

ANALISIS KINERJA KARBON AKTIF TERHADAP ADSORPSI EMAS UNTUK MENENTUKAN KARBON AKTIF OPTIMUM PADA PROSES *CARBON IN LEACH*

Irfan Tegar Pratama¹, Imelda Hutabarat¹, Sabtanto Joko Suprpto¹, Sapri Jaya²

¹ Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung

² PT Meares Soputan Mining

Email: imelda.hutabarat@esdm.go.id

Naskah Diterima Juni 2026/Revisi: Juni 2026 /Disetujui: Juni 2026

ABSTRAK

Karbon aktif merupakan komponen kritis dalam proses *Carbon In Leach* (CIL) pengolahan emas; namun, perbedaan kualitas antar vendor dapat menurunkan efisiensi adsorpsi dan perolehan emas di PT Meares Soputan Mining (MSM). Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja 12 sampel karbon aktif dari berbagai vendor guna menentukan karbon yang paling optimal untuk digunakan pada proses CIL. Pengujian dilakukan dalam skala laboratorium menggunakan tiga parameter, yaitu *attrition test* untuk mengukur ketahanan fisik terhadap abrasi, analisis kinetika adsorpsi emas dengan model *Power Law* untuk memperoleh konstanta laju adsorpsi (k), serta *%Relative Activity* untuk mengukur efektivitas penyerapan emas dibandingkan karbon standar operasional. Data konsentrasi emas dianalisis menggunakan metode *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS). Hasil menunjukkan nilai *attrition* berkisar 1,70%–15,50%, konstanta k antara 111–423, dan *%Relative Activity* antara 49%–149%. Berdasarkan evaluasi keseluruhan menggunakan sistem matriks dan *scoring*, sampel c terpilih sebagai karbon aktif paling optimal karena memiliki keseimbangan terbaik antara ketahanan fisik (peringkat 3 *attrition test*) dan kemampuan adsorpsi emas yang tinggi (peringkat 2 pada Au kinetik dan *%Relative Activity*). Hasil penelitian ini memberikan dasar teknis yang kuat bagi PT MSM dalam pemilihan karbon aktif yang tepat guna meningkatkan efisiensi operasi dan optimasi *gold recovery* secara berkelanjutan.

Kata kunci: karbon aktif, adsorpsi emas, *Carbon In Leach*, *attrition test*, kinetika adsorpsi.

ABSTRACT

Activated carbon is a critical component in the *Carbon In Leach* (CIL) gold processing method; however, differences in quality among vendors can reduce adsorption efficiency and gold recovery at PT Meares Soputan Mining (MSM). This study aimed to evaluate the performance of 12 activated carbon samples from various vendors to determine the most optimal carbon for use in the CIL process. Laboratory-scale testing was conducted using three parameters: the *attrition test* to measure physical resistance to abrasion, gold adsorption kinetics analysis employing the *Power Law* model to obtain the adsorption rate constant (k), and *%Relative Activity* to assess gold adsorption effectiveness relative to the existing operational carbon standard. Gold concentration data were analyzed by *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS). Results showed *attrition* values ranging from 1.70% to 15.50%, k constants between 111 and 423, and *%Relative Activity* between 49% and 149%. Based on overall evaluation using a matrix and scoring system, sample c was identified as the most optimal activated carbon, delivering the best balance between physical durability (3rd in the *attrition test*) and high gold adsorption performance (2nd in both Au kinetics and *%Relative Activity*). These findings provide a strong technical basis for PT MSM in selecting the most suitable activated carbon to improve operational efficiency and sustain optimal gold recovery.

Keywords: activated carbon, gold adsorption, *Carbon In Leach*, *attrition test*, adsorption kinetics.

ANALISIS KINERJA KARBON AKTIF TERHADAP ADSORPSI EMAS UNTUK MENENTUKAN KARBON AKTIF OPTIMUM PADA PROSES *CARBON IN LEACH* DI PT MEARES SOPUTAN MINING

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan cadangan emas terbesar di dunia. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral tahun 2025, cadangan bijih emas primer nasional mencapai sekitar 3,46 miliar ton dengan kandungan logam emas lebih dari 3.400 ton, dan produksi emas nasional telah mencapai lebih dari 70 ton emas batangan per tahun (ANTARA News, 2025). Kondisi ini menempatkan sektor pertambangan emas sebagai salah satu pilar penting perekonomian nasional yang sekaligus menuntut penerapan teknologi pengolahan yang efisien dan berkelanjutan (Setiawan, 2022).

