

Keterkaitan antara Kadar Silikon dan Aluminium dari Kandungan Debu Tanah Hasil Perlakuan Basa atau Asam dalam Kemampuannya Mengadsorpsi Biru Metilen

Correlation between Silicon and Aluminum Content from the Soil Dust Resulting from Alkaline and Acid Treatment in Their Ability to Adsorb Methylene Blue

Dede Suhendar^{1*}, Fresa Agustini²

^{1,2}Program Studi Kimia, UIN Sunan Gunung Djati, Bandung

Email: ¹dede.suhendar@uinsgd.ac.id, ²fresa8732@gmail.com

*Penulis korespondensi: dede.suhendar@uinsgd.ac.id

Direview: 17 September 2023

Diterima: 8 Oktober 2023

ABSTRAK

Debu tanah merupakan objek paling sulit ditemukan pemanfaatannya, padahal ia kaya dengan senyawa-senyawa silikat dan aluminosilikat, yang telah dikenal secara luas sebagai adsorben. Karakteristik fisika dan kimia senyawa-senyawa yang pembentuk kerangka utamanya adalah oksida silikon dan aluminium dalam bahan biasanya dihubungkan dengan rasio mol Si/Al-nya. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh perubahan kadar silikon, aluminium, dan unsur-unsur terkait dalam debu tanah hasil perlakuan basa atau asam (DTBA) dalam mengadsorpsi metilena biru (MB). Perbedaan komposisi unsur-unsur dalam DTBA ini dinyatakan dalam kuantitas-kuantitas rasio mol silikon terhadap aluminium, $(Si/Al)_{mol}$, rasio mol silikon terhadap jumlah mol aluminium dan besi, $(Si/(Al+Fe))_{mol}$, rasio mol silikon terhadap jumlah mol aluminium, besi, dan kalsium, $(Si/(Al+Fe+Ca))_{mol}$, dan selisih mol silikon terhadap aluminium, $(Si-Al)_{mol}$. Kuantitas-kuantitas dalam mol tersebut juga diujicoba dengan menggunakan persentase kadar unsur-unsur yang dimaksud, $(Si/Al)_{kadar}$, $(Si/(Al+Fe))_{kadar}$, $(Si/(Al+Fe+Ca))_{kadar}$, dan $(Si-Al)_{kadar}$. Melalui regresi linear maupun nonlinear, pengaluran konsentrasi MB yang teradsorpsi terhadap $(Si-Al)_{kadar}$ memiliki koefisien determinasi terbaik (linear, $R^2 = 0,9767$), lebih baik daripada $(Si/Al)_{mol}$ (polinom 2, $R^2 = 0,5177$), $(Si/(Al+Fe))_{mol}$ (polinom 2, $R^2 = 0,7940$), dan $(Si/(Al+Fe+Ca))_{mol}$ (linear, $R^2 = 0,7996$) ataupun yang sama-sama berbasis kadar, $(Si/Al)_{kadar}$ (polinom 2, $R^2 = 0,9105$), $(Si/(Al+Fe))_{kadar}$ (polinom 2, $R^2 = 0,6649$), dan $(Si/(Al+Fe+Ca))_{kadar}$ (polinom 2, $R^2 = 0,5601$). Dari sejumlah optimasi, adsorpsi MB pada DTBA mendekati model adsorpsi isoterm Langmuir dan Redlich-Peterson yang menggambarkan terdapat satu lapisan adsorbat MB pada permukaan DTBA. Dengan hasil ini, debu tanah hasil perlakuan basa atau asam dapat mengadsorpsi MB pada permukaannya paling ditentukan oleh selisih persentase kadar silikon terhadap aluminium.

Kata kunci: adsorben, aluminosilikat, debu tanah, metilena biru, selisih persentase kadar Si-Al.

ABSTRACT

Soil dust is the most difficult object of research to find in applications, even though it is rich in silica, silicate, and aluminosilicate compounds, which are widely known as adsorbents. The physical and chemical characteristics of compounds in which the main framework is the oxides of silicon and aluminium in the material are usually related to their Si/Al mole ratio. This study aims to study the effect of changes in the levels of silicon, aluminium, and related elements in alkaline or acid-treated soil dust (DTBA) in adsorbing methylene blue (MB). The difference in the composition of the elements in DTBA is expressed in terms of the mole ratios of silicon to aluminium, $(Si/Al)_{mole}$, the ratio of moles of silicon to the number of moles of aluminium and iron, $(Si/(Al+Fe))_{mole}$, the ratio of moles of silicon to

the number of moles of aluminum, iron, and calcium, $(Si/(Al+Fe+Ca))_{mole}$, and the mole difference of silicon to aluminum, $(Si-Al)_{mole}$. The quantities in moles were also tested using the levels of these elements: $(Si/Al)_{weight}$, $(Si/(Al+Fe))_{weight}$, $(Si/(Al+Fe+Ca))_{weight}$, and $(Si-Al)_{weight}$. Through linear and non-linear regression (2nd order polynomial), plotting of the concentration of adsorbed MB to $(Si-Al)_{weight}$ had the highest correlation coefficient ($R^2 = 0.9767$), better than $(Si/Al)_{mole}$ (polynomial 2, $R^2 = 0.5177$), $(Si/(Al+Fe))_{mole}$ (polynomial 2, $R^2 = 0.7940$), and $(Si/(Al+Fe+Ca))_{mole}$ (linear, $R^2 = 0.7996$) or the same based on percentage of weight, $(Si/Al)_{weight}$ (polynomial 2, $R^2 = 0.9105$), $(Si/(Al+Fe))_{weight}$ (polynomial 2, $R^2 = 0.6649$), and $(Si/(Al+Fe+Ca))_{weight}$ (polynomial 2, $R^2 = 0.5601$). From a number of optimizations, the adsorption of MB on DTBA was close to the Langmuir and Redlich-Peterson isotherm adsorption model, which describes that there was one layer of MB adsorbate on the surface of DTBA. With this result, soil dust resulting from alkaline or acid treatment can adsorb MB on its surface, which is determined most by the difference in the weight of silicon to aluminum.

Keywords: adsorbent, aluminosilicates, soil dust, methylene blue, Si-Al weight different.

1. PENDAHULUAN

Debu tanah merupakan satu-satunya objek yang paling sulit ditemukan penelitiannya dalam potensinya sebagai adsorben. Alih-alih diteliti sebagai adsorben, debu tanah lebih banyak disorot memiliki hubungan erat dengan adanya polusi udara (Begum *et al.*, 2011; Sing & Sing, 2010). Berbeda halnya dengan mineral-mineral tanah liat maupun zeolit, keduanya sudah tidak diragukan lagi aplikasinya sebagai adsorben (Subhi *et al.*, 2022). Jenis-jenis debu atau yang memiliki karakteristik debu selain debu tanah sudah banyak diteliti walaupun masih terbatas dalam ruang lingkup penambahan pembendaharaan ilmiah (Khan *et al.*, 2016; Setyono & Valiyaveettil, 2014).

