

Persebaran Logam Berat dalam Air Tanah di Sekitar Area Penimbunan Abu Batu Bara pada Lahan Bekas Tambang Kota Sawahlunto

Dedi Harian*, Shinta Indah, Ansiha Nur

Departemen Teknik Lingkungan, Universitas Andalas, Padang

*Koresponden email: dediharian15@gmail.com

Diterima: 15 April 2025

Disetujui: 26 April 2025

Abstract

Coal ash from the Sawahlunto City coal mine is used to backfill former mine land. This application poses a clear threat to groundwater quality. The objective of this study is clear: to analyze the concentration of heavy metals, including Ni and Cu, and their distribution in groundwater around the coal ash landfill area using response surface methodology in design of experiments. Groundwater samples were taken three times at four locations spaced 0 m, 365 m, 730 m, and 850 m by guiding SNI 6989.58.2008. Laboratory tests of metal concentrations refer to SNI 6989-84:2019. Water quality analysis showed Ni concentration exceeded drinking water quality standards with a measured concentration of 0.227 mg/L, while Cu parameters were still within safe limits with concentrations of 0.0002 mg/L and 0.02 mg/L. The metal distribution analysis definitively showed that coal ash landfilling in the former mining area contributed to groundwater pollution by Ni. The distribution pattern of Ni and Cu decreases with increasing distance. It is imperative that the FABA landfill area be located away from settlements that use groundwater to protect consumers. Further research is needed to determine the safe distance between the coal ash landfill site and groundwater sources.

Keywords: coal ash, distribution, groundwater, heavy metal, landfill

Abstrak

FABA berupa *fly ash* dan *bottom ash* (FABA) di Kota Sawahlunto dimanfaatkan untuk penimbunan kembali lahan bekas tambang batu bara. Aplikasi ini berpotensi menimbulkan pencemaran air tanah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis konsentrasi logam berat meliputi Ni dan Cu, serta persebarannya dalam air tanah di sekitar area penimbunan FABA menggunakan metode *response surface methodology in design of experiments*. Sampel air tanah diambil tiga kali pada empat lokasi yang berjarak 0 m, 365 m, 730 m, dan 850 m dengan mempedomani SNI 6989.58.2008. Uji laboratorium konsentrasi logam mengacu pada SNI 6989-84:2019. Analisis kualitas air menunjukkan bahwa konsentrasi logam Ni melebihi standar kualitas air minum dengan konsentrasi terukur 0,227 mg/L, sementara parameter Cu masih dalam batas aman dengan konsentrasi 0,0002 mg/L dan 0,02 mg/L. Analisis persebaran logam menunjukkan bahwa penimbunan FABA pada lahan bekas tambang berkontribusi terhadap pencemaran air tanah oleh logam Ni. Pola persebaran logam Ni dan Cu cenderung menurun seiring dengan pertambahan jarak. Untuk melindungi konsumen, area penimbunan FABA harus ditempatkan jauh dari permukiman yang menggunakan air tanah, dan penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menentukan jarak aman antara lokasi penimbunan FABA dan sumber air tanah.

Kata Kunci: FABA, air tanah, logam berat, persebaran, tambang

1. Pendahuluan

Batu bara merupakan sumber utama pemenuhan kebutuhan energi di dunia, dimana tahun 2021 berkontribusi terhadap lebih dari 36% konsumsi energi dunia [1], [2]. Sementara itu di Indonesia lebih dari 54,9% suplai energi nasional bersumber dari batu bara [3], [4]. Penggunaan batu bara ini berkonsekuensi terhadap timbunan abu sisa pembakaran baik berupa *fly ash* (FA) maupun *bottom ash* (BA) yang diperkirakan sebesar 5-20% dari konsumsi batu bara [5], [6]. Permasalahan pengelolaan FABA dengan volume besar ini juga menjadi lebih rumit mengingat karakteristik FABA yang mengandung logam berat antara lain Ni, dan Cu yang berpotensi menyebabkan pencemaran air tanah [7], [8], [9], [10].

Abu PLTU di Kota Sawahlunto dimanfaatkan sebagai material timbunan pada lubang tambang yang sekaligus sebagai lapisan pencegah terbentuknya air asam tambang batu bara. Meskipun memiliki dampak dampak positif sebagai penetralisir air asam tambang, namun aplikasi tersebut memiliki potensi pencemaran tanah, tumbuhan, dan air tanah akibat pelindian material logam beracun yang terkandung

dalam FABA [7], [10]. Logam berat FABA dengan karakteristik beracun ini dapat terlarut dalam air, sehingga mengakibatkan pencemaran lingkungan khususnya air tanah [11], [12]. Mengingat potensi risiko pencemaran air tanah tersebut, pengaruh unsur pencemar dari FABA terhadap air tanah dan pola persebrannya di sekitar lokasi kegiatan penimbunan perlu dilakukan pengkajian. Kajian ini sangat penting dilakukan mengingat masyarakat sekitar kegiatan masih menggunakan air tanah untuk keperluan domestik mengingat belum optimalnya penyediaan air minum yang aman bagi masyarakat [13], [14]. Parameter logam Ni dan Cu dijadikan indikator untuk menilai potensi pencemaran air tanah di sekitar lokasi kegiatan penimbunan FABA ini [7], [8], [9], [10].

Temuan penelitian ini diharapkan bisa bermanfaat sebagai bahan penyusunan perencanaan kebijakan perlindungan konsumen air tanah, dan pengelolaan FABA yang lebih aman bagi lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penimbunan FABA pada lahan bekas tambang terhadap konsentrasi dan persebaran logam Ni dan Cu air tanah menggunakan *response surface methodology in design of experiments*.