PT Meares Soputan Mining (MSM) merupakan salah satu perusahaan pertambangan emas yang beroperasi di Sulawesi Utara di bawah naungan PT Archi Indonesia Tbk. Perusahaan ini mengolah bijih emas melalui jalur hidrometalurgi dengan menerapkan proses *Carbon In Leach* (CIL) sebagai metode utama dalam tahapan pelindian dan adsorpsi emas. Pada proses CIL, pelindian emas menggunakan larutan sianida berlangsung secara simultan dengan proses adsorpsi ion kompleks emas oleh karbon aktif, sehingga efisiensi keseluruhan proses sangat bergantung pada kinerja karbon aktif yang digunakan (Wadnerkar et al., 2015).

Karbon aktif merupakan material karbon berpori yang memiliki luas permukaan sangat besar sehingga mampu menyerap berbagai senyawa dari fase cair melalui proses adsorpsi. Dalam proses CIL, ion kompleks emas dalam bentuk $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ diserap oleh karbon aktif melalui kombinasi mekanisme adsorpsi fisik, interaksi elektrostatis, dan *chemisorption* pada permukaan karbon (McDougall et al., 1980; Nicol et al., 1984). Karakteristik utama karbon aktif yang menentukan kemampuan adsorpsinya meliputi luas permukaan spesifik, volume pori, dan distribusi ukuran pori, yang diklasifikasikan menjadi mikropori (<2 nm), mesopori (2-50 nm), dan makropori (>50 nm) (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).

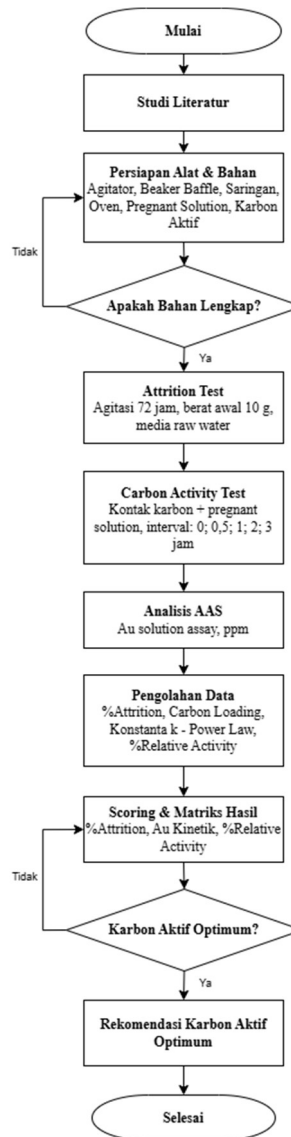
Kualitas karbon aktif dari berbagai vendor tidak selalu seragam. Perbedaan dalam hal kapasitas adsorpsi, kecepatan adsorpsi, maupun ketahanan fisik terhadap kondisi agitasi di dalam tangki *leaching* dapat menyebabkan variasi kinerja adsorpsi emas yang signifikan. Kondisi ini berpotensi menurunkan efisiensi proses, meningkatkan kehilangan logam berharga dalam larutan, serta berdampak pada stabilitas *recovery* emas di *plant* (Xia et al., 2022). Selain itu, fenomena *attrition* atau degradasi fisik karbon akibat gesekan mekanik selama proses operasi juga berpengaruh langsung terhadap kehilangan massa karbon aktif dan emas yang telah teradsorpsi (Gora & Andrews, 2023; Nyoni et al., 2022).

Larutan hasil pelindian disebut *pregnant solution* karena mengandung logam emas yang siap diproses lebih lanjut pada tahap adsorpsi menggunakan karbon aktif. Semakin tinggi konsentrasi emas terlarut dalam *pregnant solution*, maka semakin besar pula potensi *gold loading* pada karbon aktif (Martínez-Peñuñuri et al., 2023). Komposisi *pregnant solution* juga sangat mempengaruhi efisiensi adsorpsi emas karena kandungan logam terlarut, konsentrasi sianida, pH, oksigen terlarut, serta keberadaan ion pengotor dapat mempengaruhi mekanisme adsorpsi pada permukaan karbon aktif (Abdel-Aal et al., 2024).

Dalam praktik operasional, pemilihan karbon aktif di PT MSM melibatkan beberapa alternatif karbon dari vendor yang berbeda. Meskipun masing-masing karbon memenuhi spesifikasi dasar, performa aktual dalam proses CIL belum tentu menunjukkan hasil yang setara. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi teknis yang komprehensif untuk menilai kinerja karbon aktif secara objektif, tidak hanya berdasarkan spesifikasi vendor, tetapi juga berdasarkan hasil pengujian laboratorium yang terukur (Vargas et al., 2022). Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa evaluasi menggunakan parameter *attrition test*, kinetika adsorpsi dengan model *Power Law*, dan *%Relative Activity* merupakan pendekatan yang efektif untuk menentukan karbon aktif optimum pada sistem CIL (Le Roux et al., 1991; Martínez-Peñuñuri et al., 2023).

METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan di laboratorium PT Meares Soputan Mining (MSM), Kabupaten Minahasa Utara, Sulawesi Utara, selama ± 6 minggu pada tahap Praktik Kerja Industri. Penelitian menggunakan metode eksperimental skala laboratorium dengan pendekatan *batch test* untuk mengevaluasi kinerja 12 sampel karbon aktif dari berbagai vendor (kode a hingga l). Secara umum, alur penelitian mencakup dua tahapan pengujian utama yaitu *attrition test* dan *carbon activity test*, yang dilanjutkan dengan pengolahan dan analisis data. Diagram alir penelitian ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

ANALISIS KINERJA KARBON AKTIF TERHADAP ADSORPSI EMAS UNTUK MENENTUKAN KARBON AKTIF OPTIMUM PADA PROSES *CARBON IN LEACH* DI PT MEARES SOPUTAN MINING

Alat yang digunakan meliputi agitator, batang pengaduk, gelas beaker *baffle*, botol sampel, saringan, dan oven. Bahan yang digunakan terdiri dari *raw water* sebagai media pengujian *attrition test*, *pregnant solution* yang diperoleh dari *elution column* sebelum tahap *electrowinning* dengan konsentrasi emas awal 25-27 ppm, serta *fresh carbon* dari masing-masing vendor sebagai sampel uji.

Pengujian *attrition test* dilakukan selama 72 jam menggunakan *raw water* dengan berat awal sampel karbon sebesar 10 gram. Pengujian ini bertujuan untuk mensimulasikan degradasi fisik karbon aktif akibat agitasi mekanik dan tumbukan antarpartikel yang terjadi secara kontinu pada kondisi operasi CIL (B. Cevallos Toledo et al., 2020). Nilai persentase kehilangan massa (*%attrition*) dihitung berdasarkan selisih berat awal dan berat akhir karbon setelah pengujian. Semakin kecil nilai *%attrition*, semakin baik ketahanan fisik karbon aktif tersebut. Standar perusahaan menetapkan nilai *%attrition* yang dapat diterima adalah kurang dari 6%.

Pengujian *carbon activity test* dilakukan dengan mengontakkan karbon aktif dengan *pregnant solution* pada kondisi agitasi selama beberapa interval waktu yaitu 0; 0,5; 1; 2; dan 3 jam. Konsentrasi emas dalam larutan dianalisis pada setiap interval menggunakan metode *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) yang dilaksanakan di Laboratorium Intertek. Data konsentrasi emas (*Au solution assay*) yang diperoleh selanjutnya diolah menjadi nilai *carbon loading* (g/t) berdasarkan selisih konsentrasi emas awal dan akhir terhadap massa karbon. Analisis kinetika adsorpsi dilakukan menggunakan model *Power Law* yang dikembangkan oleh Nicol et al. (1984). Model ini mendeskripsikan laju adsorpsi emas pada karbon aktif melalui hubungan antara logaritma waktu dan logaritma rasio konsentrasi emas, dengan persamaan:

$$\log \left(\frac{[Au]_{ct}}{[Au]_{st}} \right) = n \log t + \log k \quad (\text{Pers. 1})$$

di mana $[Au]_{ct}$ adalah konsentrasi emas dalam larutan pada waktu t , $[Au]_{st}$ adalah konsentrasi kesetimbangan emas pada karbon, k adalah konstanta laju adsorpsi, dan n adalah eksponen waktu yang nilainya berkisar antara 0,5 hingga 1,0 bergantung pada kondisi *loading* karbon relatif terhadap kesetimbangannya. Konstanta k diperoleh dari nilai intersep hasil regresi linear grafik log-log, di mana standar operasional perusahaan menetapkan nilai k yang dapat diterima adalah lebih dari 270.

Parameter ketiga yang dievaluasi adalah *%Relative Activity* (%RA), yang merupakan perbandingan antara jumlah emas yang teradsorpsi oleh karbon aktif yang diuji terhadap karbon standar operasional, dinyatakan dalam satuan persen. Nilai %RA yang lebih tinggi menunjukkan kemampuan adsorpsi emas yang lebih baik. Standar perusahaan menetapkan nilai %RA yang dapat diterima adalah lebih dari 100%.

