MASALIQ
Jurnal Pendidikan dan Sains

e-ISSN: 2808-8115
p-ISSN: 2809-1051

Terindeks: Sinta 5, Copernicus, Dimensions, Scilit, Lens, Crossref, Garuda, Google Scholar, Base, etc

https://doi.org/10.58578/masaliq.v6i1.8940

SINTESIS DAN KARAKTERISASI SILIKA XEROGEL DARI ABU CANGKANG SAWIT SERTA PENENTUAN LUAS PERMUKAANNYA MENGGUNAKAN METODE ADSORPSI METILEN BIRU

Synthesis and Characterization of Silica Xerogel From Oil Palm Shell Ash and Determination of Its Surface Area Using the Methylene Blue Adsorption Method

Afdila Nada, Alifea Arpy, Faiqa Haura Tsagifa, Edi Nasra, M.Iqbal Saputra Gemasih
Universitas Negeri Padang
edinasra@fmipa.unp.ac.id

Article Info:

Submitted:	Revised:	Accepted:	Published:
Dec 17, 2025	Jan 10, 2026	Jan 22, 2026	Jan 27, 2026

Abstract

Silica xerogel is a porous material with a high surface area and active silanol and siloxane groups, making it a promising candidate for use as an adsorbent material. This study aimed to synthesize silica xerogel from palm shell ash as an alternative silica source, characterize its functional groups, and determine its surface area using the methylene blue adsorption method. Silica xerogel was synthesized via a sol–gel method followed by a drying process to obtain the xerogel. Functional group characterization was carried out using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), while the surface area was determined based on methylene blue adsorption analyzed using UV–Vis absorbance data. The results showed that the synthesized silica xerogel possessed characteristic silica functional groups, namely siloxane (Si–O–Si) and silanol (Si–OH). The methylene blue adsorption process showed a decrease in concentration from 25.7912 mg/L to 2.06

Masaliq Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License

mg/L, with an adsorption efficiency of 92%, an adsorption capacity of 5.9328 mg/g, and a silica xerogel surface area of 21.96032 m²/g. These findings indicate that silica xerogel synthesized from palm shell ash has surface characteristics that support the adsorption of cationic dyes and has potential for use as a biomass waste-based adsorbent material.

Keywords: Silica Xerogel; Palm Shell Ash; Methylene Blue; Adsorption; Sol–Gel Method

Abstrak: Silika xerogel merupakan material berpori dengan luas permukaan tinggi serta gugus aktif silanol dan siloksan, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai material adsorben. Penelitian ini bertujuan mensintesis silika xerogel dari abu cangkang sawit sebagai sumber silika alternatif, mengkarakterisasi gugus fungsinya, serta menentukan luas permukaannya menggunakan metode adsorpsi *metilen biru*. Sintesis silika xerogel dilakukan melalui metode *sol–gel* yang diikuti proses pengeringan untuk menghasilkan xerogel. Karakterisasi gugus fungsi dilakukan menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*, sedangkan luas permukaan ditentukan berdasarkan adsorpsi *metilen biru* yang dianalisis menggunakan data absorbansi *UV–Vis*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa silika xerogel yang dihasilkan memiliki gugus fungsi khas silika, yaitu siloksan (Si–O–Si) dan silanol (Si–OH). Proses adsorpsi *metilen biru* menunjukkan penurunan konsentrasi dari 25,7912 mg/L menjadi 2,06 mg/L dengan efisiensi adsorpsi sebesar 92%, kapasitas adsorpsi sebesar 5,9328 mg/g, serta luas permukaan silika xerogel sebesar 21,96032 m²/g. Temuan ini mengindikasikan bahwa silika xerogel yang disintesis dari abu cangkang sawit memiliki karakteristik permukaan yang mendukung adsorpsi pewarna kationik dan berpotensi digunakan sebagai material adsorben berbasis limbah biomassa.

Kata Kunci: Silika Xerogel; Abu Cangkang Sawit; *Metilen Biru*; Adsorpsi; Metode *Sol–Gel*

PENDAHULUAN

Limbah biomassa dari industri kelapa sawit, khususnya cangkang sawit, dihasilkan dalam jumlah besar dan hingga kini masih belum dimanfaatkan secara optimal. Cangkang sawit sebagai limbah biomassa dari industri kelapa sawit telah dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi, antara lain sebagai sumber energi biomassa, bahan baku karbon aktif, penguat pada material komposit, serta prekursor material anorganik seperti silika. Selain itu, cangkang sawit juga telah digunakan sebagai bahan amelioran tanah dan sumber karbon untuk berbagai material fungsional. Meskipun memiliki beragam potensi pemanfaatan, pengolahan cangkang sawit sebagai adsorben merupakan salah satu aplikasi yang paling bernilai dibandingkan pemanfaatan lainnya (Zakir et al., 2025).