2. Metode Penelitian

Air tanah di sekitar lokasi penimbunan FABA pada lahan bekas tambang diambil sebanyak 3 titik yang mewakili:

- 1) 1 titik di daerah hulu pada sumur pantau Perusahaan (SP 1);
- 2) 1 titik di daerah hilir pada sumur pantau Perusahaan (SP 2); dan
- 3) 1 titik pada sumur masyarakat terdekat (SP 3).

Selain 3 titik tersebut di atas, kualitas air sumur masyarakat lainnya titik 4 (SP 4) juga diambil datanya untuk validasi model persebaran. Lokasi titik sampling dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Foto Citra Satelit Lokasi Penelitian (Sumber: Google Earth, 2024)

Frekuensi pengambilan sampel air tanah adalah sebanyak 3 kali dengan jarak waktu pengambilan 3 minggu dari pelaksanaan pengambilan sebelumnya. Waktu pengambilan sampel berlangsung pada Minggu IV April – Minggu II Juni 2024. Pedoman pengambilan sampel air tanah merujuk kepada SNI 6989.5:2008 Air dan Air Limbah - Bagian 58: Metoda Pengambilan Contoh Air Tanah. Data lapangan parameter lingkungan yang diambil antara lain berupa pH menggunakan pH meter, kedalaman sumur dan kedalaman muka air tanah menggunakan meteran. Parameter Ni dan Cu dianalisis di Laboratorium Sentral Universitas Andalas. Waktu perjalanan sampel ke laboratorium kurang dari 24 jam, sehingga perlakuan pengawetan dengan pendingin suhu < 6°C dalam *cooler box* dilengkapi *ice gel pack*. Pelaksanaan analisis laboratorium mengikuti SNI 6989-84:2019 Air dan air limbah - Bagian 84: Cara uji kadar logam terlarut dan logam total secara Spektrometer Serapan Atom (SSA)-Nyala.

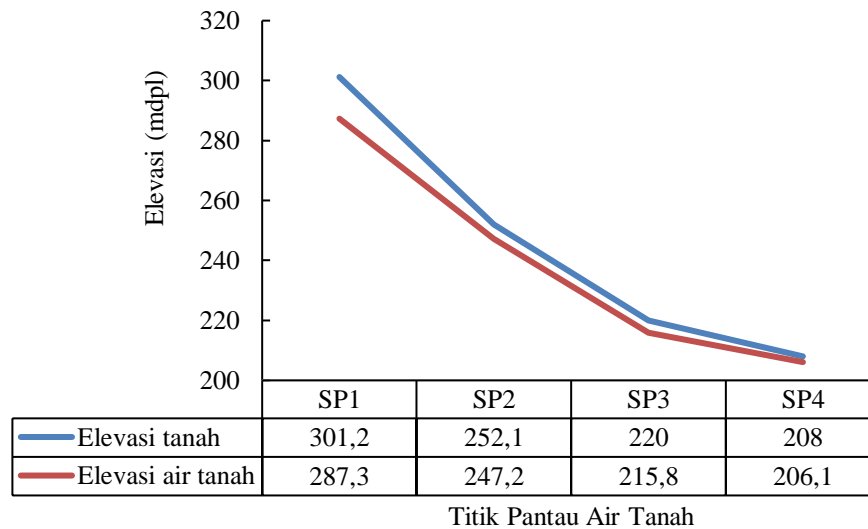
Data konsentrasi Ni dan Cu air tanah berdasarkan hasil uji laboratorium diolah dan dibandingkan dengan standar kualitas air minum. Untuk melihat pengaruh kegiatan penimbunan FABA pada lahan bekas

tambang terhadap konsentrasi Ni dan Cu air tanah digunakan uji ANOVA. Pola persebaran logam Ni dan Cu dianalisis menggunakan *software Statistical Analysis System (SAS)* dengan menu *Response surface methodology in design of eexperiment (RSM in DOE)*. Input data dari *RSM in DOE* ini adalah data jarak lokasi titik pantau dengan lokasi pemanfaatan FABA, data waktu pemantauan yang berjarak 3 minggu dari pengambilan sampel sebelumnya, serta data nilai konsentrasi Ni dan Cu terukur pada masing-masing titik sebanyak 3 kali pemantauan. Luaran yang diperoleh dari proses ini adalah nilai prediksi persebaran konsentrasi polutan logam berat di sekitar lokasi kajian.

3. Hasil dan Pebahasan

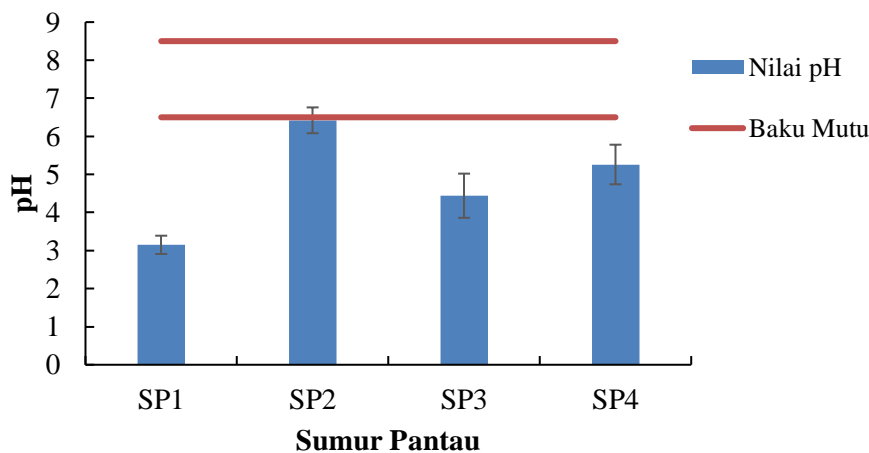
Data lapangan

Data lapangan menunjukkan bahwa muka air tanah pada sumur pantau yang paling dalam berada di SP1 yaitunya 13,9 m, dan muka air tanah ini terus menurun ke arah hilir dimana pada SP4 kedalaman air tanahnya cukup dangkal yaitunya 1,9 m. Profil hidrolis hubungan elevasi permukaan tanah dengan muka air tanah lokasi sampling dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Profil Hidrolis Hubungan Elevasi Permukaan Tanah dengan Muka Air Tanah