Seluruh hasil pengujian kemudian diintegrasikan dalam sistem *scoring* dan matriks evaluasi. Setiap parameter diberi peringkat berdasarkan nilai yang diperoleh, dan bobot nilai diakumulasikan untuk menghasilkan peringkat keseluruhan. Karbon aktif dengan total skor dan peringkat terbaik direkomendasikan sebagai karbon aktif optimum yang paling sesuai untuk diterapkan pada proses CIL di PT MSM

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Ketahanan Karbon Aktif Terhadap Abrasi (*Attrition Test*)

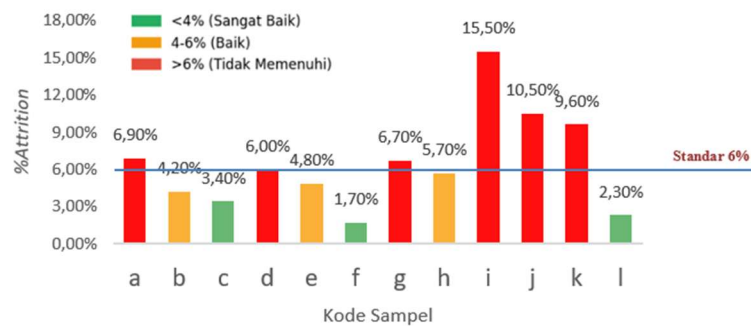
Pengujian *attrition test* dilakukan selama 72 jam dengan media *raw water* dan pengadukan kontinu untuk

mengevaluasi ketahanan fisik karbon aktif terhadap abrasi mekanik. Penggunaan air bertujuan menghilangkan pengaruh reaksi kimia sehingga kehilangan massa sepenuhnya akibat tumbukan dan gesekan antarpartikel (B. Cevallos Toledo et al., 2020). Hasil disajikan pada Tabel 1.

Table 1 Hasil Pengujian *Attrition Test*

Kode Sampel	Berat awal (gr)	Berat akhir (gr)	Berat Hilang	%Attrition
a	10	9,31	0,69	6,90%
b	10	9,58	0,42	4,20%
c	10	9,66	0,34	3,40%
d	10	9,40	0,6	6,00%
e	10	9,52	0,48	4,80%
f	10	9,83	0,17	1,70%
g	10	9,33	0,67	6,70%
h	10	9,43	0,57	5,70%
i	10	8,45	1,55	15,50%
j	10	8,95	1,05	10,50%
k	10	9,04	0,96	9,60%
l	10	9,77	0,23	2,30%

Berdasarkan Tabel 1, nilai %attrition bervariasi dari 1,70% (sampel f) hingga 15,50% (sampel i). Sampel f, l, dan c menunjukkan ketahanan fisik terbaik masing-masing 1,70%; 2,30%; dan 3,40%, di bawah batas 6% yang ditetapkan sebagai standar dari perusahaan. Sebaliknya, sampel i, j, dan k (15,50%; 10,50%; 9,60%) menunjukkan degradasi fisik yang tinggi akibat kelemahan struktur partikel karbon, berpotensi meningkatkan pembentukan *carbon fines* dan kehilangan emas teradsorpsi selama operasi CIL (Nyoni et al., 2022).

