

**STUDI LITERATUR : SINTESIS DAN KARAKTERISASI SILIKA
DARI LIMBAH PERKEBUNAN**

Imelda Olivia Agustina Gurning¹, M. Sulthon Nurharmansyah Putra²
imeldaaoag@gmail.com¹, sulthonp30@gmail.com²
Universitas Pertahanan Republik Indonesia

Article Info

ABSTRAK

Article history:

Published March 31, 2026

Kata Kunci:

Silika, Sekam Padi, Ampas Tebu, Bonggol Jagung, Limbah Sawit.

Silika merupakan material penting dengan aplikasi luas sebagai katalis, adsorben, dan material fungsional, namun penggunaan prekursor sintesis relatif mahal dan kurang berkelanjutan sehingga limbah biomassa menjadi alternatif yang menjanjikan. Studi literatur ini bertujuan untuk membandingkan potensi sekam padi, tandan kosong kelapa sawit (TKKS), cangkang sawit, dan ampas tebu sebagai sumber silika, serta mengevaluasi metode ekstraksi dan sintesis yang digunakan, khususnya pendekatan sol-gel berbasis natrium silikat hasil ekstraksi alkali. Kajian dilakukan terhadap publikasi ilmiah yang membahas tahapan pengabuan biomassa, pelindian asam untuk menghilangkan pengotor logam, ekstraksi menggunakan basa (umumnya NaOH) untuk membentuk larutan natrium silikat, dan pengasaman untuk menghasilkan gel silika, diikuti karakterisasi seperti XRD, FTIR, SEM, dan BET. Hasil telaah menunjukkan bahwa sebagian besar silika yang diperoleh bersifat amorf dengan pita khas Si-O-Si dan kandungan SiO₂ dominan, sementara kemurnian dan luas permukaan dipengaruhi oleh jenis biomassa dan kondisi proses. Sekam padi umumnya memiliki kandungan silika tertinggi, tetapi TKKS, cangkang sawit, dan ampas tebu tetap potensial setelah perlakuan pemurnian yang tepat. Secara keseluruhan, optimasi parameter ekstraksi dan sintesis menjadi faktor kunci dalam menghasilkan silika berkualitas tinggi dari limbah biomassa.

1. PENDAHULUAN

Sektor pertanian di Indonesia menunjukkan tingkat produktivitas yang tinggi dengan padi sebagai komoditas utama yang memiliki luas lahan mencapai 15.994.512 ha, sementara komoditas lain seperti jagung, kelapa sawit, dan tebu juga berkontribusi signifikan terhadap produksi nasional setiap tahunnya. Peningkatan produksi tersebut menyebabkan peningkatan jumlah limbah biomassa yang dihasilkan selama proses budidaya dan pengolahan hasil pertanian, yang berpotensi mencapai 50,147 juta ton per tahun dari komoditas padi, jagung, kelapa sawit, dan tebu (Hidayati & Ekayuliana, 2022). Setiap komoditas menghasilkan jenis limbah yang berbeda, yaitu sekam dan jerami dari padi, bonggol dan batang dari jagung, cangkang serta tandan buah kosong dari kelapa sawit, batok dan serat dari kelapa, serta ampas dan serat dari tebu dalam proses pengolahannya.

Biomassa pertanian menyimpan energi kimia dalam struktur lignoselulosa yang memungkinkan pemanfaatannya untuk berbagai aplikasi material seperti film, adsorben, binder, komposit, dan biomedis (Zhou & Wang, 2020). Pengembangan biomassa secara efisien diperlukan untuk meningkatkan nilai tambah limbah sekaligus mengurangi dampak lingkungan akibat akumulasi yang tidak terkelola dengan baik (Cho et al., 2019).

