

**MODIFIKASI LIMBAH PADAT INDUSTRI UNTUK
MENANGANI POLUTAN KIMIA LOGAM BERAT
BERBAHAYA DAN ZAT WARNA**



UNIVERSITAS GADJAH MADA

**Pidato Pengukuhan Jabatan Guru Besar
dalam Bidang Ilmu Kimia Analitik
pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Gadjah Mada**

**Disampaikan pada Pengukuhan Guru Besar
Universitas Gadjah Mada
Tanggal 12 Agustus 2025**

**Oleh
Prof. Dr.rer.nat Nurul Hidayat Aprilita, S.Si., M.Si**

Bismillaahirrohmaanirrohiim

Assalaamu'alaikum wa rahmatullaahi wa barakaatuh, salam sejahtera untuk kita semua. Puji syukur kita panjatkan ke hadirat Allah Swt atas segala nikmat dan karuaniaNya. Shalawat dan salam semoga selalu tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, keluarga, sahabat dan pengikutnya hingga akhir zaman. Aamiin.

Yang saya hormati,

Ketua, Sekretaris, dan seluruh anggota Majelis Wali Amanat Universitas Gadjah Mada,

Ketua dan Sekretaris Senat Akademik beserta seluruh anggota Senat Akademik Universitas Gadjah Mada,

Ketua dan Sekretaris beserta seluruh anggota Dewan Guru Besar Universitas Gadjah Mada,

Rektor dan para Wakil Rektor Universitas Gadjah Mada beserta jajarannya,

Dekan dan Wakil Dekan FMIPA Universitas Gadjah Mada,

Ketua dan Sekretaris beserta seluruh anggota Senat Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Gadjah Mada,

Dosen, tenaga kependidikan, mahasiswa, serta alumni Universitas Gadjah Mada;

Bapak dan ibu tamu undangan, para sahabat, keluarga, dan semua yang hadir, baik secara luring maupun daring, yang telah menyempatkan waktu untuk hadir pada hari ini.

Bapak Ibu dan Hadirin yang terhormat,

Segala puji syukur kita panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas berkah, rahmat, dan hidayah yang telah dilimpahkanNya kepada kita semua, sehingga hari ini kita dapat menghadiri pengukuhan jabatan Guru Besar Universitas Gadjah Mada. Pada hari yang berbahagia ini, saya menyampaikan terima kasih kepada Rektor dan Pimpinan Dewan Guru Besar yang terhormat, yang telah memberikan kepercayaan kepada saya, untuk menyampaikan pidato pengukuhan sebagai Guru Besar Ilmu Kimia Analitik pada Fakultas

Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Gadjah Mada. Pidato pengukuhan ini merupakan kewajiban akademik saya sebagai Guru Besar Ilmu Kimia, terhitung sejak tanggal 1 Agustus 2023, yang ditetapkan pemerintah melalui SK Kemendikbudristek RI No. 45343/M/07/2023.

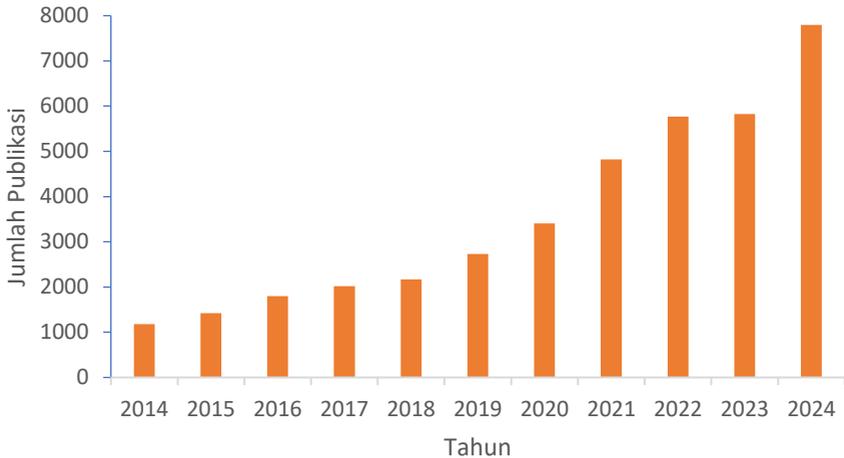
Pimpinan sidang dan hadirin yang saya muliakan,

Pada kesempatan yang berbahagia ini, perkenalkan saya menyampaikan pidato ilmiah di hadapan para hadirin dengan judul: **Modifikasi Limbah Padat Industri Untuk Menangani Polutan Kimia Logam Berat Berbahaya Dan Zat Warna**. Limbah industri dapat berupa/ditemukan dalam wujud bahan padat, cairan, gas, atau campuran apapun yang tidak diinginkan dan dikeluarkan atau dibuang dari proses industri manapun. Limbah industri dianggap sebagai salah satu masalah yang serius dihadapi oleh negara-negara di seluruh dunia karena beban lingkungan dan toksisitasnya (Soliman & Moustafa, 2020). Pembentukan limbah padat di seluruh dunia diperkirakan akan mencapai lebih dari 2,2 miliar ton per tahun pada tahun 2030 (Al-Dailami *et al.*, 2022). Limbah padat industri memiliki dampak signifikan terhadap pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya dalam aspek lingkungan. Oleh karena itu, inovasi dalam pemanfaatan kembali limbah, seperti modifikasi untuk remediasi pencemar logam berat dan zat warna, dapat menjadi solusi strategis dalam mencapai keberlanjutan industri dan lingkungan.

Isu lingkungan, terutama pencemaran air dan tanah oleh logam berat serta zat warna, telah menjadi tantangan global yang semakin mendesak untuk diatasi. Logam berat seperti merkuri (Hg), kobalt (Co), timbal (Pb), kadmium (Cd), dan kromium (Cr), serta zat warna sintesis yang berasal dari industri tekstil, kertas, dan cat, dan lain-lain telah menimbulkan dampak serius terhadap ekosistem dan kesehatan manusia. Senyawa-senyawa ini bersifat toksik, karsinogenik, dan sulit terdegradasi secara alami, sehingga memerlukan solusi inovatif untuk mengurangi dampaknya.

Di antara berbagai bahan adsorben, limbah padat industri merupakan salah satu bahan penelitian yang sedang populer, sebagaimana terbukti oleh peningkatan jumlah publikasi internasional

dalam jurnal terindeks yang berkaitan dengan kata kunci “adsorben dari limbah padat industri” selama dekade terakhir (Gambar 1).



Gambar 1. Jumlah publikasi yang mengandung kata kunci “adsorben dari limbah padat industri” yang diterbitkan dari tahun 2014 sampai tahun 2024. Data ini diperoleh dari *Science Direct*.