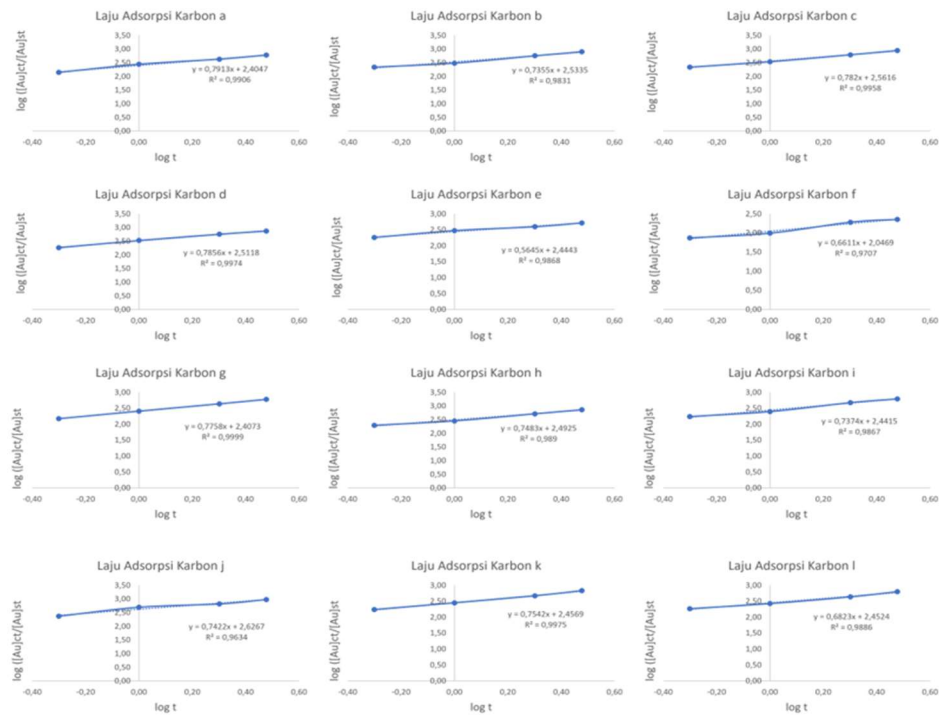


Gambar 2 Hasil Pengujian *Attrition Test*

2. Kinetika Adsorpsi Emas (Model *Power Law*)

Analisis kinetika adsorpsi emas menggunakan model *Power Law* (Nicol et al., 1984) yang menghubungkan log waktu kontak ($\log t$) dengan log rasio konsentrasi emas ($\log [Au]_{ct}/[Au]_{st}$) melalui persamaan regresi $y = n \log t + \log k$, dengan n sebagai eksponen waktu dan k sebagai konstanta laju adsorpsi. Model ini telah divalidasi untuk berbagai jenis karbon aktif pada kondisi laboratorium maupun skala pabrik. Grafik *Power Law* seluruh sampel disajikan pada Gambar 2.

ANALISIS KINERJA KARBON AKTIF TERHADAP ADSORPSI EMAS UNTUK MENENTUKAN KARBON AKTIF OPTIMUM PADA PROSES *CARBON IN LEACH* DI PT MEARES SOPUTAN MINING



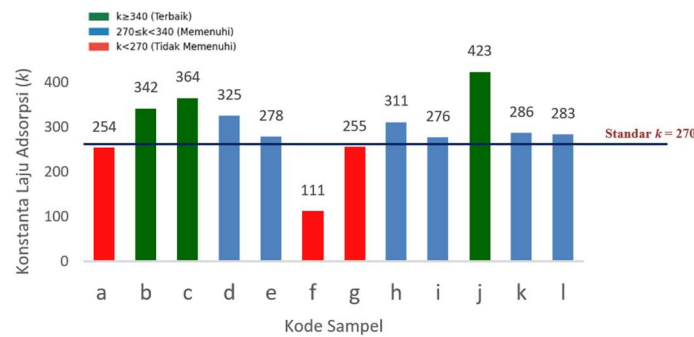
Gambar 3 Grafik Kinetika Adsorpsi Emas Model *Power Law* Karbon a-l

Seluruh dua belas sampel menghasilkan nilai R^2 antara 0,963 (karbon j) hingga 0,9999 (karbon g), membuktikan validitas model *Power Law*. Ringkasan parameter kinetika disajikan pada Tabel 2.

Table 2 Hasil Kinetika Adsorpsi Emas (*Power Law*)

Kode Sampel	Au Kinetik			
	Nilai n	Intercept	Nilai R ²	Nilai k
a	0,7913	2,405	0,991	254
b	0,7355	2,534	0,983	342
c	0,7820	2,562	0,996	364
d	0,7856	2,512	0,997	325
e	0,5645	2,444	0,987	278
f	0,6611	2,047	0,971	111
g	0,7758	2,407	0,9999	255
h	0,7483	2,493	0,989	311
i	0,7374	2,441	0,987	276
j	0,7422	2,627	0,963	423
k	0,7542	2,457	0,998	286
l	0,6823	2,452	0,989	283

Berdasarkan Tabel 2, sampel j memiliki nilai k tertinggi (423), diikuti c (364) dan b (342), mengindikasikan laju transfer massa yang paling efektif. Nilai k yang tinggi berkaitan dengan luas permukaan spesifik dan distribusi mikropori yang optimal (Xia et al., 2022). Sampel f memiliki k terendah (111), jauh di bawah standar yang ditetapkan perusahaan minimum yaitu $k > 270$, akibat keterbatasan aksesibilitas situs aktif dan difusi intrapartikel yang lambat.



