

Optimasi Dan Analisis Kinetika Adsorpsi *Methylene Blue* Menggunakan Silika Gel Berbasis Abu Limbah Biomassa

Aulia Chunissy Salsabilla, Linda Ekawati*, Akbar Ismi Aziz Pramito

Program Studi Teknologi Kimia Industri, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang

*Koresponden email: linda.ekawati@polsri.ac.id

Diterima: 25 Juli 2026

Disetujui: 30 Juli 2026

Abstract

This study aimed to synthesize silica gel from a mixture of rice husk ash and bagasse ash using the sol gel method and to evaluate its performance as an adsorbent for methylene blue. The independent variables were adsorbent mass (0,1, 0,2, and 0,3 g) and adsorption time (30, 45, 60, 75, and 90 minutes). The synthesized silica gel was characterized using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and X-Ray Diffraction (XRD). FTIR analysis confirmed the presence of silanol (Si-OH) and siloxane (Si-O-Si) functional groups, while XRD analysis indicated that the silica had an amorphous structure with a main diffraction peak at $2\theta = 20-30^\circ$. The optimum adsorption condition was achieved using 0.3 g of adsorbent with a contact time of 90 minutes, resulting in 100% adsorption efficiency. Kinetic analysis showed that the adsorption process followed the Pseudo Second-Order model with a coefficient of determination (R^2) 0,9841. These results indicate that silica gel synthesized from rice husk ash and bagasse ash has good potential as an effective adsorbent for the removal of methylene blue from aqueous solutions.

Keywords: silica gel, rice husk, bagasse, methylene blue, adsorption

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis silika gel dari campuran abu sekam padi dan ampas tebu menggunakan metode sol gel serta mengkaji kinerjanya sebagai adsorben *methylene blue*. Variabel yang digunakan adalah massa adsorben (0,1; 0,2; dan 0,3 g) dan waktu adsorpsi (30, 45, 60, 75, dan 90 menit). Produk penelitian berupa silika gel dikarakterisasi menggunakan FTIR dan XRD. Hasil FTIR menunjukkan terbentuknya gugus silanol (Si-OH) dan siloksan (Si-O-Si), sedangkan hasil XRD menunjukkan silika memiliki struktur amorf dengan puncak utama pada $2\theta = 20-30^\circ$. Kondisi optimum adsorpsi diperoleh pada massa adsorben 0,3 g dan waktu kontak 90 menit dengan persentase adsorpsi mencapai 100%. Analisis kinetika menunjukkan bahwa proses adsorpsi mengikuti model *pseudo second order* dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9841. Hasil penelitian menunjukkan bahwa silika gel dari abu sekam padi dan ampas tebu berpotensi sebagai adsorben yang efektif untuk menghilangkan *methylene blue* dari larutan.

Kata kunci: silika gel, sekam padi, ampas tebu, methylene blue, adsorpsi

1. Pendahuluan

Peningkatan aktivitas industri tekstil, kertas, percetakan, dan berbagai sektor tekstil telah menyebabkan bertambahnya jumlah limbah cair yang mengandung zat warna sintesis. Salah satu zat warna yang paling banyak digunakan adalah *methylene blue*, yaitu pewarna kationik yang memiliki stabilitas kimia tinggi, sulit terdegradasi secara alami, dan berpotensi mencemari lingkungan perairan apabila dibuang tanpa pengolahan yang memadai. Keberadaan *methylene blue* dalam badan air dapat menghambat penetrasi cahaya, menurunkan proses fotosintesis organisme akuatik, serta memberikan efek toksik terhadap biota dan kesehatan manusia apabila terakumulasi dalam jangka panjang [1], [2]. Oleh karena itu, diperlukan metode pengolahan limbah yang efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk menghilangkan zat warna tersebut.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengolah limbah zat warna, seperti koagulasi flokulasi, oksidasi lanjut, filtrasi membran, dan biodegradasi. Namun, metode-metode tersebut masih memiliki beberapa keterbatasan, antara lain biaya operasional yang tinggi, konsumsi energi yang besar, efisiensi yang rendah pada konsentrasi tertentu, serta menghasilkan residu yang memerlukan penanganan lanjutan. Dibandingkan dengan metode tersebut, adsorpsi menjadi salah satu teknik yang paling banyak digunakan karena memiliki proses yang sederhana, efisiensi penyerapan yang tinggi, mudah dioperasikan, serta mampu menghilangkan berbagai jenis polutan organik maupun anorganik secara efektif [3], [4].

