

Sintesis dan Karakterisasi Komposit Kitosan–Silika melalui Metode Sol–Gel dari Ampas Tebu untuk Adsorpsi Ion Fe(III)

Synthesis and Characterization of Chitosan–Silica Composite via Sol–Gel Method From Sugarcane Bagasse for Fe(III) Ion Adsorption

Putri Sinta Dewi Sinaga, Iriany*, Rosdanelli Hasibuan

Program Studi Teknik Kimia, Universitas Sumatera Utara, Jl. Almamater, Padang Bulan, Medan, 20155, Indonesia

*Email: iriany@usu.ac.id

Article history:

Diterima : 9 Agustus 2025
Direvisi : 10 Maret 2026
Disetujui : 21 Mei 2026
Mulai online : 29 September 2026

E-ISSN: 2337-4888

How to cite:

Putri Sinta Dewi Sinaga, Iriany, Rosdanelli Hasibuan (2026). Sintesis dan Karakterisasi Komposit Kitosan–Silika melalui Metode Sol–Gel dari Ampas Tebu untuk Adsorpsi Ion Fe(III). Jurnal Teknik Kimia USU, 15(2), 94-101.

ABSTRAK

Ampas tebu merupakan limbah yang diperoleh dari pabrik gula dan dapat dimanfaatkan sebagai adsorben karena mengandung silika. Penelitian ini menganalisis karakteristik silika ampas tebu dengan tambahan kitosan melalui proses sol-gel serta mengaplikasikannya pada proses adsorpsi logam berat besi (III). Variabel bebas yang dianalisis meliputi pH larutan logam besi (III) (2, 3, 4, 5, dan 6), sedangkan ukuran kitosan dan silika adalah konstan dengan rasio berat 1/10. Analisis yang dilakukan meliputi FTIR, SEM-EDX, XRF, dan AAS. Analisis XRF silika dari ekstrak ampas tebu menunjukkan adanya komponen utama SiO₂ sebesar 56,7%. Spektrum FTIR mengungkapkan adanya gugus siloksan (Si–O–Si) dan gugus silanol (Si–OH). Karakterisasi menggunakan SEM-EDX mengonfirmasi morfologi komposit kitosan silika yang tidak merata tersebar dengan baik di permukaan kitosan serta mengandung Si sebesar 44,59%. Komposit silika-kitosan yang dibuat berpotensi diaplikasikan sebagai adsorben logam berat besi (III) dalam air dengan penyisihan maksimum sebesar 63,97% pada pH 5.

Kata kunci: abu ampas tebu, silika, logam berat besi (III), adsorpsi, komposit kitosan-silika

ABSTRACT

Sugarcane bagasse is a waste material produced by sugar mills that can be utilized as an adsorbent due to its silica content. This study analyzes the characteristics of silica derived from sugarcane bagasse combined with chitosan through the sol-gel process and evaluates its application in the adsorption of Fe(III) heavy metal ions. The independent variable examined was the pH of the Fe(III) ion solution (2, 3, 4, 5, and 6), while the particle sizes of chitosan and silica were kept constant with a weight ratio of 1:10. Characterization analyses included FTIR, SEM-EDX, XRF, and AAS. XRF analysis of the silica extracted from sugarcane bagasse showed SiO₂ as the major component, accounting for 56.7%. The FTIR spectra revealed the presence of siloxane (Si–O–Si) and silanol (Si–OH) functional groups. SEM-EDX characterization confirmed that the chitosan–silica composite exhibited an uneven morphology, with silica particles distributed irregularly across the chitosan surface and containing 44.59% Si. The synthesized silica–chitosan composite demonstrates potential applicability as an adsorbent for Fe(III) heavy metal ions in aqueous solutions, achieving a maximum removal efficiency of 63.97% at pH 5.

Keyword: sugarcane bagasse ash, silica, iron(III) heavy metal, adsorption, chitosan–silica composite



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International.
<https://doi.org/10.32734/jtk.v15i2.22422>

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara agraris yang sebagian besar penduduknya berprofesi sebagai petani. Tebu (*Saccharum officinarum* Linn.) merupakan salah satu hasil pertanian di Indonesia yang melimpah dan diolah untuk menghasilkan gula [1]. Badan Pusat Statistik (BPS) melaporkan bahwa produksi gula di Indonesia mencapai 2,40 juta ton pada tahun 2022, dan mengalami peningkatan sebesar 54,32 ribu ton (2,31%) dari tahun 2021 yaitu 2,35 juta ton [2].

Tingginya produksi gula berdampak pada tingginya volume limbah ampas tebu yang dihasilkan. Ampas tebu dapat diproses menjadi abu melalui pembakaran. Abu ampas tebu mengandung silika (SiO_2) yang cukup tinggi, yaitu 55,5-70% [3]. Abu ampas tebu memiliki potensi cukup besar dalam mensintesis silika yang lebih terjangkau dan mudah diperoleh [1] khususnya sebagai bahan utama sintesis silika gel [4].