Daya adsorpsi bahan yang mengandung aluminosilikat memiliki kecenderungan dihubungkan dengan kadar silikon dan aluminiumnya yang dinyatakan dalam rasio mol Si/Al (Elsheikh *et al.*, 2010; Chibani *et al.*, 2016; Dashti & Al-Bazaz, 1995; Kodaira & Ikeda, 2010; Liu *et al.*, 2013; Munthali *et al.*, 2014; Sharma *et al.*, 2016; Shirazi *et al.*, 2008; Talesh *et al.*, 2010; Zheng *et al.*, 2010). Pengaruh unsur lain dapat dimasukkan, seperti Fe dalam bentuk rasio mol Si/(Al+Fe) pada tiga sampel adsorben, yakni kaolinit, bentonit, dan tanah merah (oxisol) (Shen, 2000). Temuan Shen ini menarik untuk diujicoba lebih lanjut karena tanah merah didominasi oksida-oksida Si, Al, dan Fe. Satu unsur yang masih luput dari perhatian Shen adalah Ca, padahal Ca masih tinggi kelimpahannya dalam tanah (Sposito, 2008), namun masih sulit menentukan peranannya secara langsung dalam sifat tanah sebagai adsorben.

Karakteristik bahan adsorben silikat-aluminosilikat-silika yang dikandung debu tanah yang dihubungkan dengan selisih kandungan unsur silikon terhadap aluminium, Si-Al, belum pernah dipertimbangkan sebelumnya oleh para peneliti bahan. Cara optimasi komposisi Si dan Al ini sudah banyak dilakukan untuk kasus-kasus mineral lain, terutama zeolit, dengan merekayasa rasio mol Si/Al melalui metode desilikasi atau dealuminasi dengan menggunakan basa atau asam (Silaghi *et al.*, 2014). Penerapan kedua metode ini akan membawa kepada perubahan komposisi dua unsur utama lainnya selain Si dan Al, yakni Fe dan Ca, sehingga kehadiran keduanya menjadi bagian dari fungsi pengurangan Si atau Al. Pengurangan kadar Si atau Al dari campuran silikat-aluminosilikat-silika seperti pada debu tanah pada akhirnya akan membawa kepada perubahan rasio mol Si/Al ataupun selisih mol Si-Al-nya, sehingga diprediksi akan menghasilkan variasi kemampuan debu tanah jika akan diaplikasikan sebagai adsorben.

Salah satu model uji kemampuan adsorben yang cukup banyak digunakan adalah dengan menggunakan adsorbat larutan metilena biru (MB), seperti terhadap zeolit (Dehghani *et al.*, 2017; Fungaro *et al.*, 2009; Ioannou *et al.*, 2013; Richards & Pope, 1996; Rida *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2010), kaolin (Rida *et al.*, 2013), karbon aktif (Pathania *et al.*, 2017; Potgieter, 1991), dan limbah-limbah hasil pertanian (Adegoke & Bello, 2015; Bharathi & Ramesh, 2013; Etim *et al.*, 2016; Postai *et al.*, 2016). Tidaklah mengherankan jika zeolit mendominasi kasus-kasus penelitian adsorpsi, karena zeolit sudah dikenal cukup luas sebagai adsorben. Zeolit memiliki kandungan unsur silikon dan aluminium dengan rentang rasio mol Si/Al = 1 sampai tak hingga (Li *et al.*, 2022), suatu rentang kimiawi yang sama dengan mineral-mineral utama di kulit bumi.

Berdasarkan latar belakang di atas, penelitian ini bertujuan untuk menggali lebih lanjut hubungan kuantitas antar unsur dalam debu tanah yang telah diubah komposisi unsur-unsur utamanya terhadap kemampuan adsorpsinya dengan menggunakan metilena biru sebagai representasi adsorbatnya. Adapun

debu tanah yang akan diteliti adalah debu tanah yang biasa ditemukan sehari-hari namun tidak banyak mendapatkan perhatian, seperti dari lantai bangunan, halaman rumah, dan tempat parkir umum.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Sampel Debu Tanah dan Preparasinya

Sampel debu tanah diambil dari empat tempat yang berbeda dalam wilayah administratif Kecamatan Ibum dan Kecamatan Majalaya, Kabupaten Bandung, Jawa Barat, yang terdiri atas debu tanah dari lantai dan halaman rumah penduduk, debu tanah dari lantai masjid, debu tanah dari lantai dan halaman sekolah, dan debu tanah lantai toko kain. Peta kedua kecamatan ini dapat dilihat pada **Gambar-1**. Preparasi dilakukan dengan cara kotorannya (selain debu tanah) dipisahkan terlebih dahulu menggunakan ayakan 100 mesh, selanjutnya masing-masing debu tanah tersebut dibersihkan dengan akua demineralisasi (akua dm) dengan cara direndam di dalamnya dan diaduk pada 700 rpm selama 1 jam. Debu tanah dibiarkan hingga mengendap, filtrat dibuang dan ditambahkan akua dm (dengan perbandingan yang setara dengan 1 g debu tanah : 2 mL akua dm) untuk dilakukan pembilasan sebanyak tiga kali. Masing-masing debu tanah disaring, kemudian dikeringkan pada suhu 120 °C selama 24 jam. Selanjutnya debu tanah didiamkan pada suhu ruang, dihaluskan menggunakan mortar, diayak menggunakan ayakan 100 mesh dan dikeringkan kembali pada suhu 120 °C selama 24 jam. Selanjutnya padatan debu tanah didiamkan di ruang terbuka hingga mencapai suhu ruang. Empat sampel debu tanah yang telah dikeringkan disatukan dengan berat masing-masing 100 gram. Sampel ini selanjutnya dijadikan bahan induk (BI) untuk perlakuan pengubahan kadar Si dengan perlakuan basa dan AI dengan perlakuan asam.