Limbah biomassa pertanian umumnya mengandung sekitar 90% makromolekul organik yang membentuk struktur utama dinding sel tanaman serta sejumlah mikromolekul mineral dalam komposisi alamnya (Arumugam et al., 2021). Salah satu mineral yang banyak ditemukan pada residu biomassa adalah silika (SiO_2), yang termasuk oksida metaloid fungsional dengan aplikasi luas di berbagai bidang industri karena stabilitas kimia dan fleksibilitas strukturnya (Rajan et al., 2020). Beberapa jenis limbah tanaman menunjukkan kandungan silika yang signifikan, seperti limbah jagung dengan kadar SiO_2 sekitar 60%, tebu sebesar 88%, dan sekam padi yang dapat mencapai 98% dalam bentuk abu hasil pembakaran (Abu Khadra et al., 2020). Kandungan silika yang tinggi pada berbagai limbah pertanian tersebut menunjukkan bahwa biomassa memiliki potensi besar sebagai sumber alternatif silika yang berkelanjutan. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah biomassa sebagai bahan baku silika tidak hanya mendukung pengelolaan limbah yang lebih ramah lingkungan, tetapi juga mendorong pengembangan material berbasis sumber daya terbarukan dengan nilai tambah yang lebih tinggi.

Berbagai prosedur sintesis digunakan untuk memperoleh silika dari biomassa sesuai dengan karakteristik bahan baku yang digunakan dalam setiap penelitian. Sekam padi menjadi salah satu sumber bahan alam yang paling banyak diteliti karena kandungan silikanya yang tinggi dan kemampuannya menghasilkan silika dengan kemurnian hingga 96,41% setelah melalui proses pemurnian yang tepat. Metode pelindian asam (acid leaching) menggunakan larutan seperti HCl , H_2SO_4 , dan HNO_3 untuk menghilangkan impuritas logam, seperti Fe, Al, Ca, dan Mg, yang umum terdapat dalam bahan alam (Permatasari et al., 2016). Metode ekstraksi alkali membentuk natrium silikat yang kemudian mengalami proses pengendapan untuk menghasilkan silika berwarna putih dengan karakteristik fisik yang menyerupai silika komersial. Perbedaan metode tersebut memiliki tujuan yang sama, yaitu menghasilkan silika dengan tingkat kemurnian dan struktur yang optimal dari sumber bahan alam.

Karakteristik fisik tidak selalu menjamin terbentuknya fase SiO_2 secara murni dalam material hasil sintesis dari bahan alam. Teknik difraksi sinar-X (X-ray diffraction, XRD) memberikan informasi mengenai fase kristal, tingkat keteraturan struktur, dan kemungkinan keberadaan senyawa pengotor dalam material padat. Silika yang disintesis dari larutan prekursor tetraetil ortosilikat (TEOS) melalui metode sol-gel menunjukkan pola difraksi khas silika amorf dengan puncak lebar pada rentang sudut 2θ sekitar $20\text{--}25^\circ$ berdasarkan berbagai laporan penelitian (Issa & Luyt, 2019), sehingga pola tersebut sering digunakan sebagai referensi dalam evaluasi kualitas silika berbasis bahan alam. Studi literatur ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan karakteristik silika yang disintesis dari berbagai sumber biomassa melalui berbagai evaluasi karakterisasi instrument, guna memperoleh pemahaman yang lebih sistematis mengenai kualitas dan kesesuaian struktur silika berbasis bahan alam.

2. METODOLOGI

Penelitian ini merupakan studi literatur yang bertujuan untuk mengkaji secara komparatif sintesis silika dari limbah perkebunan Indonesia (sekam padi, ampas tebu, bonggol jagung, cangkang sawit, dan tandan kosong kelapa sawit) serta karakteristiknya melalui pengumpulan, analisis, dan sintesis literatur ilmiah dari basis data elektronik

seperti Google Scholar, ScienceDirect, Scopus, dan SpringerLink dengan rentang waktu publikasi 2015–2026. Literatur yang dikaji meliputi artikel jurnal internasional terindeks dan prosiding konferensi yang membahas sintesis silika dari kelima jenis limbah tersebut menggunakan metode sol-gel, serta menyediakan data karakterisasi minimal dua dari tiga teknik utama (XRD untuk analisis fasa, FTIR untuk gugus fungsi, dan XRF/EDS untuk kemurnian SiO₂). Data yang diekstraksi meliputi sumber limbah, kondisi pra-perlakuan (jenis dan konsentrasi asam, suhu dan waktu kalsinasi), parameter sintesis (konsentrasi NaOH, pH pengendapan, metode pengeringan), serta hasil karakterisasi (puncak XRD, bilangan gelombang FTIR, kadar SiO₂ dan pengotor, luas permukaan BET, ukuran partikel, dan morfologi SEM/TEM) yang kemudian dianalisis secara komparatif untuk mengidentifikasi pengaruh kondisi proses terhadap kualitas silika, membandingkan keunggulan dan tantangan masing-masing sumber limbah, serta menentukan potensi terbaiknya berdasarkan kemurnian, struktur amorf, dan karakteristik fisikokimia lainnya.

