



Aplikasi Persamaan Regresi Linier untuk Memprediksi Kebutuhan Kapur Tohor dan Biaya Netralisasi Air Asam Tambang¹

Application of Linear Regression Equation to Predict Quicklime Needs and Acid Mine Water Neutralization Costs

Esthi Kusdarini^{a, 2}, Yuliano Eldianto Atawolo^a, Fairus Atika Redanto Putri^a

^a Program Studi S1 Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Jl. Arief Rahman Hakim 100 Surabaya

ABSTRAK

Air asam tambang berpotensi mencemari badan air. Salah satu metode pengolahan air asam tambang adalah netralisasi menggunakan kapur tohor. Penelitian ini bertujuan untuk merencanakan dosis kapur tohor dan memperkirakan biaya netralisasi air asam tambang menggunakan persamaan regresi linier. Sampel air asam tambang diperoleh dari PT Bukit Asam. Percobaan netralisasi dilakukan dalam skala laboratorium menggunakan variabel dosis kapur tohor : 0,0759; 0,0971; 0,1460; 0,2965; 0,3877 g/L. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sampel air asam tambang mengandung parameter pH 3,6; TSS 87 mg/L; Fe 1,1239 mg/L; Mn 3,8333 mg/L. Netralisasi air asam tambang menggunakan kapur tohor dosis 0,1460-0,2965 g/L mampu menaikkan pH 33-153%; menurunkan : TSS 2-94%, Fe 24-87%, dan Mn 14-43%. Persamaan regresi linear yang diperoleh adalah $y = 13,707x + 4,103$; dengan x adalah dosis kapur tohor (g/L) dan y adalah pH. Perhitungan menggunakan persamaan regresi linear menghasilkan kebutuhan dosis kapur tohor sebesar 0,1383 – 0,3572 g/L untuk menghasilkan air asam tambang pH 6-9. Sedangkan untuk mengolah air asam tambang dengan debit 86.400 m³/hari membutuhkan kapur tohor sebesar 11.949-30.862,08 kg/hari dan biaya Rp 10.156.650,00 – 26.232.700,00/hari.

Kata kunci: Air asam tambang, Kapur tohor, Netralisasi, Regresi linear

ABSTRACT

Acid mine drainage has the potential to pollute water bodies. One method of acid mine drainage treatment is neutralization using quicklime. This study aims to plan the dose of quicklime and estimate the cost of neutralizing acid mine drainage using a linear regression equation. Acid mine drainage samples were obtained from PT Bukit Asam. Neutralization experiments were carried out on a laboratory scale using variable doses of quicklime: 0.0759, 0.0971, 0.1460, 0.2965, and 0.3877 g/L. The results showed that the acid mine drainage samples contained parameters of pH 3.6, TSS 87 mg/L, Fe 1.1239 mg/L, and Mn 3.8333 mg/L. Neutralization of acid mine drainage using quicklime at a dose of 0.1460-0.2965 g/L was able to increase pH by 33-153% and decrease TSS by 2-94%, Fe by 24-87%, and Mn by 14-43%. The linear regression equation obtained is $y = 13.707x + 4.103$, where x is the dose of quicklime (g/L) and y is pH. Calculations using the linear regression equation produce a dose requirement of quicklime of 0.1383–0.3572 g/L to produce acid mine water with a pH of 6-9. Meanwhile, processing acid mine water with a discharge of 86,400 m³/day requires quicklime of 11,949-30,862.08 kg/day and costs of Rp10,156,650.00–26,232,700.00/day.

Keywords: Acid mine drainage, quicklime, neutralization, linear regression

¹ Info Artikel: Received: 14 Agustus 2024, Accepted: 8 Desember 2024

² Corresponding Author: Esthi Kusdarini, esti@itats.ac.id

PENDAHULUAN

Kegiatan penambangan bijih mineral mengandung sulfur dan batu bara berpotensi membentuk air asam tambang. Air asam tambang adalah air yang terbentuk akibat kegiatan penambangan atau pengolahan yang bersifat asam atau mempunyai keasaman tinggi. Air asam tambang terbentuk akibat adanya mineral sulfida yang mengalami reaksi oksidasi disertai keberadaan air. Pada suatu kegiatan penambangan terdapat beberapa proses yang bisa mengakibatkan terbentuknya air asam tambang, antara lain: air limpasan hujan yang mengalir dan mengenai dinding pit penambangan; air hujan yang jatuh dan terinfiltrasi pada timbunan batuan penutup, air hujan yang jatuh dan terinfiltrasi pada timbunan batubara atau bijih hasil penambangan; tumpukan bijih pada ekstraksi logam dengan metode *heap leach*, timbunan tailing dan timbunan limbah sisa pencucian batubara; air tanah yang mengalir ke dalam bukaan tambang bawah tanah dan berkontak dengan batuan pada dinding bukaan; air tanah dan limpasan hujan yang mengalir ke zona ambrukan pada tambang bawah tanah dengan metode ambrukan (Gautama, 2019).