Gambar-1. Empat titik (diberi tanda warna hitam bulat) lokasi *sampling* debu tanah

2.2 Pengubahan Kadar Silikon dan Aluminium

Sampel debu tanah BI dibagi menjadi 3 bagian, yakni untuk perlakuan dengan basa (DTB), untuk perlakuan dengan asam (DTA), dan tanpa perlakuan (DTP). Untuk sampel DTB, debu tanah direndam dalam larutan NaOH dengan variasi konsentrasi 0,1, 0,2, dan 0,3 N, sedangkan untuk sampel DTA dalam larutan HCl dengan variasi konsentrasi 0,1, 0,2, dan 0,3 N, untuk menghasilkan volume total campuran masing-masing 200 mL. Masing-masing campuran diaduk lambat (60 rpm) semalaman kemudian dibiarkan terbentuk endapan. Endapan disaring dan dicuci beberapa kali dengan akua dm sampai air cucuannya memiliki pH yang tetap (sekitar 6,5 – 7,5), kemudian dikeringkan pada oven pada suhu 120 °C selama 24 jam. Masing-masing padatan selanjutnya didinginkan pada suhu ruang dan dihaluskan menggunakan mortar. Secara berturut-turut sampel hasil perlakuan basa diberi kode DTB01, DTB02, dan DTB03, dan hasil perlakuan asam diberi kode DTA01, DTA02, dan DTA03, sesuai dengan urutan variasi konsentrasi larutan NaOH dan HCl-nya yang telah digunakan.

2.3 Percobaan Adsorpsi Metilena Biru

Sampel-sampel DTP, DTB, dan DTA ditimbang sebanyak 0,05 g dan dicampurkan dengan 10 mL larutan MB 100 bpj dalam tabung valkon. Campuran tersebut selanjutnya diaduk selama 2 menit dan

disentrifugasi pada kecepatan 4000 rpm selama 5 menit. Selanjutnya, terhadap campuran dilakukan dekantasi dan filtrat yang diperoleh diukur serapan MB-nya dengan menggunakan spektrofotometer sinar tampak. Adapun kurva baku konsentrasi larutan MB dibuat pada variasi konsentrasi 1, 2, 3, 4, dan 5 bpj dan diperiksa absorbansinya pada λ_{maks} -nya untuk menghasilkan persamaan linear yang akan dipakai untuk penetapan konsentrasi MB sebelum dan setelah perlakuan adsorpsi oleh sampel DTP, DTB01, DTB02, DTB03, DTA01, DTA02, dan DTA03. Sampel-sampel selain DTP selanjutnya dikelompokkan sebagai sampel-sampel debu tanah yang telah diberi perlakuan larutan basa atau asam (DTBA).

2.4 Optimasi-optimasi Adsorpsi dan Penentuan Model Adsorpsi

Penentuan kondisi optimum adsorpsi dilakukan untuk waktu kontak, massa adsorben, dan konsentrasi adsorbat. Penentuan kondisi optimum dilakukan pada sampel debu tanah di antara DTP dan DTBA yang memiliki daya adsorpsi paling tinggi terhadap larutan MB berdasarkan persentase efisiensi adsorpsi atau kapasitas adsorpsi.

Penentuan waktu kontak optimum menggunakan sampel yang mengadsorpsi MB terbanyak di antara DTP dan sampel-sampel DTBA pada percobaan sebelumnya, dilakukan sebanyak 6 kali dalam variasi waktu yang berbeda 1 – 6 menit. Penentuan massa adsorben optimum dilakukan dengan cara yang sama, kecuali variasinya dalam massa DTP atau DTBA dalam rentang 0,01 – 0,07 g dan digunakan waktu optimum yang telah diperoleh. Penentuan konsentrasi optimum adsorbat dilakukan menggunakan variasi konsentrasi MB dalam rentang 100 – 350 bpj dalam waktu optimum dan konsentrasi adsorben optimum. Data massa adsorben dan konsentrasi MB sebelum dan setelah kontak dengan adsorben selanjutnya dianalisis dan direkapitulasi untuk memperoleh kuantitas-kuantitas yang diperlukan untuk mengkonfirmasi model isotherm adsorpsinya.

2.5 Karakterisasi dan Analisis Kuantitatif

Karakterisasi fasa yang ada dalam sampel induk (BI) atau tanpa perlakuan (DTP) dan masing-masing 1 hasil perlakuan larutan basa atau asamnya (DTBA) ditentukan dengan menggunakan metode difraksi sinar-X (Shimadzu XRD-7000 Maxima). Analisis unsur sampel DTP dan DTBA ditentukan dengan metode fluoresensi sinar-X (Rigaku Supermini 200). Analisis kadar dan perubahan kadar MB pada percobaan-percobaan adsorpsi dilakukan dengan metode spektrofotometri sinar tampak pada $\lambda_{maks} = 664 \text{ nm}$ (Agilent Cary 60 UV-Vis Spectrophotometer).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Unsur dan Fasa Mineral Hasil Perlakuan Debu Tanah

Sampel campuran debu tanah dalam penelitian ini mengandung unsur-unsur yang persentasenya di luar oksigen didominasi secara berturut-turut oleh silikon, kalsium, besi dan aluminium, sebagaimana yang disajikan pada Tabel-1. Pada Tabel-1 juga disajikan hasil perlakuannya dengan larutan NaOH dan HCl masing-masing 0,1 – 0,3 N. Berdasarkan hasil analisis pola difraksi sinar-X (Gambar-2), mayoritas fasa yang terdeteksi berada dalam senyawa-senyawa oksidanya (SiO_2 sebagai kuarsa dan kristobalit, Fe_2O_3 sebagai hematit) atau oksida rangkap (oksida rangkap Si dan Al sebagai albit dan anortit), kecuali untuk kalsium. Kalsium juga terdeteksi cukup jelas sebagai kalsit (CaCO_3), sedikit terdeteksi sebagai anortit, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$. Selain sebagai silika dan aluminosilikat, Si juga terdeteksi sebagai silikat, antigorit, $\text{M}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ ($\text{M} = \text{Mg}^{2+}$ atau Fe^{2+}).

Berdasarkan Tabel-1, keadaan basa lebih disukai untuk menurunkan kadar Si daripada keadaan asam, terutama pada konsentrasi NaOH yang paling rendah (0,1 N). Namun demikian, pada konsentrasi NaOH yang paling rendah ini juga lebih banyak lagi menurunkan kadar Al. Menurunnya kadar Al ini diumungkankan berasal dari banyak terlarutnya Si dari kerangka aluminosilikat ditambah melarutnya Al membentuk kompleks ion tetrahidroksaluminat, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$. Dua fasa aluminosilikat yang terdeteksi dalam debu tanah antara lain, albit dan anortit.

Penurunan kadar Fe oleh perlakuan basa merupakan hal yang tidak biasa. Fe yang turun kadarnya diprediksi berasal dari fasa antigorit, $\text{Fe}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$, bukan dari hematit, Fe_2O_3 . Silikat dari antigorit, $\text{Si}_2\text{O}_5^{2-}$, sama seperti silikat lainnya, merupakan polimer yang mudah larut dalam kondisi basa menjadi satuan-satuan silikat yang lebih pendek (Schott & Oelkers, 1995), sehingga Fe^{2+} yang menjadi penyeimbang muatan silikat dan hidroksida menjadi mudah terlepas.

