

Pengaruh Perbandingan Zeolit dan Limestone terhadap Derajat Keasaman (pH) Air Asam Tambang (Studi Kasus: PT. XYZ)

Karim Kasmudin^{1*)}, Fitria Fitria¹⁾

¹⁾ Program Studi Teknik Kimia, Sekolah Tinggi Teknologi Industri Bontang

E-mail: kasmudinkarim@gmail.com*, sttfitria@gmail.com

ABSTRAK

Air Asam Tambang (AAT) merupakan salah satu permasalahan lingkungan serius dalam industri pertambangan batubara, ditandai dengan pH rendah dan konsentrasi logam berat terlarut yang tinggi. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh perbandingan massa antara zeolit alam dan limestone (batu kapur) sebagai media netralisasi dan adsorben dalam pengolahan AAT dari PT. XYZ. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen batch di laboratorium dengan lima variasi perbandingan massa zeolit dan limestone (100:0, 75:25, 50:50, 25:75, dan 0:100) dengan total massa media 10 gram per 500 mL sampel AAT. Parameter yang diukur adalah perubahan pH selama waktu kontak 90 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua variasi mampu menaikkan pH AAT dari nilai awal 2,6. Perbandingan 25:75 (zeolit:limestone) menunjukkan efektivitas paling optimal, mampu menaikkan pH hingga 8,3 dalam waktu 60 menit dan tetap stabil. Limestone berperan dominan dalam netralisasi asam, sementara kehadiran zeolit diduga mencegah efek *armoring* (pelapisan) pada partikel limestone dan turut menyerap ion logam yang ada. Kombinasi ini terbukti lebih efektif dibandingkan penggunaan masing-masing bahan secara tunggal. Disimpulkan bahwa perbandingan massa 25:75 merupakan rasio optimal untuk pengolahan AAT pada studi kasus ini.

Kata Kunci: Air Asam Tambang (AAT), Limestone, Proses Batch, Zeolit

ABSTRACT

Amino acid water (AAT) is one of the serious environmental problems in the coal mining industry, characterized by low pH and high concentrations of dissolved heavy metals. This study aims to analyze the effect of mass comparison between natural zeolite and limestone (limestone) as neutralization and adsorbent media in AAT processing from PT. XYZ. The research method used was a batch experiment in the laboratory with five variations of zeolite and limestone mass comparison (100:0, 75:25, 50:50, 25:75, and 0:100) with a total media mass of 10 grams per 500 mL of AAT samples. The measured parameter is the change in pH during the 90-minute contact time. The results showed that all variations were able to raise the AAT pH from an initial value of 2.6. The 25:75 ratio (zeolite:limestone) shows the most optimal effectiveness, being able to raise the pH to 8.3 within 60 minutes and remain stable. Limestone plays a dominant role in acid neutralization, while the presence of zeolite is thought to prevent the armoring effect of limestone particles and also absorb existing metal ions. This combination has proven to be more effective than using each ingredient alone. It was concluded that the mass ratio of 25:75 was the optimal ratio for AAT processing in this case study.

Keyword: Acid Mine Drainage (AMD), Limestone, Process Batch, Zeolite

1. Pendahuluan

Industri pertambangan, khususnya batubara, memiliki peran vital dalam perekonomian nasional, namun juga menghasilkan dampak lingkungan yang signifikan. Salah satu dampak utama adalah terbentuknya Air Asam Tambang atau AAT (*Acid Mine Drainage*). AAT terbentuk ketika mineral sulfida, seperti pirit (FeS_2), yang terpapar ke udara dan air selama proses penambangan, mengalami oksidasi (Zipper et al., 2018). Reaksi ini menghasilkan asam sulfat yang menurunkan pH air secara drastis, seringkali hingga di bawah 4, dan melarutkan logam-logam berat seperti besi (Fe), mangan (Mn), dan aluminium (Al) dari batuan sekitar (Sun et al., 2018).