1. Klasifikasi Limbah Padat Industri

Limbah padat industri mencakup berbagai jenis dan jumlah yang bergantung pada jenis industri, bahan baku, kapasitas produksi, dan teknologi yang digunakan dalam proses produksi. Limbah padat industri dapat diklasifikasikan berdasarkan sifat, karakteristik polusi dan sektor industri (Soliman & Moustafa, 2020)

a. Klasifikasi berdasarkan sifatnya

Limbah padat industri diklasifikasikan berdasarkan sifatnya menjadi dua kelompok utama. Yang pertama adalah limbah padat industri organik (LPIO); adalah limbah yang mengandung bahan organik dalam komposisi kimianya, atau limbah yang memiliki sifat organik. Limbah tersebut dihasilkan dari berbagai jenis industri seperti; pabrik kayu, pengawetan makanan, ekstraksi minyak, pengecatan, pewarnaan, penyamakan, dan industri plastik. Jumlah LPIO dan bentuk fisiknya tergantung pada sumber dan teknologi

yang digunakan. Sumber LPIO dapat diatur berdasarkan kapasitasnya dalam urutan berikut ini: pabrik kayu < ekstraksi minyak < plastik, pengawetan makanan < pengecatan, pewarnaan, dan penyamakan. Kelompok kedua menurut klasifikasi ini adalah limbah padat industri anorganik (LPIA); adalah limbah yang mengandung bahan kimia anorganik dalam komposisi kimianya. LPIA dihasilkan dari berbagai jenis industri seperti; semen, keramik, dan pabrik granit. Debu semen dianggap sebagai limbah padat paling berbahaya yang dihasilkan dalam jumlah besar.

b. Klasifikasi berdasarkan karakteristik pencemarannya

Limbah padat industri diklasifikasikan berdasarkan karakteristik pencemarannya menjadi limbah padat berbahaya dan limbah padat tidak berbahaya. Limbah padat berbahaya adalah limbah yang memiliki sifat berbahaya dan memerlukan pertimbangan khusus sesuai dengan standar identifikasi limbah berbahaya. Limbah berbahaya memiliki definisi yang luas yang karena sifat fisik, kimia, konsentrasi, jumlah, karakteristiknya dapat secara signifikan berkontribusi atau menyebabkan penyakit serius yang *irreversible* atau penyakit yang dapat dipulihkan secara terbatas; atau peningkatan kematian atau menimbulkan bahaya potensial baik bagi kesehatan maupun/atau lingkungan saat diangkut, dibuang, disimpan, diobati, atau dikelola. Limbah berbahaya juga didefinisikan sebagai limbah yang memiliki reaktivitas kimia, toksisitas, kemampuan meledak, erosi, atau sifat lain yang dapat menghasilkan efek yang bertentangan terhadap kesehatan dan/atau lingkungan. Limbah padat tidak berbahaya mewakili limbah yang tidak memiliki sifat berbahaya dan tidak memerlukan pertimbangan khusus untuk penanganan dan penghapusan, termasuk limbah yang dapat digunakan kembali dan didaur ulang seperti limbah industri makanan.

c. Klasifikasi berdasarkan sektor industri

Limbah padat industri dapat dikelompokkan berdasarkan sektor industri menjadi kategori-kategori berikut. Kategori pertama adalah limbah padat industri pertambangan termasuk semua limbah padat yang dihasilkan selama proses industri pertambangan, seperti

batuan dan *tailing* (sisa *slag* setelah pemurnian tambang). Kategori kedua adalah limbah padat industri metalurgi; jenis ini merujuk pada semua *slag* yang diperoleh selama industri metalurgi dan pengolahan logam dan non-logam. Kategori ketiga adalah limbah padat industri kimia; jenis limbah ini mencakup produk yang tidak diinginkan, bahan baku yang tidak bereaksi, kotoran, lumpur garam, *slag* pirit, alkali, dan slag asam. Selain itu, limbah farmasi, obat-obatan yang kadaluwarsa, pestisida yang tidak terpakai, dan lumpur insektisida dari fasilitas pengolahan air limbah. Kategori keempat adalah limbah padat industri pengawetan makanan; jenis limbah ini mencakup biji yang rusak, akar, stok, tanah, dan debu. Kategori terakhir adalah limbah padat industri bahan bangunan; sektor ini menghasilkan berbagai macam limbah seperti debu semen, limbah keramik, granit, limbah marmer, limbah baja, dan limbah industri kertas. Diantara jenis limbah padat yang ada limbah slag nikel dan limbah abu dasar batubara yang menjadi fokus penelitian kami selama ini.

Bapak, Ibu, dan hadirin yang saya hormati,

2. Modifikasi Limbah Slag Nikel

Pada tahun 2021 Indonesia telah menjadi produsen nikel terbesar dunia dengan total produksi mencapai 1.040 ribu ton, meningkat menjadi 1.600 ribu ton pada 2022. Produksi tahun 2021 tersebut jauh melampaui Filipina dengan total 387 ribu ton, Rusia dengan 205 ribu ton, Kaledonia Baru dengan 186 ribu ton, Australia 151 ribu dan Kanada 134 ribu ton. Dengan total produksi global tahun 2021 sebesar 2.735,4 ribu ton, produksi nikel Indonesia mencakup hingga 38 persen total produksi global (Patria Gupta, 2019). USGS (*United States Geological Survey*) mencatat cadangan nikel Indonesia mencapai 55 juta ton atau 42,31% dari total cadangan dunia yang sebesar 130 juta ton pada 2023. Indonesia merupakan negara dengan jumlah cadangan nikel terbesar di dunia. Produksi tambang nikel pada 2023 mencapai 1,8 juta ton atau 50% dari produksi dunia yang mencapai 3,6 juta ton.

Nikel telah ditetapkan oleh Pemerintah RI sebagai salah satu komoditas yang tergolong dalam klasifikasi mineral kritis sesuai dengan Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral RI nomor

296.K/MB.01/MEM.B/2023 tanggal 14 September 2023. Mineral kritis merupakan mineral yang mempunyai kegunaan penting untuk perekonomian nasional dan pertahanan keamanan negara yang memiliki potensi gangguan pasokan dan tidak memiliki pengganti yang layak. Industri nikel menghadapi banyak tantangan saat ini, karena nikel adalah logam kritis yang digunakan untuk teknologi rendah karbon dan produksi paduan super, baterai ion Li dan Ni-MH untuk kendaraan listrik. Permintaan nikel diperkirakan akan meningkat secara signifikan dalam beberapa tahun mendatang. Produksi nikel membutuhkan energi yang intensif dan menghasilkan jumlah limbah padat yang besar yang jika tidak ditangani dengan baik atau tidak dimanfaatkan dengan memadai dapat menimbulkan risiko signifikan terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat (Bartzas et al., 2021). Industri nikel menghasilkan logam nikel atau paduan nikel melalui penggunaan proses pirometalurgi dan hidrometalurgi yang mengakibatkan pembentukan limbah padat dan cair yang besar, yaitu *slag* nikel dan residu pelarutan.