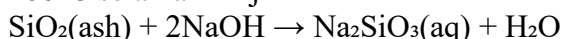
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis Silika dari Sekam Padi

Sekam padi (rice husk) merupakan sumber biomassa yang paling banyak diteliti sebagai bahan baku silika karena kandungan SiO₂-nya yang sangat tinggi, berkisar antara 15-28% dari berat kering sekam atau 85-98% dari total abu setelah proses kalsinasi. Proses sintesis umumnya diawali dengan pembersihan sekam menggunakan air untuk menghilangkan kotoran fisik, dilanjutkan dengan leaching asam menggunakan HCl atau H₂SO₄ pada konsentrasi 0,5– 2 M selama 2–24 jam pada suhu 60–120°C. Tujuan leaching adalah melarutkan pengotor mineral utama seperti kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), besi (Fe), dan mangan (Mn) yang dapat menurunkan kemurnian silika akhir (Hamidu et al., 2025). Menurut Gu et al. (2015), leaching dengan HCl lebih efektif dibandingkan H₂SO₄ dalam menghilangkan pengotor logam alkali karena kemampuan HCl membentuk garam klorida yang lebih mudah larut dalam air.

Tahap kalsinasi merupakan kunci dalam mengonversi bahan organik (selulosa, hemiselulosa, lignin) menjadi abu yang kaya silika. Penelitian Aghashahi Ardestani et al. (2025) menunjukkan bahwa kalsinasi pada 700°C selama 3 jam menghasilkan abu berwarna putih bersih dengan kandungan karbon sangat rendah (dikonfirmasi oleh TGA). Suhu 600–800°C dianggap optimal karena menghasilkan silika berfasa amorf dengan reaktivitas tinggi, sedangkan di atas 800°C silika mulai bertransformasi menjadi fasa kristalin (kristobalit dan tridimit) yang ditandai dengan munculnya puncak-puncak tajam dalam pola XRD (Hamidu et al., 2025; Bakar et al., 2016). Chandrasekhar et al. (2006) menegaskan bahwa keberadaan pengotor alkali seperti K₂O dapat menurunkan suhu transisi amorf-kristalin, sehingga leaching asam sebelum kalsinasi sangat penting untuk mempertahankan sifat amorf. Abu hasil kalsinasi kemudian diekstraksi dengan larutan NaOH 1–2 M pada suhu 80–

100°C selama 1–4 jam untuk membentuk natrium silikat (Na₂SiO₃) menurut reaksi:



Larutan natrium silikat yang jernih kemudian diasamkan dengan HCl 1–2 M atau H₂SO₄ hingga pH 7 untuk mengendapkan silika gel (SiO₂·nH₂O). Proses pengasaman ini menyebabkan polikondensasi gugus silanol membentuk jaringan tiga dimensi siloksan (Si-O-Si). Dhaneswara et al. (2020) membandingkan penggunaan HCl dan CH₃COOH dalam proses pengasaman dan menemukan bahwa HCl menghasilkan silika dengan kemurnian lebih tinggi (98,9–99,7%) serta luas permukaan yang lebih besar (236 m²/g) dibandingkan CH₃COOH (204 m²/g).

Produk silika yang dihasilkan bersifat amorf dengan puncak XRD broad pada 2θ =

22– 23° dan kemurnian SiO₂ mencapai 98,41–99,7% berdasarkan analisis XRF (Aghashahi Ardestani et al., 2025; Dhaneswara et al., 2020). Hasil XRF dari Azat et al. (2019) menunjukkan bahwa perlakuan leaching dengan HCl 2M dan kalsinasi pada 600°C menghasilkan silika dengan kemurnian 99,58%, dengan pengotor utama hanya K₂O (0,02%) dan Fe₂O₃ (0,03%).