Proses pembentukan air asam tambang yang dapat berlangsung dengan cepat berpotensi membahayakan kesehatan manusia. Ogugua dkk menghasilkan temuan bahwa air asam tambang mengandung logam berat dengan kadar logam berat lebih tinggi dibandingkan air kran. Logam berat dalam air asam tambang terakumulasi dalam jaringan bibit tanaman yang disiram air asam tambang sehingga membahayakan kesehatan manusia yang mengkonsumsinya (Ogugua, Kanu, & Ntushelo, 2022). Jung dkk menghasilkan temuan bahwa drainase air asam tambang ke sungai mempengaruhi geokimia air sungai dan menurunkan kualitas air, yaitu adanya pelapukan karbonat dan silikat yang berasosiasi dengan asam sulfat dan asam karbonat, peningkatan konsentrasi SO_4 , Zn, dan Tl (Jung et al., 2023). Silva dkk juga membuktikan adanya logam tanah jarang dan kandungan sulfat yang tinggi dalam air asam tambang (Silva, Bertoli, Duarte, & Ladeira, 2022). Hajihashemi dkk menghasilkan temuan bahwa pohon delima yang tumbuh di sekitar tambang tembaga mengandung logam berpotensi toksik Cu, Fe, dan Zn yang terakumulasi dalam daun, mengalami stress oksidatif, klorosis, ukuran daun berkurang, mengalami peroksidasi lipid, dimana hal ini akan meningkatkan resiko kontaminasi rantai makanan (Hajihashemi, Rajabpoor, & Schat, 2023). Pemulihan air yang tercemar air asam tambang sangat penting untuk keberlanjutan lingkungan (KUSDARINI, HAKIM, YANUWIADI, & SUYADI, 2021; Kusdarini, Suyadi, Yanuwiadi, & Hakim, 2019; Kusdarini, Yanuwiadi, Hakim, & Suyadi, 2020). Pemulihan air bisa dilakukan melalui beberapa cara pengolahan.

Secara garis besar pengolahan air asam tambang dibagi menjadi 2 jenis, yaitu pengolahan aktif dan pasif. Pengolahan aktif antara lain menggunakan proses aerasi/oksidasi; menambahkan bahan penetral kimiawi, bahan berbasis kalsium, bahan berbasis Na, K dan NH_3 , flokulan/koagulan; proses *reverse osmosis*; resin penukar ion (Kusdarini & Budianto, 2018; Kusdarini, Purwaningsih, & Budianto, 2018, 2021), elektrodialisis, zeolite alami, proses *recovery* logam dari lumpur hasil pengolahan air asam tambang. Sedangkan pengolahan pasif antara lain menggunakan proses *aerobic wetlands*, *anaerobic wetlands* dan *biochemical reactors*, *anoxic limestone drain (ALD)*, *reducing and alkalinity producing systems (RAPS)*, *open limestone drain (OLD)* (Gautama, 2019). Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengolah air asam tambang.

Qin dkk menghasilkan temuan bahwa komposit lumpur merah-biochar mampu menetralkan dan menyerap logam yang terbawa air asam tambang (Qin, Wang, Deng, Li, & Lin, 2022). Weinberg dkk menghasilkan temuan bahwa *fly ash* telah terbukti berhasil menetralsasi air

asam tambang, menghilangkan unsur kationik (yaitu, Fe, Mn, dan Al) dari larutan, sementara pada saat yang sama, melindungi unsur pembentuk oksianion (yaitu, As, Se, Mo, Cr, B, Tl, dan Sb) dari *fly ash*, meningkatkan potensi risiko lingkungan dari lindi yang diolah (Weinberg, Coyte, Wang, Das, & Vengosh, 2022). Wibowo dkk juga berhasil membuat komposit dari kulit kerang dan tempurung kelapa yang mampu menyerap logam Al, Ca, dan Mg yang terkandung dalam air asam tambang dengan baik (Wibowo, Sudiby, Naswir, & Ramadan, 2022). Kusdarini dkk menghasilkan adsorber berbahan dasar batubara, cangkang kelapa sawit, dan mangrove yang mampu menyerap beberapa logam berat sampai 53% (A Budianto, E Kusdarini, NH Amrullah, E Ningsih, K Udyani, 2021; Budianto, Kusdarini, Effendi, & Aziz, 2019; Budianto, Kusdarini, Mangkurat, Nurdiana, & Asri, 2021; Kusdarini & Budianto, 2022; Kusdarini, Budianto, & Ghafarunnisa, 2017; Kusdarini, Pradana, & Budianto, 2022).

Penelitian-penelitian tersebut menghasilkan temuan metode yang bagus untuk menaikkan pH dan menyerap logam berat dalam air asam tambang, namun penelitian tersebut masih dalam skala laboratorium. Penelitian ini menyempurnakan penelitian sebelumnya dengan menerapkan hasil penelitian skala laboratorium untuk diterapkan dalam skala industri. Data hasil penelitian skala laboratorium digunakan untuk membuat persamaan regresi linier yang dapat digunakan untuk memprediksi kebutuhan bahan kimia dan biaya yang diperlukan untuk mengolah air asam tambang skala industri menggunakan kapur tohor (CaO), suatu bahan berbasis basa yang harganya murah, mudah diperoleh, dan cara pengoperasian yang mudah. Parameter yang diteliti pada penelitian ini adalah pH, Fe, Mn, dan TSS karena sesuai dengan parameter baku mutu air limbah kegiatan penambangan batu bara yang tercantum dalam Lampiran 1 Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 113 Tahun 2003.