Silika gel mempunyai beberapa kelebihan diantaranya memiliki karakter pertukaran massa dan porositas yang tinggi namun bahan ini juga memiliki kelemahan berupa situs aktif yang hanya berjenis silanol ($-\text{SiOH}$) dan siloksan (Si-O-Si) [5-6]. Hal ini menyebabkan silika menjadi kurang efektif dalam menyerap ion logam. Salah satu solusi yang dapat dilakukan adalah memodifikasi silika menggunakan senyawa organik dengan gugus fungsi aktif seperti $-\text{OH}$, $-\text{NH}$, COOH , dan $-\text{SH}$ untuk membentuk organosilika hibrida [5]. Dalam hal ini, salah satu senyawa yang dapat digunakan adalah kitosan.

Kitosan merupakan salah satu adsorben yang cukup banyak dikembangkan karena bersifat ramah lingkungan. Kitosan memiliki kemampuan menyerap ion-ion logam, khususnya logam transisi. Kemampuan ini berasal dari ikatan koordinasi pada gugus hidroksil ($-\text{OH}$), amina ($-\text{NH}_2$), dan gugus amida ($-\text{NHCOCH}_3$) pada kitin yang berperan sebagai ligan ketika berikatan dengan logam [6].

Salah satu metode untuk memodifikasi gugus fungsi pada silika gel adalah metode sol-gel karena reaksi pengikatan berlangsung bersamaan dengan pembentukan padatan sehingga lebih cepat, sederhana [7], menghasilkan partikel silika murni dan dapat menentukan ukuran partikel [8].

Berbagai metode telah dikembangkan untuk menghilangkan logam berat di dalam air seperti penambahan 4,5 kg ampas tebu sebagai media filtrasi paling efektif dalam penurunan kadar Fe pada air sumur gali hingga 88% [9]. Selain itu, terdapat penelitian tentang komposit kitin – silika dari sekam padi yang digunakan untuk mengadsorpsi logam Fe(III) pada pH 4 memiliki daya adsorpsi logam sebesar 91,42% [10]. Adsorpsi memiliki keunggulan dalam pengolahan air selain itu lebih murah dan bahannya sangat berlimpah [11].

Sejumlah penelitian terdahulu terkait adsorpsi polutan dalam pengelolaan air masih memiliki sejumlah kekurangan sehingga perlu dilakukan kajian lebih lanjut. Penelitian ini memodifikasi silika dari ampas tebu dengan kitosan melalui proses sol-gel. Komposit kitosan silika yang dihasilkan kemudian digunakan sebagai adsorben logam besi dengan memvariasikan pH larutan serta konsentrasi larutan. Modifikasi ini diharapkan dapat menghasilkan komposit dengan karakter yang lebih baik untuk meningkatkan efektivitas adsorpsi besi (Fe) di dalam air.

2. Metode

Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah ampas tebu yang diperoleh dari Medan, Sumatera Utara, dan kitosan yang diperoleh dari CV. Rudang Jaya, Medan. Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah *hotplate stirrer* (THERMO FISHER SCIENTIFIC Cimarec+™ *Stirrer*, USA), neraca digital (METTLER TOLEDO *Analytical Balance* ME204, Indonesia), oven (Mettmert UNB 500, Germany), pH meter (HANNA INSTRUMENT HI98107, USA), ayakan (ABM *Test Sieve Analysis*, Indonesia), serta *furnace* (THERMO FISHER SCIENTIFIC Thermolyne™ *Small Benchtop Muffle Furnaces*, USA).

Prosedur Penelitian

Isolasi silika dari ampas tebu

Ampas tebu dibersihkan menggunakan air mengalir. Kemudian dijemur di bawah sinar matahari langsung, selanjutnya dipotong menjadi ukuran kecil. Ampas tebu dikeringkan di dalam oven pada suhu 105 °C selama 2 jam. Kemudian dikalsinasi menggunakan *furnace* pada suhu 600 °C selama 2 jam tanpa kontak dengan oksigen untuk menghasilkan abu ampas tebu, selanjutnya, abu ampas tebu digerus dan diayak dengan ukuran lolos 100 mesh [13].

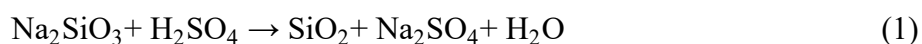
Abu ampas tebu sebanyak 10 g direndam dalam larutan asam klorida (HCl) 1 M 100 mL. Perendaman dilakukan selama 2 jam sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan pengadukan 350 rpm pada suhu 80 °C. Padatan yang dihasilkan kemudian disaring dengan kertas saring dan dicuci dengan akuades hingga pH netral. Padatan yang diperoleh kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C selama 24 jam. Padatan ini merupakan silika, yang kemudian dianalisis menggunakan *X-ray fluorescence* (XRF) [14].