Pelepasan AAT ke badan air tanpa pengolahan yang memadai dapat menyebabkan kerusakan ekosistem perairan, mematikan biota air, serta mencemari sumber air bagi manusia (Johnson & Hallberg,

2005). Oleh karena itu, pemerintah menetapkan baku mutu lingkungan yang ketat untuk air limbah tambang, dimana parameter pH harus berada dalam rentang 6-9 sebelum dapat dibuang ke lingkungan.

Berbagai teknologi telah dikembangkan untuk mengolah AAT, yang secara umum terbagi menjadi dua kategori: pengolahan aktif dan pasif (Mapukata et al., 2024). Pengolahan aktif, seperti penambahan bahan kimia basa (kapur tohor, soda kaustik), efektif namun memerlukan biaya operasional dan energi yang tinggi serta pemantauan berkelanjutan (Thisani et al., 2021). Sebaliknya, sistem pengolahan pasif menjadi alternatif yang menarik karena lebih ramah lingkungan, berbiaya rendah, dan perawatannya minimal (Qinwen, et al., 2024).

Salah satu metode pengolahan pasif yang potensial adalah penggunaan material reaktif alami. Limestone atau batu kapur (dominan CaCO_3) telah lama digunakan karena kemampuannya yang efektif dalam menetralkan keasaman (Francesco et al., 2015). Namun, penggunaan limestone tunggal memiliki kelemahan, yaitu fenomena *armoring*, di mana permukaan partikel limestone tertutup oleh endapan logam hidroksida (misalnya $\text{Fe}(\text{OH})_3$), sehingga menghambat reaksi netralisasi lebih lanjut (Sun et al., 2018).

Untuk mengatasi masalah tersebut, penelitian modern mulai mengkombinasikan limestone dengan material lain, salah satunya adalah zeolit. Zeolit adalah mineral aluminosilikat terhidrasi yang memiliki struktur kerangka tiga dimensi berpori. Strukturnya yang unik memberikan kapasitas tukar kation yang tinggi, sehingga mampu menyerap ion logam berat dari larutan AAT (Widyaningrum et al., 2022). Selain itu, porositas zeolit diharapkan dapat menjadi media dispersi bagi limestone, mengurangi kontak langsung antar partikel limestone dan meminimalisir efek *armoring* (Sun et al., 2018).

Meskipun potensi masing-masing bahan telah banyak diteliti, studi mengenai pengaruh perbandingan komposisi antara zeolit dan limestone terhadap efektivitas netralisasi AAT masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menentukan perbandingan massa optimal antara zeolit dan limestone untuk menaikkan pH air asam tambang yang berasal dari lokasi PT. XYZ, sehingga dapat menjadi dasar pengembangan sistem pengolahan pasif yang lebih efisien dan berkelanjutan (Daniela et al., 2025).

2. Metode Penelitian

A. Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Kimia, Sekolah Tinggi Teknologi Industri Bontang dari bulan Februari hingga April 2025. Sampel Air Asam Tambang diperoleh dari kolam penampungan (*settling pond*) di area konsesi PT. XYZ, Sulawesi Selatan.

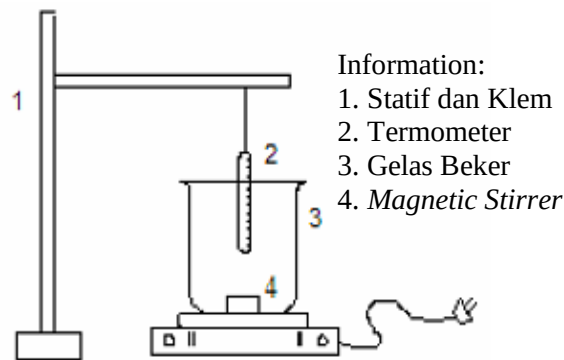
B. Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan meliputi pH meter digital (*Hanna Instruments HI98191*), gelas beker 1000 mL, timbangan analitik, *magnetic stirrer*, kertas saring Whatman No. 42, termometer dan *stopwatch*. Bahan yang digunakan adalah sampel AAT PT. XYZ, zeolit alam jenis *klinoptilolit* yang telah diaktivasi dengan cara dihaluskan hingga ukuran 100 mesh dan dipanaskan pada suhu 110°C selama 2 jam, serta limestone komersial yang juga dihaluskan hingga ukuran 100 mesh.