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Bahan-bahan yang diperlukan adalah sampel air asam tambang dari PT Bukit Asam (diambil pada satu musim, yaitu musim penghujan); aquades; HNO₃; larutan standar logam Fe; larutan standar logam Mn; gas C₂H₂; HNO₃; aquades; kertas saring ukuran pori 0,42; 0,45; 1,0; 1,1; 1,5 µm; larutan buffer 4, 7, dan 10. Sedangkan alat-alat yang digunakan adalah 1 set spektrofotometer; pH meter; *stirrer magnetic*; kertas tissue; neraca analitik; thermometer; lampu hallow katoda Fe; lampu hallow katoda Mn; gelas piala 250 mL; pipet ukur 5, 10, 20, 30, 40, 60 mL; labu ukur 100 mL; corong gelas; pemanas listrik; labu semprot; desikator; oven; pipet volume; gelas ukur; cawan aluminium; cawan porselen; penjepit; kaca arloji; pompa vacuum.

Metode Penelitian

Penelitian menggunakan metode eksperimen skala laboratorium pengolahan air asam tambang menggunakan kapur tohor dengan variabel dosis kapur tohor. Eksperimen dilakukan dalam tiga tahap, yaitu: 1) pengujian pH, TSS, kadar Fe dan Mn sampel air asam tambang; 2) pengujian jar test dosis kapur tohor (CaO) untuk netralisasi air asam tambang; 3) pengujian pH, TSS, kadar Fe dan Mn sampel air asam tambang yang telah diolah.

Pengujian pH

Prosedur pengujian pH sesuai SNI 6989.11.2019. Alat yang digunakan adalah pH meter. Prinsip pengujian berdasarkan aktifitas ion hidrogen secara potensiometri atau elektrometri. Pengujian terdiri dari 2 tahap, yaitu persiapan dan pengujian. Tahap persiapan meliputi: 1) mengkalibrasi pH meter menggunakan larutan *buffer*; 2) mengkondisikan sampel dengan temperatur tinggi sampai standart. Sedangkan tahap pengujian meliputi: 1) mengeringkan elektroda dengan kertas tissue, kemudian membilas dengan aquades; 2) membilas elektroda dengan contoh uji; 3) mencelupkan elektroda ke dalam sampel sampai pH meter menunjukkan pembacaan tetap.

Pengujian Kadar Fe

Prosedur pengukuran kadar Fe sesuai SNI 6989-84:2019. Prinsip pengujian adalah penambahan HNO₃ pada sampel guna melarutkan logam-logam yang terkandung dalam sampel menjadi ion-ion dan menghilangkan zat pengotor dengan bantuan pemanas listrik, kemudian melakukan analisa *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) menggunakan gas asetilen (C₂H₂). Pengujian terdiri dari 2 tahap, yaitu persiapan dan pengujian. Tahap persiapan meliputi: 1) sampel sejumlah 100 mL diaduk kemudian dimasukkan ke dalam wadah gelas; 2) sampel dalam gelas piala ditambah dengan HNO₃ sebanyak 5 mL; 3) sampel dipanaskan sampai hampir kering; 4) pada sampel ditambahkan 50 mL aquades, kemudian dimasukkan ke dalam labu ukur 100 mL melalui kertas saring dan ditambahkan aquades sampai volume sampel mencapai 100 mL; 5) pada masing-masing larutan kerja dilakukan pengukuran dengan panjang gelombang sebesar 248,3 nm; 6) perhitungan persamaan regresi berdasarkan kurva kalibrasi; 7) eksperimen dilanjutkan dengan pengukuran sampel.

Pengujian Kadar Mn

Prosedur pengukuran kadar Mn sesuai SNI 6989-84:2019. Prinsip pengujian kadar Mn sama dengan prinsip pengujian kadar Fe. Pengujian kadar Mn terdiri dari 2 tahap, yaitu persiapan dan pengujian. Tahap persiapan meliputi: 1) sampel sejumlah 100 mL diaduk kemudian dimasukkan ke dalam wadah gelas; 2) sampel dalam gelas piala ditambah dengan HNO₃ sebanyak 5 mL; 3) sampel dipanaskan sampai hampir kering; 4) pada sampel ditambahkan 50 mL aquades, kemudian dimasukkan ke dalam labu ukur 100 mL melalui kertas saring dan ditambahkan aquades sampai volume sampel mencapai 100 mL; 5) pada masing-masing larutan kerja dilakukan pengukuran dengan panjang gelombang sebesar 248,3 nm; 6) perhitungan persamaan regresi berdasarkan kurva kalibrasi; 7) eksperimen dilanjutkan dengan pengukuran sampel.