Agusnar et al. (2022) dalam kajiannya melaporkan bahwa variasi konsentrasi NaOH (5%, 10%, dan 15%) tidak mengubah karakter amorf silika yang dihasilkan, namun meningkatkan kadar silika dari 22% menjadi 40% (analisis EDS) dan mempengaruhi ukuran partikel yang berkisar antara 43–97 nm berdasarkan perhitungan Debye-Scherrer. Semakin tinggi konsentrasi NaOH, semakin besar rendemen silika yang diperoleh karena kelarutan silika dalam alkali meningkat.

Selain itu, Purnawira et al. (2019) yang berhasil mensintesis MCM-41 dari sekam padi dengan variasi CTAB 1–1,5% dan memperoleh luas permukaan hingga 768,9 m²/g dengan diameter pori 3–6 nm. Puncak XRD yang melebar pada 2θ = 22–24° mengkonfirmasi struktur amorf sekaligus mengindikasikan pembentukan pori akibat template surfaktan.

Sintesis Silika dari Ampas Tebu

Ampas tebu (sugarcane bagasse) adalah residu berserat yang tersisa setelah pemerasan batang tebu dalam proses produksi gula. Setiap ton gula yang diproduksi menghasilkan sekitar 280–300 kg ampas tebu kering, dan Indonesia sebagai salah satu produsen tebu terbesar menghasilkan limbah ampas tebu dalam jumlah melimpah yang selama ini hanya dimanfaatkan terbatas sebagai bahan bakar boiler atau dibuang begitu saja. Kandungan SiO₂ dalam abu ampas tebu dilaporkan bervariasi antara 50–78% tergantung kondisi reaksi, varietas tebu, dan metode pembakaran. Kandungan silika yang cukup tinggi ini menjadikan ampas tebu sebagai sumber alternatif yang potensial untuk sintesis silika bernilai tambah.

Proses sintesis silika dari ampas tebu umumnya juga melibatkan pembakaran terkontrol (kalsinasi) pada suhu 500–800°C. Habte et al. (2025) melakukan optimasi statistik menggunakan Central Composite Design (CCD) dengan memvariasikan suhu kalsinasi (500– 800°C), waktu kalsinasi (2–4 jam), dan waktu digesti (1–3 jam). Kondisi optimal diperoleh pada suhu 583,48°C, waktu kalsinasi 3,482 jam, dan waktu digesti 2,283 jam yang menghasilkan rendemen silika sebesar 69,6%. Abu ampas tebu yang dikalsinasi pada suhu di bawah 600°C cenderung berwarna kehitaman akibat masih adanya sisa karbon yang belum terbakar sempurna, sedangkan pada suhu di atas 700°C warna abu berubah menjadi putih yang menandakan tingginya kemurnian silika dan rendahnya residu karbon.

Pinheiro et al. (2025) melaporkan bahwa abu ampas tebu yang berasal dari empat sumber berbeda di Brasil memiliki komposisi oksida yang sangat bervariasi, dengan kadar SiO₂ berkisar antara 53,2–77,9% dan pengotor utama berupa Al₂O₃ (4,3–18,5%), K₂O (2,3–12,8%), serta CaO (1,5–6,4%). Abu tersebut kemudian diproses melalui ekstraksi alkali dengan NaOH dan pengasaman menggunakan HCl untuk menghasilkan gel silika. Setelah melalui proses sol- gel, kemurnian SiO₂ meningkat secara signifikan menjadi 91,9–93,5% dengan kandungan alumina yang masih tersisa sekitar 3,4–4,2%. Pola XRD produk menunjukkan puncak melebar yang khas pada 2θ = 22–24°, mengonfirmasi fasa amorf dari silika yang dihasilkan. Menariknya, meskipun abu awal memiliki karakteristik yang sangat heterogen, produk silika yang dihasilkan menunjukkan kemiripan sifat yang konsisten, membuktikan bahwa metode sol-gel mampu meminimalkan heterogenitas bahan baku (Pinheiro et al., 2025).