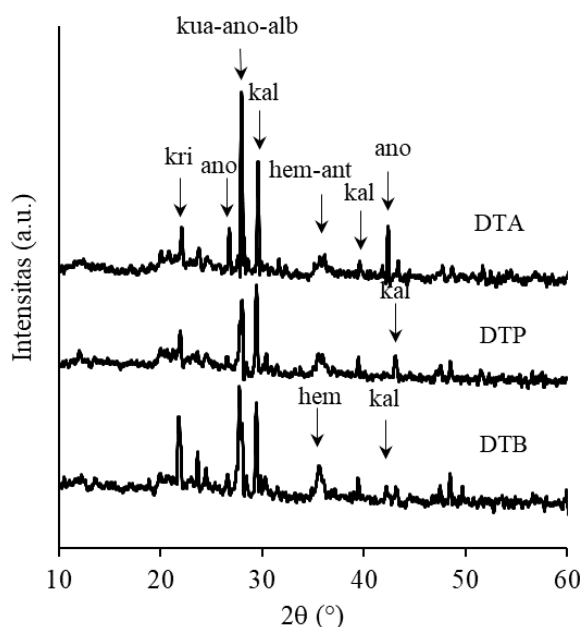
Perlakuan dengan larutan asam tidak menyebabkan turunnya kadar Al, namun menurunkan kadar Ca. Kesulitan terlarutnya Al belum dapat dikonfirmasi pada penelitian ini, sementara penurunan kadar Ca dapat

diketahui disumbangkan dari melarutnya mineral kalsit (CaCO_3) yang ditandai menurunnya puncak-puncak difraksi sinar-X dari kalsit.

Tabel-1. Hasil analisis kadar (% b/b) unsur-unsur dalam sampel debu tanah dan hasil perlakuan dengan asam dan basa

Unsur ¹	Sampel ²						
	DTB03	DTBS02	DTB01	DTP	DTA01	DTA02	DTA03
Al	15,2	14,9	12,0	15,5	16,8	17,5	16,9
Si	32,7	32,9	27,0	32,0	31,1	32,7	33,8
Ca	25,2	24,5	25,6	23,4	23,6	21,7	19,2
Fe	19,1	20,2	28,0	21,8	21,3	21,2	22,9
Unsur- unsur sisa ²	6,5	7,5	7,8	7,2	6,9	7,2	7,3

Keterangan: ¹Unsur-unsur dominan yang terdeteksi kadarnya tanpa oksigen dengan metode XRF; ² Unsur-unsur yang kadarnya masing-masing dalam rentang 1 - 2%, terdiri atas Ti dan K, sisanya masing-masing kurang dari 1%, yang terdiri atas Mg, Na, S, Cl, P, Mn, Cu, Zn, Sr, Zr, Rh, dan W.



Gambar-2. Pola difraktogram sinar-X dari sampel campuran debu tanah tanpa perlakuan (DTP), setelah perlakuan larutan basa (direpresentasikan DTB03) dan asam (direpresentasikan oleh DTA03) yang menunjukkan kandungan fasa kristobalit (kri), kuarsa (kua), anortit (ano), albit (alb), kalsit (kal), hematit (hem), dan antigorit (ant).

3.2 Hubungan Kemampuan Mengadsorpsi Zat Warna Metilen Biru dengan Komposisi Unsur-unsur Debu Tanah

Sebagaimana terlihat pada Tabel-1, massa total unsur-unsur dalam debu tanah selain oksigen didominasi oleh Si, Al, Ca, dan Fe. Walaupun Ca merupakan salah satu unsur yang dominan, senyawa-senyawa Ca relatif lebih mudah larut dalam tanah melalui tukar-menukar kation daripada senyawa-senyawa Si, Al, dan Fe. Bagaimanapun juga studi-studi mengenai hubungan komposisi unsur dari bahan-bahan padatan yang didominasi silika dan aluminosilikat sampai saat ini masih berkisar pada pengaruh kadar Si dan Al yang pengaruhnya dinyatakan dalam rasio mol Si/Al (Abdalla Elsheikh et al., 2010; Chibani et al., 2016; Dashti & Al-Bazaz, 1995; Kodaira & Ikeda, 2010; Liu et al., 2013; Munthali et al., 2014; Sharma et al., 2016; Shirazi et al., 2008; Talesh et al., 2010; Zheng et al., 2010). Adapun yang menyangkut bahan campuran fasa seperti tanah, sampai saat ini belum dipahami. Shen (2000) melakukan studi hubungan yang bukan hanya melibatkan Si dan Al, namun juga Fe (Shen 2000).

Dengan adanya dua pendekatan pernyataan kuantitas unsur yang berpengaruh pada kemampuan adsorpsi di atas, kami perlu melihat keberlakuan keduanya dalam kasus penelitian ini. Satu bentuk

pernyataan pengaruh kuantitas Si dan Al yang belum pernah diujicoba adalah sebagai selisih mol Si-Al dan yang melibatkan keberadaan Ca. Hasil rekapitulasi beserta korelasi hubungannya dengan kemampuan adsorpsinya terhadap MB disajikan pada Tabel-2. Berdasarkan Tabel-2, penggunaan satuan mol untuk kuantitas unsur-unsur tidak menghasilkan korelasi yang baik. Dengan demikian karakteristik adsorben dengan menggunakan rasio mol Si/Al maupun Si/(Al+Fe) dalam kasus penelitian ini tidak memuaskan.

Selanjutnya, kita dapat melihat perubahan koefisien determinasi yang lebih memuaskan jika Si-Al dinyatakan sebagai selisih dari persentase kadar dengan menggunakan data pada Tabel-1. Pengaluran konsentrasi MB yang teradsorpsi terhadap selisih kadar Si-Al ini menghasilkan regresi linear dengan $R^2 = 0,9294$ yang melibatkan sampel DTP. Linearitas hubungan ini makin meningkat jika sampel DTP tidak dilibatkan, menghasilkan $R^2 = 0,9767$. Perbandingan bentuk-bentuk regresi dan koefisien determinasinya dengan pernyataan-pernyataan kuantitas lainnya yang terpilih yang berbasis kadar unsur ini selanjutnya dapat dilihat pada Gambar-3.