Gambar 4 Nilai Konstanta Laju Adsorpsi

3. Analisis %Relative Activity (%RA)

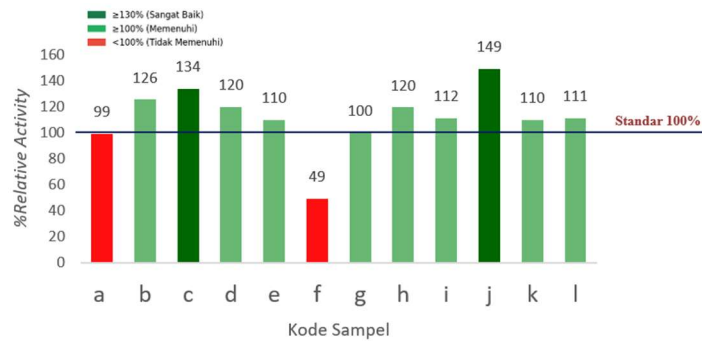
Parameter %Relative Activity mengevaluasi kemampuan adsorpsi setiap sampel relatif terhadap karbon *existing* (sampel g). Nilai %RA dihitung berdasarkan perbandingan Au adsorb sampel terhadap karbon *existing* dikalikan 100%. Standar perusahaan menetapkan %RA > 100%. Hasil disajikan pada Tabel 3.

Table 3 Hasil %Relative Activity

Kode Sampel	[Au] solution	[Au] adsorb	%relative activity
a	20,673	5,249	99
b	19,451	6,644	126
c	19,477	7,098	134
d	19,542	6,351	120
e	20,946	5,826	110
f	23,416	2,609	49
g	20,686	5,284	100
h	20,361	6,329	120
i	21,340	5,898	112
j	18,655	7,898	149
k	20,272	5,805	110
l	20,762	5,883	111

Sampel j menunjukkan %RA tertinggi (149%), diikuti c (134%) dan b (126%). Variasi ini mencerminkan perbedaan karakteristik karbon seperti luas permukaan, distribusi pori, dan sifat kimia permukaan yang berpengaruh pada adsorpsi ion aurosianida (Vargas et al., 2022). Sampel f hanya mencapai 49%, menunjukkan kemampuan adsorpsi kurang dari setengah karbon *existing*, sehingga tidak memenuhi standar operasional perusahaan.

ANALISIS KINERJA KARBON AKTIF TERHADAP ADSORPSI EMAS UNTUK MENENTUKAN KARBON AKTIF OPTIMUM PADA PROSES *CARBON IN LEACH* DI PT MEARES SOPUTAN MINING



Gambar 5 Nilai %Relative Activity

4. Matriks dan Penentuan Karbon Aktif Optimum

Evaluasi menyeluruh dilakukan dengan mengintegrasikan ketiga parameter pengujian ke dalam matriks. Standar perusahaan: (1) %attrition < 6%, (2) konstanta k > 270, dan (3) %Relative Activity > 100%. Hasil matriks disajikan pada Tabel 4.

Table 4 Matriks Hasil Keseluruhan

Kode Sampel	Teswork			Score
	Attrition	Au Kinetik	%relative activity	
	%	k	%	
a	6,90% (X)	254 (X)	99 (X)	
b	4,20% (✓)	342 (✓)	126 (✓)	✓
c	3,40% (✓)	364 (✓)	134 (✓)	✓
d	6,00% (X)	325 (✓)	120 (✓)	
e	4,80% (✓)	278 (✓)	110 (✓)	✓
f	1,70% (✓)	111 (X)	49 (X)	
g	6,70% (X)	255 (X)	100 (X)	
h	5,70% (✓)	311 (✓)	120 (✓)	✓
i	15,50% (X)	276 (✓)	112 (✓)	
j	10,50% (X)	423 (✓)	149 (✓)	
k	9,60% (X)	286 (✓)	110 (✓)	
l	2,30% (✓)	283 (✓)	111 (✓)	✓

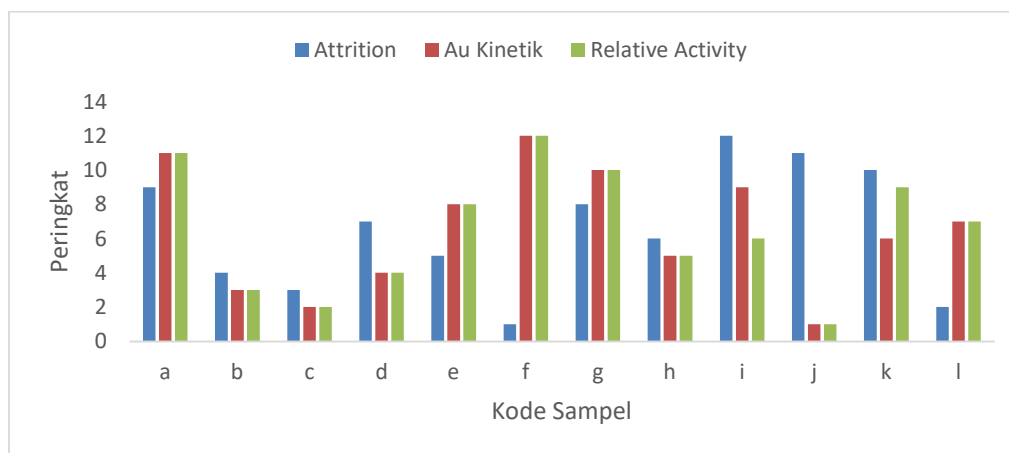
Dari dua belas sampel, hanya lima memenuhi ketiga standar: sampel b, c, e, h, dan l. Sampel j meskipun unggul pada adsorpsi ($k = 423$, %RA = 149%), namun gagal pada *attrition test* (%attrition = 10,50%). Sampel a dan g tidak memenuhi ketiga parameter.