Salah satu pemanfaatan cangkang sawit ini dapat dijadikan sebagai adsorben yaitu silika yang disintesis dari abu cangkang sawit. Melalui proses pembakaran, aktivasi, dan

sintesis lanjutan, cangkang sawit dapat dikonversi menjadi material berpori dengan luas permukaan tinggi dan keberadaan gugus aktif permukaan, sehingga sangat efektif untuk mengadsorpsi zat pencemar seperti zat warna dan logam berat (Permady & Mustakim, 2024). Abu cangkang sawit ini dapat disintesis secara efektif menggunakan metode sol-gel yang ramah lingkungan. Metode ini memungkinkan pembentukan silika amorf dengan luas permukaan tinggi serta keberadaan gugus aktif silanol (Si-OH) dan siloksan (Si-O-Si). Studi sebelumnya menggunakan silika dari fly ash untuk mensisntesis silika xerogel yang menunjukkan bahwa silika hasil sintesis dari fly ash memiliki karakteristik fisik dan kimia yang kompetitif dibandingkan silika komersial, sehingga berpotensi diaplikasikan sebagai material adsorben (Cynthia & Nasra, 2024).

Metode sol–gel memanfaatkan reaksi pembentukan jaringan silika melalui tahapan pembentukan sol, gelasi, hingga pengeringan, sehingga mampu menghasilkan silika dengan struktur amorf, luas permukaan tinggi, serta porositas yang dapat disesuaikan (Jaturapiree et al., 2024). Selain itu, metode ini dapat diaplikasikan pada prekursor silika yang berasal dari biomassa, sehingga mendukung pemanfaatan limbah pertanian sebagai sumber material fungsional. Silika xerogel yang dihasilkan melalui metode sol-gel umumnya memiliki gugus aktif permukaan seperti silanol (Si-OH) dan siloksan (Si-O-Si), yang berperan penting dalam mekanisme adsorpsi melalui interaksi fisik dan kimia (Mahdi et al., 2024). Oleh karena itu, penerapan metode sol–gel dalam sintesis silika xerogel berbasis limbah pertanian, termasuk limbah cangkang kelapa sawit, menjadi pendekatan yang relevan dan prospektif dalam pengembangan adsorben berkelanjutan yang ramah lingkungan. Salah satu pendekatan yang umum digunakan untuk menentukan luas permukaan silika xerogel adalah metode adsorpsi metilen biru. Metode ini memanfaatkan kemampuan molekul metilen biru untuk teradsorpsi pada permukaan material berpori, sehingga luas permukaan dapat dihitung berdasarkan jumlah zat warna yang terikat (Cynthia & Nasra, 2024).

Silika xerogel secara khusus memiliki sifat kimia permukaan dan struktur pori yang berperan penting dalam menentukan kinerja adsorpsi. Material xerogel dari biomassa ini turunannya mampu menghasilkan adsorben dengan mekanisme adsorpsi yang melibatkan fisisorpsi dan kimisorpsi, sehingga meningkatkan efektivitas penyerapan (Mohamed et al., 2025). Keberadaan gugus silanol aktif (Si-OH) pada permukaan silika memungkinkan terjadinya interaksi yang kuat dengan molekul target melalui berbagai mekanisme, seperti interaksi elektrostatik dan ikatan hidrogen, sementara struktur pori silika berkontribusi terhadap aksesibilitas adsorbat. Silika xerogel dengan struktur mesopori dilaporkan efektif

dalam mengadsorpsi zat warna dan limbah logam karena kesesuaian ukuran pori serta muatan permukaan negatif yang mendukung interaksi elektrostatik. (Cynthia & Nasra, 2024; Manurung et al., 2023). Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis silika xerogel dari abu cangkang sawit menggunakan metode sol–gel, mengkarakterisasi gugus fungsi yang terbentuk, serta menentukan luas permukaannya menggunakan metode adsorpsi metilen biru.

METODE

1. Alat dan bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini gelas kimia, gelas ukur, labu ukur, pipet, spatula logam, batang pengaduk, magnetic stirrer, spin bar, mortar, corong kaca, botol semprot, kertas saring, pH meter,oven, timbangan analitik (ABS 220-4), hot plate, termometer, furnace , FTIR (PerkinElmer).

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini *Hydrochloric acid* (HCl, 37%, Merck), kristal *Sodium hydroxide* (NaOH, p.a., Merck), metilen biru, aquades, cangkang buah sawit.

2. Preparasi sampel

Sampel caangkang sawit di oven pada suhu 95℃ selama 16 jam. Setelah kering, cangkang sawit ditimbang sebanyak 50 gram dan difurnace pada suhu 750℃ selama 3 jam. Setelah itu abu cangkang sawit dicuci dengan HCl 3 M untuk menghilangkan pengotor berupa oksida lain yang tidak diinginkan selama 2 jam, kemudian abu cangkang sawit dikeringkan dalam oven pada suhu 150℃ selama 1 jam (Pausa et al., 2015).