Dapat dilihat dari Gambar-3 bahwa regresi yang terbaik antara MB teradsorpsi dengan pernyataan kuantitas unsur-unsur adalah yang menggunakan selisih kadar Si-Al, $(Si-Al)_{kadar}$. Hal ini merupakan temuan baru dalam masalah pemahaman sifat adsorpsi campuran mineral. Penggunaan rasio kadar silikon terhadap kadar aluminium, $(Si/Al)_{kadar}$ justru lebih baik nilai R^2 -nya daripada penggunaan rasio mol-nya, $(Si/Al)_{mol}$. Jika mengikuti keteraturan perlakuan, regresi dapat dipertimbangkan tanpa melibatkan sampel DTP yang hasilnya dicantumkan pada Tabel-3. Berdasarkan tabel tersebut, penggunaan $(Si-Al)_{kadar}$ ($R^2 = 0,9767$) lebih baik daripada $(Si/Al)_{kadar}$ ($R^2 = 0,9105$), $(Si/(Al+Fe+Ca))_{mol}$ ($R^2 = 0,7996$), $(Si/(Al+Fe))_{mol}$ ($R^2 = 0,7940$), $(Si/(Al+Fe))_{kadar}$ ($R^2 = 0,6649$), $(Si/(Al+Fe+Ca))_{kadar}$ ($R^2 = 0,5601$), $(Si/Al)_{mol}$ ($R^2 = 0,5177$).

Tabel-2. Pernyataan kuantitas kimia mol unsur-unsur Si, Al, Fe, dan Ca dalam debu tanah asal, hasil perlakuannya dengan basa, dan hasil perlakuannya dengan asam, dan koefisien determinasi hubungan antara konsentrasi MB terhadap kuantitas-kuantitas kimia unsur-unsur.

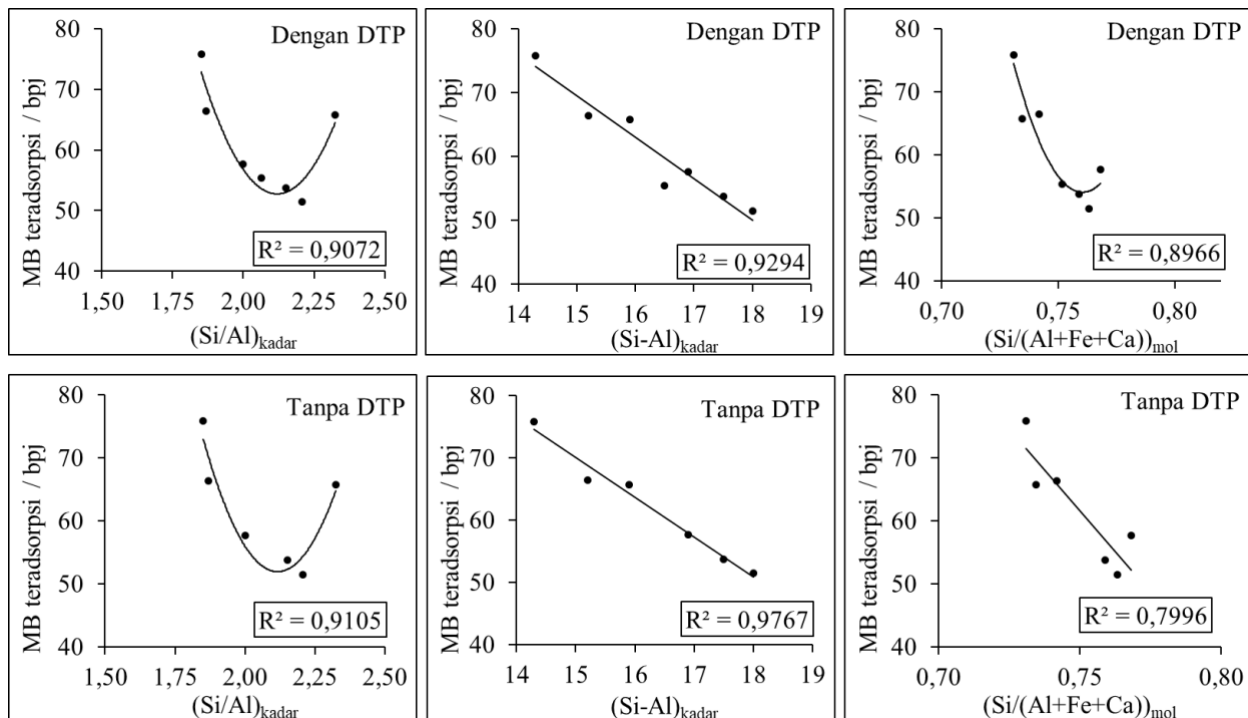
Pernyataan kuantitas kimia ¹	Sampel ²								Koefisien determinasi (R^2)	Regresi ³
	DTB03	DTB02	DTBS01	DTP	DTA01	DTA02	DTA03			
Si/Al	2,067	2,121	2,234	1,983	1,778	1,795	1,9214	0,5548	Polinom 2	
Si/(Al+Fe)	1,286	1,282	1,050	1,181	1,103	1,132	1,1612	0,3130	Linear	
Si - Al	0,601	0,619	0,549	0,565	0,485	0,516	0,5771	0,5195	Polinom 2	
Si/(Al+Ca+Fe)	0,759	0,763	0,735	0,731	0,742	0,768	0,759	0,8966	Polinom 2	
MB (bpj)	53,738	51,414	65,746	55,369	75,828	66,400	57,615			

Keterangan: ¹Kuantitas kandungan unsur dalam sampel yang dinyatakan dalam rasio mol antar unsur, rasio mol antar jumlah unsur, dan selisih mol antar unsur yang dilibatkan di antara Si, Al, Fe, dan Ca serta kuantitas metilena biru (MB) yang teradsorpsi; ² 0,05 g sampel yang dikontakkan dalam 10 mL larutan MB 100 bpj; ³ Pilihan regresi terbaik antara MB teradsorpsi dengan pernyataan kuantitas kimia unsur-unsur.

Dengan memperhatikan regresi-regresi pada Tabel-3, selisih persentase kadar Si-Al memiliki nilai prediktif yang lebih baik daripada cara pernyataan kuantitas unsur-unsur lainnya dalam kasus campuran fasa mineral-mineral dalam penelitian ini. Selain itu, penggunaan regresi linear yang berlaku pada $(Si-Al)_{kadar}$ sangat menguntungkan karena bentuk regresi ini lebih mudah penggunaannya dan merupakan regresi paling sederhana dalam memahami hubungan variabel terikat dengan variabel bebas. Seperti diketahui bahwa debu tanah sebagai bahan yang tidak terpakai lagi masih minim dalam penelitian sifat adsorpsinya, sehingga hasil penelitian ini memiliki potensi dapat dikembangkan untuk aplikasi debu tanah sebagai adsorben namun dengan tingkat prediksi terbaik.

Tabel-3. Perbandingan koefisien determinasi (R^2) dari MB teradsorpsi terhadap pernyataan-pernyataan kuantitas unsur-unsur debu tanah antara yang berbasis mol dengan kadar.