Pembuatan larutan natrium silikat (Na_2SiO_3)

Silika sebanyak 3 g ditambahkan ke dalam 50 mL akuades, kemudian dicampur dengan 50 mL natrium hidroksida (NaOH) 1,5 M. Campuran ini dididihkan sambil diaduk dengan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 350 rpm, pada suhu 90 °C selama 2 jam. Larutan didinginkan, kemudian disaring dengan menggunakan kertas saring. Filtrat yang diperoleh merupakan natrium silikat (Na_2SiO_3) [15].

Pembuatan silika presipitat

Filtrat berupa natrium silikat dimasukkan ke dalam beaker glass. Larutan natrium silikat ditetesi dengan asam sulfat (H_2SO_4) 3 N sambil diaduk dengan *magnetic stirrer* pada kecepatan 350 rpm hingga terbentuk sol gel putih. Silika presipitat disaring dan dibilas dengan akuades panas untuk menghilangkan asam yang berlebih. Silika presipitat dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C [16]. Reaksi pembentukan silika berlangsung seperti persamaan (1):



Pembuatan komposit kitosan silika

Kitosan diseragamkan ukurannya sampai 100 mesh. Sebanyak 1 g kitosan dilarutkan dalam 100 mL asam asetat (CH_3COOH) 2% (v/v). Silika presipitat sebanyak 10 g ditambahkan ke dalam larutan kitosan untuk membentuk campuran dengan perbandingan 1:10 (g/g). Campuran diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 6 jam pada suhu 30 °C dengan kecepatan 400 rpm sampai homogen. Larutan dituangkan secara perlahan di atas pelat kaca dan diratakan dengan menggunakan batang *stainless steel*. Komposit kitosan silika yang dihasilkan kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 50 °C sampai kering. Komposit kitosan silika dikarakterisasi menggunakan instrumen *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dan *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectroscopy* (SEM-EDX) [17].

Pembuatan larutan baku logam berat besi (III) 100 ppm

Larutan besi dibuat dengan menimbang 0,1 g besi klorida heksahidrat ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Kemudian dimasukkan ke dalam labu takar ukuran 1000 mL. Akuades ditambahkan ke dalam labu ukur hingga tanda batas, selanjutnya dikocok hingga homogen

Penentuan pH terbaik pada adsorpsi ion logam berat besi (III)

Sebanyak 2,5 mL larutan besi dimasukkan ke dalam labu ukur berukuran 25 mL. Akuades ditambahkan ke dalam labu ukur hingga tanda batas, kemudian dikocok hingga homogen sehingga dihasilkan larutan besi dengan konsentrasi 10 ppm. Larutan besi diatur keasamannya pada pH 2, 3, 4, 5, dan 6 dengan menambahkan larutan asam klorida (HCl) 1 M atau natrium hidroksida (NaOH) 1 M. Larutan besi yang telah diatur pH-nya kemudian dimasukkan ke dalam erlenmeyer berukuran 50 mL. Komposit kitosan silika sebanyak 0,5 g ditambahkan ke dalam larutan besi, selanjutnya diaduk dengan kecepatan 200 rpm selama 60 menit. Larutan didiamkan selama 24 jam lalu disaring menggunakan kertas saring. Filtrat yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) [18].

Uji % removal logam berat besi (III) yang teradsorpsi

Persentase penyisihan logam berat besi (III) dapat dihitung menggunakan persamaan (2) :

$$\text{Persentase penyisihan} = \frac{C_o - C_s}{C_o} \times 100\% \quad (2)$$

C_o adalah konsentrasi logam berat besi (III) sebelum adsorpsi (mg/L) dan C_s adalah konsentrasi logam berat besi (III) sesudah adsorpsi (mg/L).

3. Hasil

Isolasi Silika Limbah Ampas Tebu

Gambar 1 adalah abu ampas tebu yang diperoleh setelah kalsinasi. Fraksi organik ampas tebu akan teroksidasi membentuk oksida, misalnya unsur C dan H akan membentuk CO_2 dan H_2O (uap). Selain fraksi organik, fraksi anorganik seperti ion Mg^{2+} , Al^{3+} , P^{5+} , S^{6+} , K^+ , Cl^- , Ca^{2+} , Cu^{2+} , dan Zn^{2+} juga teroksidasi menjadi MgO , Al_2O_3 , P_2O_5 , SO_3 , K_2O , CuO , CaO , dan ZnO .