Pengujian TSS

Pengujian padatan tersuspensi secara gravimetri (SNI 6989.3-2019). Konsep pengujian adalah sampel cair disaring memakai kertas saring yang telah diukur beratnya, kemudian kertas saring yang mengandung residu dipanaskan sampai temperatur 103-105°C dan diukur beratnya. Perbedaan berat kertas saring mengandung residu dan tanpa mengandung residu merupakan berat padatan tersuspensi total (TSS). Adakalanya proses penyaringan terhambat oleh padatan tersuspensi yang menyumbat pori-pori kertas saring sehingga pori-pori kertas saring bisa diperbesar untuk memperlancar penyaringan. Pengujian TSS terdiri dari 3 tahap, yaitu persiapan dan pengawetan contoh, persiapan pengujian, dan pengujian. Tahap persiapan dan pengawetan sampel meliputi: 1) memasukkan sampel ke dalam wadah gelas; 2) menyimpan sampel pada temperatur 4°C untuk mengurangi resiko aktivitas mikroba. Analisa tidak boleh

dilakukan lebih dari 24 jam dihitung dari waktu sampel diambil; 3) meminimalisir hal-hal yang tidak diinginkan dalam proses pengujian dengan beberapa langkah: a) partikel besar yang mengapung dipisahkan, b) sampel diatur agar menghasilkan residu maksimal 200 mg agar tidak menyumbat pori saringan, c) residu yang terlalu banyak menempel pada saringan dicuci dengan aquadest, d) penyaringan dilakukan secepat mungkin agar zat koloidal yang terperangkap pada kertas saring tidak menyumbat pori kertas saring. Selanjutnya untuk tahap persiapan pengujian dilakukan dengan 3 perlakuan terhadap kertas saring, yaitu: 1) dilakukan pemasangan kertas saring pada peralatan filtrasi, peralatan vacuum dan tempat pencucian dengan aquadest berlebih sebanyak 20 mL, kemudian dilakukan penyedotan untuk membersihkan sisa air; 2) kertas saring dipindahkan dari saringan ke wadah timbangan neraca analitik, kemudian dikeringkan; 3) kertas saring dipanaskan dalam oven pada temperatur 103 – 105°C selama 1 jam, kemudian kertas saring dipindahkan ke dalam desikator, dan dilanjutkan dengan penimbangan. Setelah sampel siap maka dilakukan pengujian sampel yang prosedurnya kurang lebih sama dengan penimbangan kertas saring, yaitu: 1) sampel air asam tambang disaring dengan peralatan vacuum, kemudian saringan dibasahi dengan aquades; 2) sampel diaduk menggunakan pengaduk magnetik; 3) sampel yang sedang diaduk kemudian diambil dengan pipet; 4) kertas saring dicuci dengan air suling sebanyak 3x10 mL, dibiarkan sampai kering sempurna, kemudian penyaringan dilanjutkan dengan alat vacuum selama 3 menit. Apabila sampel mengandung padatan terlarut tinggi maka dilakukan pencucian lagi; 5) kertas saring dipindahkan ke wadah timbangan aluminium; 6) kertas saring mengandung padatan dipanaskan dalam oven pada temperatur 103 – 105°C selama 1 jam, kemudian dipindahkan ke dalam desikator. Selanjutnya TSS diperoleh dari persamaan (1).

$$TSS = \frac{(KR-K)x 1000}{K} \quad (1)$$

Dengan TSS = total padatan tersuspensi (mg/L), KR = berat kertas saring + residu kering (mg), K = berat kertas saring (mg), V = volume sampel air asam tambang (mL).

Jar Test Penentuan Dosis Kapur Tohor

Penentuan dosis CaO yang diperlukan untuk optimalisasi pengolahan air asam tambang. Penentuan dosis CaO dilakukan melalui 4 langkah: yaitu 1) menyediakan 5 sampel air asam tambang masing-masing sebanyak 1000 mL ditempatkan dalam wadah gelas; 2) menimbang CaO sebanyak 0,0759; 0,0971; 0,1460; 0,2965; 0,3877 g, dan menambahkan ke dalam gelas yang telah diisi sampel air asam tambang; 3) mengaduk sampel dengan pengaduk mekanik dengan kecepatan 120 rpm selama 20 menit; 4) mengukur pH, kadar Fe dan Mn, serta TSS sampel air asam tambang sebelum dan setelah diolah.

Persamaan Regresi Linier

Persamaan regresi linier pengaruh dosis CaO terhadap pH air asam tambang diperoleh berdasarkan persamaan (2) :

$$y = mx + cy \quad (2)$$

dengan $y = \text{pH}$ sampel dan $x = \text{dosis CaO (g/L)}$. Persamaan diperoleh dari data jar test penentuan dosis CaO.

Kebutuhan Kapur Tohor (CaO) dan Biaya Pengolahan

Kebutuhan CaO bagi PT Bukit Asam dihitung menggunakan data debit pompa per hari dan persamaan regresi linier dengan variabel bebas dosis CaO dan variabel terikat pH air asam tambang. Target pH air asam tambang dibuat untuk 4 jenis pH, yaitu 6, 7, 8, dan 9. Sedangkan biaya pengolahan dihitung berdasarkan kebutuhan CaO per hari dengan asumsi harga CaO sebesar Rp 850,00/kg.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan untuk menentukan dosis kapur tohor (CaO) dan biaya pengolahan. Pengolahan air asam tambang dilakukan untuk memenuhi baku mutu air limbah bagi usaha dan atau kegiatan pertambangan batu bara berdasarkan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 113 Tahun 2003 untuk parameter pH, Fe, Mn, dan TSS. Hasil analisa parameter sampel air asam tambang sebelum diolah disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Parameter air asam tambang sebelum diolah

Parameter	Air asam tambang	Baku mutu*	Satuan
pH	3,6	6-9	-
TSS	87	400	mg/L
Fe	1,1239	7	mg/L
Mn	3,8333	4	mg/L