Berbasis mol			Berbasis kadar (persentase berat)		
Pernyataan kuantitas	Regresi	R^2	Pernyataan kuantitas	Regresi	R^2
$(Si/Al)_{mol}$	Polinom 2	0,5177	$(Si/Al)_{kadar}$	Polinom 2	0,9105
$(Si/(Al+Fe))_{mol}$	Polinom 2	0,7940	$(Si/(Al+Fe))_{kadar}$	Polinom 2	0,6649
$(Si/(Al+Fe+Ca))_{mol}$	Linear	0,7996	$(Si/(Al+Fe+Ca))_{kadar}$	Polinom 2	0,5601
$(Si-Al)_{mol}$	Polinom 2	0,4795	$(Si-Al)_{kadar}$	Linear	0,9767



Gambar-3. Hubungan MB yang teradsorpsi terhadap pernyataan-pernyataan kuantitas unsur-unsur yang terpilih yang melibatkan sampel DTP (atas) dan tanpa sampel DTP (bawah), terdiri atas rasio kadar silikon terhadap aluminium, $(Si/Al)_{kadar}$, selisih persentase kadar silikon terhadap aluminium, $(Si-Al)_{kadar}$, dan rasio mol silikon terhadap jumlah mol aluminium, besi, dan kalsium, $(Si/(Al+Fe+Ca))_{mol}$.

3.3 Optimasi Adsorpsi

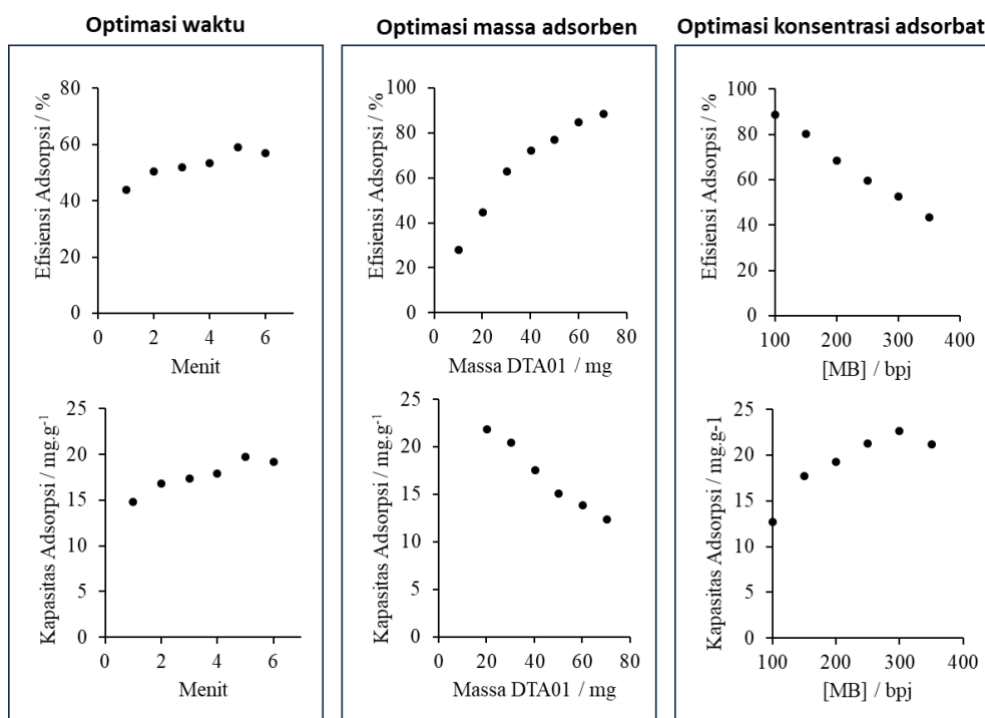
Berdasarkan hasil eksperimen adsorpsi MB (Tabel-2), diperoleh MB teradsorpsi paling banyak oleh sampel debu tanah yang diberi perlakuan asam HCl 0,1 N (DTA01). Sampel ini lebih lanjut dipakai untuk optimasi-optimasi adsorpsi yang terdiri atas optimasi waktu kontak, massa DTA01, dan konsentrasi MB yang dipakai. Hasil ketiga optimasi ini selanjutnya dapat dilihat pada Gambar-4. Berdasarkan Gambar-4, nilai-nilai optimum hanya diperoleh waktu kontak (5 menit) dan konsentrasi MB (300 bpj). Adapun untuk massa adsorben dalam rentang massa yang digunakan dalam penelitian ini tidak diperoleh nilai optimumnya. Penggunaan massa adsorben yang makin banyak meningkatkan efisiensi adsorpsi namun menurunkan kapasitas adsorpsinya. Untuk dapat melakukan optimasi konsentrasi MB ini massa adsorben yang digunakan adalah massa tertinggi dalam rentang tersebut.

3.4 Model Adsorpsi

Dalam literatur, model-model adsorpsi isoterm yang menggunakan data q_e dan C_e terdiri atas model Henry, Langmuir, Freundlich, Temkin, Elovich, dan Redlich-Peterson (Kalam et al., 2021). Dengan menggunakan data berat MB teradsorpsi per 1 g berat sampel DTA01 (q_e) dan konsentrasi MB pada kesetimbangan (C_e), beberapa bentuk rasio keduanya dan bentuk logaritma naturalnya, diperoleh hasil uji regresi linear beberapa model adsorpsi MB pada permukaan debu tanah seperti yang disajikan pada Tabel-4. Berdasarkan hasil uji yang disajikan pada tabel tersebut, adsorpsi isoterm metilena biru pada sampel DTA01 paling cocok dengan model Langmuir ($R^2 = 0,9961$) dan Redlich-Peterson ($R^2 = 0,9941$) yang bentuk kurva linearnya dapat dilihat pada Gambar-5. Diperolehnya model adsorpsinya sebagai model Langmuir cocok dengan model-model adsorpsi oleh tanah (Kothawala et al., 2008; Sposito, 1982) atau tanah liat alami (Ahrouch et al., 2019; Khan, 2020). Artinya, karakteristik mineralogi debu tanah dalam kasus penelitian ini masih memiliki kemiripan dengan mineralogi tanah secara umum.

Kecocokan dengan model adsorpsi Langmuir dan Redlich-Peterson ini menunjukkan bahwa hanya terdapat satu lapis adsorbat pada permukaan adsorben baik sistemnya homogen atau heterogen dengan rentang konsentrasi adsorbat yang lebar (Kalam et al., 2021). Namun, dengan menggunakan model Langmuir menyarankan bahwa kimiawi debu tanah harus sama, sementara berdasarkan mineraloginya merupakan campuran fasa/senyawa yang kompleks (Gambar-2). Oleh karena itu, adsorpsi MB diprediksi

paling banyak hanya pada dua jenis fasa yang sama-sama termasuk kelompok mineral geopolimer, albit dan anortit. Geoplimer sendiri merupakan aluminosilikat yang telah banyak dikembangkan sebagai adsorben (Cong & Cheng, 2021).