3. Sintesis Silika Xerogel

Abu cangkang biji sawit ditimbang sebanyak 4,5 gram dilarutkan dalam 108 mL NaOH 7 M kemudian diaduk pada suhu 80°C selama 1 jam sehingga dihasilkan larutan natrium silikat (Na_2SiO_3). Residu disaring untuk mendapatkan filtrat natrium silikat dan dititrasi dengan HCl 3 M hingga pH 7. Selanjutnya hydrogel diaging dengan waktu 18 jam pada suhu kamar. Setelah aging selesai, hydrogel disaring dan dikeringkan dalam oven selama 5 jam pada suhu 70°C hingga dihasilkan silika xerogel (Cynthia & Nasra, 2024).

4. Karakterisasi

Cangkang sawit, abu cangkang sawit, dan silika xerogel sebanyak 0,1 gram dikarakterisasi dengan FTIR untuk mengetahui gugu fungsi yang terdapat pada cangkang sawit, abu cangkang sawit, dan silika xerogel.

5. Luas Permukaan

Luas permukaan silika xerogel ditentukan menggunakan metode adsorpsi metilen biru. Sebanyak 25 mL larutan metilen biru 25 mg/L dicampurkan dengan 0,1 g silika xerogel dan diaduk pada 200 rpm selama 1 jam. Setelah penyaringan, konsentrasi metilen biru dalam filtrat diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum. Luas permukaan silika xerogel dihitung menggunakan persamaan.

$$S = \frac{X_m \times N \times a}{Mr}$$

(Anjelia et al., 2024).

HASIL

1. Sintesis Silika Xerogel

Sintesis silika xerogel dari abu cangkang sawit dilakukan menggunakan metode sol–gel dengan prekursor natrium silikat (Pal Singh, et.al., 2023). Tahapan sintesis meliputi proses ekstraksi silikat, pembentukan sol, gelasi, aging, dan pengeringan. Skema keseluruhan proses sol–gel pada sintesis silika xerogel ditunjukkan pada Gambar 1.

Pada tahap ekstraksi, abu cangkang sawit direaksikan dengan larutan NaOH untuk menghasilkan larutan natrium silikat. Larutan natrium silikat selanjutnya direaksikan dengan asam klorida (HCl) hingga terbentuk asam silikat yang mengalami polimerisasi membentuk silika hidrogel. Hidrogel yang terbentuk kemudian mengalami proses aging dan dikeringkan sehingga diperoleh silika xerogel berbentuk padatan berpori, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. Dari proses sintesis ini diperoleh silika xerogel dengan rendemen sebesar 22,56% terhadap massa abu yang digunakan, sedangkan rendemen total terhadap bahan baku awal cangkang sawit sebesar 2,03%.

2. Karakterisasi

FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat pada cangkang sawit, abu cangkang sawit, dan silika xerogel hasil sintesis dari abu cangkang sawit. Spektrum FTIR ketiga sampel ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil FTIR

Interpretasi	Bilangan Gelombang (cm^{-1})
O-H	3300-3500
C = C	1630–1500
Si-O-Si	1000–1100
H-O-H (bending)	1630
Si-OH	950–970

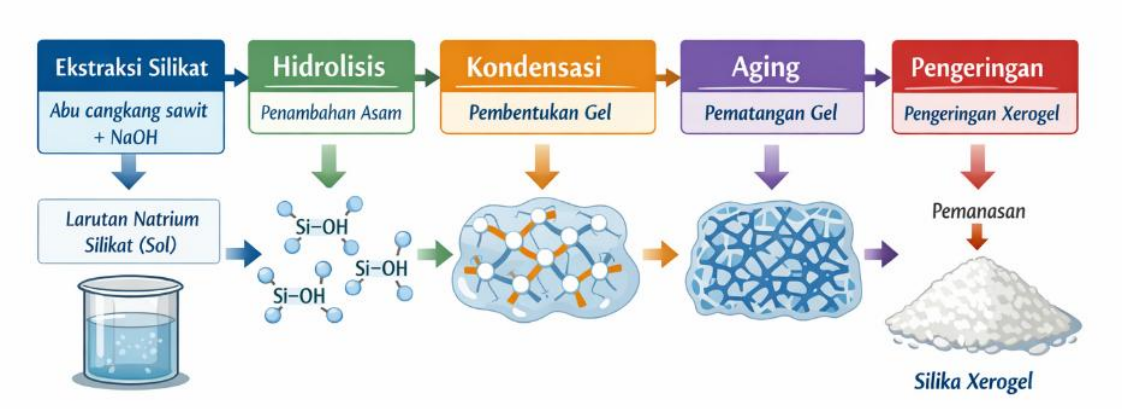
3. Luas Permukaan

Silika xerogel yang disintesis dari abu cangkang sawit menunjukkan kemampuan mengadsorpsi pewarna metilen biru dalam larutan. Hasil pengujian adsorpsi menunjukkan terjadinya penurunan konsentrasi metilen biru dari 25,7912 mg/L menjadi 2,06 mg/L setelah proses adsorpsi. Konsentrasi akhir tersebut ditentukan berdasarkan nilai absorbansi sebesar 0,105, yang dihitung menggunakan persamaan regresi linier dari kurva standar metilen biru yaitu $y = 0{,}0374x + 0{,}0279$ dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0{,}9758$. Berdasarkan hasil perhitungan, silika xerogel memiliki luas permukaan sebesar 21,96032 m^2/g. Kapasitas adsorpsi yang diperoleh sebesar 5,9328 mg/g, sedangkan efisiensi adsorpsi mencapai 92%.

