



Studi Optimisasi dan Kinetika Adsorpsi Silika dari Lumpur Lapindo dengan Metode Sol-Gel Menggunakan P123-Putih Telur

(Optimization and Kinetics Study of Silica Adsorption from Lapindo Mud with Sol-Gel Method Using P123-Egg White)

Maria Ulfa*, Anisa Ayu Solikah*, Zahra Ayu Fadhilah, Ida Setiarini, Zulfana Qoulan Syadida

Pendidikan Kimia, Fakultas Keguruan dan Pendidikan, Universitas Sebelas Maret Surakarta
Jalan Ir. Sutami 36 A, Kentingan, Surakarta, 57126, Indonesia

*Corresponding author: mariaulfa@staff.uns.ac.id; ulfa.maria2015@gmail.com; anisaayusolikah5@gmail.com

DOI: <https://dx.doi.org/10.20961/alchemy.20.1.75659.49-61>

Received 27 June 2023, Revised 22 November 2023, Accepted 27 December 2023, Published March 2024

Kata kunci:

adsorpsi;
ibuprofen;
green chemistry;
lumpur lapindo;
metode sol-gel;
nanosilika.

ABSTRAK. Dalam penelitian ini, silika yang disintesis dari Lapindo lumpur dengan metode sol-gel menggunakan P123-putih telur dan berhasil diterapkan sebagai adsorben ibuprofen. Konsentrasi awal, berat adsorben, pH dan suhu diterapkan untuk mengoptimalkan kondisi reaksi eksperimental utama menggunakan metode *batch*. Optimisasi ini didasarkan pada maksimalisasi pengurangan ibuprofen menggunakan silika dari Lumpur Lapindo. Penelitian ini menunjukkan bahwa dua parameter yang paling relevan untuk adsorpsi ibuprofen adalah suhu adsorpsi dan dosis adsorben. Berdasarkan model adsorpsi, kondisi optimal untuk adsorpsi ibuprofen maksimum ditentukan selama 60 menit sebagai 100 mg/L, $45 \pm 0,5$ °C, pH 5 dan dosis katalis 0,03 g, menghasilkan persentase pengurangan adsorpsi masing-masing 94,88; 96,04; 95,57; dan 96,65%. Kinetika adsorpsi ibuprofen juga dievaluasi dan hasil eksperimen dijelaskan dengan baik menggunakan pseudo pertama dan model orde kedua semu. Studi kinetik yang menggunakan analisis regresi linier mengungkapkan adsorpsi cocok dengan pseudo kinetik orde kedua dengan nilai energi aktivasi adalah 0,441 kJ/mol dan faktor pra-eksponensial adalah $1,21 \text{ L}^2 \cdot \text{mol}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ yang mengonfirmasi bahwa silika dari Lumpur Lapindo bisa menjadi alternatif yang baik untuk menghilangkan ibuprofen melalui adsorpsi.

Keywords:

adsorption;
ibuprofen;
green chemistry;
lapindo mud (LM);
sol-sel method;
nanosilica.

ABSTRACT. This study successfully applied silica synthesized from Lapindo mud by sol-gel method using P123-white egg as an adsorbent for reducing ibuprofen. An initial concentration, adsorbent weight, pH, and temperature were applied to optimize the main experimental reaction conditions using batch methods. This optimization was based on maximizing ibuprofen removal of the silica from lapindo mud samples. The results show that the two most relevant parameters for ibuprofen adsorption are the adsorption temperature and adsorbent dosage. According to the Kinetics model, the optimum condition for the maximum ibuprofen adsorption was determined during 60 min at ibuprofen concentration of 100 mg/L at 45 ± 0.5 °C (pH 5) with catalyst dosage of 0.03 g, resulting in 94.88, 96.04, 95.57, and 96.65% ibuprofen removal, respectively. The kinetics of the ibuprofen adsorption was also evaluated, and the experimental results were well described using a pseudo-first and pseudo-second-order model. The kinetic studies using linear regression analysis revealed that the adsorption fits pseudo-second-order kinetic with the value of the activation energy of 0.441 kJ/mol and the pre-exponential factor of $1.21 \text{ L}^2 \cdot \text{mol}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, confirming that the silica from Lapindo mud is a good alternative for removal ibuprofen through adsorption.

PENDAHULUAN

Peristiwa lumpur Lapindo di Sidoarjo merupakan peristiwa semburan lumpur panas yang terjadi pada bulan Mei 2006. Pada peristiwa ini, lumpur dengan jumlah yang sangat besar dan laju mencapai $100.000 \text{ m}^3/\text{hari}$ meluap ke area pemukiman penduduk, persawahan, dan industri. Peristiwa lumpur Lapindo diperkirakan terus berlanjut untuk 30 tahun kedepan (Fanani and Ulfindrayani, 2019). Lumpur ini diduga berasal dari kesalahan

Cite this as: Ulfa, M., Solikah, A. A., Fadhilah, Z. A., Setiarini, I., and Syadida, Z. Q., 2024. Studi Optimisasi dan Kinetika Adsorpsi Silika dari Lumpur Lapindo Menggunakan Metode P123-Putih Telur. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 20(1), 48-61. <https://dx.doi.org/10.20961/alchemy.20.1.75659.49-61>.



pegeboran minyak dan gas yang dilakukan oleh PT Lapindo Brantas. Kerugian yang harus ditanggung masyarakat diantaranya adalah rusaknya 200 hektare persawahan dan perkebunan, tidak berfungsinya sarana pendidikan, terhambatnya akses jalan utama, serta rusaknya sejumlah infrastruktur dan sarana prasarana lainnya. Lumpur lapindo merupakan tipe lumpur gunung berapi yang telah menutup >6,5 km² sejak erupsi gunung merapi sejak Mei 2006. Tidak hanya menutup kawasan lapindo, erupsi ini mengharuskan 30.000 penduduk untuk mengungsi dan berpindah lokasi karena sejak 2008 laju erupsi mencapai 100.000 m³ per hari. Oleh karena itu, pemanfaatan lapindo mud akan memberikan keuntungan dalam penyelamatan lingkungan serta peningkatan ekonomi masyarakat.

Lumpur lapindo mengandung K 52,63%; Si 17,40%; Ca 13,87%; Mg 2,68%; Fe 1,77%; Na 0,97%; Al 1,38%; Ti 0,24%; 6,94%; Cl 1,45%; dan S 0,67% (Talib *et al.*, 2016). Kandungan silika yang mencapai 17% pada lumpur Lapindo berpotensi dimanfaatkan menjadi material yang memiliki nilai guna lebih tinggi, seperti adsorben berbasis nanosilika. Berdasarkan penelitian Nizar *and* Supardi (2016), menunjukkan bahwa silika sebagai adsorben memiliki kemampuan adsorpsi tinggi sebesar 99,88% dengan karakteristik volume pori 1,26 cc/g, dan ukuran partikel pori sebesar 24,3 nm, dan luas permukaan yang cukup besar sebesar 106,68 m²/g.

Kelebihan dari material silika di antaranya bersifat *inert*, kestabilan mekanik dan kestabilan termal tinggi, memiliki daya yang baik, dan mudah dimodifikasi (Pyrzyńska *and* Wierzbicki, 2005). Umumnya, silika diperoleh dari proses penambangan, tetapi proses tersebut memerlukan tahapan yang rumit. Silika juga dapat diperoleh secara sintesis dengan prekursor TMOS atau TEOS, tetapi kedua bahan tersebut memiliki harga yang cukup mahal. Oleh karena itu, diperlukan sumber silika lainnya seperti lumpur Lapindo yang selama ini masih jarang dimanfaatkan.

Adsorben nanosilika dari lumpur Lapindo bisa dimanfaatkan untuk mengatasi permasalahan lingkungan dalam industri farmasi yang saat ini semakin berkembang dan banyak menghasilkan limbah, seperti ibuprofen. Ibuprofen sering ditemukan di beberapa wilayah perairan di dunia dengan konsentrasi mencapai 0,018 – 2,110 µg (Dziadkowiec *et al.*, 2017). Campuran ibuprofen di air minum menimbulkan efek yang merugikan bagi kesehatan manusia seperti gangguan endokrin. Konsentrasi residu ibuprofen yang ekstrim membahayakan sistem reproduksi ikan, katak, dan spesies air lainnya. Oleh karena itu, dibutuhkan metode yang efektif untuk mengatasi pencemaran karena limbah industri farmasi ibuprofen.