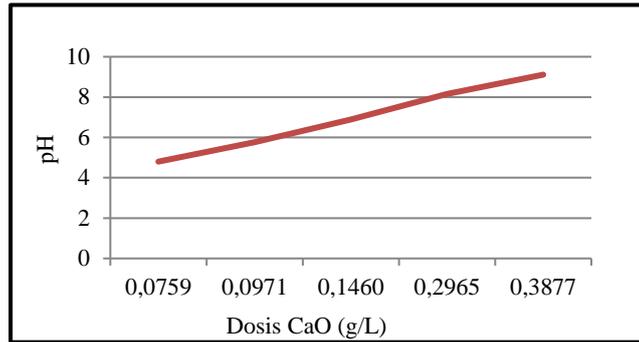
*(Hidup, 2003)

Tabel 1 menunjukkan bahwa air asam tambang sudah memenuhi baku mutu untuk parameter TSS, Fe, dan Mn namun belum memenuhi baku mutu untuk parameter pH. Pada penelitian ini dilakukan penambahan kapur tohor (CaO) ke dalam air asam tambang untuk menaikkan nilai pH. Parameter air asam tambang setelah diolah menggunakan CaO disajikan pada Tabel-2.

Tabel 2 Parameter air asam tambang setelah diolah

CaO (g/L)	pH	TSS (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)
0,0759	4,80	10	0,5327	3,2929
0,0971	5,77	31	0,8841	4,5449
0,1460	6,89	20	0,4583	4,5662
0,2965	8,16	5	0,5262	2,8556
0,3877	9,11	85	0,1470	2,1941

Penambahan CaO mempengaruhi pH air asam tambang seperti disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1 Pengaruh dosis CaO terhadap pH

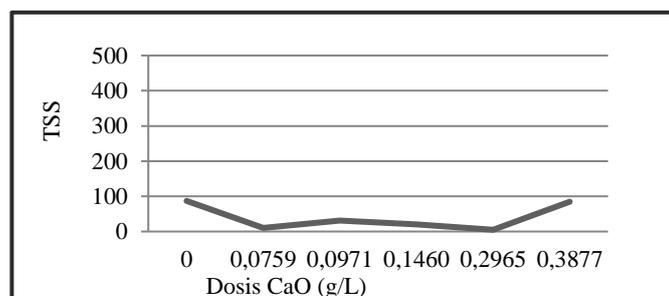
Gambar 1 menunjukkan bahwa semakin besar dosis CaO maka semakin bertambah pula pH air asam tambang yang diolah. pH air asam tambang yang diolah memenuhi baku mutu apabila ditambahkan CaO sebesar 0,1460-0,2965 g/L. Penggunaan CaO mampu menaikkan pH air asam tambang sebesar 33-153%, yaitu dari 3,6 menjadi 4,80 – 9,11 sehingga memenuhi baku mutu air limbah kegiatan pertambangan batu bara, yaitu pH 6 – 9 (Hidup, 2003) . Penambahan bahan kimia berbasis kalsium mampu menetralkan sifat asam air tambang (Gautama, 2019). CaO sebagai salah satu mineral karbonat telah terbukti efektif bekerja dengan dosis kurang dari 0,3 g/L untuk air asam tambang dengan pH kurang dari 4. CaO dihasilkan dari pemanasan CaCO_3 sehingga lebih reaktif dibandingkan CaCO_3 seperti disajikan pada persamaan reaksi (3).



Secara umum reaksi penetralan air asam tambang menggunakan CaO disajikan pada persamaan reaksi (4).

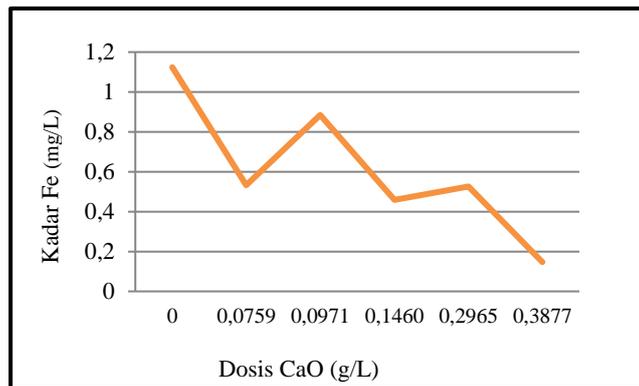


Penetralan air asam tambang dengan CaO yang cukup efektif sesuai dengan temuan dari Lizuka dkk yang menjelaskan bahwa apabila penetralan menggunakan material lumpur maka dibutuhkan 1,5 kali lipat (Iizuka et al., 2022). Selain pH, penambahan CaO juga mempengaruhi TSS air asam tambang seperti disajikan pada Gambar-2.