PEMBAHASAN

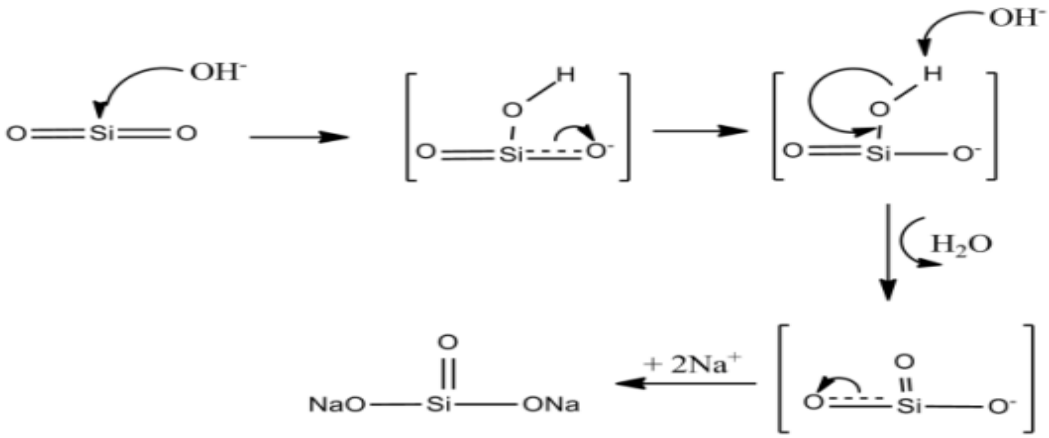
1. Sintesis Silika Xerogel

Sintesis silika xerogel dengan prekursor natrium silikat dilakukan melalui metode sol–gel (Pal Singh et al., 2023). Tahapan pembentukan silika xerogel melalui metode sol–gel, mulai dari pembentukan sol hingga pengeringan, ditampilkan pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Proses Sol-Gel pada Sintesis Silika Xerogel