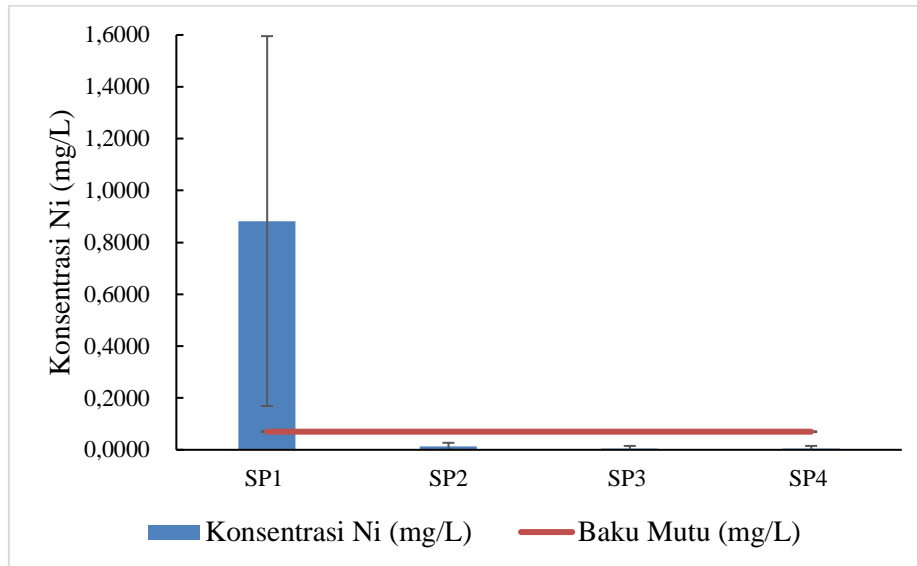
Air tanah di lokasi kajian memiliki pH yang asam, pH terendah berada di SP1 yang berkisar antara 2,94-3,41, dan pH tertinggi berada di SP2 dengan rentang pH 6,05-6,71. Kondisi pH yang rendah ini diperkirakan merupakan dampak dari kegiatan tambang batu bara yang menghasilkan air asam tambang. Batuan di sekitar wilayah kajian diperkirakan merupakan material *Potentially Acid Forming (PAF)* yang berasal dari aktivitas penambangan batu bara. Data pH lokasi kajian dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3. pH Air Tanah Wilayah Kajian

Konsentrasi logam berat dalam air tanah

Konsentrasi logam Ni pada lokasi penelitian serta pemenuhan baku mutu masing-masing titik sampling dapat dilihat pada **Gambar 4**. Rata-rata konsentrasi logam Ni pada 4 sumur pantau ini adalah 0,227 mg/L, dimana konsentrasi Ni tertinggi berada di SP1, dan konsentrasi terendah berada di SP3 dan SP4 dengan nilai konsentrasi Ni yang sama sebesar 0,005 mg/L. Standar kualitas air minum berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 adalah 0,7 mg/L. Angka konsentrasi logam Ni yang melebihi baku mutu ini sejalan dengan temuan penelitian lain di sekitar PLTU Udupi Karnataka India dengan nilai konsentrasi maksimal terpantau pada 22 titik sebesar 1,6 mg/L [15].