Bapak/Ibu, hadirin yang saya hormati,

Slag nikel merupakan limbah yang dihasilkan dari pengolahan bijih nikel yang mempunyai kandungan utama SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , dan MgO (Wu et al., 2018, Aprilita et al., 2023). Setiap 1 ton nikel yang dihasilkan, terdapat 6-16 ton limbah *slag* nikel yang dihasilkan (Wu et al., 2018). Limbah *slag* nikel membutuhkan area penampungan landfill yang luas dan berbahaya bagi lingkungan. Oleh karena itu, *slag* nikel perlu diolah atau dimanfaatkan menjadi material yang berguna untuk mengurangi jumlah limbah tersebut. *Slag* nikel sudah dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, diantaranya adalah:

- a. Ekstraksi logam berharga dari *slag* nikel. Nikel, besi, tembaga, dan unsur lain dalam *slag* nikel dapat diperoleh kembali (*recovery*) melalui proses pelindian asam dan proses pemisahan magnetik-reduksi selektif (Shen et al., 2008). Namun, dengan peningkatan proses metalurgi nikel, kandungan logam yang dapat diekstraksi dalam *slag* nikel menjadi sangat rendah.
- b. Preparasi kaca kristal. Komponen utama *slag* nikel, seperti kalsium, silikon, magnesium, aluminium, dan oksida lainnya, juga merupakan

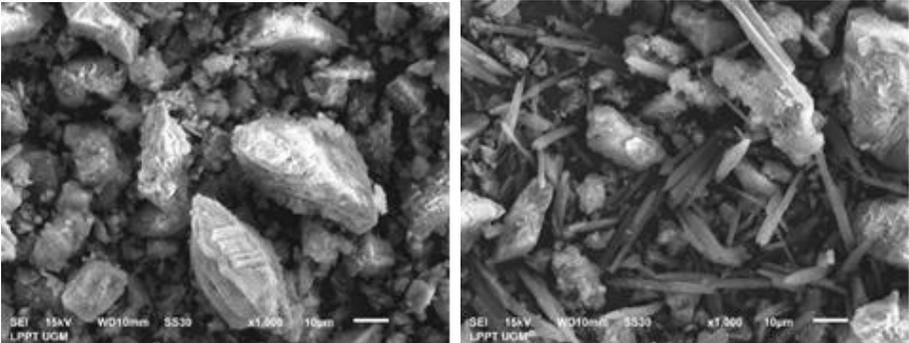
komponen penting dari kaca (Wang et al., 2010). Namun demikian, hanya sedikit kandungan slag nikel yang digunakan dalam pembuatan kaca-keramik dan akan dengan mudah menimbulkan pencemaran sekunder.

- c. Produksi semen dan beton: sebagai aditif dalam pembuatan semen Portland atau pengganti agregat (Choi & Choi, 2015)
- d. Produksi material bangunan: sebagai bahan baku untuk blok bangunan, produk autoklaf, bata mentah, dan geopolimer (Yang et al., 2014)

Slag nikel dapat dimodifikasi secara kimia dan dimanfaatkan untuk menangani polutan logam berat dan zat warna. Kandungan oksida utama *slag* nikel alam Indonesia dari Pomalaa, Sulawesi adalah SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MgO , CaO dan mineral lainnya berturut-turut adalah 42,07; 14,29; 3,32; 27,37; 1,25 dan 11,70% (Aprilita et al., 2022). Analisis *slag* nikel dari Provinsi Jiangsu, China juga menunjukkan hasil yang mirip kandungan SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MgO , dan CaO berturut-turut adalah 44,89; 15,59; 6,60; 26,89 dan 2,40% (Wu et al., 2018). Hasil ini menunjukkan bahwa kandungan oksida utama *slag* nikel relatif tidak berbeda di lokasi yang berbeda. Material yang mengandung SiO_2 sering digunakan sebagai adsorben padat karena gugus fungsionalnya pada struktur padatan berpori dan stabilitas termal dan mekanik yang baik (Aprilita et al., 2022).

Modifikasi adsorben dapat dilakukan dengan melapisi permukaan adsorben dengan ligan yang mempunyai gugus aktif seperti N, -NH, dan -SH. Immobilisasi ditizon dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi beberapa adsorben seperti zeolit (Mudasir et al., 2016), silika gel, abu dasar (Huda et al., 2021), serta *slag* nikel (Aprilita et al., 2022, 2023). Untuk mengetahui kandungan mineral utama dan bentuk morfologi pada slag nikel alam dari PT. ANTAM, Pomala, Sulawesi, maka perlu dilakukan analisis menggunakan instrumentasi *Scanning Electron Microscopy-Electron Dispersive X-Ray* (SEM-EDX). Hasil

karakterisasi SEM pada *slag* nikel teraktivasi dan *slag* terimobilisasi ditizon disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Citra SEM *slag* nikel teraktivasi (kiri) dan *slag* nikel terimobilisasi ditizon (kanan)

Berdasarkan Gambar 2 tersebut, menunjukkan bahwa *slag* nikel teraktivasi memiliki struktur yang tidak teratur. *Slag* nikel terimobilisasi ditizon (kanan) memiliki struktur yang lebih rapi dan bentuk yang runcing, yang menunjukkan adanya ditizon pada *slag* nikel. Hasil analisis kandungan mineral oksida logam *slag* nikel dan *slag* nikel teraktivasi disajikan pada Tabel 1, sedangkan hasil analisis kandungan unsur setelah adsorpsi disajikan pada Tabel 2.

SiO_2 merupakan oksida mineral yang paling banyak terkandung dalam *slag* nikel sebelum aktivasi sebesar 42,07%. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya bahwa komposisi atau penyusun utama dari *slag* nikel ialah mineral SiO_2 yang sukar larut dalam asam, sedangkan senyawa oksida lain dapat larut dengan baik dalam asam. Setelah proses aktivasi, kandungan SiO_2 relatif meningkat menjadi 64,78% dikarenakan beberapa pengotor dan oksida lain telah berkurang. Hal ini disebabkan karena mineral SiO_2 merupakan senyawa yang bersifat *inert* terhadap asam (kecuali HF). Pada proses aktivasi dengan menggunakan asam HCl, persentase massa C pada *slag* nikel terimobilisasi ditizon juga mengalami peningkatan. Hal ini menandakan bahwa ditizon (yang mengandung atom N, S, dan C) berhasil diimobilisasikan pada *slag* nikel teraktivasi.

Tabel 1. Kandungan Utama Oksida Logam *Slag* Nikel

No.	Oksida Mineral Logam	Persentase (% massa) EDX	
		Sebelum Aktivasi	Setelah Aktivasi
1	SiO ₂	42,07	64,78
2	Fe ₂ O ₃	14,29	11,21
3	Al ₂ O ₃	3,32	5,01
4	MgO	27,37	4,27
5	CaO	1,25	2,57
6	Mineral lain	11,7	12,16

Berdasarkan Tabel 2, terdapat atom N dan S pada *slag* nikel terimobilisasi ditizon. Hal ini menandakan bahwa ditizon berhasil diimobilisasikan pada permukaan *slag* nikel aktivasi. Tabel 2 juga mengindikasikan bahwa *slag* nikel yang diimobilisasi dengan ditizon mampu menyerap ion Ag(I) dan Co(II) yang lebih banyak dibandingkan *slag* nikel teraktivasi. Hal ini dimungkinkan karena adanya ditizon sehingga kemampuan adsorpsi dan selektivitas terhadap ion logam Ag(I) dan Co(II) meningkat karena bertambahnya gugus aktif yang berasal dari ditizon, sedangkan pada adsorben aktivasi (tanpa imobilisasi ditizon) situs aktif hanya berasal dari *slag* nikel saja.

Tabel 2. Kandungan unsur setelah adsorpsi ion Ag(I) dan Co(II) pada *slag* nikel aktivasi dan imobilisasi ditizon (Luqman, 2021).