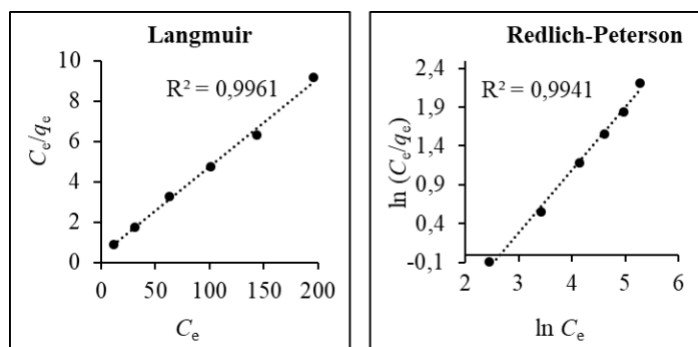


Gambar-4. Optimasi waktu kontak dengan MB (kiri), massa adsorben DTA01 (tengah), dan konsentrasi adsorbat (MB) (kanan) berdasarkan efisiensi (atas) dan kapasitas adsorpsi (bawah).

Tabel-4. Data percobaan adsorpsi isoterm MB pada debu tanah hasil perlakuan dengan asam

Data percobaan*		Uji regresi linear dari model isoterm adsorpsi			
q_e	C_e	Model isoterm	Ordinat	Absis	R^2
12,706	11,542	Henry	q_e	C_e	0,6607
17,761	30,783	Langmuir	C_e/q_e	C_e	0,9961
19,272	62,765	Freundlich	$\ln q_e$	$\ln C_e$	0,9033
21,294	101,117	Temkin	q_e	$\ln C_e$	0,9225
22,685	143,452	Elovich	$\ln (q_e/C_e)$	q_e	0,8778
21,342	195,307	Redlich-Peterson	$\ln (C_e/q_e)$	$\ln C_e$	0,9941

* q_e = berat MB teradsorpsi per 1 g berat sampel DTA01, C_e = konsentrasi MB dalam kesetimbangan (bpj). Data-data tersebut diperoleh pada volume larutan MB 100 mL dalam rentang konsentrasi 100 – 350 bpj dan berat debu tanah 70 mg.



Gambar-5. Dua model adsorpsi isoterm yang paling cocok, Langmuir dan Redlich-Peterson, untuk adsorpsi MB pada representasi sampel debu tanah hasil perlakuan asam

4. KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa debu tanah memiliki daya adsorpsi terhadap metilena biru yang secara sederhana dapat dihubungkan dengan perubahan kadar unsur Si dan Al. Hubungan tersebut cenderung paling cocok pada selisih persentase kadar silikon terhadap aluminium (linear, $R^2 = 0,9767$) daripada rasio mol Si/Al-nya (polinomial orde 2, $R^2 = 0,5177$) maupun Si/(Al+Fe) (linear, $R^2 = 0,7940$). Adapun adsorpsi metilena biru pada permukaan partikel debu tanah memiliki model Langmuir dan Redlich-Peterson.

SARAN

Penelitian ini disarankan dapat dikembangkan ke campuran-campuran senyawa silikat dan aluminosilikat hasil sintesis dengan komposisi fasa yang terkontrol untuk dapat memperoleh distribusi kadar Si dan Al yang beragam. Untuk penelitian yang lebih aplikatif, perlu dicoba diberi perlakuan asam menggunakan larutan HCl dengan variasi pada kisaran 0,1 N dan diujicobakan langsung pada limbah zat organik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Agama RI atas bantuan penelitian Litapdimas Tahun 2019.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdalla Elsheikh, M., Matsue, N., & Henmi, T. (2010). Effect of Si/Al ratio of allophane on competitive adsorption of phosphate and Oxalate. In *International Journal of Soil Science* (Vol. 5, Nomor 3, hal. 140–152). <https://doi.org/10.3923/ijss.2009.1.13>
- Adegoke, K. A., & Bello, O. S. (2015). Dye sequestration using agricultural wastes as adsorbents. *Water Resources and Industry*, 12, 8–24. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2015.09.002>
- Ahrouch, M., Gatica, J. M., Draoui, K., & Vidal, H. (2019). Adding value to natural clays as low-cost adsorbents of methylene blue in polluted water through honeycomb monoliths manufacture. *SN Applied Sciences*, 1(12), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1636-4>
- Begum, B. A., Biswas, S. K., Pandit, G. G., Saradhi, I. V., Waheed, S., Siddique, N., Seneviratne, M. C. S., Cohen, D. D., Markwitz, A., & Hopke, P. K. (2011). Long-range transport of soil dust and smoke pollution in the South Asian region. *Atmospheric Pollution Research*, 2(2), 151–157. <https://doi.org/10.5094/APR.2011.020>
- Bharathi, K. S., & Ramesh, S. T. (2013). Removal of dyes using agricultural waste as low-cost adsorbents: a review. *Applied Water Science*, 3(4), 773–790. <https://doi.org/10.1007/s13201-013-0117-y>
- Chibani, S., Chebbi, M., Lebègue, S., Cantrel, L., & Badawi, M. (2016). Impact of the Si/Al ratio on the selective capture of iodine compounds in silver-mordenite: A periodic DFT study. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(36), 25574–25581. <https://doi.org/10.1039/c6cp05015h>
- Cong, P., & Cheng, Y. (2021). Advances in geopolymer materials: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), 283–314. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004>
- Dashti, H., & Al-Bazaz, H. (1995). Comparative study of the hydrothermal stability and performance of y-zeolite based fcc catalysts having different initial si/al ratio. *Fuel Science and Technology International*, 13(4), 451–466. <https://doi.org/10.1080/08843759508947689>
- Dehghani, M. H., Dehghan, A., Alidadi, H., Dolatabadi, M., Mehrabpour, M., & Converti, A. (2017). Removal of methylene blue dye from aqueous solutions by a new chitosan/zeolite composite from shrimp waste: Kinetic and equilibrium study. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 34(6), 1699–1707. <https://doi.org/10.1007/s11814-017-0077-2>
- Etim, U. J., Umoren, S. A., & Eduok, U. M. (2016). Coconut coir dust as a low cost adsorbent for the removal of cationic dye from aqueous solution. *Journal of Saudi Chemical Society*, 20, S67–S76. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2012.09.014>
- Fungaro, D. A., Bruno, M., & Grosche, L. C. (2009). Adsorption and kinetic studies of methylene blue on zeolite synthesized from fly ash. *Desalination and Water Treatment*, 2(1–3), 231–239. <https://doi.org/10.5004/dwt.2009.305>
- Ioannou, Z., Karasavvidis, C., Dimirkou, A., & Antoniadis, V. (2013). Adsorption of methylene blue and methyl red dyes from aqueous solutions onto modified zeolites. *Water Science and Technology*, 67(5),