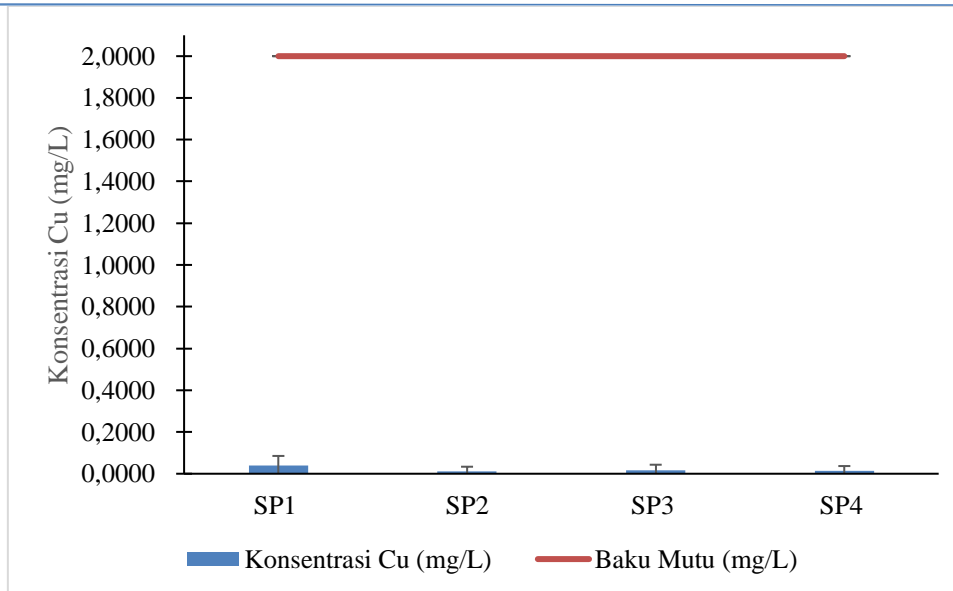


Gambar 4. Konsentrasi Ni Air Tanah Sumur Pantau

Tingginya konsentrasi logam Ni di SP1 diperkirakan karena sumur pantau masih berada di dalam area penimbunan FABA pada lahan bekas tambang. Sementara untuk titik pantau SP2, SP3, dan SP4 konsentrasinya masih berada di bawah baku mutu. SP2 berada pada jarak 365 m dari lokasi penimbunan FABA, dan lokasi ini memiliki tutupan lahan berupa kebun karet dan bentang alamnya tidak terganggu aktivitas penambangan. Sementara SP3 dan SP4 merupakan Kawasan permukiman yang berjarak masing-masing 730 m dan 850 m dari lokasi penimbunan FABA. Perbedaan konsentrasi yang sangat jauh antara SP1 dengan SP2, SP3, dan SP4 diperkirakan karena kondisi akuifer yang dilewati sepanjang aliran air tanah ke hilir masih mampu menyerap kandungan Ni air tanah. Ketika air tanah yang terkontaminasi logam berat tersebut mengalir dalam tanah akan terjadi adsorpsi, dimana fase padat lingkungan melemahkan kontaminan sehingga konsentrasi polutan akan berkurang di hilir [16].

Kondisi pH SP1 yang lebih asam sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 3** juga mendukung pelarutan logam Ni pada lokasi lahan bekas tambang tersebut. pH titik pantau SP2, SP3, dan SP4 lebih netral dibandingkan dengan SP1. Pelindian logam berat dari lokasi penimbunan FABA dipengaruhi oleh pH dan kandungan logam berat dalam FABA tersebut, dimana pelepasan logam berat meningkat seiring dengan menurunnya pH [17]. Walaupun konsentrasi logam Ni hanya melebihi baku mutu pada SP1, namun untuk jangka panjang logam ini juga perlu mendapatkan perhatian yang serius di sekitar lokasi penimbunan FABA karena toksisitas dari logam tersebut yang sangat berbahaya. Paparan logam Ni dalam jangka panjang dapat menyebabkan kerusakan hati dan ginjal [18]. Nikel dianggap sebagai logam penting namun beracun dalam jumlah besar bagi kesehatan [17].

Untuk logam Cu dalam air tanah ditemukan konsentrasi yang masih memenuhi standar untuk kualitas air minum dengan rata-rata konsentrasi sebesar 0,02 mg/L, sedangkan baku mutu Cu dalam Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 adalah 2 mg/L. Untuk lebih jelasnya konsentrasi logam Cu di lokasi penelitian dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Konsentrasi Cu Air Tanah Sumur Pantau

Pola yang sama dengan logam Ni, konsentrasi Cu tertinggi berada pada SP1 di lokasi terdekat dengan penimbunan FABA, sementara SP2, SP3, dan SP4 yang berada di luar lokasi kegiatan penimbunan FABA memiliki konsentrasi Cu air tanah yang lebih rendah. Kondisi konsentrasi logam Cu pada air tanah di 4 sumur pantau ini diperkirakan juga dipengaruhi karakteristik FABA sendiri yang juga mampu mengikat logam Cu, sehingga unsur Cu tersebut tidak terlepas ke media air tanah. Lekgoba dkk (2021) menyatakan bahwa *fly ash* merupakan adsorben yang efektif dalam pemisahan selektif tembaga dari campuran biner [19]. Papandreou dkk (2007) juga menyatakan bahwa *fly ash* yang dibentuk menjadi pelet dapat dianggap sebagai adsorben potensial untuk menghilangkan tembaga dari air limbah [20].

Analisis persebaran logam berat air tanah di sekitar lokasi penimbunan FABA

Untuk menilai pengaruh penimbunan FABA terhadap air tanah pada lokasi kajian dilakukan uji ANOVA dengan hasil sebagaimana **Tabel 1**. Semakin besar nilai F dan semakin kecil nilai p (probabilitas), maka semakin signifikan suku koefisien yang bersangkutan [21], [22], [23]. Hasil perhitungan p-value lebih rendah dari 0,05 menunjukkan bahwa faktor signifikan secara statistik [24], [25].

Tabel 1. Uji ANOVA Konsentrasi Logam Berat Terhadap Jarak dan Waktu

Logam	Faktor	DF	SS	MS	F	p-value
Ni	jarak	1	1.152729	1.152729	17.81431	0.0039*
	waktu	1	0.190246	0.190246	2.940075	0.1301
	jarak x jarak	1	0.341739	0.341739	5.281249	0.0551
	jarak x waktu	1	0.283556	0.283556	4.382088	0.0746
	waktu x waktu	1	0.091694	0.091694	1.417039	0.2727
Cu	jarak	1	0.000923	0.000923	17.13902	0.0043*
	waktu	1	0.004971	0.004971	92.3474	<.0001*
	jarak x jarak	1	0.000718	0.000718	13.33421	0.0082*
	jarak x waktu	1	0.00042	0.00042	7.807266	0.0267*
	waktu x waktu	1	0.000882	0.000882	16.38636	0.0049*

Catatan: Taraf nyata 0,05

* Signifikan.

Tabel 1 menunjukkan bahwa variabel jarak dengan *p-value* 0,0039 merupakan variabel yang signifikan terhadap konsentrasi Ni terukur, sedangkan variabel waktu pengambilan sampel dengan *p-value* = 0,1301 tidak signifikan terhadap konsentrasi Ni terlarut. Meskipun konsentrasi logam Cu masih berada dalam rentang yang memenuhi baku mutu, uji statistik menunjukkan variabel jarak dan waktu memiliki signifikansi terhadap konsentrasi Cu terlarut, dimana jarak *p-value* 0,0043 dan waktu dengan *p-value* < 0,0001.