Komposisi (% massa)	Adsorbent <i>Slag</i> Nikel			
	Teraktivasi	Terimobilisasi ditizon	Teraktivasi	Terimobilisasi ditizon
	Adsorpsi Ag (I)		Adsorpsi Co(II)	
Si	23,11	28,48	32,10	29,20
Al	2,22	0,69	2,43	0,12
O	57,71	47,56	53,90	48,67
C	12,98	17,19	11,16	16,34
N	-	5,23	-	4,59
S	-	0,46	-	0,89
Ag	0,19	0,39	-	-

Co	-	-	0,10	0,18
Unsur lain	3,79	-	0,31	-

Kapasitas adsorpsi, konstanta kesetimbangan adsorpsi dan energi adsorpsi untuk adsorben *slag* nikel terimobilisasi ditizon lebih besar dibandingkan *slag* nikel teraktivasi (Tabel 3). Hal ini dimungkinkan karena pembentukan ikatan yang terjadi antara adsorbat dan permukaan adsorben lebih stabil dan proses adsorpsi ion logam lebih stabil pada *slag* nikel terimobilisasi ditizon.

Tabel 3. Parameter model isoterm adsorpsi Langmuir untuk adsorpsi ion Ag(I) dan Co(II) pada *slag* nikel teraktivasi dan terimobilisasi ditizon

Ion logam	Adsorben	Kapasitas adsorpsi, q_{\max} (mol g ⁻¹)	Tetapan kesetimbangan K_L (L mol ⁻¹)	Energi adsorpsi (kJ mol ⁻¹)
Ag(I)	<i>slag</i> aktivasi	$1,256 \times 10^{-5}$	$5,07 \times 10^4$	26,842
	<i>slag</i> imobilisasi	$1,698 \times 10^{-5}$	$9,64 \times 10^4$	28,434
Co(II)	<i>slag</i> aktivasi	$1,236 \times 10^{-5}$	$6,76 \times 10^3$	21,850
	<i>slag</i> imobilisasi	$1,441 \times 10^{-5}$	$7,50 \times 10^3$	22,106

Dengan adanya imobilisasi ditizon pada *slag* nikel menjadikan *slag* nikel terimobilisasi ditizon lebih disukai oleh ion logam dalam proses adsorpsi, sehingga menyebabkan nilai kapasitas adsorpsinya lebih besar daripada *slag* nikel teraktivasi. Menurut teori HSAB (*Hard and Soft Acids and Bases*) oleh Pearson, Ag(I) merupakan asam lunak yang dapat berinteraksi secara efektif dengan basa lunak atau basa menengah (*borderline*), sedangkan gugus aktif pada ditizon (gugus N, -NH dan -SH) merupakan basa lunak atau basa menengah (*borderline*). Co(II) merupakan asam menengah (*borderline*) yang dapat berinteraksi baik dengan basa keras atau basa menengah (*borderline*). Hal ini mengindikasikan bahwa ion Co(II) mampu berinteraksi baik dengan basa keras dari *slag* nikel dan mengakibatkan interaksi terhadap ditizon lebih rendah jika dibandingkan dengan Ag(I). Penjelasan ini sesuai dengan hasil penelitian bahwa jumlah ion Ag(I) teradsorp lebih tinggi dibandingkan dengan ion Co(II).

Bapak dan Ibu yang saya muliakan,

3. Modifikasi Limbah Abu Dasar Batubara

Abu dasar batubara (*Coal Bottom Ash/CBA*) adalah produk samping yang dihasilkan dari pembakaran batubara di PLTU Batubara (Kamal *et al.*, 2019). Abu ini terdiri dari partikel-partikel yang beraglomerasi dan terlalu berat untuk terbawa oleh gas buang, sehingga mengendap di dasar tungku. Pengelolaan *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA), sebagai limbah yang telah diatur dalam Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan, tetap memiliki kewajiban untuk dikelola hingga memenuhi standar dan persyaratan teknis yang ditetapkan (Anonim, 2021). *Bottom ash* (abu dasar) ditetapkan sebagai jenis limbah non B3 yang bersumber dari proses pembakaran batubara pada fasilitas PLTU atau dari kegiatan lain yang menggunakan teknologi selain *stocker boiler* dan/atau tungku industri. Abu dasar batubara dapat mengandung beberapa logam berat, seperti arsen (As), timbal (Pb), kadmium (Cd), kromium (Cr), mangan (Mn), tembaga (Cu), seng (Zn), dan nikel (Ni), biasanya dalam kadar runutan. Logam berat ini dapat terlarut dari abu batubara dalam kondisi asam dan mencemari tanah, air permukaan, serta air tanah, yang pada akhirnya dapat masuk ke rantai makanan dan menyebabkan efek genotoksik pada DNA (Asokbunyarat *et al.*, 2015).

Abu dasar batubara terutama terdiri dari senyawa silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), besi oksida (Fe_2O_3), kalsium oksida (CaO), dan magnesium oksida (MgO). Berikut ini gambaran komposisi kimia abu dasar batubara dari berbagai sumber (Tabel 4). Partikel abu dasar secara fisik kasar, berpori, berbentuk butiran, dan berwarna keabu-abuan. Ukuran partikel berkisar dari kerikil halus hingga pasir halus. Berat jenis abu dasar bervariasi antara 1,39 hingga 2,33 g/cm^3 , tergantung pada komposisi kimianya. Abu dasar batubara berbentuk bulat dan halus seperti kaca dengan luas area permukaan abu dasar batubara adalah 7,811 m^2/g . Partikel berbentuk bulat mengkonfirmasi proporsi Si dan Al yang tinggi (Gollakota *et al.*, 2021).

Tabel 4. Komposisi Kimia abu dasar Batubara (%)

Senyawa	(Yildirim et al., 2017)	(Gupta et al., 2006)	(Asokbunyarat et al., 2015)	(Gollakot a et al., 2021)	(Rathnaya ke et al., 2018)	(Alam et al., 2019)	(Agusti ani, 2015)
SiO ₂	47,5	45,4	39,02	71,45	34,49	58,8	59,43
Al ₂ O ₃	15,4	19,3	20,40	14,26	7,74	8,8	12,74
Fe ₂ O ₃	11,6	9,7	14,16	6,66	14,24	4,6	11,62
CaO	8,33	15,3	18,03	2,30	21,97	15,8	2,86
K ₂ O	2,05	<i>n.a</i>	2,69	0,97	<i>n.a</i>	1,0	<i>n.a</i>
MgO	8,08	3,1	2,34	<i>n.a</i>	1,90	1,9	2,17
P ₂ O ₅	0,22	<i>n.a</i>	0,19	<i>n.a</i>	<i>n.a</i>	<i>n.a</i>	<i>n.a</i>
Na ₂ O	1,79	1,0	<i>n.a</i>	<i>n.a</i>	<i>n.a</i>	3,1	<i>n.a</i>
SO ₃	5,10	<i>n.a</i>	1,80	<i>n.a</i>	1,71	<i>n.a</i>	<i>n.a</i>

Keterangan: *n.a* = not available

Pengembangan adsorben selektif berbasis abu dasar batubara merupakan salah satu contoh inovasi untuk mereduksi dan menggunakan kembali limbah batubara dan sangat cocok diterapkan di Indonesia (Wahyuni *et al.*, 2018). Beberapa penelitian mengenai pemanfaatan abu batubara sebagai adsorben telah banyak dilakukan, di antaranya dapat dilihat pada Tabel 5.