Gambar 1. Penampakan abu ampas tebu

Proses selanjutnya adalah ekstraksi natrium silika dari abu ampas tebu hasil pencucian. Reaksi SiO_2 pada abu ampas tebu dengan larutan natrium hidroksida berlangsung seperti persamaan (3):



Tahap selanjutnya adalah sintesis silika melalui proses sol-gel, dengan cara menambahkan asam ke dalam larutan natrium silikat. Selama proses sol-gel, larutan natrium silikat ditetesi dengan H_2SO_4 sambil diaduk hingga terbentuk sol-gel putih.

Karakterisasi Silika Ampas Tebu

Silika abu ampas tebu yang telah direndam menggunakan HCl kemudian dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi senyawa oksida silika abu ampas tebu

Senyawa	Kadar (%)	Senyawa	Kadar (%)
SiO_2	56,700	K_2O	0,785
MgO	0,186	Cl	0,057
Al_2O_3	0,199	CaO	0,254
P_2O_5	0,078	CuO	0,013
SO_3	0,081	ZnO	0,030
Balance			41,400

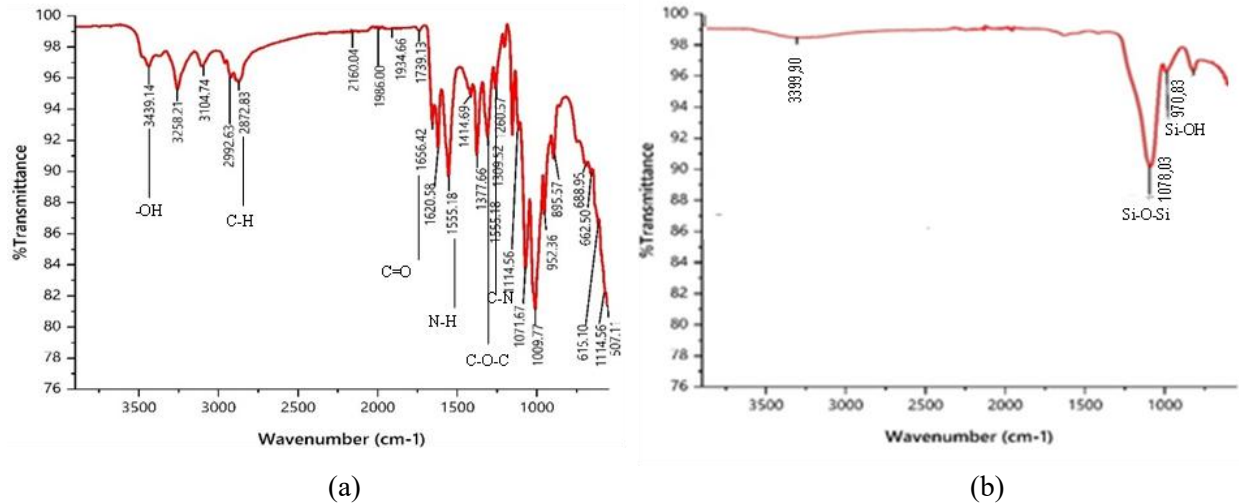
Karakterisasi menggunakan XRF menunjukkan bahwa komponen utama abu ampas tebu adalah SiO_2 dengan persentase sebesar 56,70%, sedangkan kandungan senyawa oksida lainnya relatif kecil dari total kandungan senyawa. Tabel 1 menunjukkan bahwa abu ampas tebu masih mengandung oksida logam lainnya seperti MgO , Al_2O_3 , K_2O , CaO , CuO dan ZnO . Keberadaan oksida-oksida logam ini menandakan pencucian abu ampas tebu menggunakan HCl masih belum sempurna. Hal ini juga dipertegas dengan adanya kandungan klorida yang terdeteksi pada silika abu ampas tebu yang dihasilkan.

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa kondisi proses yang digunakan masih kurang efektif dalam mensintesis silika dari ampas tebu. Norsuraya dkk. [14] melaporkan kandungan silika setelah perlakuan asam sebesar 88,13%. Kemurnian yang tinggi ini dikarenakan suhu kalsinasi yang dijalankan pada 1000°C , sementara pada penelitian ini hanya 600°C . Suhu yang lebih tinggi akan menghasilkan abu yang lebih sedikit dan kandungan silika yang lebih tinggi. Bagaimanapun, kandungan silika yang ada di dalam abu ampas tebu sangat bervariasi. Hal ini tergantung pada lingkungan sekitar, sifat tanah, waktu pemanenan, dan proses yang dilakukan untuk mengekstraksi silika dari abu ampas tebu.