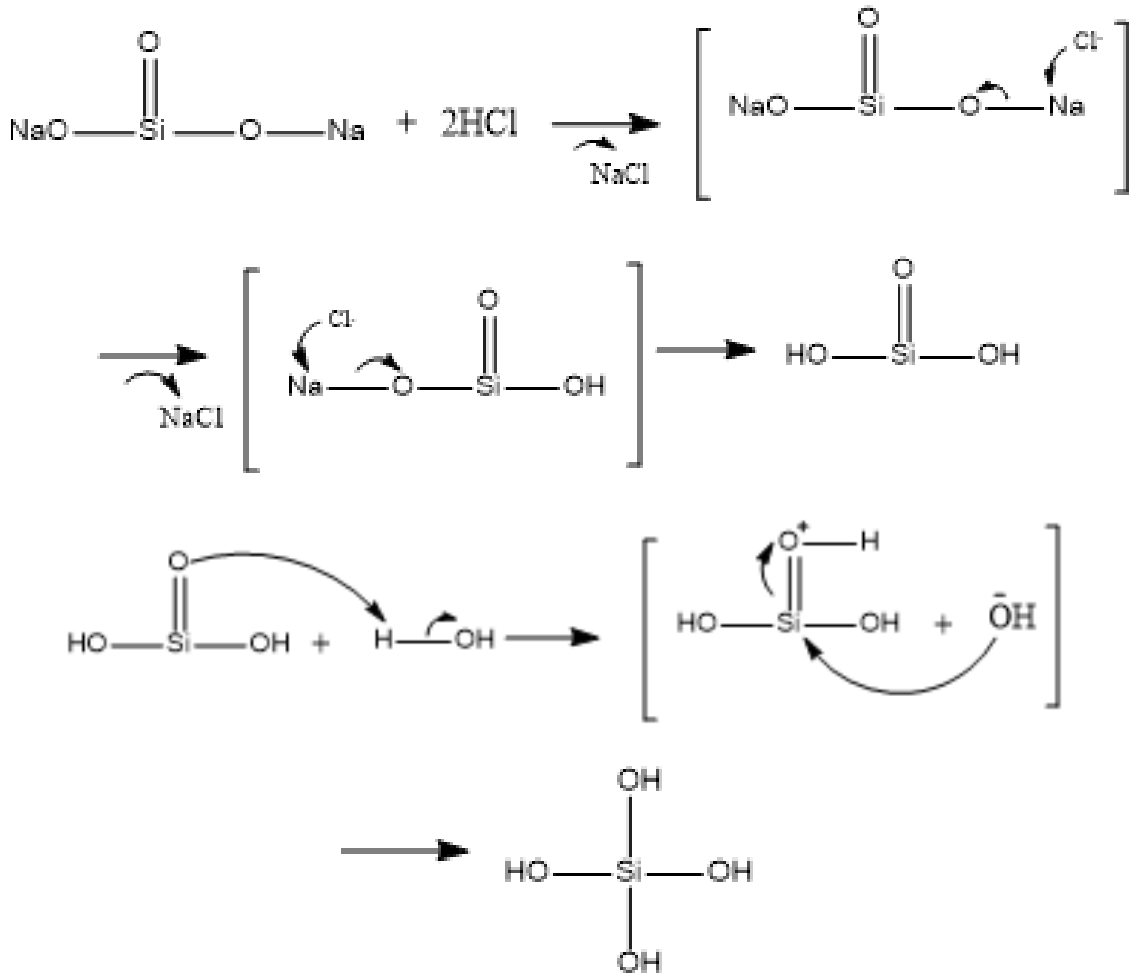
Berdasarkan Gambar 1. tahap ekstraksi, abu cangkang sawit direaksikan dengan NaOH untuk menghasilkan larutan natrium silikat. Natrium silikat diperoleh melalui reaksi antara silika yang terdapat dalam abu terbang dan larutan natrium hidroksida (NaOH), yang menyebabkan silika padat terlarut dan berubah menjadi spesies silikat dalam larutan. Dalam medium berair, NaOH sebagai basa kuat terdisosiasi sempurna menjadi ion Na^+ dan OH^-. Ion OH^- berperan sebagai nukleofil kuat yang menyerang atom silikon (Si) bermuatan elektrofil dalam struktur SiO_2. Serangan ini menyebabkan redistribusi elektron pada ikatan Si=O, sehingga terbentuk gugus silanol terdeprotonasi (Si-O^-) dan menghasilkan intermediat SiO_2OH (Yuan et al., 2019). Spesies silikat ini selanjutnya digunakan sebagai bahan awal pada tahapan sintesis berikutnya, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Mekanisme Pembentukan Na_2SiO_3

Natrium silikat direaksikan dengan asam (HCl) membentuk asam silikat, yang selanjutnya menghasilkan silika hidrogel atau hidrosol $Si(OH)_4$ dengan gugus silanol (Si–OH). Spesies ini mengalami polimerisasi melalui pembentukan ikatan siloksan (Si-O-Si)

hingga terbentuk gel silika, sementara sebagian gugus silanol tetap berada pada permukaan material. Adapun reaksinya dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Pembentukan $Si(OH)_4$

Tahap selanjutnya adalah proses aging, yang bertujuan menstabilkan struktur gel dan berperan penting dalam menentukan karakteristik silika xerogel, seperti luas permukaan, morfologi, dan porositas. Selama proses ini terjadi polimerisasi lanjutan melalui pembentukan ikatan siloksan (Si-O-Si), sehingga jaringan silika menjadi lebih kuat dan kaku dalam pembentukan gel (Cynthia & Nasra, 2024). Permukaan silika xerogel mengandung gugus silanol (-OH) dan siloksan (Si-O-Si), di mana gugus silanol yang bersifat higroskopis menyebabkan permukaannya hidrofilik dan mampu berinteraksi kuat dengan molekul air, sehingga berpengaruh terhadap aplikasinya (Tanheitafino et al., 2020). Hydrogel yang terbentuk dikeringkan agar terbentuk padatan yang berpori dapat dilihat pada Gambar 4.