C. Prosedur Penelitian

Karakterisasi awal sampel AAT dilakukan dengan mengukur pH awal menggunakan pH meter yang telah dikalibrasi. Prosedur eksperimen dilakukan secara *batch* sebagai berikut:

1. Lima buah gelas beker disiapkan, masing-masing diisi dengan 500 mL sampel AAT.
2. Campuran media zeolit dan limestone ditambahkan ke dalam setiap gelas beker dengan total massa 10 gram, sesuai dengan lima variasi perbandingan massa (dalam gram):
 - V1: 10 g Zeolit + 0 g Limestone (100:0)
 - V2: 7,5 g Zeolit + 2,5 g Limestone (75:25)
 - V3: 5,0 g Zeolit + 5,0 g Limestone (50:50)
 - V4: 2,5 g Zeolit + 7,5 g Limestone (25:75)
 - V5: 0 g Zeolit + 10 g Limestone (0:100)
3. Setiap larutan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan konstan (150 rpm) untuk memastikan kontak yang merata antara media dan AAT.
4. Perubahan pH diukur dan dicatat pada interval waktu 0, 5, 15, 30, 60, dan 90 menit.
5. Setiap perlakuan diulang sebanyak tiga kali (triplo) untuk memastikan validitas data.



Gambar 1. Rangkaian Alat Penelitian

D. Prosedur Penelitian

Data hasil pengukuran pH dari tiga kali replikasi dirata-ratakan. Hasilnya kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik yang menunjukkan hubungan antara waktu kontak dan perubahan pH untuk setiap variasi perbandingan media. Analisis dilakukan secara deskriptif untuk membandingkan efektivitas setiap variasi dan menentukan perbandingan yang paling optimal.

3. Hasil dan Pembahasan

A. Karakteristik Air Asam Tambang

Hasil pengukuran sampel AAT dari PT. XYZ menunjukkan pH awal rata-rata sebesar 2,6. Nilai ini berada jauh di bawah baku mutu lingkungan yang ditetapkan (pH 6-9), sehingga memerlukan pengolahan sebelum dibuang ke lingkungan.

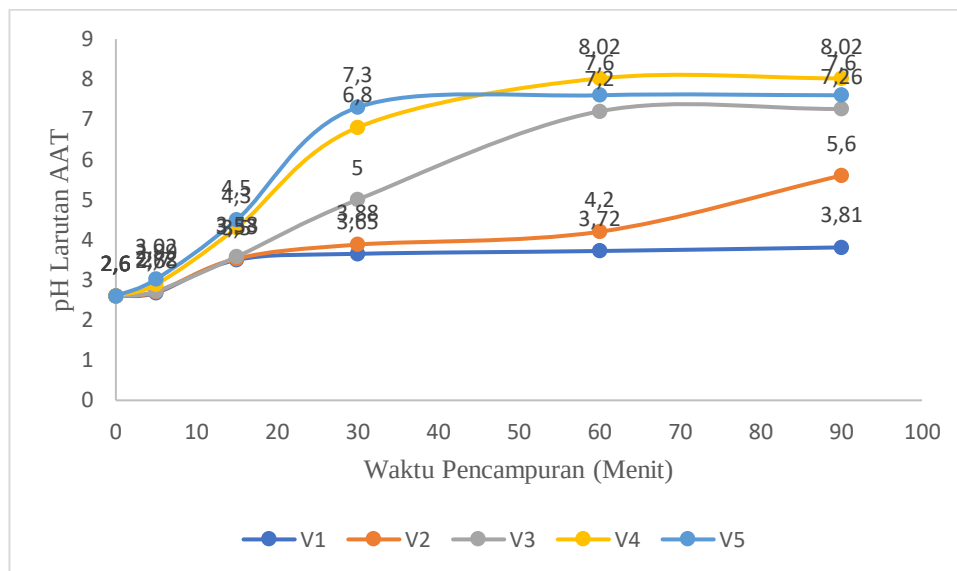
B. Pengaruh Waktu Kontak dan Perbandingan Media terhadap pH