Perangkingan menyeluruh berdasarkan ketiga parameter disajikan pada Tabel 5 dan Gambar 6.

Table 5 Hasil Perangkingan Karbon Aktif

Kode Sampel	Testwork			Total	Remark
	Attrition	Au Kinetik	Relative Activity		
	Ranking				
a	9	11	11	31	
b	4	3	3	10	Priority 2
c	3	2	2	7	Priority 1
d	7	4	4	15	
e	5	8	8	21	
f	1	12	12	25	X
g	8	10	10	28	
h	6	5	5	16	
i	12	9	6	27	
j	11	1	1	13	X
k	10	6	9	25	
l	2	7	7	16	Priority 3

Berdasarkan hasil perangkingan, tiga nilai total ranking terendah diperoleh oleh karbon aktif sampel c, b, dan j dengan nilai masing-masing 7, 10, dan 13. Namun, karbon aktif j tidak memenuhi standar perusahaan sehingga tidak direkomendasikan untuk digunakan. Oleh karena itu, dua karbon aktif terbaik yang direkomendasikan adalah sampel c dan b karena memiliki performa keseluruhan terbaik berdasarkan parameter yang diuji.



Gambar 6 Perbandingan Peringkat

Sampel c menempati Prioritas 1 karena keseimbangan terbaik: peringkat ke-3 pada *attrition* ($\%attrition = 3,40\%$), ke-2 pada Au kinetik ($k = 364$), dan ke-2 pada $\%RA$ (134%). Sampel b (Prioritas 2) konsisten di posisi 3-4 pada semua parameter, sedangkan sampel l (Prioritas 3) unggul pada ketahanan fisik (rank 2 *attrition*) dengan adsorpsi yang moderat. Sampel c direkomendasikan sebagai karbon aktif optimum untuk proses CIL di PT MSM karena memiliki kombinasi terbaik antara kekuatan fisik dan performa adsorpsi emas (Martínez-Peñuñuri et al., 2023)

ANALISIS KINERJA KARBON AKTIF TERHADAP ADSORPSI EMAS UNTUK MENENTUKAN KARBON AKTIF OPTIMUM PADA PROSES *CARBON IN LEACH* DI PT MEARES SOPUTAN MINING

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai analisis kinerja karbon aktif terhadap adsorpsi emas untuk menentukan karbon optimum pada proses CIL di PT MSM, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Hasil *attrition test* menunjukkan variasi ketahanan fisik yang signifikan antar sampel, dengan nilai %*attrition* berkisar antara 1,70% hingga 15,50%. Sampel f, l, dan c memiliki ketahanan fisik terbaik dengan nilai %*attrition* masing-masing 1,70%; 2,30%; dan 3,40%, yang memenuhi standar perusahaan (<6%). Sebaliknya, sampel i, j, dan k menunjukkan degradasi fisik tertinggi sehingga berpotensi meningkatkan kehilangan emas teradsorpsi selama operasi berlangsung.
- Berdasarkan analisis kinetika adsorpsi emas menggunakan model *Power Law*, konstanta laju adsorpsi (*k*) berkisar antara 111 hingga 423. Sampel j memiliki nilai *k* tertinggi (423), diikuti oleh sampel c (364) dan b (342), yang mengindikasikan laju transfer massa dan aksesibilitas situs aktif yang lebih baik. Sampel f memiliki nilai *k* terendah (111), berada di bawah ambang batas standar perusahaan (*k* > 270), sehingga tidak direkomendasikan untuk digunakan. Validitas model *Power Law* dikonfirmasi dengan nilai R^2 antara 0,963 hingga 0,9999 untuk seluruh sampel.
- Analisis %*Relative Activity* menunjukkan rentang nilai antara 49% hingga 149%. Sampel j mencatat %RA tertinggi (149%), diikuti sampel c (134%) dan b (126%), sementara sampel f hanya mencapai 49% dan tidak memenuhi standar operasional perusahaan (%RA > 100%).