Abu dasar batubara tanpa modifikasi dapat digunakan sebagai adsorben, namun selektivitasnya masih rendah. Hal ini disebabkan karena sisi aktif SiO₂ dan Al₂O₃ yang bermuatan parsial negatif dapat berikatan secara elektrostatis dengan semua kation logam sehingga beberapa kation penting lainnya juga hilang. Oleh karena itu perlu dilakukan modifikasi pada abu dasar batubara sehingga kapasitas selektivitas adsorpsinya dapat ditingkatkan.

Beberapa cara yang dapat dilakukan untuk modifikasi abu dasar batubara adalah:

- a. Modifikasi dengan surfaktan natrium dodesil sulfat.

Natrium dodesil sulfat (SDS) merupakan surfaktan anionik yang mempunyai gugus fungsi sulfonat pada bagian kepala dengan 14 rantai karbon. Gugus sulfonat pada SDS mempunyai muatan negatif yang bersifat polar dan berperan sebagai hidrofilik. Adanya muatan negatif pada SDS ini berpotensi untuk menarik senyawa yang bermuatan positif seperti kation logam. SDS memiliki

selektivitas yang baik terhadap beberapa kation logam seperti ion logam Cu^{2+} , Ni^{2+} dan Zn^{2+} (Adeli *et al.*, 2017), dan Cd^{2+} (Ahn *et al.*, 2009), sehingga modifikasi permukaan abu dasar batubara dengan SDS akan dapat meningkatkan selektivitas dan sensitivitas adsorpsi terhadap ion logam berat.

Tabel 5. Penelitian terkait pemanfaatan abu dasar batubara sebagai adsorben

Preparasi adsorben abu batubara	Adsorbat	Hasil	Referensi
Aktivasi menggunakan HCl, HNO_3 , H_2O_2 30%	<i>Ramazol Brilliant Blue R</i> dan <i>Reactive blue 19</i>	Aktivasi abu dasar batubara menggunakan HCl memberikan kapasitas adsorpsi paling tinggi.	(Jarusirip ot, 2014)
Aktivasi dalam <i>Furnace</i> 500°C	<i>Acid Orange 7</i>	Penurunan <i>Acid Orange 7</i> sebesar 78% dengan metode <i>batch</i>	(Gupta et al., 2006)
Aktivasi menggunakan NaOH secara hidrotermal	kristal violet	Kapasitas adsorpsi zeolit dari abu dasar $17,6 \text{ mg g}^{-1}$.	(Bertolini et al., 2013)
Diayak manual	<i>Reactive Dyes</i>	Abu dasar Batubara dapat digunakan sebagai adsorben alternatif karbon aktif pada sistem pengolahan limbah	(Dinçer et al., 2007)
Diayak dengan ayakan 250 mesh dan dikeringkan pada 105°C selama 24 jam	<i>Acid Red 183</i> dan <i>Acid Yellow 99</i>	Efisiensi penghilangan wama dengan abu dasar bisa mencapai 50% tergantung pada konsentrasi zat warna awal.	(Genc & Oguz, 2010)
Aktivasi dengan asam	Ion logam Pb(II), Cu(II), dan Cr(III)	Adsorpsi campuran ion logam Pb(II), Cu(II), dan Cr(III) mengikuti kinetika orde pseudo 2 Ho	Anies Septiana, 2013

b. Modifikasi dengan 8-hidroksiquinolin

Interaksi 8-hidroksiquinolin pada adsorben abu dasar Batubara terbentuk melalui ikatan hidrogen antara atom H pada hidroksiquinolin dengan gugus Si-OH pada permukaan abu dasar. Interaksi abu dasar termodifikasi 8-hidroksiquinolin dengan ion

logam M(II) terjadi antara atom O dan N dari 8-hidroksikuinolin, atom O dari Si-OH melalui ikatan kovalen dan kovalen koordinasi dengan M(II). Abu dasar Batubara yang dimodifikasi dengan 8-hidroksikuinolin menunjukkan kemampuan adsorpsi yang lebih tinggi daripada abu dasar tanpa modifikasi terhadap ion Co(II) (Ernawati, 2018). Kapasitas adsorpsi abu dasar batubara setelah modifikasi 8-hidroksikuinolin juga meningkat yang awalnya 41,8 dan setelah dimodifikasi menjadi 47,84 mg/g terhadap Cu(II) dan serta dari 22,97 menjadi 32,58 mg/g terhadap Ni(II) (Marita, 2018). Hasil yang analog juga diperoleh untuk ion logam Zn(II) dan Mg(II). Kapasitas adsorpsi setelah modifikasi dengan 8- hidroksikuinolin meningkat dibandingkan sebelum modifikasi untk adsorpsi ion Zn(II) dan Mg(II) (Arta, 2019)

c. Sintesis silika gel dari abu dasar batubara

Limbah abu dasar Batubara dan pasir silika dari suatu pabrik gula dapat disintesis menjadi silika gel. Abu dasar Batubara-pasir silika (ADPS) terlebih dahulu diaktivasi dengan HCl 6 M. Langkah selanjutnya adalah mengubahnya menjadi natrium silikat dengan cara dilebur dengan larutan NaOH 6M dalam *furnace* pada suhu 700 °C selama 30 menit. Larutan natrium silikat sebanyak 20 mL ditetes HCl 3 M secara tetes demi tetes sembari diaduk menggunakan pengaduk magnetik sampai pH netral dan terbentuk silika gel berwarna putih. Silika gel hasil sintesis dapat dimanfaatkan untuk mengadsorpsi berbagai jenis kation logam dan zat warna kationik, seperti Cu(II) (Zahro, 2023), Ni(II) (Wangi, 2023), Metilen biru (Praneswara, 2023) dan Malasit Hijau (Sari, 2023)

4. Prospek Modifikasi Limbah Padat Industri Untuk Menangani Polutan Kimia Logam Berat Berbahaya Dan Zat Warna

Bapak dan Ibu yang dirahmati Allah,

Limbah padat industri seperti *slag* nikel, abu dasar dan abu layang batubara, *slag* baja, dan lain-lain tersedia dalam jumlah besar sebagai hasil samping dari proses industri. Dengan sedikit pengolahan atau modifikasi, limbah ini dapat diubah menjadi bahan adsorben berbiaya rendah, menggantikan material konvensional seperti karbon aktif yang lebih mahal. Berbagai metode seperti modifikasi kimia

dengan asam/basa, serta fungsionalisasi dengan polimer atau senyawa pengompleks telah terbukti secara signifikan meningkatkan kapasitas adsorpsi terhadap logam berat dan zat warna sintetis. Pemanfaatan limbah padat industri sebagai adsorben merupakan bagian dari pendekatan ekonomi sirkular, yang menekankan pada penggunaan kembali dan pengurangan limbah. Hal ini juga mendukung prinsip kimia hijau (*green chemistry*) dan *sustainable development* (Wu & Zhao, 2021).