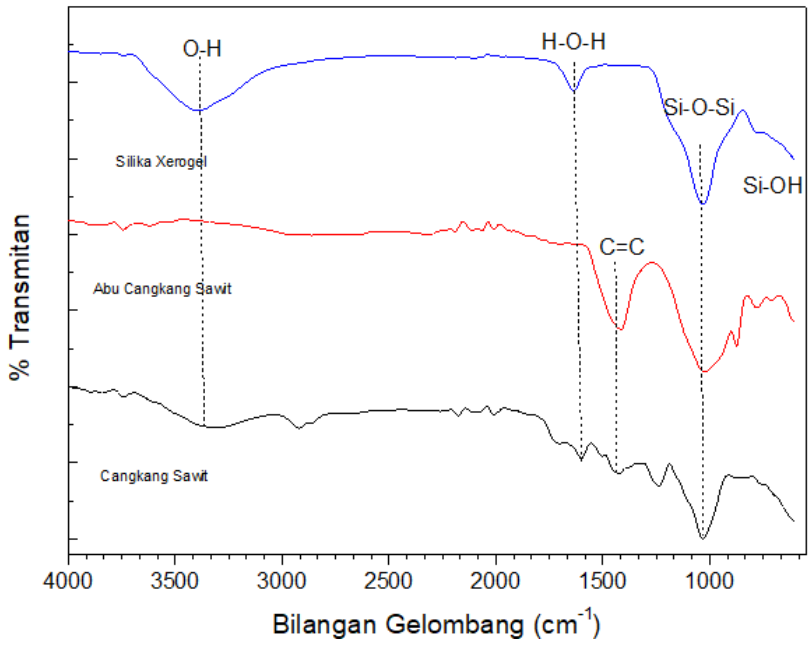


Gambar 4. Silika Xerogel

Rendemen silika xerogel yang diperoleh dari abu cangkang sawit sebesar 22,56%, sedangkan rendemen total terhadap bahan baku awal sebesar 2,03%. Nilai ini menunjukkan bahwa sebagian silika dalam abu cangkang sawit berhasil diekstraksi dan dikonversi menjadi silika xerogel melalui metode sol–gel. Rendemen yang lebih tinggi terhadap abu mengindikasikan bahwa proses pembakaran berperan dalam meningkatkan konsentrasi silika dengan menghilangkan komponen organik. Rendemen yang diperoleh dipengaruhi oleh efisiensi ekstraksi silikat, proses pembentukan gel, serta tahapan pemisahan dan pengeringan yang dapat menyebabkan kehilangan material (Anjelia et al., 2024). Nilai rendemen ini menunjukkan bahwa abu cangkang sawit berpotensi sebagai sumber silika alternatif untuk sintesis silika xerogel berbasis limbah biomassa.

2. Karakterisasi

FTIR digunakan sebagai instrumen untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat pada cangkang sawit, abu cangkang sawit dan silika xerogel hasil sintesis dari abu canngkang sawit.



Gambar 5. spektrum FTIR

Spektra FTIR pada Gambar 5. cangkang sawit sebagai bahan baku awal menunjukkan ciri khas material lignoselulosa. Pita serapan yang lebar dan kompleks pada daerah 1630-1500 cm^{-1} mengindikasikan vibrasi C=C dari gugus aromatik lignin serta kontribusi selulosa dan hemiselulosa. Serapan lemah pada rentang 1000-1100 cm^{-1} menunjukkan keberadaan silika alami dalam jumlah kecil. Selain itu, pita lebar pada 3300-3500 cm^{-1} berkaitan dengan vibrasi ulur O-H dari gugus hidroksil pada selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Secara keseluruhan, spektrum FTIR cangkang sawit didominasi oleh karakteristik material organik biomassa lignoselulosa dengan kandungan silika mineral yang relatif rendah namun masih terdeteksi.

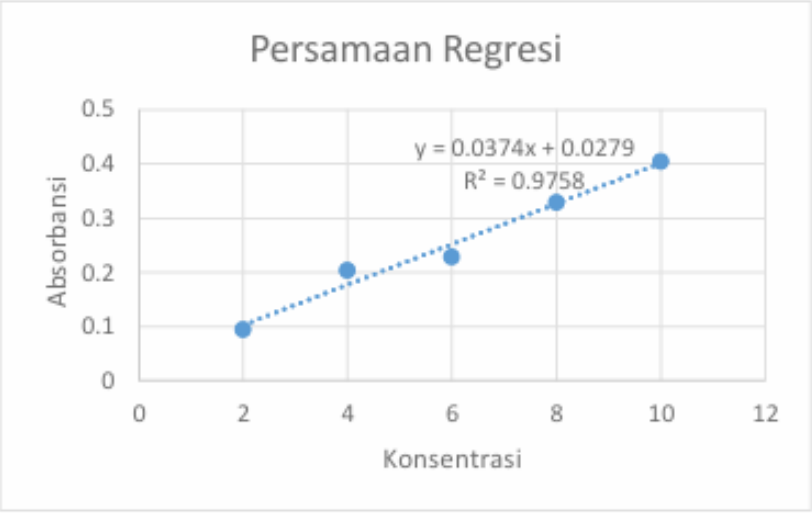
Perbandingan ketiga spektra FTIR menunjukkan terjadinya perubahan struktur yang jelas selama proses sintesis silika xerogel. Intensitas pita Si-O-Si pada daerah 1090-1100 cm^{-1} meningkat secara bertahap dari cangkang sawit, abu cangkang sawit, hingga silika xerogel, yang menandakan peningkatan kandungan silika akibat proses pembakaran dan ekstraksi (Dahliyanti et al., 2024). Pita kuat yang muncul di sekitar 1090-1100 cm^{-1} pada silika xerogel merupakan karakteristik utama jaringan siloksan (Si-O-Si). Pita ini menunjukkan terbentuknya rangkaian jaringan silika tiga dimensi yang padat, yang menjadi kerangka utama xerogel (Omatola et al., 2023). Pita ini jauh lebih serapan yang lebih kuat dibandingkan pada abu CS atau cangkang mentah, menunjukkan peningkatan derajat kondensasi silika selama sintesis sol-gel (Prempeh et al., 2024). Pita lain yang muncul di kisaran 750-800 cm^{-1} dapat dihubungkan dengan vibrasi simetris dari ikatan Si-O-Si atau O-Si-O. Keberadaan pita-pita

ini menegaskan struktur silika yang telah tersintesis secara konsisten dan menunjukkan keberhasilan metode sol-gel dalam membentuk jaringan silika yang stabil (Xie et al., 2025).