Metode adsorpsi merupakan proses penyerapan yang terjadi di permukaan dan pada prosesnya melibatkan permukaan zat padat sebagai penyerap (adsorben) dengan zat yang diserap (adsorbat). Kelebihan dari metode adsorpsi antara lain dapat menangani berbagai level polutan, efisien, mudah dioperasikan, adsorben dapat diregenerasi dan digunakan berulang kali, serta memiliki *initial cost* yang rendah (Ulfa *et al.*, 2019). Pada penelitian ini, sintesis adsorben nanosilika dari lumpur Lapindo (Puspitasari *et al.*, 2017) menerapkan prinsip metode sol-gel berbasis *green chemistry*.

Metode sol gel dipilih untuk menghasilkan material berupa nanosilika dengan diameter silika yang lebih kecil dan proses preparasi yang mudah (Tadanaga *et al.*, 2013). Metode sol-gel berbasis *green chemistry* dipilih sebagai upaya menerapkan prinsip kimia di laboratorium yang lebih ramah lingkungan dan mengurangi zat kimia yang bersifat toksik guna menciptakan kehidupan yang berkelanjutan.

Harga silika yang tersedia secara komersial pada umumnya cukup tinggi jika dibandingkan dengan silika dari sumber alami. Namun, silika lebih disukai karena beberapa keuntungan penting (Jalil *et al.*, 2010; Puspitasari *et al.*, 2017; Talib *et al.*, 2016). Keuntungan utama silika dari sumber alami berkaitan dengan kinerja adsorbennya. Keuntungan penting lainnya terkait dengan fakta bahwa silika memiliki keberlanjutan yang tinggi, kelimpahan, dapat didaur ulang dan digunakan kembali, serta cukup mudah dan aman untuk ditangani. Berdasarkan latar belakang tersebut, maka diperlukan penelitian terkait sintesis nanosilika dari lumpur Lapindo untuk adsorpsi limbah ibuprofen berbasis metode *green chemistry* yang lebih ramah lingkungan. Penelitian akan mengkaji tentang presentase penyerapan nanosilika pada adsorpsi limbah ibuprofen dan mengetahui kinetika serta isotherm adsorpsi sehingga dapat diketahui jenis adsorpsi yang terjadi. Dalam penelitian ini, penelitian mengkaji lebih dalam tentang pengaruh beberapa parameter reaksi pada adsorpsi ibuprofen. Saat ini, belum ada penelitian yang dipublikasikan terkait dengan penentuan parameter kinetik untuk reaksi menggunakan silika dari lumpur lapindo. Selanjutnya, penelitian ini akan menyajikan hasil eksperimen dan pemodelan baru untuk prediksi parameter kinetik, termasuk orde reaksi, konstanta laju reaksi pada temperatur yang berbeda dan energi aktivasi adsorpsi ibuprofen menggunakan silika dari lumpur Lapindo.

METODE PENELITIAN

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah mortar, alu, ayakan, loyang, plastik wrap, neraca analitik (Ohaus carat series), *hotplate magnetic stirrer* (IKA Magma G700), kertas saring (Whatman), oven (WTC Bider 7200 Germany), furnace (Thermolyne 48000), *microwave* (Litton), dan pH meter. Adapun bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah lumpur lapindo, NaOH (Merck), HCl (Merck, 37%), akuades, n-heksana, ibuprofen, P123, putih telur, dan air demineral.

Ekstraksi Silika dari Lumpur Lapindo

Langkah pertama adalah mengeringkan lumpur lapindo lalu menghaluskan dengan mortar dan alu hingga ukurannya 100 mesh. Lumpur lapindo yang telah dihaluskan direndam dalam larutan NaOH 4 M sembari dipanaskan dan diaduk selama 2 jam. Selanjutnya disaring dan didiamkan hingga dingin lalu dititrasikan dengan HCl 3 M sampai diperoleh pH 7,6 – 8,5. Gel didiamkan selama 24 jam. Terakhir, gel dihancurkan dengan air dan dimasukkan ke dalam alat sentrifugasi pada kecepatan 300 rpm selama 5 menit (Imoisili *et al.*, 2020).

Sintesis Nanosilika dari Lumpur Lapindo Berbasis *Green Chemistry*

Tahap sintesis ini diawali dengan menambahkan *polimer triblock Pluronic* P123 dan putih telur dengan rasio 1:1 (% b/b) ke dalam beaker glass kemudian ditambahkan larutan HCl yang telah diencerkan dengan akuades ke dalam campuran. Campuran diaduk menggunakan *stirrer* pada suhu 40 °C dengan kecepatan 500 rpm selama 3 jam dalam keadaan tertutup *wrapped plastic*. Setelah itu, 8,62 g silika gel ditambahkan dan diaduk dengan *stirrer* kembali selama 24 jam. Sampel yang terbentuk dimasukkan ke dalam Hidrotermal *autoclave* dan dipanaskan selama 24 jam pada suhu 90 °C. Endapan putih yang terbentuk disaring dan dicuci kemudian dikeringkan selama 24 jam pada suhu 70 °C lalu dinaikkan kembali menjadi 100 °C selama 24 jam. Bubuk putih yang terbentuk kemudian dikalsinasi dalam furnace dengan suhu 550 °C selama 5 jam. Silika hasil sintesis diberi nama Silica Lapindo Mud (SLM)

Aktivasi Nanosilika

Tahap aktivasi ini dilakukan dengan merendam 1,5 gram nanosilika dengan 50 mL HCl 0,1 M selama 24 jam. Setelah itu, endapan disaring dan dicuci dengan akuades dan dilanjutkan dengan pemanasan dalam oven selama 24 jam pada suhu 100 °C hingga terbentuk bubuk putih halus.

Karakterisasi pada Nanosilika Hasil Sintesis

Karakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) (spektrometer (PW-1830, Philips) dengan Cu K α radiation ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) over a 2θ range of 5 – 70° dan *Fourier-transformed Infrared Spectroscopy* (FTIR) (FTIR, Nicolet 6700 FT-IR Spectrometer).

Adsorpsi Ibuprofen dan Uji Kapasitas Adsorben Nanosilika terhadap Ibuprofen

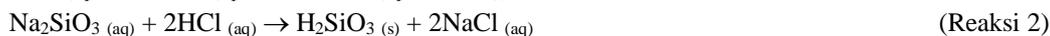
Prosedur adsorpsi ibuprofen menggunakan material nanosilika ini mengacu pada penelitian yang sebelumnya telah dilakukan oleh Ulfa *et al.*, 2019. Metode adsorpsi yang digunakan yaitu metode *batch*. Langkah pertama pada tahap ini adalah menyiapkan larutan standar ibuprofen dalam berbagai konsentrasi. Larutan ibuprofen 100 ppm disiapkan dengan melarutkan bubuk ibuprofen pada n-heksana lalu diaduk. Sebanyak 0,01 g nanosilika dimasukkan ke dalam 100 mL larutan ibuprofen dan diaduk selama 1 jam. Pengambilan 10 mL larutan dilakukan pada 0, 5, 10, 15, 20, sampai 60 menit. Pengukuran konsentrasi ibuprofen setelah adsorpsi dilakukan dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 275 cm⁻¹. Langkah diulangi dengan variasi konsentrasi, suhu, pH larutan ibuprofen, dan massa adsorben. Setelah sampel dianalisis dengan spektrofotometer, nilai absorbansi ujung digunakan untuk mengetahui konsentrasi ibuprofen sebagai parameter kapasitas adsorpsi material.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Ekstraksi Silika dari Lumpur Lapindo

Ekstraksi silika SLM menggunakan NaOH bertujuan agar Na⁺ dalam NaOH mengikat SiO₂ dalam lumpur Lapindo menjadi natirum silikat (Na₂SiO₃) yang berwujud cair, tidak berwarna, dan bersifat basa. Reaksi yang terjadi ditunjukkan pada [Persamaan Reaksi \(1\)](#).

Natrium silikat kemudian dititrasi dengan HCl 3 M hingga pH 7,6 – 8,5. Penambahan HCl mengakibatkan terjadinya pertukaran ion Na^+ pada Na_2SiO_3 dengan ion H^+ pada HCl menghasilkan asam silikat (H_2SiO_3) yang berwujud padat. Reaksi yang terjadi ditunjukkan pada [Persamaan Reaksi \(2\)](#). Padatan kemudian didiamkan hingga terbentuk gel bening dan dicuci dengan akuades untuk menghilangkan NaCl.