Karakterisasi Komposit Kitosan Silika

Gambar 2(a) merupakan spektrum FTIR pada kitosan murni, di mana terdapat pita serapan pada bilangan gelombang 3439 cm^{-1} , yang mewakili -OH dari gugus hidroksil yang terikat pada atom karbon. Selanjutnya, pada kitosan terlihat gugus amida melalui pita serapan pada 1555 cm^{-1} . Gugus amida merupakan gugus aktif penting dalam kitosan. Pita serapan pada $2800\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan kehadiran gugus C-H. Serapan pada 1309 cm^{-1} merupakan asimetris dari gugus C-O-C yang berasal dari gugus keton pada ikatan polimer kitosan. Pita serapan pada 1010 cm^{-1} mewakili vibrasi stretching gugus C-O dari CH-OH. Gugus C-N dari senyawa amina yang terikat terdeteksi pada bilangan gelombang 1260 cm^{-1} . Terakhir, gugus amida C=O terdeteksi pada bilangan gelombang 1656 cm^{-1} , yang merupakan gugus amin pada kitosan yang mengikat gugus asil (asetamida) [21].

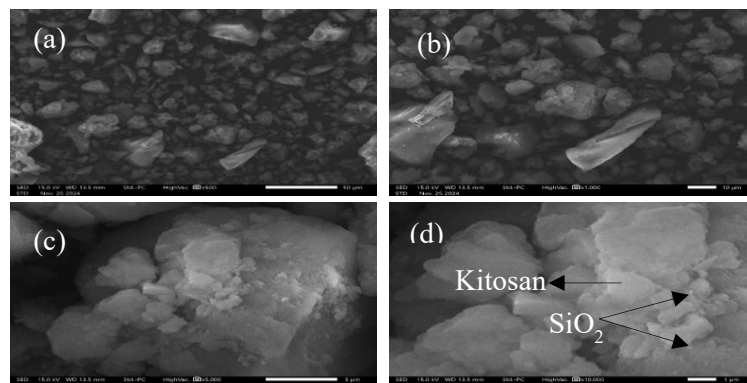
Gambar 2(b) menunjukkan spektrum FTIR pada komposit kitosan silika, di mana terlihat pita serapan baru dalam komposit kitosan silika. Serapan melebar pada 3399 cm^{-1} menunjukkan vibrasi regangan gugus -OH dan -NH. Pita serapan pada $1500\text{--}1650\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan kehadiran gugus CO-NH₂. Serapan tajam pada 1078 cm^{-1} menunjukkan vibrasi ulur asimetris gugus Si-O dari gugus siloksan (Si-O-Si). Pita serapan pada $970,83\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan keberadaan gugus silanol (Si-OH) [22]. Kehadiran gugus fungsi baru ini menunjukkan interaksi kuat antara silika dan kitosan. Tabel 2 menunjukkan rentang bilangan gelombang pada spektrum FTIR kitosan dan kitosan silika.



Gambar 2. Spektrum FTIR (a) kitosan murni dan (b) komposit kitosan silika

Tabel 2. Hasil spektrum FTIR kitosan murni dan komposit kitosan silika

Vibrasi Gugus	Rentang Bilangan Gelombang (cm^{-1})	Kitosan murni (cm^{-1})	Komposit kitosan Silika (cm^{-1})
O-H	3200-3600	3439,14	3399,88
N-H Primer	3500-3300	3439,14	3399,88
C-H	2800-3000	2878,83	2632,57
C=O amida	1680-1630	1656,42	1639,20
C-N	1300-1000	1260,57	-
Si-O-Si dan Si-O-C alifatik	1110-1000	-	1078,03
Si-OH	1000-830	-	970,83



Gambar 3. Hasil SEM komposit kitosan silika pada perbesaran (a) 500x; (b) 1.000x; (c) 5.000x; dan (d) 10.000x

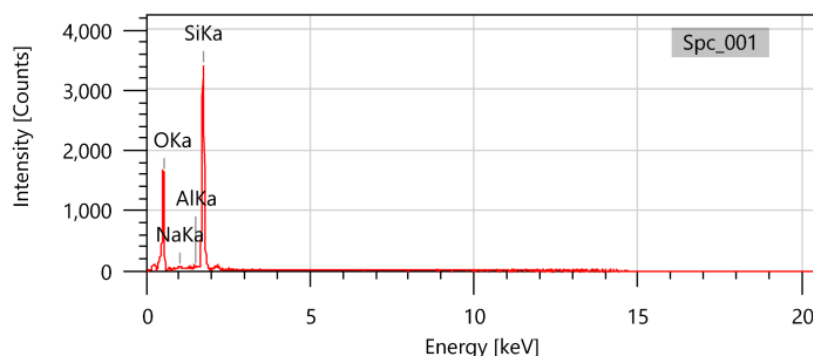
Gambar 3(a) dengan pembesaran 500x terlihat bahwa komposit kitosan silika memiliki permukaan yang kasar dan tidak beraturan. Struktur ini juga diperjelas dengan pembesaran 1.000x pada Gambar 3(b). Analisis

morfologi juga menunjukkan bahwa komposit kitosan silika mempunyai rongga-rongga kecil akibat penambahan silika pada komposit. Penambahan silika ke dalam matriks kitosan menyebabkan terjadinya interaksi antara gugus -OH pada kitosan dan gugus -OH pada silika, yang menginisiasi aglomerasi partikel silika di dalam matriks kitosan. Ketika silika membentuk agregat, molekul kitosan akan terdorong ke sekitarnya dan menciptakan ruang kosong atau rongga [22]. Interaksi antara kitosan dan silika dapat dilihat jelas pada Gambar 3(c) dan 3(d), dimana partikel silika yang berbentuk bulatan putih tersebar dengan baik di permukaan kitosan [23].