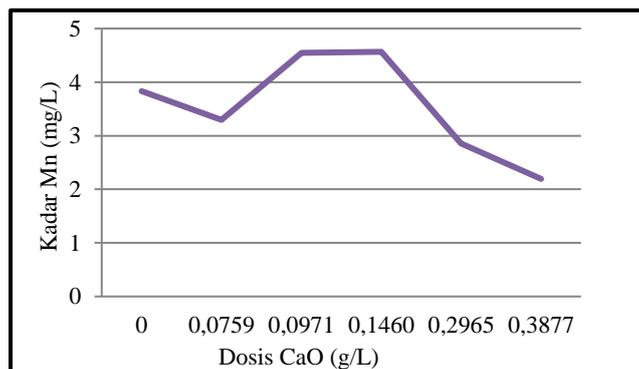
Gambar 2 Pengaruh dosis CaO terhadap TSS

Gambar 2 menunjukkan bahwa peningkatan dosis CaO tidak menunjukkan kenaikan atau penurunan TSS yang konsisten. Hal ini kemungkinan disebabkan adanya reaksi-reaksi kimia CaO dengan unsur-unsur yang terkandung dalam air asam tambang. Namun demikian untuk dosis CaO 0,0759-0,3877 g/L, nilai TSS memenuhi baku mutu air limbah kegiatan pertambangan batu bara, yaitu sebesar 10-85 mg/L atau di bawah 400 mg/L (Hidup, 2003). Selanjutnya penambahan CaO mempengaruhi kadar Fe air asam tambang seperti disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3 Pengaruh dosis CaO terhadap kadar Fe

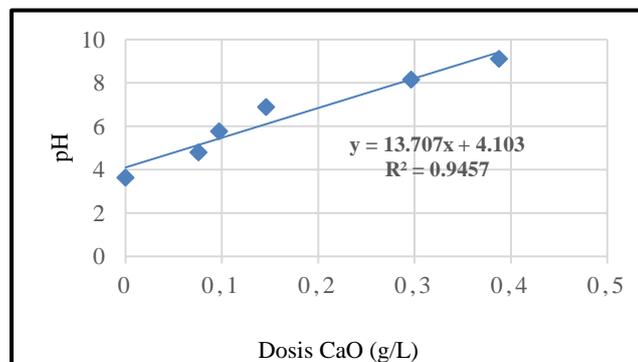
Gambar 3 menunjukkan bahwa semakin besar dosis CaO maka kadar Fe dalam air asam tambang cenderung turun dengan prosentase removal sebesar 21,34-86,92%. Removal Fe optimal pada dosis CaO 0,3877 g/L. Kemampuan CaO meremoval logam Fe hampir sama dengan kemampuan *fly ash* dalam meremoval Fe dalam air asam tambang (Weinberg et al., 2022). Selain mempengaruhi kadar Fe, penambahan dosis CaO juga mempengaruhi kadar Mn dalam air asam tambang seperti disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4 Pengaruh dosis CaO terhadap kadar Mn

Gambar 4 menunjukkan bahwa semakin besar dosis CaO maka kadar Mn mengalami kenaikan kemudian penurunan kembali. Pada pH rendah Mn masih terikat dalam bentuk mineral. Kemudian seiring dengan kenaikan pH Mn dalam mineral mulai larut sehingga terbentuk ion Mn^{2+} dan Mn^{4+} , yang kemudian akan mengendap kembali dengan kenaikan pH mendekati basa. Hal ini disebabkan ion OH^- yang dihasilkan bereaksi dengan ion logam membentuk endapan logam hidroksida. Namun untuk ion Mn^{2+} dan Mn^{4+} membutuhkan

kondisi $\text{pH} > 8$ untuk mengendap sempurna. Oleh karena itu pada dosis CaO 0,0971 g/L dan 0,1460 g/L kandungan Mn belum memenuhi baku mutu karena pH kurang dari 7 sehingga Mn masih berupa ion Mn^{2+} dan Mn^{4+} . Selanjutnya prosentase removal Mn mencapai 45,15%. Removal Mn optimal pada dosis CaO 0,2965 - 0,3877 g/L pada pH 8,16-9,11. Penelitian menghasilkan temuan bahwa air asam tambang dapat memenuhi baku mutu apabila diolah menggunakan CaO dosis 0,2965 g/L dengan parameter air olahan pH 8,16; TSS 5 mg/L; Fe 0,5262 mg/L; dan Mn 2,8556 mg/L. Kemampuan CaO meremoval logam Mn lebih efektif dibandingkan *fly ash* dalam meremoval Mn dalam air asam tambang (Weinberg et al., 2022). Penetral *fly ash* dari batubara lignit dari jenis yang mengandung komponen utama kapur maupun silika yang membutuhkan dosis 5g/50 mL air asam (Rouliia, Alexopoulos, Itskos, & Vasilatos, 2022). Kemampuan CaO yang tidak hanya menetralkan sifat asam dari air asam tambang, akan tetapi juga mampu menurunkan kadar Fe dan Mn juga mendukung temuan Song dkk (Song et al., 2022). Selanjutnya berdasarkan Gambar 1 dan parameter awal air asam tambang maka diperoleh hubungan antara dosis CaO dengan pH air asam tambang seperti disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5 Grafik regresi linear pengaruh dosis CaO terhadap pH

Gambar 5 menunjukkan bahwa dari grafik dosis CaO vs pH diperoleh persamaan regresi linear seperti disajikan pada Persamaan (5).

$$y = 13,707x + 4,103 \quad (5)$$

Persamaan (5) mempunyai R square 0,9457, yang berarti sebanyak 94,57% sebaran pH air asam tambang dapat dijelaskan oleh variabel dosis CaO . (Hair, 2011; Kusdarini et al., 2020). Variabel y merupakan nilai pH dan variabel x merupakan dosis kapur yang dibutuhkan. Berdasarkan persamaan regresi linear yang diperoleh diketahui bahwa hubungannya berbanding lurus, dimana semakin meningkat dosis yang digunakan semakin meningkat juga nilai pH hasil penetralan. Selanjutnya untuk memprediksi kebutuhan CaO maka dihitung dosis CaO yang dibutuhkan untuk target pH air asam tambang 6, 7, 8, dan 9 menggunakan persamaan (5). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa dosis kapur tohor (CaO) yang dibutuhkan agar pH air asam tambang memenuhi baku mutu lingkungan berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 berkisar antara 0,1383-0,3572 g/L (Indonesia, 2021).