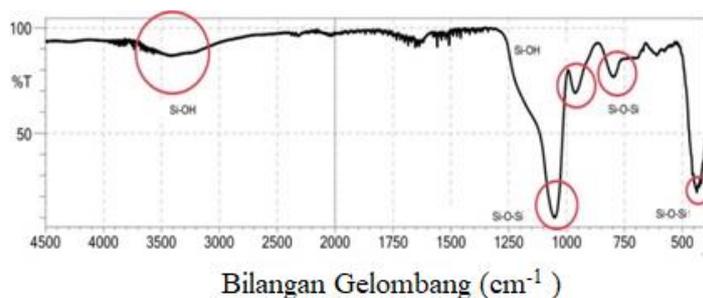


Sintesis Nanosilika SLM dari Lumpur Lapindo Berbasis Green Chemistry

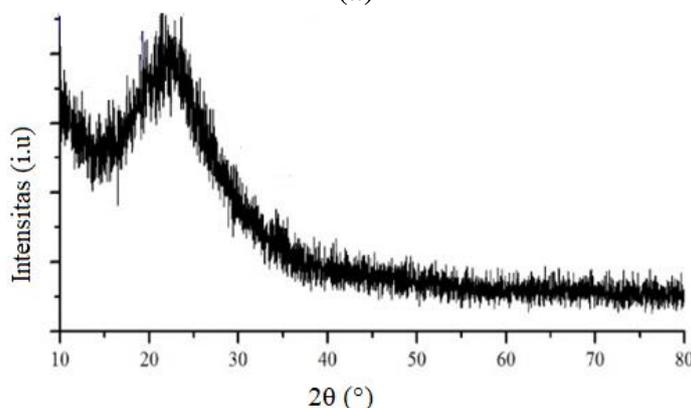
Sintesis nanosilika SLM dari lumpur Lapindo menggunakan *polimer triblock Pluronic P123* dan putih telur dengan rasio yang berfungsi sebagai pencetak struktur untuk memodifikasi porositas dan luas permukaan. Proses pembuatan nanosilika ini menggunakan metode sol-gel yang prinsipnya melarutkan *template agent* berupa P123 dan putih telur ke pelarut dan menambahkan prekursor silikat gel yang sudah diekstrak dari lumpur Lapindo. Homogenisasi prekursor dan template dilakukan dengan pengadukan selama 24 jam dilanjutkan proses pematangan via reaksi hidrotermal selama 24 jam pada suhu 90°C yang bertujuan menumbuhkan kristal dalam wadah bertekanan tinggi yang disebut autoklaf. Hasil proses hidrotermal yang berupa endapan putih selanjutnya di oven dan dikalsinasi yang bertujuan untuk menghilangkan pencetak dan mendapatkan nanosilika murni. Hasil akhir sintesis nanosilika SLM ini berbentuk serbuk putih halus sebanyak 3,25 g sedangkan lumpur Lapindo asli berwarna abu-abu, berbentuk bongkahan dan kerikil kering dan sebagian berbentuk lumpur basah seperti bubuk. Warna dan tekstur silika hasil sintesis menunjukkan tanda awal keberhasilan proses ekstraksi lumpur Lapindo dengan metode template.

Karakterisasi FTIR dan XRD pada Nanosilika SLM

Berdasarkan [Gambar 1\(a\)](#), spektrum FTIR menunjukkan terdapat puncak vibrasi tekuk pada bilangan gelombang antara $450 - 500 \text{ cm}^{-1}$ yang mengindikasikan adanya gugus siloksan (Si-O-Si). Gugus Si-O-Si juga dibuktikan dengan adanya serapan pada bilangan gelombang $750 - 800 \text{ cm}^{-1}$ yang berupa vibrasi regangan simetris dan serapan pada bilangan $1000 - 1050 \text{ cm}^{-1}$ yang menandai adanya vibrasi regangan asimetris Si-O-Si . Serapan pada bilangan gelombang antara $950 - 1000 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya gugus silanol (Si-OH).



(a)



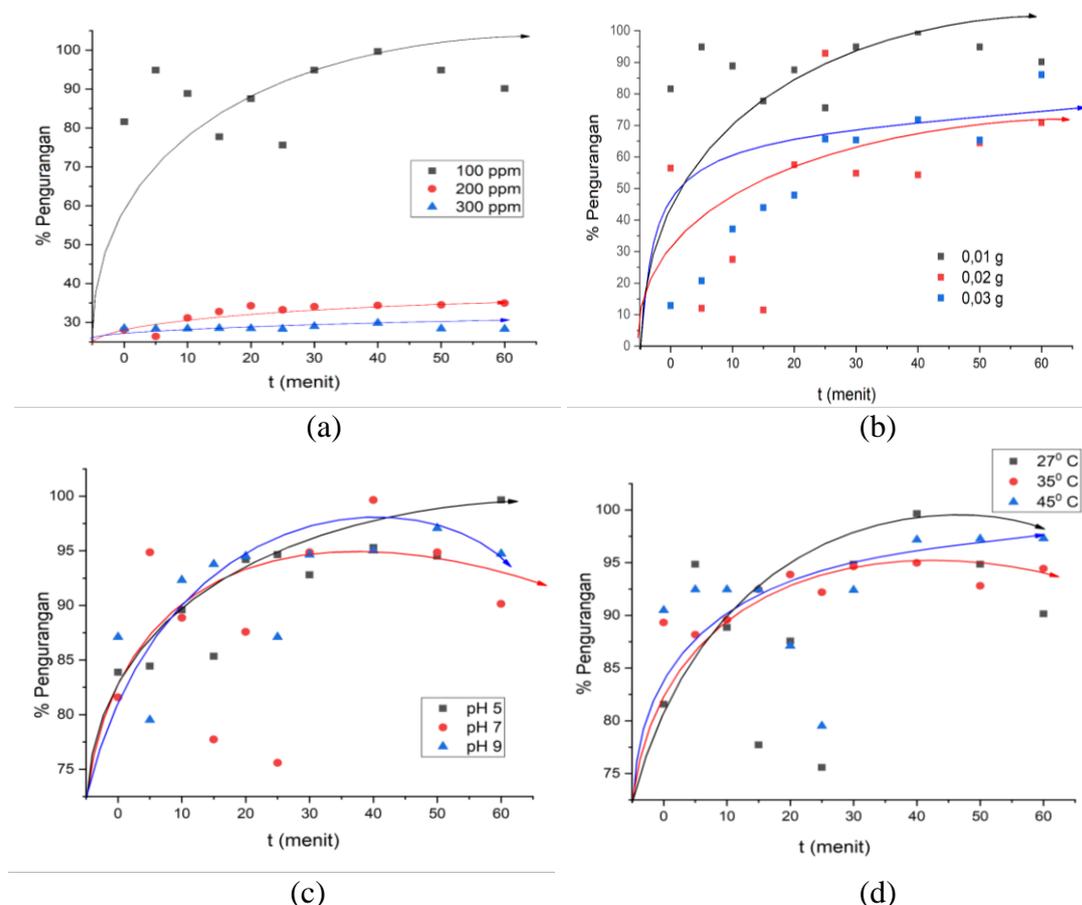
(b)

Gambar 1. Spektrum (a) FTIR dan (b) Difraktogram XRD nanosilika dari Lumpur Lapindo (SLM) 2θ ($^\circ$).

Adanya gugus silanol pada nanosilika SLM dari lumpur lapindo juga dibuktikan dari adanya serapan pada bilangan gelombang $3400 - 3500 \text{ cm}^{-1}$. Hasil FTIR pada penelitian ini sejalan dengan penelitian (Talib *et al.*, 2016) yang menunjukkan bahwa terdapat gugus silanol (Si–O–H) dan gugus siloksan (Si–O–Si) yang terikat hidrogen dalam nanosilika. Gambar XRD (Gambar 1(b)) dari SLM menunjukkan adanya SiO_2 puncak lebar pada $2\theta \sim 25,0$ yang berhubungan dengan (002). Puncak tunggal melebar menunjukkan bahwa nanosilika SLM adalah amorfous (derajat kristalinitas rendah) yang senada dengan data JCPDS SiO_2 29 – 0085 (Thirugnanam *et al.*, 2021). Sedangkan pada puncak rendah pada 28,4 dan 29,7 yang merupakan puncak K_2O sesuai JCPDS 47–1701 dan 23–493 (Talib *et al.*, 2016) yang menunjukkan bahwa kadar kalium dalam sampel ini sangat sedikit. XRD lumpur lapindo asli dari penelitian sebelumnya yang menginformasikan bahwa dalam lumpur Lapindo terdapat struktur ruah (bulk) material yang memiliki fase amorf yang teridentifikasi terdiri dari berbagai komponen seperti SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , Fe_2O_3 , Cl, MgO, CaO, K_2O , SO_3 dan TiO_2 (Jalil *et al.*, 2010). Setelah ekstraksi dilakukan, tidak adanya jejak unsur lain seperti Ca, Mg, Fe, Na, Al, Ti, Cl, dan S dalam sampel nanosilika (dikonfirmasi dari pola XRD) yang memberikan kesimpulan sementara bahwa proses ekstraksi silika dari lumpur Lapindo telah berhasil dilakukan dengan metode sol-gel menggunakan surfaktan putih telur dengan komponen utama Si dan O.