Gambar 4 dan Tabel 3 menunjukkan keberhasilan sintesis komposit kitosan ditandai dengan munculnya unsur C, N, O, dan Si yang merupakan unsur khas pada komposit kitosan silika dan mengonfirmasi ikatan antara kitosan dengan silika [24]. Hal ini membuktikan adanya keberadaan partikel silika yang tidak merata namun tersebar dengan baik di permukaan kitosan sehingga membentuk tekstur kasar dan tidak beraturan [25].

Tabel 3. Hasil EDX komposit kitosan silika

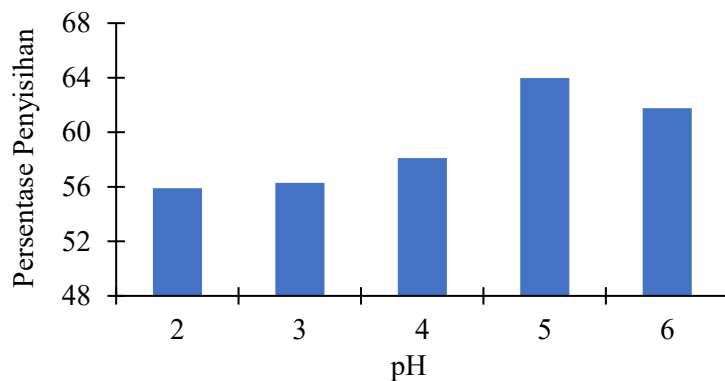
Senyawa	Kadar (%)
O	54,31
Si	44,59
Na	0,63
Al	0,46



Gambar 4. EDX komposit kitosan silika

Penentuan pH Terbaik Adsorpsi Besi (III)

Komposit kitosan silika yang disintesis diaplikasikan untuk mengadsorpsi logam besi dari larutan air. Pada percobaan ini, pH larutan divariasikan untuk mengkaji kemampuan adsorpsi komposit. Berdasarkan Gambar 5, terlihat bahwa kenaikan pH adsorbat dapat memengaruhi persentase penyisihan logam besi (III), dimana persentase penyisihan tertinggi diperoleh pada pH 5. Kondisi terbaik adsorben dalam mengadsorpsi ion Fe^{3+} merupakan pH maksimum [18]. Penambahan HCl menyebabkan peningkatan ion H^+ dalam larutan yang menyebabkan permukaan adsorben menjadi positif. Pada pH rendah, gugus amino ($-\text{NH}_2$) dalam kitosan akan terprotonasi sehingga terjadi persaingan antara ion H^+ dengan besi (III) untuk mengisi sisi aktif gugus amino ($-\text{NH}_2$) adsorben sehingga menyebabkan efisiensi adsorpsi menurun [26]. Ketika pH larutan ditingkatkan hingga pH 5, persentase penyisihan logam berat besi (III) mengalami peningkatan. Namun, saat pH adsorbat telah melebihi 5, terlihat adanya penurunan persentase penjerapan logam berat besi (III). Hal ini karena pada pH di atas 5, ion Fe^{3+} memiliki kecenderungan untuk membentuk hidroksida ($\text{Fe}(\text{OH})^+$). Akibatnya, terjadi persaingan ion Fe^{3+} bebas untuk berikatan dengan situs aktif pada adsorben sehingga jumlah ion Fe^{3+} yang teradsorpsi semakin berkurang [27].



Gambar 5. Pengaruh variasi pH terhadap persentase penyisihan logam besi (III)

4. Kesimpulan

Berdasarkan analisis menggunakan XRF, kadar SiO_2 yang terdapat pada ampas tebu sebesar 56,70%. Analisis menggunakan FTIR menunjukkan adanya sejumlah gugus fungsi pada komposit kitosan silika, diantaranya gugus siloksan (Si-O-Si) dan gugus silanol (Si-OH). Analisis menggunakan SEM-EDX mengonfirmasi morfologi komposit kitosan silika yang tidak merata tersebar dengan baik di permukaan kitosan dengan tekstur kasar dan tidak beraturan, serta mengandung Si sebesar 44,59%. Pengaplikasian komposit kitosan silika untuk mengadsorpsi logam berat besi (III) tertinggi terjadi pada pH 5 sebesar 63,97%. Oleh karena itu, perlu dilakukan uji coba variasi kondisi lainnya, seperti temperatur, jenis asam kuat, dan waktu reaksi, untuk mengisolasi silika dari ampas tebu sehingga meningkatkan kadar silika yang diperoleh agar abu ampas tebu menjadi bahan alternatif dalam penurunan Fe dalam air dengan metode adsorpsi. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan menggabungkan beberapa media untuk menurunkan unsur logam berat lainnya.