Prediksi Kebutuhan CaO dan Biaya Pengolahan Skala Industri

Untuk memprediksi CaO yang diperlukan PT R untuk mengolah air asam tambang maka diperlukan data debit pompa yang digunakan untuk memompa air asam tambang ke kolam pengendapan. Air asam tambang yang masuk ke kolam pengendapan dipompa oleh 4 buah pompa jenis J-900 DXH. Masing-masing pompa mempunyai debit 900 m³/jam sehingga total 4 pompa mempunyai debit 3600 m³/jam atau 3600000 L/jam. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa untuk pengolahan air asam tambang di PT Bukit Asam membutuhkan kapur tohor (CaO) sebesar 11.949,00-30.862,08 kg/hari atau 478-1.235 karung/hari (1 karung berisi 25 kg). Sedangkan biaya yang dibutuhkan sebesar Rp 10.156.650,00-26.232.700,00. Prediksi kebutuhan CaO dan biaya pengolahan yang dihasilkan dapat membantu untuk merencanakan pengelolaan air asam tambang, menangani permasalahan berbagai logam berat dan sulfat yang sangat mencemari dan korosif, menimbulkan ancaman terus-menerus terhadap lingkungan ekologis dan kesehatan manusia. Hasil penelitian mendukung temuan Song dkk yang menghasilkan temuan bahwa proses netralisasi efektif mengatasi permasalahan air asam tambang dan berpotensi untuk digabung dengan metode biologi dan elektoreduksi (Song et al., 2022). Penelitian juga bisa disempurnakan dengan menganalisis metode pengendalian dan teknologi pengolahan yang dapat digunakan untuk pencegahan dan pengendalian sumber dan akhirnya tata kelola yang efektif (Xia, Song, Zhao, & Li, 2023).

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa air asam tambang di PT Bukit Asam mengandung pH 3,64; TSS 84; kadar Fe 1,1239 mg/L dan Mn 3,8333 mg/L. Sampel belum memenuhi baku mutu air limbah industri pertambangan dan batubara untuk parameter pH berdasarkan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 113 Tahun 2003. Penelitian menghasilkan temuan bahwa dosis CaO sebesar 0,2965 g/L menghasilkan air hasil olahan memenuhi baku mutu dengan parameter pH 8,16; TSS 5 mg/L; Fe 0,5262 mg/L; dan Mn 2,8556 mg/L. Sedangkan persamaan regresi linear yang menjelaskan pengaruh dosis CaO terhadap pH air asam tambang adalah $y = 13,707x + 4,103$; x adalah dosis CaO (g/L) dan y adalah pH. Prediksi kebutuhan CaO PT R untuk mengolah air asam tambang menggunakan persamaan regresi linear dengan target pH 6-9 sebesar 11.949-30.862,08 kg/hari, sedangkan prediksi biaya pengolahan sebesar Rp 10.156.650,00 – 26.232.700,00/hari. Hasil penelitian ini sangat penting untuk memprediksi kebutuhan CaO dan biaya pengolahannya sehingga menjadi bahan pertimbangan apabila ditemukan bahan penetral dan metode lain yang lebih menguntungkan. Penelitian juga bisa disempurnakan dengan mengkaji pencegahan pembentukan air asam tambang sampai pengelolaan lumpur air asam tambang.

DAFTAR PUSTAKA

- A Budianto, E Kusdarini, NH Amrullah, E Ningsih, K Udyani, A. A. (2021). Physics and chemical activation to produce activated carbon from empty palm oil bunches waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing.
- Anonim. (2021). *Kamus Besar Bahasa Indonesia Daring* (p. diakses 12 Februari 2021 06.05 WIB). p. diakses 12 Februari 2021 06.05 WIB. Jakarta: Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia.
- Budianto, A., Kusdarini, E., Effendi, S. S. W., & Aziz, M. (2019). The Production of Activated Carbon from Indonesian Mangrove Charcoal. *IOP Conference Series:*