Pemanfaatan limbah biomassa sebagai bahan baku adsorben merupakan salah satu pendekatan yang mendukung konsep ekonomi sirkular dan pengelolaan limbah berkelanjutan. Abu sekam padi diketahui mengandung silika amorf sebesar 85-95%, sedangkan abu ampas tebu juga memiliki kandungan silika yang cukup tinggi sehingga keduanya berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber silika alternatif. Selain jumlahnya melimpah dan mudah diperoleh, kedua limbah tersebut masih belum dimanfaatkan secara optimal sehingga berpotensi memberikan nilai tambah apabila dikonversi menjadi material adsorben [5], [6].

Silika gel merupakan adsorben anorganik yang memiliki luas permukaan besar, porositas tinggi, stabilitas termal yang baik, serta gugus aktif silanol (Si-OH) dan siloksan (Si-O-Si). Gugus-gugus tersebut berperan penting dalam proses adsorpsi karena mampu berinteraksi dengan molekul *methylene blue* melalui gaya elektrostatis maupun ikatan hidrogen. Salah satu metode yang banyak digunakan untuk sintesis silika adalah metode *sol-gel* karena mampu menghasilkan material dengan kemurnian tinggi, distribusi pori yang seragam, dan luas permukaan yang besar sehingga meningkatkan kemampuan adsorpsi material [6], [7].

Beberapa penelitian telah melaporkan keberhasilan sintesis silika dari limbah biomassa sebagai adsorben zat warna. Silika gel dari abu sekam padi mampu mengadsorpsi *methylene blue* dengan efisiensi yang tinggi [8]. Silika yang berbasis biomassa memiliki gugus silanol dan siloksan yang berperan dalam meningkatkan kemampuan adsorpsi zat warna [9]. Sementara itu, proses adsorpsi *methylene blue* menggunakan material silika lebih sesuai mengikuti model kinetika *Pseudo Second Order* [10]. Meskipun demikian, penelitian mengenai sintesis silika gel yang berasal dari kombinasi abu sekam padi dan abu ampas tebu serta optimasi adsorpsi berdasarkan variasi massa adsorben dan waktu kontak masih relatif terbatas. Selain itu, hubungan antara karakteristik silika hasil sintesis dengan perilaku kinetika adsorpsi masih memerlukan kajian lebih lanjut.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mensintesis silika gel dari campuran abu sekam padi dan abu ampas tebu menggunakan metode *sol-gel*, mengkarakterisasi material menggunakan FTIR dan XRD, menentukan kondisi optimum adsorpsi *methylene blue* berdasarkan variasi massa adsorben dan waktu kontak, serta menganalisis model kinetika adsorpsi yang paling sesuai. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi alternatif pemanfaatan limbah biomassa sebagai adsorben yang efektif, bernilai ekonomis, dan berpotensi diaplikasikan dalam pengolahan limbah cair industri.

2. Metode Penelitian

Bahan & Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sekam padi dan ampas tebu sebagai sumber silika. Bahan kimia yang digunakan meliputi natrium hidroksida (NaOH), asam sulfat (H_2SO_4), aquades, dan *methylene blue*.

Peralatan yang digunakan meliputi furnace, oven, hot plate *magnetic stirrer*, pH meter, neraca analitik, peralatan gelas laboratorium, spektrofotometer UV-Vis, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), dan *X-Ray Diffraction* (XRD).

Preparasi Sampel

Sekam padi dan ampas tebu terlebih dahulu dicuci, dikeringkan, kemudian dikalsinasi menggunakan furnace pada suhu 700°C selama 4 jam untuk menghasilkan abu. Abu yang diperoleh dihaluskan dan diayak hingga ukuran 100 mesh.