Adsorpsi Ibuprofen dan Uji Penyerapan Adsorben Nanosilika SLM terhadap Ibuprofen

Dalam penelitian ini, pengaruh waktu kontak, konsentrasi awal limbah, massa adsorben, pH (dan suhu adsorpsi diinvestigasi untuk mengetahui pengaruhnya pada performa silika SLM dan proses adsorpsi. Gambar 2 menyajikan persentase penghilangan ibuprofen sebagai fungsi waktu kontak dengan variasi parameter reaksi. Hal ini menunjukkan bahwa adsorpsi akan naik dari 0 hingga 25 menit dan mencapai keseimbangan pada 40 menit dan $q_{\text{max}} = 99,65\%$. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan adsorpsi menggunakan SLM dipengaruhi oleh waktu kontak karena ada peningkatan interaksi di antara molekul. Namun, menjadi stabil setelah 40 menit kontak karena adsorben telah mencapai kondisi jenuh.



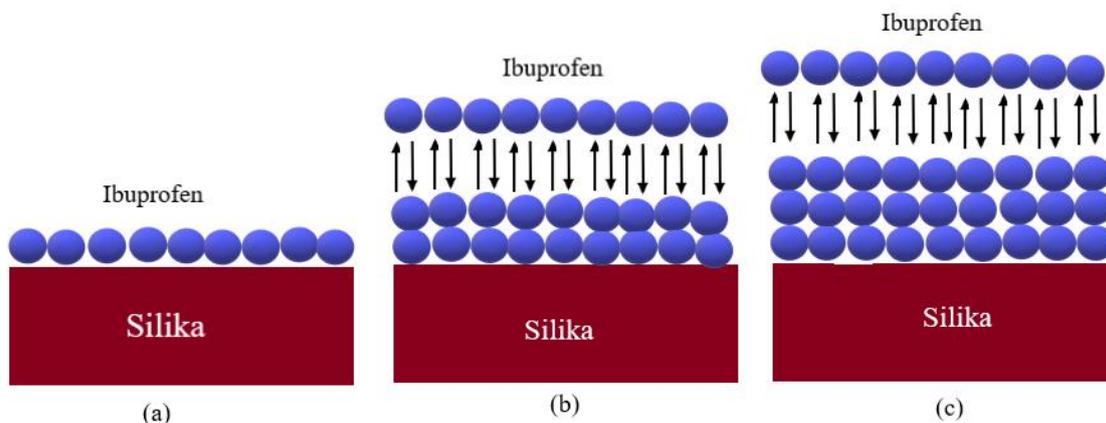
Gambar 2. Grafik pengaruh (a) konsentrasi awal, (b) berat adsorben, (c) larutan pH, dan (d) suhu adsorpsi pada % adsorpsi ibuprofen menggunakan silika SLM.

Gambar 2(a) menunjukkan bahwa persentase adsorpsi menurun dari 94,88% menjadi 28,89% dari konsentrasi awal 100 mg/L hingga 300 mg/L. Hasil ini mengungkapkan bahwa konsentrasi yang lebih rendah memiliki probabilitas adsorpsi tertinggi karena pasokan situs aktif di permukaan lebih menonjol, memungkinkan molekul ibuprofen diadsorpsi.

Efek suhu pada adsorpsi ibuprofen menggunakan SLM juga diselidiki pada suhu 27, 35 dan 45 °C. Hasilnya menunjukkan bahwa persentase penghilangan ibuprofen menggunakan SLM sedikit meningkat. Peningkatan suhu (**Gambar 2d**) menyiratkan bahwa proses adsorpsi adalah endotermik. Nilai Q_E sedikit meningkat dari 94 menjadi 96% dengan kenaikan suhu dari 27 menjadi 45 °C. Hal ini menunjukkan bahwa suhu adalah parameter yang kurang kritis untuk adsorpsi ibuprofen oleh SLM dalam kisaran ini. Karena itu, studi adsorpsi berikutnya dilakukan pada suhu kamar (27 °C).

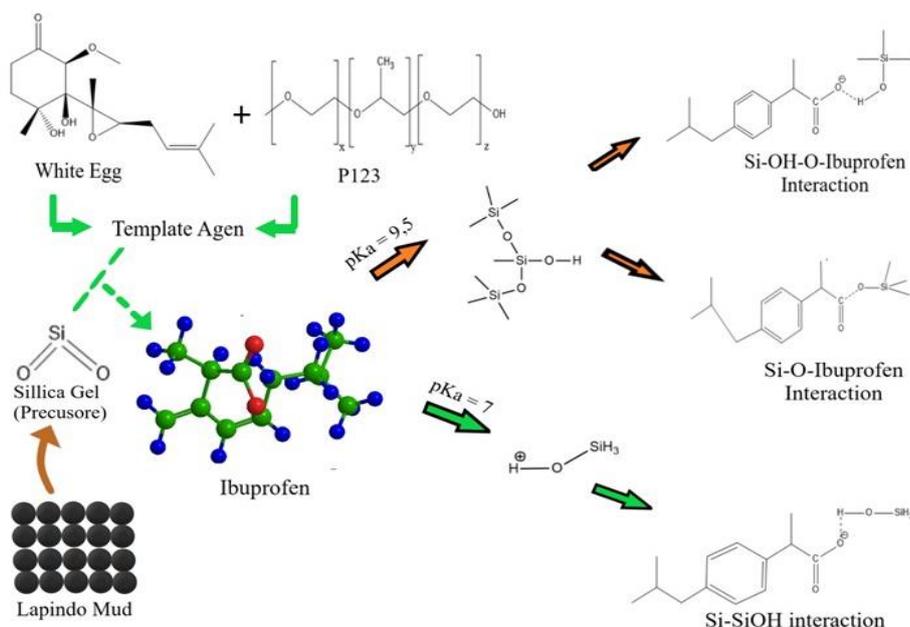
Efek dosis adsorben (**Gambar 2b**) pada jumlah adsorpsi ibuprofen pada kesetimbangan diselidiki dengan menambahkan bobot yang berbeda dari adsorben SLM dan menggunakan konsentrasi awal 100 mg/L dan waktu kontak 60 menit pada suhu kamar. **Gambar 2b** memperlihatkan bahwa penghilangan ibuprofen meningkat dari 58% menjadi 96,65% dengan meningkatkan massa adsorben. Peningkatan persentase penghilangan ibuprofen dengan dosis adsorben dapat dikaitkan dengan ketersediaan luas permukaan yang lebih besar dan lebih banyak lokasi adsorpsi. Berdasarkan hasil penelitian ini, dosis 0,03 g dipilih sebagai jumlah optimal SLM.

Gambar 2 (d) menunjukkan bahwa kondisi asam yang diwakili oleh pH 5 dalam penelitian ini memiliki persentase adsorpsi yang lebih tinggi daripada kondisi netral dan basa. Hasil ini sama dengan penelitian yang dilakukan oleh *Vicente-Martínez et al. (2020)* terkait dengan netralisasi dan kelarutan ibuprofen pada pH rendah (*Vicente-Martínez et al., 2020*) Kondisi asam pada pH rendah akan menyebabkan proses adsorpsi lebih mudah karena karakteristik dasar ibuprofen adalah asam lemah yang menyebabkan deprotonasi dan akan dimudahkan ketika lingkungan memiliki keasaman rendah. Jika kondisi adsorpsi tidak asam, misalnya kondisi basa yang kaya ion OH^- , akan menyebabkan permukaan adsorben memiliki ion negatif dan memberikan tolakan elektrostatik yang mengurangi efisiensi adsorpsi (*Iovino et al., 2015*).



Gambar 3. Skema adsorpsi ibuprofen oleh SLM menggunakan konsentrasi awal pada (a) 100 mg/L, (b) 200 mg/L, dan (c) 300 mg/L.