Temuan penelitian ini mirip dengan penelitian, seperti Choi dkk (2002) dalam penelitiannya menyatakan bahwa sampel air tanah di dekat lokasi penimbunan *fly ash* memiliki pola konsentrasi yang mirip dengan sampel lumpur *fly ash*, hal ini menunjukkan bahwa kebocoran lindi FABA mempengaruhi

kualitas air tanah [26]. Praktek penimbunan FABA dengan sistem pelapisan yang buruk memiliki potensi kebocoran air lindi [27]. Penelitian di sekitar lokasi penimbunan FABA di Parichha Thermal Power Plant (Jhansi), juga memperoleh konsentrasi logam Ni air tanah di lokasi penimbunan FABA lebih tinggi dibandingkan lokasi pengambilan sampel dengan jarak yang lebih jauh [28]. Kualitas air tanah tercemar pada tingkat yang mengkhawatirkan akibat aktivitas antropogenik seperti praktek pembuangan limbah yang tidak tepat [29]. Pembuangan fly ash di kolam abu yang tidak dilapisi dapat mengkontaminasi air tanah dengan logam berat akibat pergerakan ke bawah dari lindi yang dihasilkan di kolam abu [28], [30].

Persebaran logam berat di sekitar area penimbunan FABA pada lahan bekas tambang Kota Sawahlunto dimodelkan dengan menggunakan *tools response surface methodology in design of experiments (RSM in DoE)* yang tersedia pada perangkat lunak SAS. Persamaan polinomial orde kedua digunakan dalam rangka memperkirakan konsentrasi logam Ni dan Cu dalam air tanah berdasarkan *RSM in DoE*. Pengolahan data menggunakan *RSM in DoE* melihat hubungan empiris antara C (Konsentrasi logam berat, mg/L) dengan variable bebas Jarak (m), dan waktu (hari). Hasil dan model empiris dari berbagai desain eksperimen *central composite design (CCD)* memberi kita arahan untuk berpikir logis dan melakukan analisis multivariable [31]. Model prediktif yang dihasilkan untuk masing-masing logam berat adalah:

$$C_{Ni} = 0,65535 - 0,001201X \dots \dots \dots (1)$$

$$C_{Cu} = 0,08559 - 0,00015X - 0,003561Y + 1,21 \times 10^{-7}X^2 + 1,337 \times 10^{-6}XY + 0,000041Y^2 \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan: C_{Ni} = Prediksi Konsentrasi Ni (mg/L)
 C_{Cu} = Prediksi Konsentrasi Cu (mg/L)
 X = Jarak dari lokasi pemanfaatan FABA (m)
 Y = Waktu Pengambilan Sampel (Hari ke n)

Persamaan di atas menggambarkan hubungan empiris antara variabel jarak dan waktu terhadap respon berupa konsentrasi masing-masing logam berat yang dipantau. Model telah divalidasi dengan uji ANOVA. Analisis statistik menunjukkan bahwa model tersebut mewakili fenomena dengan cukup baik dan variasi respon berhubungan erat dengan variasi faktor. Keakuratan model yang diusulkan diidentifikasi dengan *p-value*. Sifat fit model polinomial diwakili oleh koefisien determinasi R^2 seperti terlihat pada **Tabel 2**. Nilai R^2 menjamin ukuran bagaimana variabilitas dalam nilai respon yang diamati dapat diklarifikasi oleh faktor-faktor eksperimental dan interaksinya [32]. Nilai Predicted R^2 menunjukkan bahwa model untuk Ni dan Cu sudah dirancang dengan baik, mengingat koefisien determinasi (R^2) > 80%. Selain itu, nilai *Predicted R^2* cukup sesuai dengan nilai *Adjusted R^2* dengan nilai > 70%.

Tabel 2. Statistik kesesuaian model prediksi persebaran logam berat

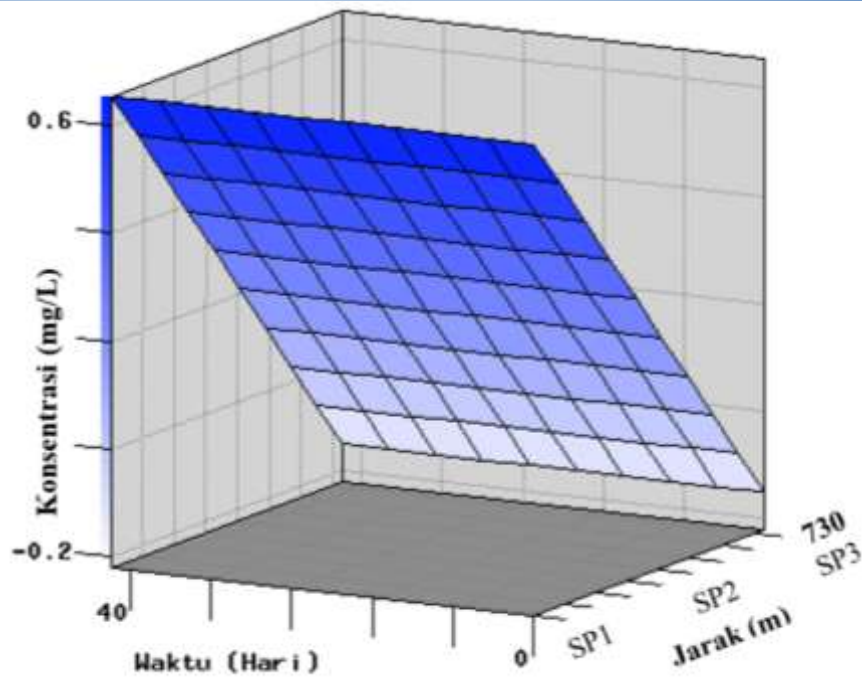
Model Prediksi (C)	<i>Predicted R^2</i> (%)	<i>Adjusted R^2</i> (%)
C_{Ni}	83,49	71,70
C_{Cu}	95,94	93,03

ANOVA menunjukkan bahwa persamaan dan hubungan sebenarnya antara respon dan variabel signifikan yang diwakili oleh persamaan tersebut sudah memadai. Uji ANOVA terhadap hasil yang diperoleh pada model prediktif dapat dilihat pada **Tabel 3**. Model prediksi konsentrasi logam berat yang diberikan dapat diterima secara statistik, dimana *p-value* berada di bawah taraf nyata 0,05. Nilai *p-value* lebih rendah dari 0,05 menunjukkan bahwa model dan ketentuan model signifikan secara statistik [24], [25].