September et al. (2026) melakukan studi komparatif penggunaan tiga jenis asam dalam proses leaching dan gelasi, yaitu HCl, asam sitrat (CA), dan L-sistein hidroklorida monohidrat (L-cys). Abu ampas tebu awal mengandung SiO₂ sebesar 74,96% dengan pengotor utama Al₂O₃ (12,89%) dan Fe₂O₃ (3,06%). Setelah proses sol-gel, kemurnian silika

yang dihasilkan bervariasi: 78,36% (HCl), 94,58% (asam sitrat), dan 67,25% (L-cys). Rendemen tertinggi diperoleh dengan penggunaan asam sitrat, yang juga menghasilkan luas permukaan BET tertinggi yaitu 523,89 m²/g dengan volume pori 0,71 cm³/g dan diameter pori 5,43 nm. Pola XRD menunjukkan puncak melebar pada $2\theta = 21,6^\circ$ untuk silika-CA dan $2\theta = 22^\circ$ untuk silika-HCl dan silika-L-cys, semuanya mengonfirmasi fasa amorf. Analisis TEM menunjukkan ukuran partikel silika berada pada rentang 11–21 nm, dengan morfologi partikel yang cenderung beraglomerasi membentuk jaringan tiga dimensi khas hasil metode sol-gel.

Sholeh et al. (2021) mengkaji pengaruh suhu sintesis (60–90°C) dan pH (7–11) terhadap karakteristik silika nanostruktur dari ampas tebu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu sintesis, ukuran partikel primer meningkat (dari 12,4 nm pada 60°C menjadi 24,5 nm pada 90°C) dan luas permukaan BET menurun (dari 185,1 m²/g menjadi 74,1 m²/g). Sementara itu, peningkatan pH dari 7 ke 11 juga menyebabkan ukuran partikel membesar (dari 18,8 nm pada pH 8 menjadi 21,9 nm pada pH 11) akibat meningkatnya muatan negatif pada permukaan silika yang mendorong pertumbuhan partikel. Analisis FTIR mengonfirmasi keberadaan gugus siloksan (Si-O-Si) pada 1140 cm⁻¹, 830 cm⁻¹, dan 500 cm⁻¹, serta gugus silanol (Si-OH) pada 3450 cm⁻¹ dan 1660 cm⁻¹. Uji termogravimetri menunjukkan bahwa silika yang dihasilkan stabil hingga suhu 600°C, dengan kehilangan massa total sekitar 10–15% yang sebagian besar berasal dari pelepasan air teradsorpsi dan dehidroksilasi gugus silanol. Temuan ini menegaskan bahwa suhu dan pH sintesis merupakan parameter kunci yang mengendalikan ukuran partikel, porositas, dan kestabilan termal silika dari ampas tebu.

Nata et al. (2024) dan Nuhu et al. (2025) berhasil memanfaatkan silika dari abu ampas tebu sebagai bahan baku pembuatan komposit magnetik dan nanosilika untuk aplikasi adsorpsi. Nata et al. (2024) mengkombinasikan serat ampas tebu dan sekam padi dengan nanopartikel magnetik (Fe₃O₄) yang difungsionalisasi dengan gugus amina. Material komposit yang dihasilkan memiliki luas permukaan 25,81 m²/g dan kapasitas adsorpsi ion Cr(III) mencapai 132,92 mg/g pada pH 5, mengikuti model isotherm Langmuir dan kinetika pseudo- orde dua. Sementara itu, Nuhu et al. (2025) mensintesis nanosilika dari ampas tebu menggunakan asam sitrat dan aminodeoksisorbitol, menghasilkan silika dengan kemurnian 69,92% (dari analisis XRF) dan ukuran kristalit rata-rata 24,10 nm. Analisis BET menunjukkan luas permukaan 284,2 m²/g dengan volume pori 0,173 cm³/g dan diameter pori 2,13 nm. Kedua penelitian ini menunjukkan potensi aplikasi silika ampas tebu di bidang pengolahan limbah dan adsorpsi logam berat, membuka peluang pemanfaatan limbah pertanian menjadi material fungsional yang bernilai ekonomi tinggi.