Penurunan adsorpsi ibuprofen diprediksi berasal dari penurunan kekuatan pendorong transfer massa karena gradien konsentrasi yang dikembangkan antara larutan curah dan permukaan adsorben, seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 3**. Mekanisme adsorpsi ibuprofen menggunakan SLM pada kelompok fungsional ibuprofen adalah hidrofilik di luar dan hidrofobik di dalam molekulnya. Mekanisme ini mendukung pembentukan interaksi hidrofilik dengan Si-OH . Hal ini dapat menunjukkan bahwa interaksi *van der Waals* hanya dimungkinkan antara ibuprofen dan silika melalui ikatan hidrogen. Selain itu, interaksi non-kovalen antara senyawa hidronium (dalam silika) dan OH^- (ibuprofen) dapat melibatkan interaksi hidrofobik dan *van der Waals*, seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Mekanisme adsorpsi ibuprofen oleh SLM pada pH 7.0 – 9.5.

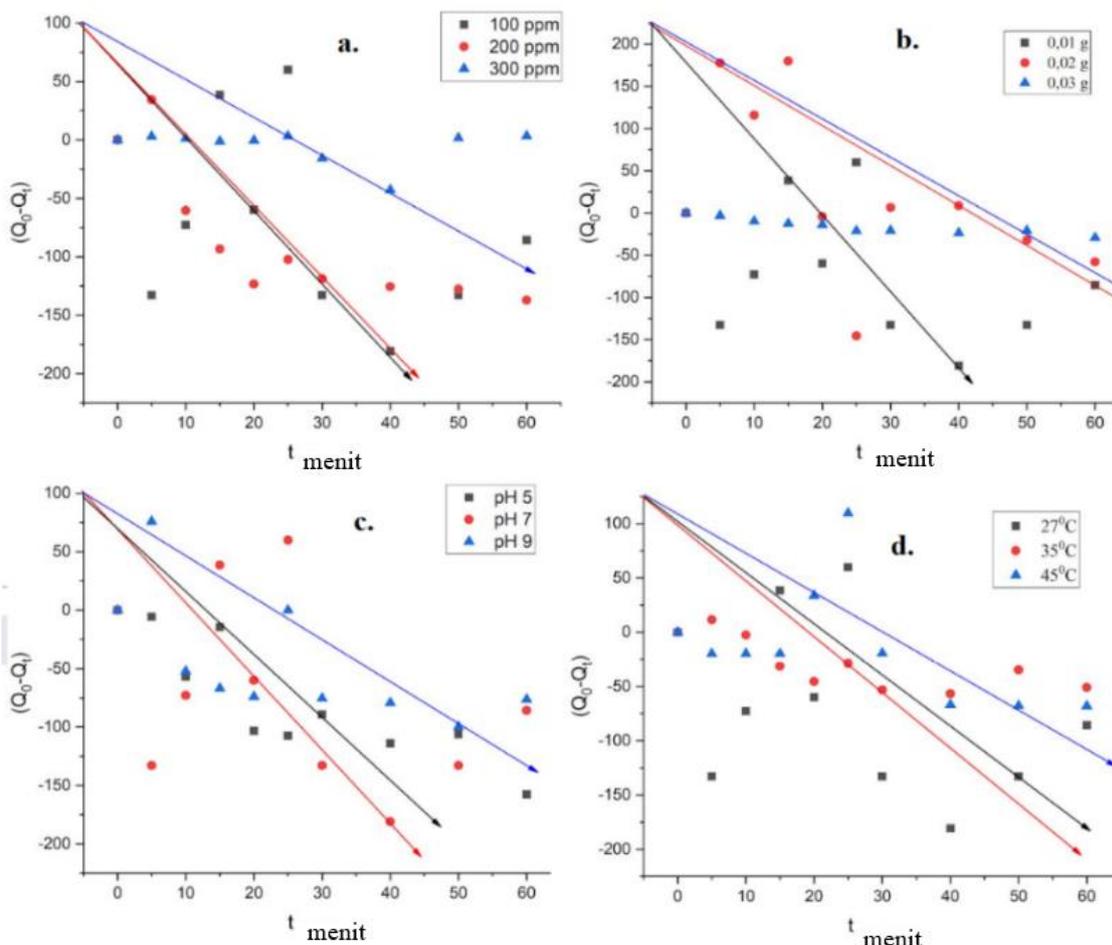
Kinetika Adsorpsi

Adsorpsi ibuprofen pada sampel SLM bertujuan mengetahui laju adsorpsi adsorbat pada adsorben dengan membandingkan persamaan model kinetika laju adsorpsi orde nol, orde pertama dengan persamaan Lagergren, dan laju pseudo orde kedua Ho and McKay. Tabel 1 dan Gambar 5-8 menunjukkan bahwa grafik pseudo orde dua memiliki nilai korelasi (R^2) tertinggi mendekati 0,99 sedangkan model pseudo orde nol dan orde satu memiliki nilai korelasi lebih rendah dalam kisaran 0,4 – 0,8. Hasil ini menunjukkan bahwa model kinetik yang sesuai adalah model kinetik pseudo orde dua oleh Ho and McKay.

Tabel 1. Kinetika adsorpsi.

Parameter	Pseudo Orde Nol		Pseudo Orde Satu			% Ads	Pseudo Orde Dua		
Formula	$C_0 - C_t = k_t t$		$\ln(C_0 - C_t) = -k_1 t$				$1/C_0 - 1/C_t = k_2 t$		
Kondisi parameter	R^2	K_0 (min^{-1})	R^2	qcal (mg/g)	K_1 (min^{-1})		R^2	qcal (mg/g)	K_2 (1×10^{-6}) (min^{-1})
Variasi konsentrasi ibuprofen									
100 mg/L	0,16	1,64	0,10	42,42	0,04	94,88	0,99	909,09	1,21
200 mg/L	0,63	2,38	0,42	119,15	0,13	34,47	0,99	714,29	1,96
300 mg/L	0,05	0,17	0,09	0,887	0,02	28,89	0,99	833,33	1,44
Variasi dosis katalis									
0.01 g	0,16	1,64	0,10	42,42	0,04	94,88	0,99	909,09	1,21
0.02 g	0,29	2,84	0,26	25,21	0,06	58,33	0,79	400,00	6,25
0.03 g	0,86	0,44	0,55	16,63	0,09	96,65	0,99	322,58	9,61
Variasi pH									
pH 5	0,77	2,39	0,68	84,38	0,09	95,56	0,99	1000,0	0,01
pH 7	0,16	1,64	0,10	42,42	0,04	94,88	0,99	909,09	1,21
pH 9	0,42	1,78	0,58	55,31	0,08	95,37	0,99	1000	1,0
Variasi suhu									
27°C	0,16	1,64	0,10	42,42	0,04	94,88	0,99	909,09	1,21
35°C	0,58	0,94	0,38	43,44	0,06	94,22	0,99	909,09	1,21
45°C	0,21	1,26	0,13	0,007	0,11	96,04	0,99	1000	1,0