- 1129–1136. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.672>
- Kalam, S., Abu-Khamsin, S. A., Kamal, M. S., & Patil, S. (2021). Surfactant Adsorption Isotherms: A Review. *ACS Omega*, 6(48), 32342–32348. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04661>
- Khan, M. I. (2020). Adsorption of methylene blue onto natural Saudi Red Clay: Isotherms, kinetics and thermodynamic studies. *Materials Research Express*, 7(5). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab903c>
- Khan, M. M. R., Rahman, M. W., Ong, H. R., Ismail, A. B., & Cheng, C. K. (2016). Tea dust as a potential low-cost adsorbent for the removal of crystal violet from aqueous solution. *Desalination and Water Treatment*, 57(31), 14728–14738. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1066272>
- Kodaira, T., & Ikeda, T. (2010). Characters of the tetramethylammonium ion in ZK-4 zeolites depending on their Si/Al ratios. *Journal of Physical Chemistry C*, 114(30), 12885–12895. <https://doi.org/10.1021/jp1022554>
- Kothawala, D. N., Moore, T. R., & Hendershot, W. H. (2008). Adsorption of dissolved organic carbon to mineral soils: A comparison of four isotherm approaches. *Geoderma*, 148(1), 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.09.004>
- Li, J., Gao, M., Yan, W., & Yu, J. (2022). Regulation of the Si/Al ratios and Al distributions of zeolites and their impact on properties. *Chemical Science*, 14(8), 1935–1959. <https://doi.org/10.1039/d2sc06010h>
- Liu, M., Hou, L. A., Xi, B., Zhao, Y., & Xia, X. (2013). Synthesis, characterization, and mercury adsorption properties of hybrid mesoporous aluminosilicate sieve prepared with fly ash. *Applied Surface Science*, 273, 706–716. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.02.116>
- Munthali, M. W., Elsheikh, M. A., Johan, E., & Matsue, N. (2014). Proton adsorption selectivity of zeolites in aqueous media: Effect of Si/Al ratio of zeolites. *Molecules*, 19(12), 20468–20481. <https://doi.org/10.3390/molecules191220468>
- Pathania, D., Sharma, S., & Singh, P. (2017). Removal of methylene blue by adsorption onto activated carbon developed from Ficus carica bast. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S1445–S1451. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.04.021>
- Postai, D. L., Demarchi, C. A., Zanatta, F., Melo, D. C. C., & Rodrigues, C. A. (2016). Adsorption of rhodamine B and methylene blue dyes using waste of seeds of Aleurites Moluccana, a low cost adsorbent. *Alexandria Engineering Journal*, 55(2), 1713–1723. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.03.017>
- Potgieter, J. H. (1991). Adsorption of methylene blue on activated carbon: An experiment illustrating both the langmuir and freundlich isotherms. *Journal of Chemical Education*, 68(4), 349–350. <https://doi.org/10.1021/ed068p349>
- Richards, M. D., & Pope, C. G. (1996). Adsorption of Methylene Blue from aqueous solutions by amorphous aluminosilicate gels and zeolite X. *Journal of the Chemical Society - Faraday Transactions*, 92(2), 317–323. <https://doi.org/10.1039/ft9969200317>
- Rida, K., Bouraoui, S., & Hadnine, S. (2013). Adsorption of methylene blue from aqueous solution by kaolin and zeolite. *Applied Clay Science*, 83–84, 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.08.015>
- Schott, J., & Oelkers, E. H. (1995). Dissolution and crystallization rates of silicate minerals as a function of chemical affinity. *Pure and Applied Chemistry*, 67(6), 903–910. <https://doi.org/10.1351/pac199567060903>
- Setyono, D., & Valiyaveetil, S. (2014). Chemically modified sawdust as renewable adsorbent for arsenic removal from water. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2(12), 2722–2729. <https://doi.org/10.1021/sc500458x>
- Sharma, P., Song, J. S., Han, M. H., & Cho, C. H. (2016). GIS-NaP1 zeolite microspheres as potential water adsorption material: Influence of initial silica concentration on adsorptive and physical/topological properties. *Scientific Reports*, 6(March), 1–26. <https://doi.org/10.1038/srep22734>
- Shen, Y. H. (2000). Sorption of non-ionic surfactants to soil: The role of soil mineral composition. *Chemosphere*, 41(5), 711–716. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00436-1](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00436-1)
- Shirazi, L., Jamshidi, E., & Ghasemi, M. R. (2008). The effect of Si/Al ratio of ZSM-5 zeolite on its morphology, acidity and crystal size. *Crystal Research and Technology*, 43(12), 1300–1306. <https://doi.org/10.1002/crat.200800149>
- Silaghi, M. C., Chizallet, C., & Raybaud, P. (2014). Challenges on molecular aspects of dealumination and desilication of zeolites. *Microporous and Mesoporous Materials*, 191, 82–96. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.02.040>
- Sing, D., & Sing, C. F. (2010). Impact of direct soil exposures from airborne dust and geophagy on human

- health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7(3), 1205–1223. <https://doi.org/10.3390/ijerph7031205>
- Sposito, G. (1982). On the Use of the Langmuir Equation in the Interpretation of “Adsorption” Phenomena: II. The “Two-Surface” Langmuir Equation. *Soil Science Society of America Journal*, 46(6), 1147–1152. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600060006x>
- Sposito, G. (2008). *The Chemistry of Soils*. New York: Oxford University Press.
- Subhi, A. M., Al-Najar, J. A., & Noori, W. A. H. (2022). Adsorption of dyes using natural minerals: A review. *Global Nest Journal*, 24(3), 451–464. <https://doi.org/10.30955/gnj.004325>
- Sun, Z., Li, C., & Wu, D. (2010). Removal of methylene blue from aqueous solution by adsorption onto zeolite synthesized from coal fly ash and its thermal regeneration. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 85(6), 845–850. <https://doi.org/10.1002/jctb.2377>
- Talesh, S. S. A., Fatemi, S., Hashemi, S. J., & Ghasemi, M. (2010). Effect of Si/Al ratio on CO₂ - CH₄ adsorption and selectivity in synthesized SAPO-34. *Separation Science and Technology*, 45(9), 1295–1301. <https://doi.org/10.1080/01496391003684414>
- Zheng, L., Wang, W., & Shi, Y. (2010). The effects of alkaline dosage and Si/Al ratio on the immobilization of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash-based geopolymer. *Chemosphere*, 79(6), 665–671. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.02.018>