- Materials Science and Engineering*, 462(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/462/1/012006>
- Budianto, A., Kusdarini, E., Mangkurat, W., Nurdiana, E., & Asri, N. (2021). Activated Carbon Producing from Young Coconut Coir and Shells to Meet Activated Carbon Needs in Water Purification Process. *Journal of Physics: Conference Series*. Surabaya: IOP Publishing.
- Gautama, P. D. I. R. S. (2019). *Pembentukan, Pengendalian dan Pengelolaan Air Asam Tambang (II)*. Bandung: ITB Press.
- Hair, J. M. S. C. R. J. mena. (2011). PLS SEM: Indeed A Silver Bullet. *Journal of Marketing Theory and Practice*, 19(2), 139–151.
- Hajihashemi, S., Rajabpoor, S., & Schat, H. (2023). Acid mine drainage (AMD) endangers pomegranate trees nearby a copper mine Author. *Science of The Total Environment*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164269>
- Hidup, K. L. (2003). *Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 113 Tahun 2003 Tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha Dan Atau Kegiatan Pertambangan Batu Bara*.
- Iizuka, A., Ho, H.-J., Sasaki, T., Yoshida, H., Hayakawa, Y., & Yamasaki, A. (2022). Comparative study of acid mine drainage neutralization by calcium hydroxide and concrete sludge-derived material Author. *Minerals Engineering*, 188. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107819>
- Indonesia, P. R. (2021). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*.
- Jung, Y.-Y., Choi, S.-H., Choi, M., Bong, Y.-S., Park, M.-Y., Lee, K.-S., & Shin, W.-J. (2023). Acid mine drainage and smelter-derived sources affecting water geochemistry in the upper Nakdong River, South Korea Author. *Science of The Total Environment*, 880. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163353>
- Kusdarini, E., & Budianto, A. (2018). Removal of Manganese from Well-Water on Pasuruan, East Java, Indonesia Using Fixed Bed Cation Exchanger and Prediction of Kinetics Adsorption. *Indian Journal of Science and Technology*, 11(23), 1–7.
- Kusdarini, E., & Budianto, A. (2022). Characteristics and Adsorption Test of Activated Carbon from Indonesian Bituminous Coal. *Journal of Ecological Engineering*, 23(10), 1–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.12911/22998993/152343>
- Kusdarini, E., Budianto, A., & Ghafarunnisa, D. (2017). Produksi Karbon Aktif dari Batubara Bituminus dengan Aktivasi Tunggal H₃PO₄, Kombinasi H₃PO₄-NH₄HCO₃, dan Termal. *Reaktor*, 17(2), 74–80. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14710/reaktor.17.2.74-80>
- KUSDARINI, E., HAKIM, L., YANUWIADI, B., & SUYADI, S. (2021). Study in the Development of Fixed Bed Filter Adoption of Public Health of Lake Water Users. *Walailak Journal of Science and Technology*, 18(8), 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.48048/wjst.2021.9131>
- Kusdarini, E., Pradana, D. R., & Budianto, A. (2022). Production of Activated Carbon from High-Grade Bituminous Coal to Removal Cr (VI). *Reaktor*, 22(1), 14–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/reaktor.22.1.14-20>
- Kusdarini, E., Purwaningsih, D. Y., & Budianto, A. (2018). Adsorption of Pb²⁺ Ion in Water Well with Amberlite Ir 120 Na Resin. *Pollution Research*, 37(4), 307–312.
- Kusdarini, E., Purwaningsih, D. Y., & Budianto, A. (2021). Removal Pb²⁺ of Well Water using Purolite C-100 Resin and Adsorption Kinetic. *Pollution Research*, 40(2).

- Kusdarini, E., Suyadi, S., Yanuwiadi, B., & Hakim, L. (2019). Analysis of Water Sources Availability and Water Quality in Dry and Rainy Season in Dry Land Areas, North Gresik, Indonesia. *Pollution Research*, 38(4), 58–65.
- Kusdarini, E., Yanuwiadi, B., Hakim, L., & Suyadi, S. (2020). Adoption Model of Water Filter by The Society of Lake Water Users in Dry Land Area, Gresik, East Java, Indonesia. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, 10(5), 2089–2096.
- Ogugua, U. V., Kanu, S. A., & Ntushelo, K. (2022). Gibberellic acid improves growth and reduces heavy metal accumulation: A case study in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings exposed to acid mine water. *Heliyon*, (12). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12399>
- Qin, J., Wang, X., Deng, M., Li, H., & Lin, C. (2022). Red mud-biochar composites (co-pyrolyzed red mud-plant materials): Characteristics and improved efficacy on the treatment of acidic mine water and trace element-contaminated soils. *Science of The Total Environment*, 844. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157062>
- Rouliia, M., Alexopoulos, D., Itskos, G., & Vasilatos, C. (2022). Lignite fly ash utilization for acid mine drainage neutralization and clean-up Author. *Cleaner Materials*, 6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100142>
- Silva, G. C., Bertoli, A. C., Duarte, H. A., & Ladeira, A. C. Q. (2022). Recovery of rare earth elements from sulfate-rich acid mine water: Looking through the keyhole the exchange reaction for cationic resin. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108715>
- Song, Y., Guo, Z., Wang, R., Yang, L., Cao, Y., & Wang, H. (2022). A novel approach for treating acid mine drainage by forming schwertmannite driven by a combination of biooxidation and electroreduction before lime neutralization. *Water Research*, 221. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118748>
- Weinberg, R., Coyte, R., Wang, Z., Das, D., & Vengosh, A. (2022). Water quality implications of the neutralization of acid mine drainage with coal fly ash from India and the United States. *Fuel*, 330. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125675>
- Wibowo, Y. G., Sudibyoy, Naswir, M., & Ramadan, B. S. (2022). Performance of a novel biochar-clamshell composite for real acid mine drainage treatment. *Bioresource Technology Reports*, 17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.100993>
- Xia, S., Song, Z., Zhao, X., & Li, J. (2023). Review of the recent advances in the prevention, treatment, and resource recovery of acid mine wastewater discharged in coal mines. *Journal of Water Process Engineering*, 52. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103555>