Pita -OH pada silika xerogel di daerah 3200-3600 cm^{-1} tampak lebih jelas dibanding abu CS atau cangkang mentah, yang menunjukkan keberadaan gugus silanol (Si-OH) pada permukaan silika xerogel. Gugus -OH ini terbentuk selama proses hidrolisis dan kondensasi pada metode sol–gel, di mana sebagian gugus silanol tetap bertahan di permukaan setelah pembentukan jaringan siloksan. Keberadaan silanol permukaan ini merupakan ciri khas silika xerogel dan berperan penting sebagai situs aktif adsorpsi, karena mampu berinteraksi dengan molekul target melalui ikatan hidrogen dan interaksi elektrostatik (Hanifah & Shofiyani, 2025). Sebaliknya, pita C=C pada rentang 1630-1500 cm^{-1} mengalami penurunan intensitas hingga hampir hilang pada silika xerogel, menunjukkan efektifnya penghilangan komponen organik.Perubahan spektral ini mengonfirmasi keberhasilan konversi biomassa lignoselulosa menjadi material silika anorganik.

3. Luas Permukaan

Silika xerogel yang disintesis dari abu cangkang sawit menunjukkan kemampuan adsorpsi terhadap pewarna metilen biru dalam larutan. Data eksperimental menunjukkan adanya penurunan konsentrasi metilen biru dari 25,7912 mg/L menjadi 2,06 mg/L setelah proses adsorpsi. Penurunan konsentrasi tersebut ditentukan berdasarkan nilai absorbansi akhir sebesar 0,105, yang kemudian dikonversi menggunakan persamaan regresi linier pada Gambar 4, yaitu y = 0,0374x + 0,0279 dengan nilai koefisien determinasi R^2 = 0,9758, yang menunjukkan hubungan linier yang baik antara konsentrasi dan absorbansi..



Gambar 6. Grafik kurva standar larutan metilen biru

Luas permukaan yang didapatkan mencerminkan karakteristik silika xerogel sebagai material berpori yang memiliki situs aktif pada permukaannya. Luas permukaan silika xerogel sebesar 21,96032 m^2/g berperan penting dalam menentukan kapasitas adsorpsinya. Berdasarkan hasil adsorpsi yang diperoleh, perhitungan kapasitas adsorpsi menunjukkan nilai sebesar 5,9328 mg/g, yang menandakan bahwa setiap gram silika xerogel mampu menyerap hampir 6 mg methylene blue dari larutan. Efisiensi adsorpsi yang mencapai 92% menunjukkan bahwa silika xerogel yang disintesis dari abu cangkang sawit memiliki potensi yang baik sebagai material adsorben untuk pewarna kationik seperti methylene blue. Kapasitas adsorpsi yang relatif tinggi ini mengindikasikan keberhasilan proses ekstraksi silika dari abu cangkang sawit dalam menghasilkan material dengan karakteristik permukaan yang mendukung penyerapan molekul organik bermuatan positif.

KESIMPULAN

Silika xerogel berhasil disintesis dari abu cangkang sawit menggunakan metode sol–gel dan menunjukkan karakteristik khas silika berdasarkan hasil analisis gugus fungsi. Spektrum FTIR mengonfirmasi keberadaan gugus siloksan (Si-O-Si) dan silanol (Si-OH) yang berperan sebagai situs aktif pada permukaan material. Penentuan luas permukaan menggunakan metode adsorpsi metilen biru menunjukkan bahwa silika xerogel memiliki luas permukaan sebesar 21,96032 m^2/g, yang mencerminkan sifatnya sebagai material berpori. Proses adsorpsi metilen biru menghasilkan penurunan konsentrasi yang signifikan dengan kapasitas adsorpsi sebesar 5,9328 mg/g dan efisiensi adsorpsi mencapai 92%. Hasil ini menunjukkan bahwa silika xerogel dari abu cangkang sawit memiliki karakteristik permukaan yang mendukung adsorpsi pewarna kationik dan berpotensi dimanfaatkan sebagai material adsorben berbasis limbah biomassa.

DAFTAR PUSTAKA

Anjelia, M., Nasra, E., Kurniawati, D., & Nizar, U. K. (2024). Pengaruh Variasi Konsentrasi NaOH terhadap Xerogel dari Kulit Durian (Durio zibethinus Murr.). *Periodic, 13*(1), 63–66.