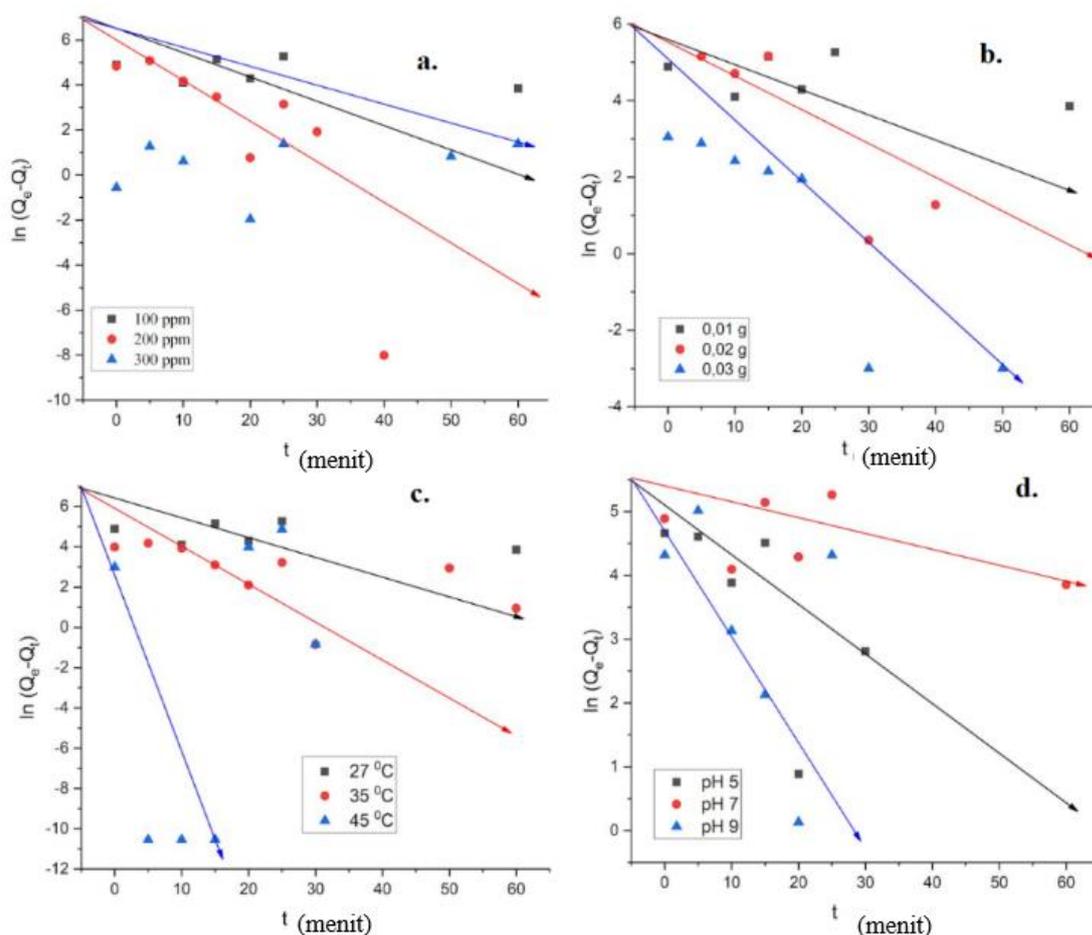
Model ini menjelaskan bahwa jika plotnya linier, proses adsorpsi dapat ditentukan sebagai kemisorpsi. Karakteristik kemisorpsi tidak dapat diubah. Dalam proses kemisorpsi, jumlah zat yang diserap secara langsung sebanding dengan jumlah situs aktif adsorben, yang dapat bereaksi terhadap adsorbat yang dibuktikan dengan plot adsorpsi pada data [Gambar 2](#). [Gambar 5](#) merupakan kurva yang menunjukkan bahwa semua sampel memiliki nilai linieritas rendah sekitar 0.1 – 0.8. Nilai linieritas yang menunjukkan bahwa adsorpsi ibuprofen dengan silika SLM tidak dapat digambarkan dengan model kinetika pseudo orde nol.



Gambar 5. Plot linier pseudo orde nol adsorpsi ibuprofen menggunakan SLM untuk berbagai (a) konsentrasi awal, (b) massa, (c) pH, dan (d) suhu.

Pseudo orde nol diprediksi karena adsorpsi ibuprofen pada silika memiliki laju yang tidak bergantung pada konsentrasi reaktan. Hal berbeda terlihat di plot kinetika [Gambar 6](#) dimana nilai linieritas lebih rendah daripada model pseudo orde nol.

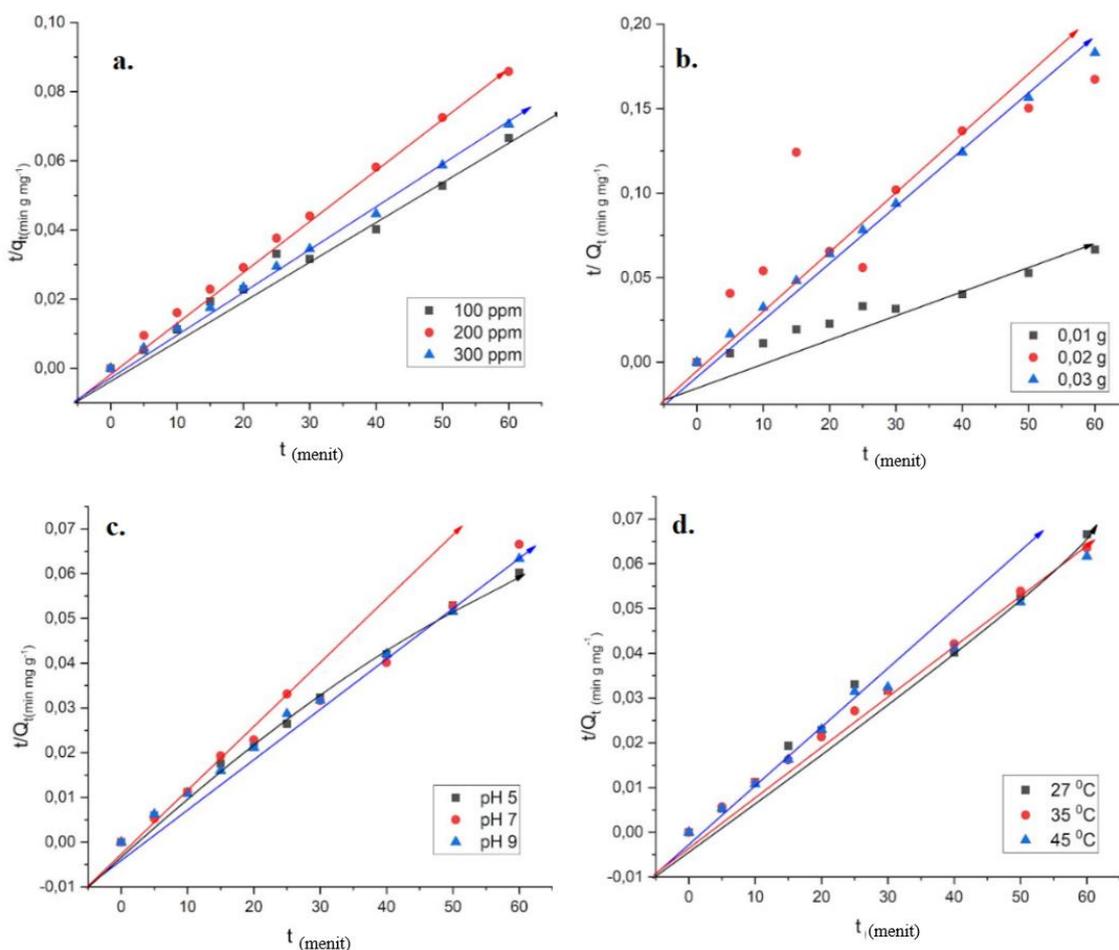
Pada [Gambar 6](#) tampak bahwa hampir semua plot pseudo orde nol menunjukkan linearitas rendah. Hal ini memberikan arti bahwa adsorpsi ibuprofen pada silika SLM bersebrangan jauh dengan prinsip kinetika pseudo orde satu. Hal ini secara logika dapat dijelaskan dimana prinsip model kinetika adsorpsi pseudo orde satu yang banyak dikenal sebagai model Lagergren merupakan model kinetika reaksi adsorpsi yang menggambarkan sifat *reversible* dalam sistem kesetimbangan adsorben-adsorbat selama proses adsorpsi molekul dari fase cair ke fase padat. Ketika linieritas dari [Gambar 6](#) sangat rendah, artinya adsorpsi ibuprofen dalam silika SLM berlangsung tidak *reversible* karena berbagai faktor seperti adanya pori kecil yang menjebak molekul ibuprofen sehingga tidak mampu melampaui system kesetimbangan. Hal yang sangat berbeda terlihat di [Gambar 7](#) dimana linieritas semua variasi kondisi mendekati 1.



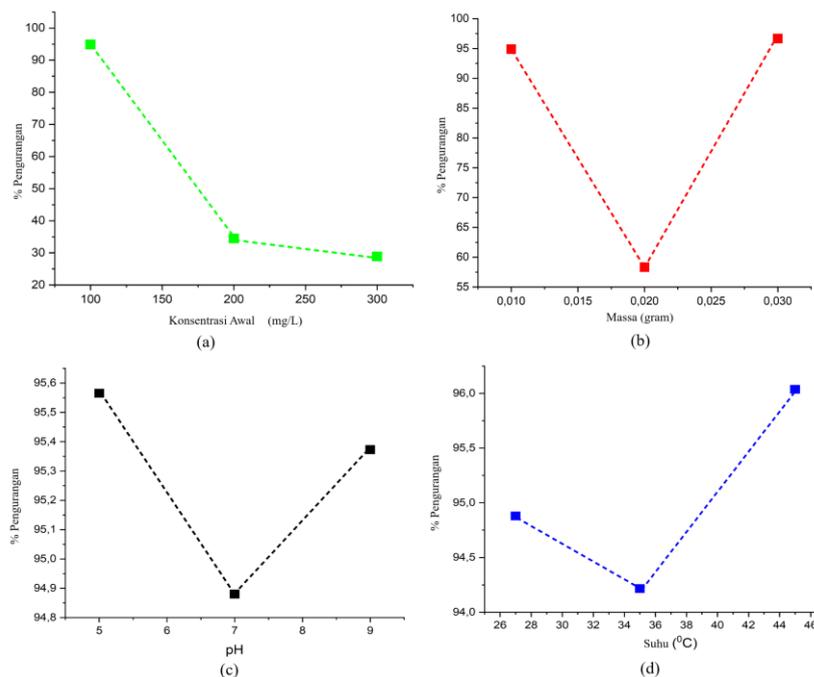
Gambar 6. Plot linier pseudo orde satu adsorpsi ibuprofen menggunakan SLM untuk berbagai (a) konsentrasi awal, (b) massa, (c) pH, dan (d) suhu.

