu pengetahuan mengenai sianida, mulai dari dasar-dasar kimia, mekanisme keracunan, proses sianidasi dalam industri pertambangan, hingga berbagai teknologi detoksifikasi berbasis oksidasi yang berkembang saat ini. Pembahasan tidak hanya menitikberatkan pada mekanisme reaksi kimia, tetapi juga menguraikan faktor-faktor operasional yang memengaruhi efektivitas proses pengolahan limbah, penggunaan berbagai oksidator, strategi kombinasi oksidator, serta implikasinya terhadap toksikologi farmasi dan kesehatan lingkungan. Selain menyajikan landasan teoritis yang kuat, buku ini juga memberikan gambaran mengenai penerapan teknologi detoksifikasi dalam pengolahan limbah industri, khususnya limbah pertambangan yang mengandung sianida. Dengan demikian, pembaca diharapkan memperoleh pemahaman yang utuh mengenai hubungan antara proses kimia, pengelolaan limbah, keselamatan kerja, perlindungan lingkungan, dan upaya mewujudkan pembangunan industri yang berkelanjutan.



IKAPI
INSTITUT KEMAHIRUAN INDONESIA

CV. Tahta Media Group

Sukoharjo, Jawa Tengah

Web : www.tahtamedia.co.id

Ig : tahtamedia group

Telp/WA : +62 896 5427 3996