Ekstraksi Silika

Selanjutnya, abu sekam padi dan abu ampas tebu dicampurkan dengan perbandingan 75:25. Sebanyak 20 g campuran abu diekstraksi menggunakan 120 mL larutan NaOH 2,5 M pada suhu 85°C selama 90 menit sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer*. Filtrat hasil ekstraksi kemudian dipisahkan dari residu padat dan ditambahkan larutan H_2SO_4 0,5 M hingga terbentuk gel silika. Gel didiamkan selama 18-24 jam, dicuci menggunakan aquades hingga pH netral, kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 150°C selama 5 jam.

Optimasi Silika

Silika hasil sintesis selanjutnya dioptimasi menggunakan larutan H_2SO_4 2,5M selama 120 menit, dicuci kembali hingga netral, dan dikeringkan menggunakan oven pada suhu 110°C selama 2 jam sebelum dilakukan karakterisasi.

Uji Adsorpsi *Methylene Blue*

Larutan induk *methylene blue* dibuat dengan melarutkan zat warna ke dalam aquadest hingga konsentrasi 1000 mg/L, kemudian diencerkan menjadi larutan uji dengan konsentrasi awal. Proses adsorpsi dilakukan menggunakan variasi massa adsorben yaitu 0,1; 0,2; dan 0,3 g sedangkan waktu kontak divariasikan selama 30, 45, 60, 75, dan 90 menit. Sebanyak 25 mL larutan *methylene blue* dicampurkan dengan adsorben silika gel kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer*. Setelah proses adsorpsi selesai, campuran disaring dan filtrat dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis untuk menentukan konsentrasi pada *methylene blue*.

Penentuan Kinetika Adsorpsi *Methylene Blue*

Setelah selesai proses adsorpsi dan telah mendapatkan data asorbansi. Dilanjutkan untuk analisis kinetika didasarkan pada pemodelan *pseudo first order* dan *pseudo second order*. Kinetika *pseudo first order* digunakan untuk menggambarkan proses adsorpsi yang berlangsung relatif cepat dalam waktu yang singkat [10].

Persamaan linear model *pseudo first order* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\ln (q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (1)$$

Keterangan:

q_e = jumlah adsorbat yang teradsorpsi pada keadaan setimbang (mg/g)

q_t = jumlah adsorbat yang teradsorpsi pada waktu tertentu (mg/g)

k_1 = konstanta laju adsorpsi *pseudo first order* (menit⁻¹)

t = waktu adsorpsi (menit)

Berbeda dengan model *pseudo first order*, model *pseudo second order* umumnya menggambarkan proses adsorpsi yang berlangsung lebih lambat tetapi memiliki interaksi yang lebih kuat antara adsorben dan adsorbat. Oleh karena itu, model ini sering digunakan untuk menjelaskan mekanisme adsorpsi kimia (*chemisorption*) yang melibatkan pembentukan ikatan antara adsorben dan adsorbat [10].

Persamaan linear model *pseudo second order* dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2)$$

Keterangan:

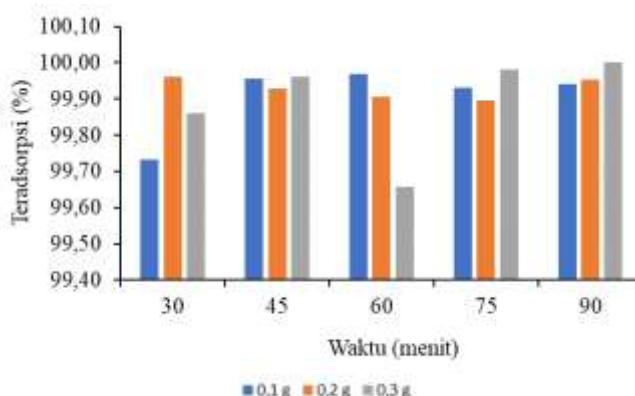
q_e dan q_t = Jumlah *methylene blue* yang teradsorpsi pada waktu tertentu (mg/g)

K_2 = Laju konstanta order 2 (min⁻¹)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Adsorpsi *Methylene Blue*

Silika gel hasil sintesis dari campuran abu sekam padi dan abu ampas tebu berhasil diaplikasikan sebagai adsorben *methylene blue*. Pengaruh variasi massa adsorben dan waktu kontak terhadap persentase adsorpsi disajikan pada **Gambar 1**.