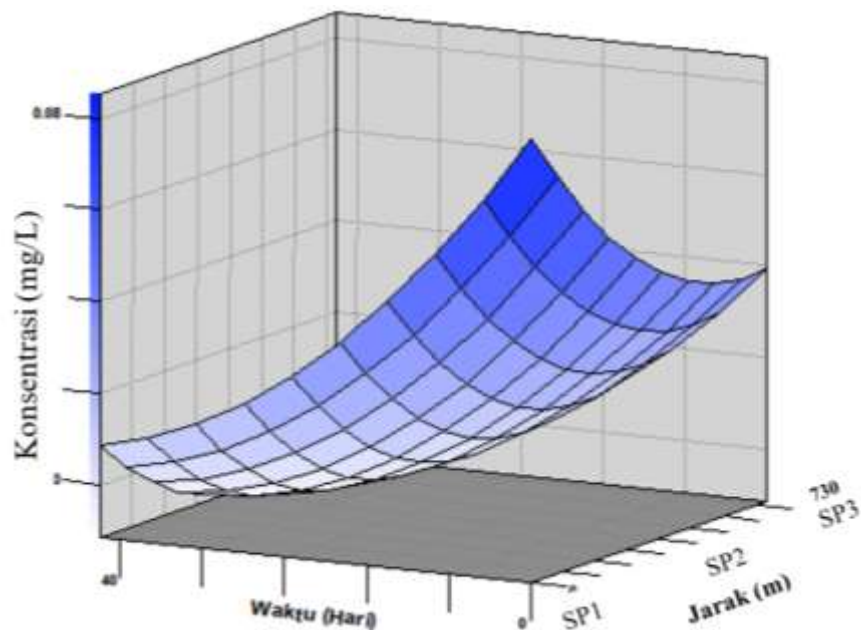
Tabel 3. Statistik *p-value* model prediksi persebaran logam berat

Logam	Faktor	<i>p-value Master Model</i>	<i>p-value Prediktif Model</i>
Ni	Jarak	0,0039	0,0166
	Jarak	0,0043	0,0043
	Waktu	<0,0001	<0,0001
Cu	Jarak x Waktu	0,0082	0,0082
	Jarak x Waktu	0,0267	0,0267
	Waktu x Waktu	0,0049	0,0049

Prediksi konsentrasi logam Ni dan Cu terlarut dalam air tanah berdasarkan pemodelan sesuai dengan rumus yang diberikan pada persamaan (1) dan (2) ditampilkan sebagaimana **Gambar 6** dan **Gambar 7**.



Gambar 6. Surface plot konsentrasi logam Ni



Gambar 7. Surface plot konsnetrasi logam Cu

Hasil pemodelan konsentrasi Ni menggambarkan bahwa kondisi pencemaran tertinggi berada pada lokasi penimbunan FABAs pada areal bekas tambang. Hal ini diperkirakan juga merupakan pengaruh dari kondisi pH disekitar SP1 yang lebih rendah dibandingkan dengan SP lainnya. Lebih dari 10 % Ni dalam FABAs dapat larut dalam kondisi asam, dan menurun tajam dengan meningkatnya pH [33]. Konsentrasi logam Ni tersebut menurun sejalan dengan pertambahan jarak dimana aliran air tanah ke arah Selatan menuju Sungai Batang Ombilin. Pada lokasi permukiman masyarakat yang berjarak 730 m konsentrasi logam Ni terlarut sudah tidak terdeteksi, dimana **Gambar 6** juga menunjukkan konsentrasi logam Ni terlarut sudah mulai hilang pada jarak ± 550 m.

Hal ini diperkirakan terjadi karena adanya proses pengenceran konsentrasi sepanjang aliran air tanah. Penurunan konsentrasi dengan pertambahan jarak ini diperkirakan terjadi akibat interaksi polutan dengan mineral pembentuk batuan, pembentukan mineral baru, dan pengenceran dengan air tanah [34]. Kecepatan proses pembersihan polutan tersebut bergantung pada komposisi mineralogi batuan dan intensitas pertukaran air [34].

Gambar 5 menunjukkan bahwa secara konsentrasi logam Cu terlarut dalam air tanah masih memenuhi baku mutu air minum nasional, namun hasil pemantauan juga menunjukkan terdapat korelasi positif antara penimbunan FABA terhadap konsentrasi Cu terlarut dalam air tanah. **Gambar 7** menunjukkan bahwa konsentrasi Cu tertinggi berada di lokasi penimbunan FABA, dan konsentrasi Cu tersebut menurun sejalan dengan pertambahan jarak dan waktu. Hasil pemodelan menunjukkan pada jarak 365 m (SP2) dari lokasi penimbunan FABA nilai konsentrasi Cu dalam air tanah sudah tidak terdeteksi, dan hal ini diperkirakan terjadi penyisihan konsentrasi Cu tersebut sepanjang aliran air tanah akibat adanya kontak dengan material batuan yang ada di dalam tanah. Kondisi lapangan SP 2 merupakan areal buffer zone yang bentang alamnya tidak terganggu kegiatan pertambangan dengan tutupan lahan berupa kebun campuran dimana sebagian besar tegakan merupakan tanaman karet.