Berbagai studi menunjukkan bahwa limbah yang dimodifikasi secara fisik, kimia, atau biologis dapat memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi terhadap logam berat dan zat warna sintetis (seperti metilen biru, remazol, dan rhodamin B). Dalam beberapa kasus, efektivitasnya setara atau melebihi adsorben komersial (Babel & Kurniawan, 2003). Teknologi ini dapat diaplikasikan mulai dari skala laboratorium hingga industri, terutama untuk pengolahan air limbah industri tekstil, pertambangan, dan manufaktur. Selain itu, teknologi ini sangat cocok untuk negara berkembang karena kesederhanaan proses dan ketersediaan bahan baku lokal (Mittal *et al.*, 2010). Prospek modifikasi limbah padat industri sebagai adsorben untuk polutan logam dan zat warna sangat cerah. Dengan riset berkelanjutan dan dukungan kebijakan, pendekatan ini bisa menjadi solusi efisien, murah, dan berkelanjutan dalam pengendalian pencemaran lingkungan.

Ucapan Terima Kasih

Bapak dan Ibu yang saya muliakan,

Pengukuhan saya sebagai Guru Besar ini tidak terlepas dari peran berbagai pihak yang telah memberikan dorongan semangat, kekuatan, empati dan doa pada saya selama lebih dari 25 tahun sebagai dosen di Departemen Kimia FMIPA Universitas Gadjah Mada. Ucapan terima kasih saya haturkan kepada Pemerintah Republik Indonesia melalui Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan, Riset dan Teknologi RI atas kepercayaan kepada saya untuk mengemban Amanah gelar Guru Besar Ilmu Kimia Analitik di Universitas Gadjah Mada. Ungkapan terima kasih juga saya sampaikan untuk Rektor UGM beserta jajarannya, Pimpinan dan anggota Senat Akademik, Pimpinan dan anggota Dewan Guru Besar, yang telah menyetujui usulan Guru

Besar saya. Demikian juga kepada Bapak Dekan Fakultas MIPA beserta Bapak-Bapak Wakil Dekan, Bapak Ketua dan anggota Senat FMIPA, Sekretaris Departemen Kimia Prof. Dr. Winarto Haryadi beserta jajaran RKD Kimia, Guru Besar Departemen Kimia, Tim PAK tingkat Fakultas dan Universitas serta staf SDM FMIPA (Mas Boma dan tim) dan UGM atas bantuan kelancaran pengajuan Guru Besar dan pengurusan dokumen kelengkapannya. Terima kasih tak berhingga untuk Prof. Drs. Mudasir, M.Eng., Ph.D. dan Prof. Dr. Endang Tri Wahyuni, M.S. yang berkenan menelaah draf pidato ini dan memberi masukan-masukan yang sangat berharga.

Falsafah Madura *Bhuppa' Bhâbbhu' Ghuru Rato* menjadi landasan yang kuat ketaatan dan kepatuhan yang positif terhadap kedua orang tua, Guru dan Pimpinan, sehingga ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya saya haturkan kepada para guru saya, di SD Pejagan II Bangkalan, SMP Negeri 1 Bangkalan, dan SMA Negeri 1 Bangkalan. Semoga menjadi amal jariyah Bapak/Ibu Guru semua. Demikian juga untuk teman-teman SD Angkatan 1985, SMP Angkatan 1988, dan SMA Angkatan 1991, terima kasih atas persaudaraan dan kenangan yang indah semasa sekolah. Tak lupa juga kepada teman-teman seperjuangan Kimia 1991 FMIPA UGM, Prof Tri Joko Raharjo, Dr. Sri Sudiono, Prof. Alimin, Prof. Restu Kartiko Widi, Prof. Rudi Syahputra, Prof. Desi Suci Handayani, Prof. Venty Suryanti, Prof Triana Kusumawati, Prof. Erwin Abdurrahim, Ikhyanuddin, S.Si, M.Acc, Bettie A, S.Si, Dr. Endah Sayekti, M.Si, Sylvi, S.Si. M.Si, Wahyu, S.Si, Poppy Probondari, S.Si, M.Sc, Maryati, S.Si, M.Sc, Sri Rejeki, S.Si, M.Sc, Setyaningdyah, S.Si, Ridho Subhan, S.Si, Rohmat Ismail, S.Si, Sofyan, S.Si, M.Pd dan semua teman-teman kimia 91 yang lain. Kita bersama-sama belajar kimia di bangku kuliah, *healing* bersama-sama dan sampai saat inipun silaturahmi kita tetap tak terputus.

Saya ucapkan terima kasih kepada Drs. H. Mudjiran (alm) dan Prof. Dr. Endang Tri Wahyuni yang telah menjadi pembimbing akademik dan pembimbing skripsi saat saya menempuh studi S1 Kimia UGM. Almarhum Drs. H. Mudjiran dan Dr. H. Ngatidjo Hadipranoto (alm) juga yang berkenan memberikan rekomendasi kepada saya saat melamar sebagai dosen Kimia FMIPA UGM. Terima kasih juga saya ucapkan kepada pembimbing tesis saya Prof. Dr. Dwi Siswanta, M.Eng

dan Dr. Agus Kuncaka, DEA. Penghargaan yang sama, saya sampaikan kepada promotor Prof. Dr. Dr (HC) Guenther Karl Bonn, di tengah kesibukannya dengan penuh keramahan bersedia menjadi pembimbing disertasi saya saat menempuh studi S3 di Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Austria. Prof. Dr. Christian Huck dan Dr. Rania Bakry, terima kasih sudah banyak membantu selama studi S3 saya di Innsbruck, Austria. Sahabat seperjuangan selama studi S3 di Innsbruck, (alm.) Dr.rer.nat Ria Armunanto, Prof. Dr.rer.soc. R. Agus Sartono, M.B.A, dr. Lutfan Lazuardi, M.Kes., Ph.D, Dr.rer.nat Fajar Rahman Wibowo, Dr.techn. Ir. Sholihin As'ad, M.T., dkk yang lain, terima kasih atas persaudaraannya sehingga kita tetap merasakan kehangatan dan menikmati indahnnya kota Innsbruck setiap weekend selalu bersama selama studi S3. Terima kasih juga kepada Prof.Dr.rer.nat Harno Dwi Pranowo yang telah mengenalkan saya kepada (alm) Prof. Dr Dr(HC) Bernd Michael Rode pendiri *The Austrian-South-East-Asian Academic University Network (ASEA-UNINET)*. Selama menempuh studi ini saya mendapatkan support dari beasiswa Pertamina dilanjutkan dengan beasiswa Tanoto pada saat studi S1, Beasiswa URGE-DIKTI saat studi pascasarjana S2 Kimia UGM, dan beasiswa *Technology South East Asia* ASEA-UNINET dari Pemerintah Austria saat studi S3 di Innsbruck University.