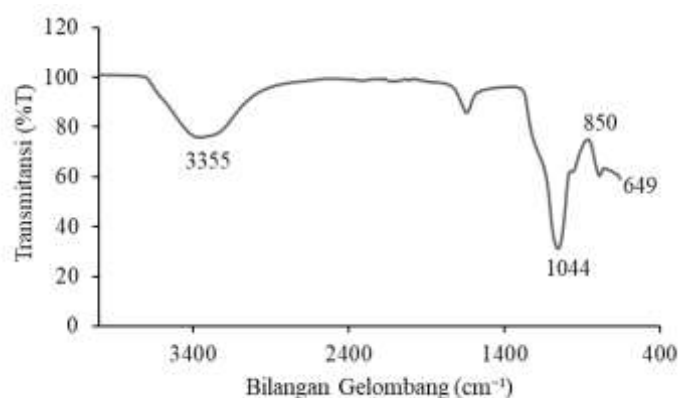
Gambar 1. Grafik Persentase Adsorpsi *Methylene Blue*

Berdasarkan **Gambar 1**, persentase adsorpsi *methylene blue* oleh silika gel hasil sintesis dari campuran abu sekam padi dan abu ampas tebu menunjukkan meningkat seiring bertambahnya waktu kontak pada setiap variasi massa adsorben. Pada tahap awal adsorpsi (30-45 menit), peningkatan nilai persentase adsorpsi berlangsung relatif cepat karena sebagian besar situs aktif pada permukaan silika masih tersedia sehingga molekul *methylene blue* mudah berinteraksi dengan gugus aktif silanol (Si-OH) dan siloksan (Si-O-Si). Seiring bertambahnya waktu kontak hingga 90 menit, persentase adsorpsi terus meningkat karena semakin banyak molekul *methylene blue* yang berdifusi menuju pori-pori adsorben. Peningkatan persentase adsorpsi terhadap waktu menunjukkan bahwa waktu kontak merupakan faktor penting dalam menentukan jumlah adsorbat yang dapat diserap oleh adsorben. Semakin lama waktu kontak, semakin besar peluang terjadinya tumbukan antara molekul *methylene blue* dengan permukaan silika sehingga jumlah zat warna yang terikat pada adsorben meningkat hingga mendekati kondisi kesetimbangan. Persentase adsorpsi *methylene blue* pada adsorben berbasis silika meningkat secara bertahap dengan bertambahnya waktu kontak akibat proses difusi adsorbat menuju situs aktif hingga tercapai keadaan setimbang [10].

Selain dipengaruhi oleh waktu kontak, persentase adsorpsi juga dipengaruhi oleh massa adsorben. Meskipun jumlah adsorben yang lebih besar menyediakan lebih banyak situs aktif secara keseluruhan menunjukkan peningkatan yang tidak terlalu signifikan atau menurun pada massa adsorben yang lebih tinggi. Hal tersebut disebabkan karena jumlah *methylene blue* yang tersedia tetap, sehingga sebagian situs aktif tidak terisi secara optimal. Peningkatan massa adsorben tidak selalu menghasilkan peningkatan kapasitas adsorpsi per satuan massa karena terjadi pembagian jumlah adsorbat pada adsorben yang lebih banyak [7],[12].

3.2 Karakterisasi Gugus Fungsi (FTIR)

Karakterisasi FTIR dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat pada silika gel hasil sintesis abu sekam padi dan ampas tebu. Spektra FTIR silika terdapat pada **Gambar 2**.