5. Konflik Kepentingan

Semua penulis tidak memiliki konflik kepentingan (*conflict of interest*) pada publikasi artikel ini.

Daftar Pustaka

- [1] I. Sukirna, D. Dhaneswara, D. J. Siregar, J. F. Fatriansyah, N. Sofyan, A. H. Yuwono, dan R. Muslih, "Synthesis of Mesoporous Silica from Sugarcane Bagasse Ash Using Pluronic 123 as a Colorant Adsorbent for Brilliant Green," *Evergreen*, vol. 11, no. 2, hal. 1366–1374, 2024, doi: 10.5109/7183448.
- [2] Badan Pusat Statistik, "Data Produksi dan Konsumsi Gula" 2022.
- [3] D. Dhaneswara, A. Tsania, J.F. Fatriansyah, A. Federico, R.Ulfiati, dan R. Muslih, "Synthesis of Mesoporous Silica from Sugarcane Bagasse as Adsorbent for Colorants Using Cationic and Non-Ionic Surfactants," *Int. J. Technol.*, vol. 15, no. 2, hal. 373–382, 2024, doi: 10.14716/ijtech.v15i2.6721.
- [4] P. Nurjanto, I. Fajriyati, dan D. Krisdiyanto, "Sintesis Silika Gel Dari Pelepah Pohon Salak Pondoh Dengan Metode Sol-Gel Menggunakan NaOH dan HCL," 2020.
- [5] J. N. Naat, Y. A. B. Neolaka, T. Lapailaka, R. T. Tjahjanto, A. Sabarudin, H. Darmokoesoema dan H. Kusuma, "Adsorption of Cu(II) and Pb(II) using silica@mercapto (hs@m) hybrid adsorbent synthesized from silica of Takari sand: Optimization of parameters and kinetics," *Rasayan J. Chem.*, vol. 14, no. 1, hal. 550–560, Jan 2021, doi: 10.31788/RJC.2021.1415803.
- [6] R. Putra, R. Elvia, H. Amir, dan P. Studi Pendidikan Kimia Jurusan PMIPA FKIP, "Sintesis Silika-Kitosan Untuk Menurunkan Kadar Ion Besi Dalam Air Permukaan," *J. Pendidik. dan Ilmu Kim.*, vol. 6, no. 1, hal. 1–9, 2022.
- [7] S. Wimarsela, R. Junaidi, dan I. Silviyati, "Sintesis Silika Gel dari Abu Cangkang dan Serabut Kelapa Sawit Terimobilisasi Difenilkarbazon dengan Metode Sol-Gel," *J. Penelit. Inov.*, vol. 1, no. 2, hal. 165–174, 2021, doi: 10.54082/jupin.24.
- [8] I. A. Rahman dan V. Padavettan, "Synthesis of Silica nanoparticles by Sol-Gel: Size-dependent properties, surface modification, and applications in silica-polymer nanocomposites a review," *J. Nanomater.*, vol. 2012, 2012, doi: 10.1155/2012/132424.
- [9] I. H. Sari, M. Maksuk, dan M. Amin, "Penambahan Ampas Tebu Sebagai Media Filtrasi Untuk Menurunkan Kadar Fe Pada Air Sumur," *J. Sanitasi Lingkungan*, vol. 3, no. 2, hal. 61–66, Nov 2023, doi: 10.36086/jsl.v3i2.2000.
- [10] M. Rahma, H. Hasri, dan D. E. Pratiwi, "Studi Adsorpsi Logam Fe (III) Menggunakan Komposit Kitin