Selanjutnya logam Cu ini berdasarkan hasil pemantauan sedikit mengalami kenaikan kembali pada SP 3 (jarak 730 m) pada daerah permukiman terdekat dari lokasi penimbunan FABA. Kenaikan konsentrasi Cu pada SP3 ini ditengarai merupakan pengaruh dari kegiatan lain di luar aktivitas penimbunan FABA. Rizwan dkk (2021) dalam penelitiannya menemukan konsentrasi Cu air tanah berkisar antara 0,02 hingga 1,01 mg/L yang sumber kontaminannya diperkirakan berasal dari limbah industri dan domestik [35].

4. Kesimpulan

Pemanfaatan FABA sebagai lapisan penudung pada reklamasi tambang di Kota Sawahlunto berdampak negatif terhadap kualitas air tanah dengan parameter pencemar logam Ni. Konsentrasi Ni dan Cu air tanah di lokasi kajian memiliki korelasi yang signifikan dengan jarak yang mengindikasikan bahwa adanya logam berat dari material FABA yang larut dalam air tanah. Pemanfaatan FABA sebagai material penimbunan kembali lubang tambang batu bara sebaiknya dilakukan pada lokasi yang jauh dari area permukiman masyarakat yang masih memerlukan air tanah sebagai sumber air kebutuhan domestik. Penghasil limbah FABA bersama pemanfaat harus memastikan jarak aman lokasi penimbunan dengan sumber air tanah melalui kajian yang komprehensif. Masyarakat sekitar lokasi kegiatan penimbunan FABA yang memanfaatkan air tanah harus diupayakan memiliki sumber air lainnya yang aman bagi kesehatan. Pemerintah perlu mempertimbangkan untuk segera menyediakan alternatif sumber air lainnya yang keamanannya terjamin dan memenuhi standar kualitas air minum.

5. Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada rekan-rekan seperjuangan dan Dosen di Magister Teknik Lingkungan Universitas Andalas serta rekan kerja di Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Sumatera Barat yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan penelitian ini.

6. Daftar Singkatan

FABA	: Fly ash and bottom ash
%	: Percentage
Ni	: Nikel
Cu	: Tembaga

7. Daftar Pustaka

- [1] A. H. Ahmad, P. S. Darmanto, H. Hariana, A. Darmawan, M. Aziz, and F. B. Juangsa, "Numerical investigation of coal-sawdust co-firing in a Carolina-type boiler: Power derating and emission analysis," *Appl Therm Eng*, vol. 266, p. 125681, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125681>.
- [2] A. Alhassan, I. Ozturk, M. F. AL-Zyoud, and F. V. Bekun, "Coal consumption-environmental sustainability nexus in developed and developing major coal-consuming economies," *Heliyon*, vol. 10, no. 4, p. e25619, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25619>.
- [3] I. D. Apriliyanti and D. B. Nugraha, "Burning coal in a cleaner way: Institutional fragmentation, power dynamics, and business influence in Indonesia's biomass co-firing imaginaries," *Energy Res Soc Sci*, vol. 121, p. 103949, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.103949>.
- [4] T. Wijayanto, D. F. Hakam, and P. N. Kemala, "Vision for Indonesia's 2050 power generation: Scenarios of hydrogen integration, nuclear energy prospects, and coal phase-out impact," *Sustainable Futures*, vol. 9, p. 100438, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100438>.
- [5] T. Prasetyawan, "Kontroversi penghapusan FABA dari daftar limbah B3," *Pusat Penelitian Badan Keahlian DPR RI*, vol. Vol. XIII, pp. 1–6, Apr. 2021, Accessed: Sep. 06, 2023. [Online]. Available:

- http://berkas.dpr.go.id/puslit/files/info_singkat/Info%20Singkat-XIII-7-I-P3DI-April-2021-223.pdf
- [6] M. A. Rais, D. T. Suryaningtyas, D. P. T. Baskoro, and F. Hazra, "Utilization of fly ash - Bottom ash, compost and arbuscular mycorrhizal fungi on growth of crops," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021. doi: 10.1088/1755-1315/756/1/012065.
- [7] A. S. Boche, S. J. Dhoble, S. S. Gupte, C. M. Dudhe, and R. M. Belekar, "Fly ash-induced groundwater contamination and magnetic nanoparticles as an innovative adsorbent for remediation: A critical review," *Hybrid Advances*, vol. 10, 2025, doi: 10.1016/j.hybadv.2025.100461.
- [8] A. Munyengabe, L. S. Kamogelo, T. Y.-A. Ngmenzuma, and M. F. Banda, "The Potential of *Helichrysum splendendum* (Thunb.) Less. for the Restoration of Sites Polluted with Coal Fly Ash," *Plants*, vol. 13, no. 18, 2024, doi: 10.3390/plants13182551.
- [9] X. Deng *et al.*, "Evaluation of the migration and environmental effects of metal elements within cementitious gangue-fly ash backfill in underground coal mines," *Int J Min Sci Technol*, vol. 34, no. 11, pp. 1551–1562, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2024.11.002>.
- [10] S. Xu, Y. Zhang, J. Guo, A. Wu, X. Xiang, and H. Sun, "Experimental and modeled analysis of contaminant mobility in coal fly ash landfills under continuous rainfall regimes," *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-86591-x.
- [11] A. B. K. Majlis *et al.*, "Intrinsic characteristics of coal combustion residues and their environmental impacts: A case study for Bangladesh," *Fuel*, vol. 324, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.124711.
- [12] Z. Zhang *et al.*, "Ecological Risk Assessment and Influencing Factors of Heavy-Metal Leaching From Coal-Based Solid Waste Fly Ash," *Front Chem*, vol. 10, 2022, doi: 10.3389/fchem.2022.932133.
- [13] R. Eryanto, F. Herista, M. Teknik, S. Um, S. Barat, and D. P. Skripsi, "Analisis kebutuhan air bersih Kota Sawahlunto," *Ensiklopedia Research and Community Service Review*, vol. 1, no. 1, 2021, [Online]. Available: <http://jurnal.ensiklopediaku.org>
- [14] S. Sutomo, S. Sagala, B. Sutomo, S. Wrinarti, and G. Sanjaya, "Accelerating the provision of safe water supply in urban and rural areas of Indonesia," *Kesmas*, vol. 16, no. 3, pp. 137–144, 2021, doi: 10.21109/kesmas.v16i3.5225.
- [15] N. Shetty, J. K. Shetty, D. M. Chadaga, and D. U. Shankara H N, "Trace Analysis of Heavy Metals in Ground Water and Soil near Coal Based Thermal Power Plant Udupi Karnataka," *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, vol. 23, no. 2, Feb. 2021, doi: 10.51201/jusst12608.
- [16] O. Al-Hashimi *et al.*, "A comprehensive review for groundwater contamination and remediation: Occurrence, migration and adsorption modelling," Oct. 01, 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/molecules26195913.
- [17] C. Verma, S. Madan, and A. Hussain, "Heavy metal contamination of groundwater due to fly ash disposal of coal-fired thermal power plant, Parichha, Jhansi, India," *Cogent Eng*, vol. 3, no. 1, 2016, doi: 10.1080/23311916.2016.1179243.
- [18] L. Evans, P. Harrison, J. Lawrence, J. Casell, D. Thiemann, and J. Kim, "Coal Ash Primer," 2023.
- [19] T. Lekgoba, F. Ntuli, and T. Falayi, "Application of coal fly ash for treatment of wastewater containing a binary mixture of copper and nickel," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 40, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101822.
- [20] A. Papandreou, C. J. Stournaras, and D. P. Panias, "Copper and cadmium adsorption on pellets made from fired coal fly ash," *J Hazard Mater*, vol. 148, no. 3, pp. 538–547, Sep. 2007, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.03.020.
- [21] A. Haggerty, E. Silva, T. Anderson, D. Bell, C. Mason, and K. S. Denholm, "Identifying critical control points for colostrum contamination in first milking colostrum from Scottish dairy herds," *Prev Vet Med*, vol. 239, p. 106514, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2025.106514>.
- [22] S. Mukhopadhyay, R. Dutta, and P. Das, "Process optimization of microwave-assisted extraction (MAE) of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from leaves of *Murraya paniculata* (L.) Jack: Process intensification approach," *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 212, p. 110284, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2025.110284>.
- [23] Z. Khoshraftar, "Modeling of CO₂ solubility and partial pressure in blended diisopropanolamine and 2-amino-2-methylpropanol solutions via response surface methodology and artificial neural network," *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, p. 1800, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-86144-2.

- [24] A. Fakhri, "Application of response surface methodology to optimize the process variables for fluoride ion removal using maghemite nanoparticles," *Journal of Saudi Chemical Society*, vol. 18, no. 4, pp. 340–347, 2014, doi: 10.1016/j.jscs.2013.10.010.
- [25] Y. Liu, Y. Zheng, and A. Wang, "Response Surface Methodology for Optimizing Adsorption Process Parameters for Methylene Blue Removal by a Hydrogel Composite," 2010.
- [26] S. K. Choi, S. Lee, Y. K. Song, and H. S. Moon, "Leaching characteristics of selected Korean fly ashes and its implications for the groundwater composition near the ash disposal mound," 2002. [Online]. Available: www.cuk.ac.kr
- [27] J. Wang, G. Liu, Y. Liu, C. Zhou, Y. Wu, and Q. Zhang, "Mobilization of substance around stackable fly ash and the environmental characteristics of groundwater: With particular reference to five elements: B, Ba, Pb, Sb and Zn," *Fuel*, vol. 174, pp. 126–132, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2016.01.092.
- [28] C. Verma, A. Hussain, S. Madan, and V. Kumar, "Assessment of heavy metal pollution in groundwater with respect to distance from ash pond by using heavy metal evaluation index," *Appl Water Sci*, vol. 11, no. 3, Mar. 2021, doi: 10.1007/s13201-021-01390-9.
- [29] A. Ram, S. K. Tiwari, H. K. Pandey, A. K. Chaurasia, S. Singh, and Y. V. Singh, "Groundwater quality assessment using water quality index (WQI) under GIS framework," *Appl Water Sci*, vol. 11, no. 2, Feb. 2021, doi: 10.1007/s13201-021-01376-7.
- [30] Chancal, S. Madan, and A. Hussain, "Groundwater contamination due to fly ash disposal: A Review," *Int J Adv*, vol. I, no. 6, pp. 237–250, 2014.
- [31] S. Bhattacharya, "Central Composite Design for Response Surface Methodology and Its Application in Pharmacy," in *Response Surface Methodology in Engineering Science*, IntechOpen, 2021. doi: 10.5772/intechopen.95835.
- [32] S. Madala, V. N. R. Mudumala, S. Vudagandla, and K. Abburi, "Modified leaf biomass for Pb(II) removal from aqueous solution: Application of response surface methodology," *Ecol Eng*, vol. 83, pp. 218–226, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.06.025.
- [33] N. Wang, X. Sun, Q. Zhao, Y. Yang, and P. Wang, "Leachability and adverse effects of coal fly ash: A review," Sep. 05, 2020, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122725.
- [34] M. Noskov, I. Solodov, A. Kesler, and T. Terovskaya, "Groundwater Contamination and Self-Purification At Uranium Production By The In-Situ Leaching Process," 2018.
- [35] K. M. Rizwan, V. Thirukumaran, and M. Suresh, "Assessment and source identification of heavy metal contamination of groundwater using geospatial technology in Gadilam River basin, Tamil Nadu, India," *Appl Water Sci*, vol. 11, no. 6, Jun. 2021, doi: 10.1007/s13201-021-01436-y.