Cynthia, & Nasra, E. (2024). Penentuan Kondisi Optimum Waktu Aging pada Sintesis Silika Xerogel dari Limbah Abu Terbang. *Gudang Jurnal Multidisiplin Ilmu, 2*(2), 50–53. https://gudangjurnal.com/index.php/gjmi/article/view/282

Dahliyanti, A., Yunitama, D. A., Rofiqoh, I. M., & Mustapha, M. (2022). Synthesis and characterization of silica xerogel from corn husk waste as cationic dyes adsorbent. *F1000Research, 11*, 305. https://doi.org/10.12688/f1000research.75979.1

Hanifah, U., & Shofiyani, A. (2025). Synthesis of hydrophobic silica xerogel from fly ash for oil–in–water adsorption. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi, 28*(5), 235–243.

Jaturapiree, A., Sukrat, K., Chaichana, E., Chidthong, R., & Saowapark, T. (2024). Dye wastewater treatment with rice husk-derived silica xerogel: An eco-friendly process. *Journal of Applied and Natural Science, 16*(3), 1213–1221. https://doi.org/10.31018/jans.v16i3.5805

Mahdi, H. H., Saleh, A. M., Alias, A. B., Jawad, A. H., Salman, S. D., Qarizada, D., Mostafa, M. M., Saleh, N. M., & Abdulqader, M. A. (2024). Synthesis and characterization of xerogel derived from palm kernel shell biochar and comparison with commercial activated carbon. *Journal of Ecological Engineering, 25*(6), 1–11. https://doi.org/10.12911/22998993/183719

Manurung, R., Parinduri, S. Z. D. M., Hasibuan, R., Tarigan, B. H., & Siregar, A. G. A. (2023). Synthesis of nano-CaO catalyst with SiO2 matrix based on palm shell ash as catalyst support for one cycle developed in the palm biodiesel process. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 7*, 100345. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100345

Mohamed, A., Bahari, A., Shatir, S., Hasan, A. S., Jawad, A. H., Abdulwahhab, T., Ali, O. M., Azlina, W., Ab, W., Ghani, K., Hamdi, H., Mohammed, N., & Khalil, O. (2025). Isotherm and kinetic models of SO2 adsorption on palm kernel shell-activated carbon and xerogel blends: Effect of flow rate and contact time. *Results in Engineering, 25*, 103970. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.103970

Omatola, K. M., Onojah, A. D., Amah, A. N., & Ahemen, I. (2023). Synthesis and characterization of silica xerogel and aerogel from rice husk ash and pulverized beach sand via sol-gel route. *Journal of the Nigerian Society of Physical Sciences, 5*(4), 1–9. https://doi.org/10.46481/jnsps.2023.1609

Pal Singh, J., Shankar Acharya, S., Kumar, S., & Kumar Dixit, S. (2023). Sol-gel method - recent advances nanomaterials – recent advances. In *IntechOpen*. IntechOpen.

Pausa, Y., Bara, M., Arman, Y., Fisika, P. S., & Tanjungpura, U. (2015). Optimasi Tingkat Kemurnian Silika, SiO2, dari Abu Cangkang Sawit Berdasarkan Konsentrasi Pengasaman. *Prisma Fisika, 3*(1), 2–5. https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jpfu/article/view/8903 [Broken link]

Prempeh, C. O., Formann, S., Hartmann, I., & Nelles, M. (2024). An improved method for the production of biogenic silica from cornhusk using sol–gel polymeric route. *Biomass Conversion and Biorefinery, 14*, 28701–28711. https://doi.org/10.1007/s13399-022-03615-6

Tanheitafino, S., Shofiyani, A., & Sasri, R. (2020). Synthesis and characterization of trimethylchlorosilane-modified silica xerogel. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi, 23*(7), 249–254.

Xie, X., Zhu, Z., Meng, Y., Wang, L., Zhao, F., Chen, L., Jiang, L., Yan, M., & Zhou, X. (2025). Ambient-dried silica xerogels with enhanced strength and thermal insulation via calcium ion-glycerol synergistic crosslinking. *Gels, 11*(6), 1–14. https://doi.org/10.3390/gels11060462

Yuan, N., Cai, H., Liu, T., Huang, Q., & Zhang, X. (2019). Adsorptive removal of methylene blue from aqueous solution using coal fly ash-derived mesoporous silica material. *Adsorption Science and Technology, 37*(3–4), 333–348. https://doi.org/10.1177/0263617419827438

Zakir, M., Taba, P., Permatasari, N. U., Nurdin, M., & Muliadi. (2025). Palm kernel shell based hydrothermal carbon for methylene blue removal in wastewater treatment: Application of dual adsorption isothermal models. *Journal of Ecological Engineering, 26*(7), 394–407. https://doi.org/10.12911/22998993/203741