Perubahan pH AAT selama 90 menit waktu kontak untuk kelima variasi perbandingan zeolit dan limestone disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Air Asam Tambang Setelah Penambahan Campuran Zeolit dan Limestone

Variabel	pH Tiap Waktu (Menit)					
	0	5	15	30	60	90
V1	2,6	2,68	3,5	3,65	3,72	3,81
V2	2,6	2,7	3,53	3,88	4,2	5,6
V3	2,6	2,72	3,58	5	7,2	7,26
V4	2,6	2,89	4,3	6,8	8,02	8,02
V5	2,6	3,02	4,5	7,3	7,6	7,6

Data dari Tabel 1 diatas jika di tampilkan dalam sebuah grafik akan lebih jelas menunjukan perubahan kenaikan pH air asam tambang pada setiap waktu dalam semua variabel, sebagaimana yang di tunjukan pada Gambar 2. berikut



Gambar 2. Grafik Perubahan pH Pada Tiap-tiap Variabel Satuan Waktu

Data Berdasarkan Gambar 2, terlihat bahwa semua variasi perlakuan berhasil menaikkan pH AAT. Kenaikan pH paling signifikan terjadi pada 30 menit pertama untuk semua variasi yang mengandung limestone (V2, V3, V4, dan V5). Hal ini menunjukkan bahwa reaksi netralisasi oleh limestone (CaCO_3) berlangsung relatif cepat.

Pada perlakuan V1 (100% zeolit), kenaikan pH terjadi sangat lambat dan tidak signifikan, hanya mencapai pH 3,81 setelah 90 menit. Ini mengkonfirmasi bahwa peran utama zeolit bukanlah sebagai agen penetral asam, melainkan melalui mekanisme pertukaran kation dimana zeolit dapat menyerap H^+ dalam jumlah terbatas atau ion logam pemicu keasaman seperti Al^{3+} dan Fe^{3+} (Widyaningrum et al. 2022).

Perlakuan V5 (100% limestone) menunjukkan kemampuan netralisasi yang sangat cepat, mencapai pH 7,3 dalam 30 menit. Namun, setelah itu kenaikan pH melambat dan cenderung stagnan di sekitar 7,6. Perlambatan ini diduga kuat disebabkan oleh awal terbentuknya lapisan pasif (*armoring*) dari endapan logam hidroksida pada permukaan partikel limestone, yang menghalangi kontak lebih lanjut dengan AAT (Sun et al., 2018).

Menariknya, variasi campuran menunjukkan hasil yang lebih unggul. Perlakuan V4 (25% zeolit : 75% limestone) menunjukkan performa terbaik. pH meningkat secara cepat dan mencapai 8,02 dalam waktu 60 menit, dan terus konstan pada nilai yang sama hingga akhir pengamatan di waktu 90 menit. Tingginya kandungan limestone (75%) menyediakan kapasitas netralisasi yang besar, sementara kehadiran zeolit (25%) diduga berperan sebagai dispersan. Partikel zeolit yang tersebar di antara partikel limestone menciptakan ruang dan mencegah agregasi partikel limestone, sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya *armoring* secara masif. Dengan demikian, permukaan aktif limestone dapat terus bereaksi dengan asam hingga mencapai pH netral.

Perlakuan V3 (50:50) juga menunjukkan hasil yang baik dengan pH akhir 7,26 masih berada di bawah V4 namun sudah menunjukkan kondisi pH yang mengarah baik. Sementara itu, V2 (75:25) yang memiliki kandungan limestone lebih sedikit, hanya mampu mencapai pH akhir 5,6 masih tergolong asam lemah. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah limestone tetap menjadi faktor dominan dalam menentukan kapasitas netralisasi total dari sistem.