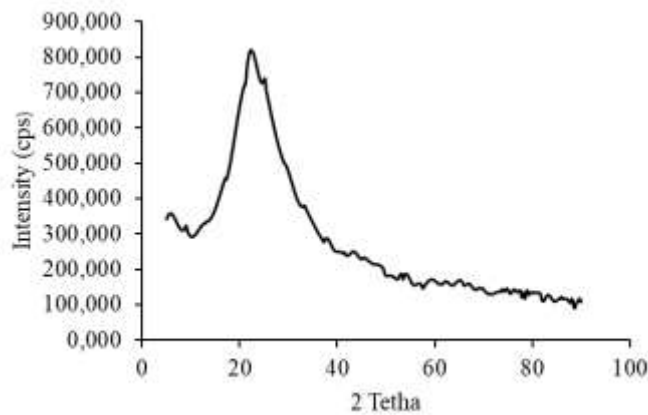


Gambar 2. Spektra FTIR Silika

Spektrum FTIR menunjukkan pita serapan utama pada bilangan gelombang 3355, 1044, 850, dan 649 cm^{-1} . Puncak pada 3355 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus silanol (Si-OH), sedangkan puncak pada 1044 cm^{-1} dan 850 cm^{-1} merupakan karakteristik ikatan siloksan (Si-O-Si). Selain itu, pita serapan pada 649 cm^{-1} menunjukkan vibrasi tekuk gugus Si-OH. Keberadaan gugus Si-OH dan Si-O-Si mengindikasikan bahwa proses sintesis silika gel melalui metode *sol-gel* telah berlangsung dengan baik dan menghasilkan gugus aktif yang berperan dalam proses adsorpsi *methylene blue*.

3.3 Karakterisasi Difraksi Sinar-X

Karakterisasi Difraksi Sinar-X atau *X-Ray Diffraction* merupakan metode untuk mengetahui tingkat kristalinitas serta fase yang terdapat pada silika hasil dari sintesis menggunakan sekam padi dan ampas tebu. Hasil XRD silika dari sekam padi dan ampas tebu dapat dilihat pada **Gambar 3**.

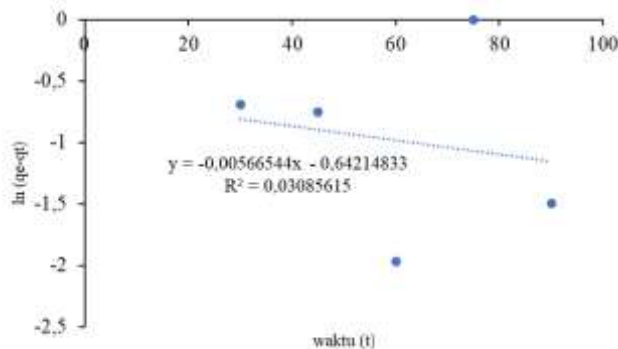


Gambar 3. Difraksi Sinar-X Silika

Hasil karakterisasi XRD menunjukkan puncak difraksi utama pada sudut 2θ sebesar $20-30^\circ$ dengan intensitas tertinggi sebesar 302 cps. Puncak pada $22,77^\circ$ menunjukkan bahwa fase amorf merupakan fase utama pada material hasil sintesis. Puncak difraksi yang melebar (*broad peak*) mengindikasikan bahwa silika yang diperoleh memiliki struktur amorf, yang merupakan karakteristik umum silika hasil sintesis dari biomassa menggunakan metode *sol gel*. Struktur amorf ini mendukung proses adsorpsi karena memiliki luas permukaan dan jumlah situs aktif yang relatif tinggi.

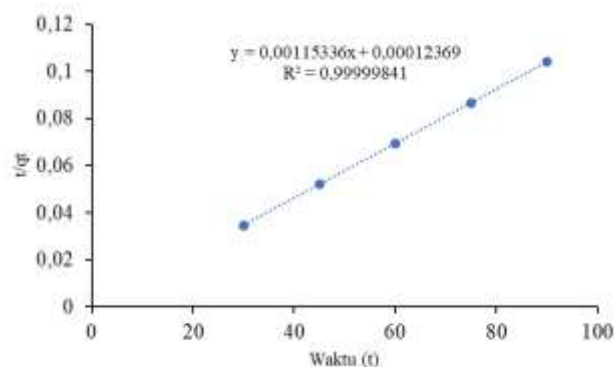
3.4 Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi menggunakan model *pseudo first order* dan *pseudo second order*, yang dimana pada model kesetimbangan dapat diuji sebagai penentu yang sesuai dari suatu penelitian. Pada koefisien korelasi (R^2) digunakan menentukan model kesetimbangan. Adapun data grafik hasil dari *pseudo first order* dan *pseudo second order* dapat dilihat pada **Gambar 4** dan **5**.