Sintesis Silika dari Bonggol Jagung

Bonggol jagung (corn cob) merupakan bagian inti dari tongkol jagung setelah biji-bijinya dilepaskan. Kandungan SiO₂ dalam abu bonggol jagung lebih rendah dibandingkan sekam padi maupun ampas tebu, dengan rentang 47,78–67,41% tergantung pada varietas jagung, kondisi tanah, dan metode preparasi. Meskipun demikian, ketersediaannya yang melimpah dan murah menjadikannya kandidat menarik sebagai sumber silika alternatif, terutama di negara-negara penghasil jagung seperti Indonesia. Kandungan mineral non-silika dalam bonggol jagung, terutama kalium (K₂O) dan kalsium (CaO), relatif tinggi karena tanaman jagung menyerap unsur hara tersebut secara aktif dari tanah selama pertumbuhannya (Sulaiman et al., 2022). Analisis XRF oleh Okoronkwo et al. (2016) menunjukkan bahwa abu bonggol jagung mengandung K₂O 5,42% dan CaO 16,70%, selain itu juga terdapat MgO (7,80%) dan Fe₂O₃ (8,31%).

Sulaiman et al. (2022) meneliti sintesis silika dari bonggol jagung menggunakan metode sol-gel dengan variasi suhu pengabuan (750°C dan 850°C) serta rasio massa

bonggol dan kulit jagung. Hasil analisis XRD menunjukkan bahwa pada suhu 750°C silika yang dihasilkan bersifat amorf dengan puncak melebar pada $2\theta = 22\text{--}24^\circ$, sedangkan pada suhu 850°C mulai terbentuk puncak tajam yang mengindikasikan transisi ke fasa kristalin (kuarsa). Hal ini sesuai dengan laporan Chanadee et al. (2016) bahwa suhu di atas 800°C menyebabkan transformasi fasa dari amorf menjadi kristalin. Kemurnian SiO_2 yang diperoleh pada kondisi optimal (rasio bonggol:kulit = 1:2, suhu 750°C) mencapai 7,64% berdasarkan XRF, dengan pengotor utama berupa K_2O dan Cl yang masih cukup tinggi akibat penggunaan HCl dalam proses pengasaman. Namun, nilai kemurnian ini relatif rendah karena sampel belum melalui proses pemurnian lanjutan.

Okoronkwo et al. (2016) melaporkan bahwa proses ekstraksi alkali dengan NaOH 3M dan pengasaman menggunakan HCl , dilanjutkan dengan nanostrukturisasi menggunakan template CTAB, mampu menurunkan kandungan pengotor K_2O dan Na_2O dari 5,42% dan 1,89% menjadi 0,74% dan 0,49%, sehingga kemurnian SiO_2 akhir meningkat menjadi 98,77%. Analisis XRD menunjukkan puncak melebar khas silika amorf pada $2\theta = 22^\circ$, sementara perhitungan dengan metode Debye-Scherrer memberikan ukuran kristalit rata-rata 54 nm. Analisis SEM mengonfirmasi bahwa partikel silika berbentuk tidak beraturan dengan ukuran bervariasi antara 44–98 nm dan cenderung beraglomerasi. Hasil ini sejalan dengan penelitian Shim et al. (2015) yang mempelajari pengaruh pH terhadap karakteristik silika dari bonggol jagung. Mereka menemukan bahwa pada pH 7 silika yang dihasilkan bersifat amorf dengan kemurnian tinggi (99,5%) dan luas permukaan BET 39,9 m^2/g , sedangkan pada pH 10 terbentuk silika dengan kristalinitas rendah dan kandungan pengotor lebih tinggi. Analisis FTIR mengonfirmasi keberadaan gugus silanol (Si-OH) pada 3200–3800 cm^{-1} dan siloksan (Si-O-Si) pada 1100 cm^{-1} dan 800 cm^{-1} .

Wardhani et al. (2017) mengkaji pengaruh jenis asam (HCl , HBr , dan asam sitrat) dalam proses leaching terhadap kandungan silika dari bonggol jagung. Hasil penelitian menunjukkan bahwa HCl merupakan asam paling efektif dalam meningkatkan kemurnian silika, yaitu dari 27,81% (abu tanpa perlakuan) menjadi 43% setelah leaching pada suhu ruang, dan setelah kalsinasi pada 750°C selama 5 jam kemurnian meningkat drastis menjadi 79,95%. Penggunaan HBr menghasilkan silika dengan kemurnian 63,65%, sedangkan asam sitrat menghasilkan 70,6%. Analisis XRD menunjukkan bahwa pada suhu 750°C, silika hasil leaching dengan HCl masih mempertahankan fasa amorf (puncak melebar pada $2\theta = 21\text{--}25^\circ$), sementara dengan HBr dan asam sitrat mulai muncul puncak tajam pada $2\theta = 26,66^\circ$ yang mengindikasikan fasa kuarsa. Hal ini menunjukkan bahwa jenis asam tidak hanya mempengaruhi kemurnian tetapi juga stabilitas fasa amorf selama kalsinasi.