- Silika Sekam Padi,” *Sainsmat J. Ilm. Ilmu Pengetah. Alam*, vol. 12, no. 2, hal. 200, 2023, doi: 10.35580/sainsmat122439262023.
- [11] N. I. Ischak, D. Fazriani, dan D. N. Botutihe, “Ekstraksi dan Karakterisasi Selulosa dari Limbah Kulit Kacang Tanah (*Arachys hypogaea* L.) Sebagai Adsorben Ion Logam Besi,” *Jambura J. Chem.*, vol. 3, no. 1, hal. 27–36, 2021, doi: 10.34312/jambchem.v3i1.9290.
- [12] E. Prasetyo dan K. Toyoda, “Sol–gel synthesis of a humic acid-silica gel composite material as low-cost adsorbent for thorium and uranium removal,” *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 310, no. 1, hal. 69–80, Okt 2016, doi: 10.1007/s10967-016-4861-y.
- [13] N. Annisa, M. Muhammad, M. Masrullita, Z. Zulnazri, dan R. Dewi, “Pemanfaatan Limbah Ampas Tebu Sebagai Adsorben Penyerapan Logam Dan Kesadahan Pada Air Sumur,” 2023. doi: 10.29103/cejs.v3i1.8013.
- [14] S. Norsuraya, H. Fazlena, dan R. Norhasyimi, “Sugarcane Bagasse as a Renewable Source of Silica to Synthesize Santa Barbara Amorphous-15 (SBA-15),” *Procedia Eng.*, vol. 148, hal. 839–846, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.627.
- [15] R. R. S. Zuhri, R. Manurung, R. Tambun, dan H. Harahap, “Application of Sodium Silicate from Palm Leaf Ash as Heterogeneous Catalyst in Transesterification of Palm Oil,” *E3S Web Conf.*, vol. 519, hal. 3–6, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202451902008.
- [16] I Surya dan K A Harahap, "Synthesis and characterization of precipitated silica from coal fly ash", *AIP Conf. Proc.* 2626, 070003, 2023. doi.org/10.1063/5.0136044.
- [17] M. Blachnio, M. Zienkiewicz-Strzalka, A. Derylo-Marczewska, L. V. Nosach, dan E. F. Voronin, “Chitosan–Silica Composites for Adsorption Application in the Treatment of Water and Wastewater from Anionic Dyes,” *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 24, no. 14, Jul 2023, doi: 10.3390/ijms241411818.
- [18] I. Chindikia, B. Oktavia, A. Putra, dan E. Nasra, “Pengaruh Variasi pH dan Waktu Kontak pada Adsorpsi Ion Fe^{3+} Menggunakan Adsorben Silika Gel Sulfonat,” *Periodic*, vol. 13, no. 1, hal. 67–70, 2024.
- [19] D. Nur’aeni, E. P. Hadisantoso, dan D. Suhendar, “Adsorpsi Ion Logam Mn^{2+} dan Cu^{2+} Oleh Silika Gel dari Abu Ampas Tebu,” *al-Kimiya*, vol. 4, no. 2, hal. 70–80, 2019, doi: 10.15575/ak.v4i2.5087.
- [20] L. A. September, N. Kheswa, N. S. Seroka, dan L. Khotseng, “Green synthesis of silica and silicon from agricultural residue sugarcane bagasse ash - a mini review,” *RSC Adv.*, vol. 13, no. 2, hal. 1370–1380, 2023, doi: 10.1039/d2ra07490g.
- [21] B. Gencer Balkis, A. Aksu, N. Ersoy Korkmaz, O. S. Taskin, C. Celen, dan N. Caglar Balkis, “Synthesis of silica-chitosan nanocomposite for the removal of pharmaceuticals from the aqueous solution,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 1, hal. 153–168, 2025, doi: 10.1007/s13762-024-05919-8.
- [22] S. Muljani, K. A. Kusuma, L. Nofitasari, A. R. Amalia, dan N. Hapsari, “Sintesis Membran Kitosan Silika Dari Geothermal Sludge,” *J. Tek. Kim.*, vol. 13, no. 1, 2018, doi: 10.33005/tekkim.v13i1.1150.
- [23] M. El-Sakhawy, A. Salama, A. K. El-Ziaty, dan H. Hassan, “Preparation and adsorption properties of chitosan/silica/ Fe_3O_4 nanocomposite,” *Cellul. Chem. Technol.*, vol. 54, no. 56, hal. 601–608, 2020, doi: 10.35812/CelluloseChemTechnol.2020.54.60.
- [24] S. M. Rafigh dan A. Heydarinasab, “Mesoporous Chitosan- SiO_2 Nanoparticles: Synthesis, Characterization, and CO_2 Adsorption Capacity,” *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 5, no. 11, hal. 10379–10386, 2017, doi: 10.1021/acssuschemeng.7b02388.
- [25] T. M. Budnyak, I. V. Pylypchuk, V. A. Tertykh, E. S. Yanovska, dan D. Kolodynska, “Synthesis and adsorption properties of chitosan-silica nanocomposite prepared by sol-gel method,” *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 10, no. 1, hal. 1–10, 2015, doi: 10.1186/s11671-014-0722-1.
- [26] A. Harugade, A. P. Sherje, dan A. Pethe, “Chitosan: A review on properties, biological activities and recent progress in biomedical applications,” *React. Funct. Polym.*, vol. 191, no. June, hal. 105634, 2023, doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105634.
- [27] I. Najafipour *et al.*, “Synthesis of $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{MIL-101-OH}$ /Chitosan for adsorption and release of doxorubicin,” *Polym. Test.*, vol. 142, no. November 2024, hal. 108659, 2025, doi: 10.1016/j.polymertesting.2024.108659.