Gambar 4. Kurva *Pseudo First Order*

Berdasarkan nilai pada koefisien korelasi yang diperoleh yaitu 0,0309 pada berbagai waktu menunjukkan bahwa kinetika adsorpsi *methylene blue* belum cukup sesuai, karena dilihat dari hasil R^2 .



Gambar 5. Kurva *Pseudo Second Order*
20820

Berdasarkan data adsorpsi *methylene blue* pada waktu dan konsentrasi didapatkan hasil kinetika adsorpsi yang sesuai pada nilai koefisien korelasi pada proses adsorpsi yaitu 0,9841, maka nilai R^2 tersebut telah mendekati nilai 1. Maka proses adsorpsi dengan menggunakan *methylene blue* dari silika ampas tebu dan sekam padi mengikuti model kinetika *pseudo second order*.

Tabel 1. Konstanta Kecepatan Adsorpsi (k)

Massa Adsorben (gr)	Pseudo First Order		Pseudo Second Order	
	k	R^2	k	R^2
0,1	4,9984	0,0308	0,0108	0,9984

Dari tabel diatas menunjukkan bahwa berdasarkan nilai R^2 menunjukkan bahwa model kinetika yang sesuai ialah *pseudo second order*, model ini menggambarkan proses adsorpsi yang berlangsung lebih lambat tetapi memiliki interaksi yang lebih kuat antara adsorben dan adsorbat Nilai konstanta laju adsorpsi menunjukkan kecepatan adsorpsi hingga mencapai kesetimbangan, di mana semakin besar nilai k, semakin cepat proses adsorpsi berlangsung. Konstanta laju adsorpsi (k_2) menggambarkan kecepatan interaksi antara adsorbat dan adsorben dalam model *pseudo second order* [16].

Dari gambar bahwa hasil pengujian menggunakan persamaan *pseudo first order* dan *pseudo second order* memiliki hasil nilai korelasi berbeda. Berdasarkan hasil nilai korelasi dapat disimpulkan bahwa pada proses adsorpsi menggunakan *methylene blue* mengikuti model *pseudo second order*. Dengan dibuktikan dengan grafik linerisasi yang baik dengan mempunyai nilai korelasi (R^2) yang mendekati 1. Nilai R^2 yang tinggi mengindikasikan bahwa laju adsorpsi tidak hanya dipengaruhi oleh perpindahan massa adsorbat menuju permukaan adsorben, tetapi juga oleh interaksi yang terjadi pada situs aktif adsorben. Hal ini sejalan dengan keberadaan pada gugus silanol (Si-OH) dan siloksan (Si-O-Si). Gugus silanol yang mengalami deprotonasi menghasilkan muatan negatif (Si-O⁻) sehingga mampu menarik molekul *methylene blue* yang bermuatan positif (*Methylene blue*⁺) melalui gaya tarik elektrostatis.

Selain itu, atom hidrogen pada gugus silanol juga dapat berinteraksi dengan atom nitrogen pada molekul *methylene blue* membentuk ikatan hidrogen. Adanya kombinasi interaksi elektrostatis dan ikatan hidrogen tersebut menyebabkan proses adsorpsi berlangsung lebih efektif dan berkontribusi terhadap tingginya persentase adsorpsi yang diperoleh. Kesesuaian model *pseudo second order* pada penelitian ini menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi didominasi oleh interaksi kimia pada permukaan adsorben (*chemisorption*), sehingga proses penyerapan *methylene blue* berlangsung melalui keterlibatan gugus aktif silika yang terbentuk selama proses sintesis. Adsorpsi *methylene blue* pada material berbasis silika umumnya dikendalikan oleh interaksi elektrostatis, ikatan hidrogen, dan mengikuti model kinetika *pseudo second order*.