Hampir semua variasi kondisi pada [Gambar 7](#) menunjukkan linearitas yang ideal (mendekati 1) yang bisa diartikan bahwa model kinetika pseudo orde dua paling mewakili proses adsorpsi ibuprofen oleh silika SLM. Keterwakilan proses adsorpsi ibuprofen pada silika SLM bisa dijelaskan oleh prinsip model kinetik pseudo orde dua dimana pada model ini terdapatat prinsip pembatas laju berupa interaksi adsorben-adsorbat berupa interaksi adsorpsi kimia. Berbeda dengan orde nol, pseudo orde dua menitik beratkan pada prinsip bahwa laju bergantung pada kapasitas adsorpsi, bukan konsentrasi adsorbat. Menilik prinsip ini, proses adsorpsi ibuprofen pada silika SLM memiliki laju adsorpsi yang dipengaruhi oleh kemampuan silika untuk menyerap ibuprofen yang umumnya dipengaruhi factor porositas dan kemampuan fungsional gugus fungsi adsorbent untuk melakukan interaksi dan tarikan kimiawi terhadap moekul ibuprofen sebagai adsorbat. Hal ini juga terlihat dari plot % pengurangan ibuprofen dengan variasi masa, konsentrasi, suhu dan keasaman pada [Gambar 8](#).

[Gambar 8](#) menunjukkan bahwa % pengurangan ibuprofen dalam adsorpsi menggunakan silika SLM paling dominan dipengaruhi konsentrasi awal yang diapakai. Semakin tinggi konsentrasi semakin rendah % pengurangan ibuprofen karena factor kejenuhan system. Selain itu, dari [Gambar 8](#) dapat kita lihat bahwa kondisi optimum untuk adsorpsi ibuprofen menggunakan silika SLM adalah konsentawai awal ibuprofen sebesar 100 mg/L, massa adsorben 0,03 g, keasaman rendah (pH 5) dan suhu tinggi (45 °C). Dari hasil invetigasi ini dapat kita simpukan bahwa % pengurangan ibuprofen tidak hanya dipengaruhi satu parameter melainkan harus memodifikasi beberapa kondisi untuk mendapatkan kapasitas adsorpsi maksimum.



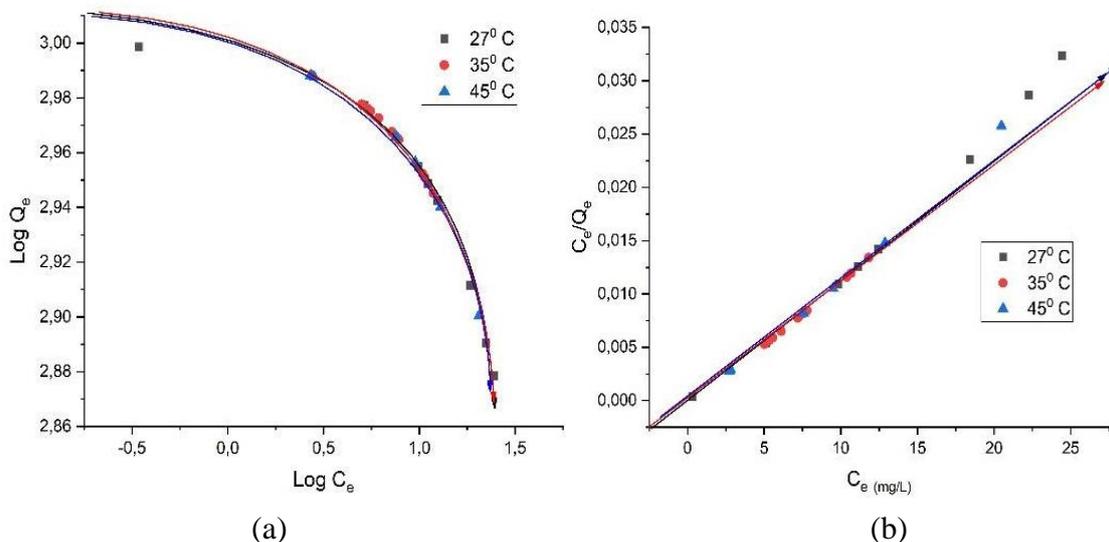
Gambar 7. Plot linier pseudo-second-order adsorpsi ibuprofen menggunakan SLM untuk berbagai (a) konsentrasi awal, (b) massa, (c) pH, dan (d) suhu.



Gambar 8. Plot korelasi adsorpsi ibuprofen menggunakan SLM untuk berbagai a) konsentrasi awal, (b) massa, (c) pH, dan (d) suhu.

Isoterm Adsorpsi

Model adsorpsi isoterm ditentukan dengan mengukur adsorpsi ibuprofen dengan nanosilika. Penentuan model isoterm bertujuan untuk menjelaskan fenomena adsorpsi yang terjadi dalam proses adsorpsi serta menjelaskan apakah proses adsorpsi terjadi secara kimia atau fisik menggunakan system Langmuri dan Freundlich. Model isoterm adsorpsi Langmuir mengasumsikan bahwa proses adsorpsi terjadi pada lapisan monolayer serta terjadi adsorpsi secara kimia. Sementara itu, isotherm Freundlich mengasumsikan bahwa adsorpsi yang terjadi adalah fisika dan terjadi ssecara multilayer (Anggriani *et al.*, 2021). Kurva isoterm adsorpsi Freundlich merupakan kurva hubungan antara log Q_e dan log C_e , sedangkan kurva isoterm Langmuir diperoleh dari hubungan C_e dan C_e/Q_e Gambar 9. Hasil analisis model isotherm yang terjadi pada adsorpsi ibuprofen dengan nanosilika disajikan pada Tabel 2.



Gambar 9. Grafik isoterm adsorpsi (a) Feundlich (b) Langmuir.

Terdapat beberapa kriteria dari nilai R_L , yaitu jika $R_L > 1$ maka proses adsorpsi tidak terjadi, jika $R_L = 1$ maka linier, dan jika $0 < R_L < 1$, maka proses adsorpsi menguntungkan atau adsorpsi terjadi dengan baik, sedangkan jika $R_L = 0$, maka tidak terjadi proses adsorpsi. Tabel 2 dan Gambar 9 menunjukkan bahwa nilai $0 < R_L < 1$. Hal ini menunjukkan bahwa Relatif Langmuir menguntungkan dan terjadi dengan baik (Zendelska *et al.*, 2015). Sementara, pada isotherm Freundlich terdapat Konstanta Freundlich (K_F) yang menunjukkan kemampuan relatif dari suatu adsorben dalam mengadsorpsi adsorbat, dimana semakin besar nilai K_F maka semakin besar kemampuan suatu adsorben dalam mengadsorpsi. Pada penelitian ini menunjukkan bahwa besarnya kemampuan adsorpsi dari adsorben paling tinggi 1,22 mg/L yang ditunjukan dari harga konstanta Freundlich. Sementara itu, untuk kekuatan interaksi antara adsorben dan adsorbat dapat dilihat dari nilai $1/n$, dimana semakin kecil nilai $1/n$ maka semakin kuat interaksi antara adsorben dengan adsorbat. Nilai n akan menguntungkan (disukai) adsorpsinya apabila nilai $n > 1$ (Irannajad *et al.*, 2016).

Tabel 2. Isoterm adsorpsi.

Sampel	Isoterm							
		Langmuir ($C_e/q_e = (1/Q_0b) + (C_e/Q_0)$)			Freundlich $\text{Log } x/m = \text{log } K + 1/n \text{ log } p$			
Suhu	R^2	qm (mg/g)	K_L (dm^3/mg)	R_L (1×10^{-2})	R^2	K_F (dm^3/mg)	$1/n$ (1×10^{-2})	N
27 °C	0,99	769,23	0,87	1,14	0,66	1,15	6,11	16,37
35 °C	0,99	833,33	1,5	0,66	0,98	1,22	8,59	11,64
45 °C	0,99	769,23	1,18	0,83	0,86	1,21	8,29	12,06

Keterangan: x = massa adsorbat, m = massa adsorben, p = tekanan kesetimbangan, c = konsentrasi kesetimbangan adsorbat, K = koefisien distribusi, n = faktor koreksi, C_e = konsentrasi saat kesetimbangan, Q_0b = kapasitas adsorpsi teramati, Q_0 = kapasitas adsorpsi awal, q_e = kapasitas adsorpsi saat kesetimbangan.