Terima kasih yang setinggi-tingginya senior dan kolega di Laboratorium Kimia Analitik Ir. Sayid Achmad (alm), Drs. H. Mudjiran (alm), Dr. H. Ngatidjo Hadipranoto (alm), Drs. Faried Uzer (alm), Dr. Eko Sugiharto, DEA, Prof. Dr. Endang Tri Wahyuni, MS, Prof. Drs. Mudasir, M.Eng., Ph.D., Dr. Agus Kuncaka, DEA, Prof. Dr. Dwi Siswanta, M.Eng, Prof. Dr. Roto, M.Eng, Dr.rer.nat Adhitasari Suratman, Prof. Dr. Suherman, M.Sc, Dr. Taufik Abdillah Natsir, M.Sc, Aulia Ratri, S.Si, M.Sc, Feni Risma Diana SSi, M.Sc dan seluruh tendik laboran yang selalu kompak dan bekerja dalam suasana kebersamaan dan kekeluargaan. Para senior dosen di departemen Kimia FMIPA UGM: Prof Chairil Anwar, Prof Sabirin Mastjeh, Prof Iip Izul Falah, Dr. Yateman Arryanto, Prof. Dr. Muchalal, Prof Bambang Rusdiarso dan alm. Dr. Ahmad Sahiril Alim terima kasih sudah banyak menginspirasi dalam menjalankan tugas sebagai dosen di kampus. Kepada seluruh Guru Besar aktif di Departemen Kimia yang saat ini

berjumlah 20 dosen (Prof Bambang Purwono, Prof Jumina, Prof Tutik Dwi Wahyuningsih, Prof Nuryono, Prof Sri Juari Santosa, Prof Indriana Kartini, Prof Eko Sri Kunarti, Prof Suyanta, Prof Wega, Prof Karna Wijaya, dll), juga kepada seluruh dosen dan tendik di Departemen Kimia yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu dihaturkan terima kasih atas kolegialitas dan kerjasamanya yang luar biasa sehingga Departemen Kimia selalu menjadi Departemen Kimia yang terbaik di Indonesia dan telah terakreditasi Internasional *Royal Society of Chemistry* (England), ASIIN Jerman, serta akreditasi Unggul Lamsama untuk semua prodinya. Kepada Prof. Dr. Triyono, SU Dekan FMIPA periode 2016-2021, ucapan terima kasih tak terhingga karena telah memberi kepercayaan untuk bergabung di Dekanat MIPA bersama Prof. Dr.-Ing. Mhd. Reza M.I. Pulungan, M.Sc., Prof Dr. Gunardi dan Prof Dr. Edi Suharyadi. Kolega-kolega Wakil Dekan bidang akademik dan kemahasiswaan UGM periode 2016-2021, terimakasih atas kekompakannya bersama-sama kita mengarungi program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) yang kini sudah berganti wajah menjadi program Diktisaintek Berdampak.

Tidak lupa pula terima kasih kepada semua mahasiswa bimbingan saya, Muhammad Luqman, S.Si, M.Sc, Dr. Suratno, S.Si, M.Sc, Baihaki Fusta Rozad, S.Si, M.Sc dkk yang telah mendukung penelitian di bidang analitik dan lingkungan, pemanfaatan dan modifikasi slag nikel dan abu dasar batubara untuk menangani polutan kimia. Sahabat satu alumni SMA 1 Bangkalan yang kuliah bersama di Universitas Gadjah Mada Mohammad Hanafia, S.Sos, Andri Budiwidodo, S.Si, M.Ikom, Jusi Ifiana Komala Rosada, Amd, Dr. P. Hadi Wijaya, S.T., M.T., dkk. Terima kasih atas persaudaraannya yang tak lekang oleh waktu. Teman-teman kost Pogung Kidul SIA XVI/VI/19 RA. Najamudin, ST, Andrianto Dharmawan, ST., Prof Dr. TN. Saifullah, Yoyon Daryono, ST dan teman-teman lainnya atas semua kenangan indah di Pogung. Keluarga ibu kost (alm) Rr.Sri Purwati, Bapak kost (alm) Drs. Wahyu Pratista, putra-putri beliau mbak Indah, mas Adi dan dik Nita, selama 9 tahun dari 1991 - 2000 saya kost di Pogung Kidul saat menempuh studi S1 dan S2 Kimia UGM sampai saya menikah baru pindah ke kontrakan. Terimakasih atas segala kebaikannya semoga silaturahmi kita tidak pernah terputus.

Doa yang tak pernah putus selalu dipanjatkan kepada Allah Swt untuk kedua orangtua saya Ibu Sri Murniati dan alm. Ayahanda M. Safiun. Doa, kasih sayang dan pengorbanan ibu dan ayah yang mengantarkan saya pada posisi saat ini. Demikian juga kepada Bapak Mertua Slamet Rijadi yang selalu menemani kami dalam mengarungi biduk rumah tangga dan almarhumah Ibu mertua Titiék Sunarti. Kepada kedua adikku tersayang Erwin Maulita dan Diana Triana bersama keluarga, terima kasih atas saling pengertian dan persaudaraan yang tulus sejak kita masih anak-anak sampai saat ini. Terima kasih juga kepada saudara-saudara ipar saya Mas Kokok, Mbak Oevi, Mbak Evie, Bambang dan keluarga semuanya atas kekompakan dan dukungannya. Terimakasih juga untuk seluruh keluarga besar di Bangkalan, Kulonprogo dan Mataram. Istriku tersayang Prof. Dr. Susy Yunita Prabawati yang selalu setia mendampingi dalam suka duka mengarungi biduk kehidupan. Semoga kita bisa mengantarkan putri-putri yang sangat kita cintai Naura Hidayat, S.Ked, Rania Hidayat dan Kaisa Zhafira Hidayat, menjadi insan-insan yang shalihah, sehat wal aafiyat dan umur yang barakah dalam mengarungi bahtera kehidupannya. *Fa inna ma'al-'usri yusrâ, inna ma'al-'usri yusrâ*. Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan. Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan” (QS. Al-Insyirah: 5-6).

Terima kasih kepada tamu undangan yang telah berkenan hadir untuk mengikuti pidato pengukuhan saya ini dan mohon maaf apabila ada hal yang kurang berkenan.

Wabillahi Taufiq wal Hidayah. Wassalamu'alaikumwa rahmatullahi wa barakatuh.

Yogyakarta, 12 Agustus 2025

DAFTAR PUSTAKA

- Adeli, M., Yamini, Y., & Faraji, M. (2017). Removal of copper, nickel and zinc by sodium dodecyl sulphate coated magnetite nanoparticles from water and wastewater samples. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S514-S521. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2012.10.012>
- Ahn, C. K., Park, D., Woo, S. H., & Park, J. M. (2009). Removal of cationic heavy metal from aqueous solution by activated carbon impregnated with anionic surfactants. *Journal of Hazardous Materials*, 164(2–3), 1130-1136. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.036>
- Alam, Q., Hendrix, Y., Thijs, L., Lazaro, A., Schollbach, K., & Brouwers, H. J. H. (2019). Novel low temperature synthesis of sodium silicate and ordered mesoporous silica from incineration bottom ash. *Journal of Cleaner Production*, 211, 874-883. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.173>
- Al-Dailami, A., Ahmad, I., Kamyab, H., Abdullah, N., Koji, I., Ashokkumar, V., & Zabara, B. (2022). Sustainable solid waste management in Yemen: environmental, social aspects, and challenges. In *Biomass Conversion and Biorefinery*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02871-w>
- Anonim. (2021). *Peraturan Pemerintah RI Nomor 22 Tahun 2021*.
- Aprilita, N. H., Luqman, M., & Suratman, A. (2022). Dithizone Immobilized Nickel Slag For The Adsorption Of Silver(I) Ion. *Rasayan Journal of Chemistry*, 15(2), 1071–1079. <https://doi.org/10.31788/RJC.2022.1526793>
- Aprilita, N. H., Luqman, M., & Suratman, A. (2023). Removal of cobalt (II) by dithizone-immobilized nickel slag. *Results in Chemistry*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100698>
- Asokbunyarat, V., Van Hullebusch, E. D., Lens, P. N. L., & Annachhatre, A. P. (2015). Coal bottom ash as sorbing material for Fe(II), Cu(II), Mn(II), and Zn(II) removal from aqueous