4. Kesimpulan

Silika gel berhasil disintesis dari campuran abu sekam padi dan abu ampas tebu menggunakan metode *sol-gel*. Karakterisasi FTIR menunjukkan terbentuknya gugus silanol (Si-OH) dan siloksan (Si-O-Si), sedangkan hasil XRD mengonfirmasi bahwa silika yang dihasilkan memiliki struktur amorf dengan puncak utama pada $2\theta = 20-30^\circ$. Kondisi adsorpsi optimum diperoleh pada massa adsorben 0,3 g dan waktu kontak 90 menit dengan efisiensi adsorpsi mencapai 100%. Analisis kinetika menunjukkan bahwa proses adsorpsi mengikuti model *pseudo second order* dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9841, sehingga silika gel dari limbah sekam padi dan ampas tebu berpotensi digunakan sebagai adsorben yang efektif untuk menghilangkan *methylene blue* dari larutan.

5. Referensi

- [1] Ali, M., Hasan, M., & Rahman, M. (2023). *Extraction of silica from rice husk and its application as adsorbent: A review*. Journal of Environmental Management, 325, 116567.
- [2] Islam, M. T., Hossen, M. F., Asraf, M. A., Kudrat-E-Zahan, M., & Zakaria, C. M. (2024). *Production and characterization of silica from rice husk: An updated review*. Asian Journal of Chemical Sciences, 14(2), 83–96.
- [3] Kumar, A., Singh, R., & Sharma, P. (2023). *Adsorption of methylene blue using silica-based adsorbents derived from agricultural residues*. Environmental Technology & Innovation, 29, 102941.
- [4] Rahman, M., Hasan, S., & Karim, M. (2024). *Removal of methylene blue using silica-based adsorbent from agricultural waste*. Journal of Water and Environmental Technology, 22(1), 1–10.

- [5] Aprilia, S., Rosnelly, C. M., Zuhra, Fitriani, Akbar, E. H., Raqib, M., Rahmah, K., Amin, A., & Baity, R. A. (2023). *Synthesis of amorphous silica from rice husk ash using the sol-gel method: Effect of alkaline and alkaline concentration*. Materials Today: Proceedings, 87(Part 2), 225–229.
- [6] Jamilatun, S., Rahmawati, D., & Putra, A. (2024). *Synthesis of silica gel from agricultural waste and its application as dye adsorbent*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 12(1), 104112.
- [7] Li, X., Zhang, Y., & Wang, H. (2022). *Preparation of porous silica materials for adsorption of organic dyes*. Applied Surface Science, 586, 152802.
- [8] Widyastuti, H., Panggabean, A. S., & Subagyo, D. J. N. (2022). *Sintesis silika gel dari abu sekam padi termodifikasi kitosan serta aplikasinya sebagai adsorben methylene blue*. Jurnal Kimia Mulawarman, 19(2), 63–70.
- [9] Goryunova, K., Gahramanli, Y., & Gurbanova, R. (2023). *Adsorption properties of silica aerogel-based materials*. RSC Advances, 13(27), 18207–18216.
- [10] Zhang, Y., Li, X., Wang, H., & Chen, L. (2023). *Efficient removal of methylene blue using porous silica adsorbent*. Separation and Purification Technology, 310, 123156.
- [11] Sitohang, R., Siregar, M., & Hutagalung, J. (2022). *Karakterisasi silika gel dari sekam padi menggunakan FTIR dan XRD*. Jurnal Sains Material Indonesia, 24(2), 89–96.
- [12] Lede, S., Hartono, R., & Wijaya, A. (2021). *Synthesis and characterization of silica adsorbent from rice husk ash for dye removal*. Materials Today: Proceedings, 44, 3421–3426.
- [13] Wang, J., Li, Y., & Chen, Z. (2023). *Adsorption behavior of methylene blue onto silica-based adsorbent*. Chemical Engineering Journal, 452, 139410.
- [14] Wisniewski, W. (2023). *Experimental evidence concerning the significant information depth of X-ray diffraction (XRD) in the Bragg–Brentano configuration*. Powder Diffraction, 38(4), 457–465.