Efektivitas kombinasi ini sejalan dengan penelitian oleh Daniela et al., (2025) yang menemukan bahwa material komposit berbasis zeolit dan limestone mampu meningkatkan efisiensi penyerapan kadmium Cd^{2+} dalam pengolahan air limbah air secara sinergis. Zeolit tidak hanya berfungsi sebagai adsorben logam tetapi juga sebagai "kerangka" yang menjaga reaktivitas material penetral agar tidak terbentuknya lapisan pasif (*armoring*) dari endapan logam hidroksida pada permukaan partikel limestone (Sun et al., 2018).

4. Kesimpulan

Kesimpulannya Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kombinasi zeolit dan limestone terbukti efektif untuk menaikkan pH Air Asam Tambang (AAT) dari PT. XYZ dari nilai awal 2,6 hingga memenuhi baku mutu lingkungan.
2. Perbandingan massa antara zeolit dan limestone secara signifikan mempengaruhi laju dan tingkat kenaikan pH.
3. Perbandingan massa 25% zeolit dan 75% limestone (V4) merupakan komposisi paling optimal dalam penelitian ini, yang mampu menaikkan pH hingga 8,32 dalam waktu 60 menit hingga 8,5 dalam waktu 90 menit.
4. Kehadiran zeolit dalam campuran diduga kuat berperan dalam meminimalisir efek *armoring* pada partikel limestone, sehingga meningkatkan efisiensi proses netralisasi secara keseluruhan.

Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan untuk melakukan penelitian skala pilot dan menganalisis efisiensi penurunan kadar logam berat terlarut menggunakan alat instrumentasi.

5. Pengakuan

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak manajemen PT. XYZ yang telah memberikan izin dan sampel Air Asam Tambang untuk penelitian ini. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada seluruh staf Laboratorium Teknik Kimia Sekolah Tinggi Teknologi Industri Bontang, atas fasilitas dan dukungan teknis selama penelitian berlangsung.

6. Daftar Pustaka

- Daniela O. Profeta, Marcella A. da Silva, Diêgo N. Faria, Daniel F. Cipriano, Jair C.C. Freitas, Fabiana Soares dos Santos, Thiago M. Lima, Sancler C. Vasconcelos, Mendelssolm K. Pietre. (2025). Zeolite/calcium carbonate composite for a synergistic adsorption of cadmium in aqueous solution. *Next Materials*, 6 (100493).
- Francesco G. Offeddu, Jordi Cama, Josep M. Soler, Gabriela Dávila, Alastair McDowell, Teddy Craciunescu, Ion Tiseanu. (2015). Processes affecting the efficiency of limestone in passive treatments for AMD: Column experiments. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(1)
- Johnson, D. B., & Hallberg, K. B. (2005). Acid mine drainage remediation options : a review. *Elsevier*, 338, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.002>
- Mapukata, S., Mudzanani, K., Maurice Chauke, N., Maiga, D., Phadi, T., & Raphulu, M. (2024). Acid Mine Drainage Treatment and Control: Remediation Methodologies, Mineral Beneficiation and Water Reclamation Strategies. *Hydrology - Current Research and Future Directions*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1003848>
- Qinwen Zheng, Yi Zhou, Xin Liu, Meng Liu, Libing Liao, Guocheng Lv. (2024). Environmental hazards and comprehensive utilization of solid waste coal gangue. *Progress in Natural Science: Materials International*, 34 (2), 223-239.
- Sun, Q., Mcdonald, L. M., & Skousen, J. G. (2018). Effects of Armoring on Limestone Neutralization of AMD. *Virginia Tech*, 3(1).
- Thisani, S. K., Kallon, D. V. Von, & Byrne, P. (2021). Review of Remediation Solutions for Acid Mine Drainage Using the Modified Hill Framework. *MDPI Sustainability*, 13(8118).
- Widyaningrum, Sri & Sarto, Sarto & Prasetya, Agus. (2022). Removal of Iron and Manganese in Acid Mine Drainage Using Natural Zeolite. *Key Engineering Materials*. 920. 81-87. 10.4028/p-0c392g.
- Zipper, C., Skousen, J., & Jage, C. (2018). Passive Treatment of Acid-Mine Drainage. *Virginia Tech*, 133.