Kekuatan interaksi adsorben nanosilika dengan ibuprofen ditunjukkan dari nilai $1/n$ sebesar 0,0611. Nilai $1/n$ yang baik dan menguntungkan berkisar antara 1 dan 0 dimana apabila semakin kecil, maka semakin kuat interaksi adsorben dan adsorbat. Sementara itu, untuk nilai n pada penelitian ini juga $n > 1$, maka adsorpsi berlangsung dengan baik. Nilai $n > 1$ juga mengindikasikan adanya reaktivitas yang tinggi dari situs aktif adsorben sehingga jika permukaan adsorben bermuatan negatif menjadi sangat mudah untuk menyerap kationik yang ada dalam sistem (Schwantes *et al.*, 2016). Oleh karena itu, ditinjau dari nilai $1/n$ dan n pada isotherm Freundlich menunjukkan bahwa penyerapan ibuprofen berlangsung baik dan menguntungkan.

KESIMPULAN

Pemilihan adsorben nanosilika dari lumpur Lapindo menunjukkan bahwa performa adsorpsi nanosilika lumpur lapindo sangat baik dalam menyerap ibuprofen sehingga cocok dan menjanjikan sebagai sumber alami adsorben. Kondisi optimal penyerapan ibuprofen oleh adsorben lumpur Lapindo ialah pada menit 60, suhu 45 °C, konsentrasi awal 100 mg/L dan masa adsorben 0,03 g dengan presentase penyerapan sebesar 96,9%. Lebih lanjut lagi, penentuan kinetika menunjukkan energi penyerapan yang terjadi ialah 0,441 kJ/mol. Nilai yang diamati lebih rendah dari energi adsorpsi yang dilaporkan dalam literatur untuk adsorben yang biasa digunakan untuk penghilangan ibuprofen. Selain itu, desain eksperimen mengarah pada kesimpulan bahwa suhu merupakan faktor yang tidak relevan, yang dinyatakan kembali oleh energi adsorpsi yang rendah.

KONFLIK KEPENTINGAN

Tidak ada konflik kepentingan dalam artikel ini.

KONTRIBUSI PENULIS

MU: Kurasi Data, Analisis Formal, Akuisisi Pendanaan, Investigasi, Metodologi, Administrasi Proyek, Sumber Daya, Validasi, Visualisasi, Penulisan Draf Asli, Menulis, Meninjau dan Mengedit Naskah; AAS: Analisis formal, Akuisisi Pendanaan, Metodologi, Sumber Daya, Perangkat Lunak, Pengawasan, Penulisan Draf Asli, Menulis, Meninjau dan Mengedit Naskah; ZAF: Akuisisi pendanaan; IS: Metodologi, Sumber Daya, Perangkat Lunak, Penulisan Draf Asli; ZQS: Sumber Daya, Perangkat Lunak, Penulisan Draf Asli.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih pada Universitas Sebelas Maret Surakarta atas pendanaan riset pada skema Kolaborasi Internasional (KI) Grant (194.2/UN27.22/PT.01.03/2024).

DAFTAR PUSTAKA

- Anggriani, M. U., Hasan, A., and Purnamasari, I., 2021. Kinetika Adsorpsi Karbon Aktif Dalam Penurunan Konsentrasi Logam Tembaga (Cu) Dan Timbal (Pb). *Universitas Sriwijaya*, 12(02), 29–37.
- Dziadkowiec, J., Mansa, R., Quintela, A., Rocha, F., and Detellier, C., 2017. Preparation, characterization and application in controlled release of Ibuprofen-loaded Guar Gum/Montmorillonite Bionanocomposites. *Applied Clay Science*, 135, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.09.003>.
- Fanani, N., and Ulfindrayani, I. F., 2019. Synthesis Of Activated Carbon (AC) From Bamboo Waste As A Support Of Zinc Oxide (ZnO) Catalyst. *Konversi*, 8(2), 108–112. <https://doi.org/10.20527/k.v8i2.7183>.
- Imoisili, P. E., Ukoba, K. O., and Jen, T. C., 2020. Green Technology Extraction and Characterisation of Silica Nanoparticles from Palm Kernel Shell Ash Via Sol-Gel. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 307–313. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.059>.
- Iovino, P., Canzano, S., Capasso, S., Erto, A., and Musmarra, D. 2015. A modeling analysis for the assessment of ibuprofen adsorption mechanism onto activated carbons. *Chemical Engineering Journal*, 277, 360–367. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.097>.
- Irannajad, M., Kamran Haghighi, H., and Soleimanipour, M. 2016. Adsorption of Zn²⁺, Cd²⁺ and Cu²⁺ on zeolites coated by manganese and iron oxides. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 52(2), 893–908. <https://doi.org/10.5277/ppmp160229>.
- Jalil, A. A., Triwahyono, S., Adam, H. ., Rahim, D. ., Aziz, M. A. A., Hairom, N. H. ., Razali, N. A. ., Abidin, M. A. ., and Mohamadiah, M. K. . 2010. Adsorption of methyl orange from aqueous solution onto calcined Lapindo volcanic mud. *Journal of Hazardous Materials*, 181, 755–762.

- Meila Anggriani, U., Hasan, A., and Purnamasari, I. 2021. Kinetika Adsorpsi Karbon Aktif Dalam Penurunan Konsentrasi Logam Tembaga (Cu) Dan Timbal (Pb). *Universitas Sriwijaya*, 12(02), 29–37.
- Nizar, M., and Supardi, I. 2016. Sintesis SiO₂ Berbahan Dasar Abu Vulkanik Sebagai Adsorben Ion Pb [III]. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI)*, 05(1), 28–32.
- Puspitasari, R. N., Budiarti, H. A., Hatta, A. M., Sekartedjo, and Risanti, D. D. 2017. Enhanced Dye-Sensitized Solar Cells Performance through Novel Core-shell Structure of Gold Nanoparticles and Nano-Silica Extracted from Lapindo Mud Vulcano. In *Procedia Engineering* (Vol. 170, pp. 93–100). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.018>.
- Pyrzyńska, K., and Wierzbicki, T. 2005. Sorption behavior of vanadium on silica gel modified with tetrakis(4-carboxyphenyl)porphyrin. *Analytical Sciences*, 21(8), 951–954. <https://doi.org/10.2116/analsci.21.951>.
- Schwantes, D., Gonçalves, A. C., Coelho, G. F., Campagnolo, M. A., Dragunski, D. C., Tarley, C. R. T., Miola, A. J., and Leismann, E. A. V. 2016. Chemical modifications of cassava peel as adsorbent material for metals ions from wastewater. *Journal of Chemistry*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/3694174>.
- Tadanaga, K., Morita, K., Mori, K., and Tatsumisago, M. 2013. Synthesis of monodispersed silica nanoparticles with high concentration by the Stöber process. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 68(2), 341–345. <https://doi.org/10.1007/s10971-013-3175-6>.
- Talib, N. ., Triwahyono, S., Jalil, A. A., Mamat, C. ., Salamun, N., Fatah, N. A. ., Sidik, S. ., and Teh, L. 2016. Utilization of a cost effective Lapindo mud catalyst derived.pdf. *Energy Conversion and Management*, 108, 411–421.
- Thirugnanam, L., Ganguly, D., and Sundara, R. 2021. PPy coated on SiO₂ encapsulated porous carbon nanofibers as a potential anode material for high rate capable and long-life Li-ion battery. *Materials Letters*, 298, 130029. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130029>.
- Ulfa, M., Saraswati, T. E., and Mulyani, B. 2019. Adsorption of ibuprofen molecule onto mesoporous silica SBA-15 loaded by iron particles using arc discharge treatment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 509(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/509/1/012073>.
- Vicente-Martínez, Y., Caravaca, M., Soto-Meca, A., and Solana-González, R. 2020. Magnetic core-modified silver nanoparticles for ibuprofen removal: an emerging pollutant in waters. *Scientific Reports*, 10(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75223-1>.
- Zendelska, A., Golomeova, M., Blazev, K., Krstev, B., Golomeov, B., and Krstev, A. 2015. Adsorption of copper ions from aqueous solutions on natural zeolite. *Environment Protection Engineering*, 41(4), 17–36. <https://doi.org/10.5277/epe150402>.