Berdasarkan integrasi ketiga parameter dalam sistem matriks dan *scoring*, hanya lima sampel yang memenuhi seluruh standar perusahaan, yaitu sampel b, c, e, h, dan l. Sampel c terpilih sebagai karbon aktif paling optimum untuk proses CIL di PT MSM karena menunjukkan keseimbangan terbaik antara ketahanan fisik (peringkat ke-3 pada *attrition test*, %*attrition* = 3,40%) dan kemampuan adsorpsi emas yang tinggi (peringkat ke-2 pada Au kinetik dengan *k* = 364, dan peringkat ke-2 pada %RA sebesar 134%). Sampel b dan l menempati prioritas kedua dan ketiga. Hasil penelitian ini memberikan dasar teknis yang kuat bagi PT MSM dalam pemilihan karbon aktif yang tepat guna meningkatkan efisiensi adsorpsi dan optimasi gold recovery secara berkelanjutan

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Aal, E. A., Mohamed, A. M., & Hassan, R. K. (2024). Evaluation of Gold Adsorption on Activated Carbon from Real Cyanide and Thiourea Leachate Solutions. *Heliyon*, 10(11), e32152.
- ANTARA News. (2025). Bahlil sebut produksi emas Indonesia mencapai 70 ton per tahun. *ANTARA*. <https://www.antaranews.com/berita/4717621/bahlil-sebut-produksi-emas-indonesia-mencapai-70-ton-per-tahun>
- B. Cevallos Toledo, R., F. Aragón-Tobar, C., Gámez, S., & de la Torre, E. (2020). Reactivation Process of Activated Carbons: Effect on the Mechanical and Adsorptive Properties. *Molecules*, 25(7), 1681. <https://doi.org/10.3390/molecules25071681>
- Gora, S. L., & Andrews, S. A. (2023). How Activated Carbon Can Help You—Processes, Properties and Technological Applications. *Processes*, 11(4), 1042.
- Le Roux, J. O., Bryson, A. W., & Fleming, C. A. (1991). A Comparison of Several Kinetic Models for the Adsorption of Gold Cyanide onto Activated Carbon. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 91(3), 95–103. <https://www.saimm.org.za/Journal/v091n03p095.pdf>
- Marsh, H., & Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Activated Carbon* (1st Editio). Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/book/9780080444635/activated-carbon>
- Martínez-Peñuñuri, R., Parga-Torres, J. R., Valenzuela-García, J. L., Díaz-Galaviz, H. J., González-

- Zamarripa, G., & García-Alegria, A. M. (2023). Thermodynamic and Kinetic Aspects of Gold Adsorption in Micrometric Activated Carbon and the Impact of Their Loss in Adsorption, Desorption, and Reactivation Plants. *Materials*, 16(14). <https://doi.org/10.3390/ma16144961>
- McDougall, G. J., Hancock, R. D., Nicol, M. J., Wellington, O. L., & Copperthwaite, R. G. (1980). The Mechanism of the Adsorption of Gold Cyanide on Activated Carbon. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 80(9), 344–356. <https://researchportal.murdoch.edu.au/esploro/outputs/journalArticle/The-mechanism-of-the-adsorption-of/991005539988007891>
- Nicol, M. J., Fleming, C. A., & Cromberge, G. (1984). Absorption of Gold Cyanide Onto Activated Carbon: I. the Kinetics of Absorption From Pulps. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 84(2), 50–54.
- Nyoni, S., McConnachie, G. L., & Mupa, M. (2022). Attrition resistance, a sporadically studied factor in aqueous adsorption: Status quo and research outlook towards creating better adsorbents. *Particuology*, 77, 45–48. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S167420012200195X>
- Setiawan, A. (2022). MINERALS AND COAL RESERVES POTENTIAL IN INDONESIA AND THE WORLD. *INTAN Jurnal Penelitian Tambang*, 1(1), 20–31. <https://doi.org/10.56139/intan.v1i1.7>
- Vargas, C., Navarro, P., Mejía, E., & Hernández, P. (2022). Aurocyanide adsorption onto granular activated carbon impregnated with SDS anionic surfactant. *Gold Bulletin*, 55(2), 137–143. <https://doi.org/10.1007/s13404-022-00314-y>
- Wadnerkar, D., Tade, M. O., Pareek, V. K., & Utikar, R. P. (2015). Modeling and optimization of Carbon in leach (CIL) circuit for gold recovery. *Minerals Engineering*, 83, 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.09.001>
- Xia, J., Marthi, R., Twinney, J., & Ghahreman, A. (2022). A review on adsorption mechanism of gold cyanide complex onto activation carbon. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 111, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.04.014>