- solutions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 226(5).
<https://doi.org/10.1007/s11270-015-2415-5>
- Babel, S., & Kurniawan, T. A. (2003). Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 97(1–3), 219–243.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00263-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00263-7)
- Bartzas, G., Tsakiridis, P. E., & Komnitsas, K. (2021). Nickel industry: Heavy metal(loid)s contamination - sources, environmental impacts and recent advances on waste valorization. In *Current Opinion in Environmental Science and Health* (Vol. 21). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100253>
- Bertolini, T. C. R., Fungaro, D. A., Izidoro, J. C., Magdalena, C. P., & Fungaro, D. A. (2013). *Article in Orbital-The Electronic Journal of Chemistry*. <https://doi.org/10.17807/orbital.v5i3.488>
- Choi, Y. C., & Choi, S. (2015). Alkali-silica reactivity of cementitious materials using ferro-nickel slag fine aggregates produced in different cooling conditions. *Construction and Building Materials*, 99, 279–287.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.039>
- Dinçer, A. R., Güneş, Y., Karakaya, N., & Güneş, E. (2007). Comparison of activated carbon and bottom ash for removal of reactive dye from aqueous solution. *Bioresource Technology*, 98(4), 834–839. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.03.009>
- Genc, A., & Oguz, A. (2010). Sorption of acid dyes from aqueous solution by using non-ground ash and slag. *Desalination*, 264(1–2), 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.07.007>
- Gollakota, A. R. K., Munagapati, V. S., Volli, V., Gautam, S., Wen, J. C., & Shu, C. M. (2021). Coal bottom ash derived zeolite (SSZ 13) for the sorption of synthetic anion Alizarin Red S (ARS) dye. *Journal of Hazardous Materials*, 416. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125925>
- Gupta, V. K., Ali, I., Saini, V. K., Van Gerven, T., Van Bruggen, B. Der, & Vandecasteele, C. (2005). Removal of dyes from wastewater using bottom ash. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44(10), 3655–3664.
<https://doi.org/10.1021/ie0500220>

- Gupta, V. K., Mittal, A., Gajbe, V., & Mittal, J. (2006). Removal and recovery of the hazardous azo dye acid orange 7 through adsorption over waste materials: Bottom ash and de-oiled soya. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 45(4), 1446-1453. <https://doi.org/10.1021/ie051111f>
- Huda, B. N., Wahyuni, E. T., & Mudasir, M. (2021). Eco-friendly immobilization of dithizone on coal bottom ash for the adsorption of lead (II) ion from water. *Results in Engineering*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100221>
- Jarusiripot, C. (2014). Removal of Reactive Dye by Adsorption over Chemical Pretreatment Coal based Bottom Ash. *Procedia Chemistry*, 9, 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2014.05.015>
- Kamal, N. L. M., Beddu, S., Syamsir, A., Mohammad, D., Itam, Z., Hamid, Z. A. A., & Manan, T. S. A (2019). Immobilization of Heavy Metals for Building Materials in the Construction Industry-an Overview. *In Materials Today: Proceedings* (Vol.17). www.sciencedirect.com
www.materialstoday.com/proceedings2214-7853
- Luqman, M., 2021, *Limbah Slag Nikel Terimobilisasi Ditizon Sebagai Adsorben Ion Ag(I) dan Co(II)*, Tesis
- Mittal, A., Mittal, J., Malviya, A., Kaur, D., & Gupta, V. K. (2010). Adsorption of hazardous dye crystal violet from wastewater by waste materials. *Journal of Colloid and Interface Science*, 343(2), 463-473. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.11.060>
- Mudasir, M., Karelius, K., Aprilita, N. H., & Wahyuni, E. T. (2016). Adsorption of mercury(II) on dithizone-immobilized natural zeolite. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(2). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.03.016>
- Patria Gupta, B. (2019). *Tambang Nikel Di Pegunungan*. https://kompaspedia.kompas.id/baca/paparan-topik/industri-nikel-indonesia-sejarah-produksi-kebijakan-dan-tantangan?track_source=kompaspe
- Rathnayake, M., Julnipitawong, P., Tangtermsirikul, S., & Toochinda, P. (2018). Utilization of coal fly ash and bottom ash as solid sorbents for sulfur dioxide reduction from coal fired power

- plant: Life cycle assessment and applications. *Journal of Cleaner Production*, 202, 934-945. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.204>
- Shen, Y. F., Xue, W. Y., Li, W., & Tang, Y. L. (2008). Selective recovery of nickel and cobalt from cobalt-enriched Ni-Cu matte by two-stage counter-current leaching. *Separation and Purification Technology*, 60(2), 113-119. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.08.010>
- Soliman, N. K., & Moustafa, A. F. (2020). Industrial solid waste for heavy metals adsorption features and challenges; a review. In *Journal of Materials Research and Technology* (Vol. 9, Issue 5, pp. 10235-10253). Elsevier Editora Ltda. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.045>
- Wahyuni, N. L. E., Soeswanto, B., Akmal, H., & Puspita, N. (2018). Effect of particle size distribution and acid treated coal bottom ash on TSS and COD removal from textile effluent using fixed bed column. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 160(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/160/1/012015>
- Wang, Z. J., Ni, W., Jia, Y., Zhu, L. P., & Huang, X. Y. (2010). Crystallization behavior of glass ceramics prepared from the mixture of nickel slag, blast furnace slag and quartz sand. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 356(31-32), 1554-1558. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2010.05.063>
- Wu, Q., Wu, Y., Tong, W., & Ma, H. (2018). Utilization of nickel slag as raw material in the production of Portland cement for road construction. *Construction and Building Materials*, 193, 426-434. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.109>
- Wu, Q., & Zhao, S. (2021). Determinants of consumers' willingness to buy counterfeit luxury products: An empirical test of linear and inverted u-shaped relationship. *Sustainability (Switzerland)*, 13(3), 1-19. <https://doi.org/10.3390/su13031194>
- Yang, T., Yao, X., & Zhang, Z. (2014). Geopolymer prepared with high-magnesium nickel slag: Characterization of properties and microstructure. *Construction and Building Materials*, 59, 188-194. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.038>

Yildirim, M., Mermer, N. K., Demir, F., & Derun, E. M. (2017). Removal Of As (V) By Using Bottom Ash As Adsorbent. *CBU International Conference Proceedings*, 5, 1259–1265. <https://doi.org/10.12955/cbup.v5.1106>