Ajeel et al. (2021) mengembangkan prosedur sintesis nanopartikel silika dari bonggol jagung dengan teknik presipitasi termodifikasi yang melibatkan proses leaching bertingkat.

Abu bonggol jagung yang telah dikalsinasi pada 700°C dileaching dengan NaOH 2–3N pada suhu 80°C, kemudian diendapkan dengan H_2SO_4 5N. Produk yang diperoleh dimurnikan kembali dengan HCl 6N dan NaOH 2,5N untuk menghilangkan sisa pengotor. Hasil analisis XRF menunjukkan bahwa kemurnian SiO_2 meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi NaOH , mencapai 97,416% pada penggunaan NaOH 3N. Analisis AFM menunjukkan ukuran partikel rata-rata 85 nm dengan distribusi ukuran 70–165 nm. Morfologi partikel cenderung spherical pada konsentrasi NaOH rendah (2–2,5N), namun berubah menjadi seperti kristal pada konsentrasi 3N.

Secara keseluruhan, tantangan utama sintesis silika dari bonggol jagung adalah kandungan pengotor mineral yang tinggi, terutama kalium, kalsium, dan magnesium, yang memerlukan optimasi proses leaching lebih agresif untuk mencapai kemurnian setara dengan sekam padi. Penggunaan HCl sebagai agen leaching terbukti paling efektif, sementara suhu kalsinasi harus dijaga di bawah 800°C untuk mempertahankan fasa amorf.

Selain itu, pengaturan pH pada proses pengendapan (optimal pH 7) serta penggunaan template seperti CTAB dapat meningkatkan kemurnian dan menghasilkan partikel berukuran nano dengan morfologi yang lebih seragam. Dengan optimasi yang tepat, bonggol jagung memiliki potensi besar sebagai sumber silika alternatif yang ekonomis dan berkelanjutan.

Sintesis Silika dari Limbah Padat Kelapa Sawit

Industri kelapa sawit di Indonesia menghasilkan limbah padat dalam jumlah sangat besar, terutama cangkang sawit (palm kernel shell) dan tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Cangkang sawit merupakan lapisan keras endokarp pelindung inti sawit, sementara TKKS adalah limbah berserat yang tersisa setelah pemisahan buah dari tandan segar, mencapai 22–23% dari berat tandan buah segar (Arfiana et al., 2021). Kedua jenis limbah ini mengandung silika dalam jumlah signifikan dan berpotensi menjadi sumber silika alternatif yang ekonomis. Keberadaan silika dalam TKKS terkait erat dengan struktur anatomi tanaman, di mana permukaan seratnya ditutupi oleh bodi silika (silica bodies) berbentuk bulat berduri berdiameter 10–15 μm yang terikat kuat pada matriks lignoselulosa Rama Rao, P., & Ramakrishna, G. (2022).

Imoisili et al. (2020) mensintesis silika dari abu cangkang sawit menggunakan metode sol-gel. Abu hasil kalsinasi pada 750°C dilarutkan dalam NaOH 2N, kemudian diendapkan dengan HCl 2N hingga pH 7,5–8,5. Analisis XRF menunjukkan peningkatan kemurnian SiO₂ dari 56,76% (dalam abu) menjadi 96,83% setelah proses sol-gel, dengan pengotor utama CaO, K₂O, dan Fe₂O₃ berhasil dihilangkan. Pola XRD menunjukkan puncak melebar khas pada $2\theta \approx 22,5^\circ$, mengonfirmasi fasa amorf (JCPDS 47-1144). Spektrum FTIR mengonfirmasi keberadaan gugus silanol (Si-OH) pada 3390–3445 cm⁻¹ dan siloksan (Si-O-Si) pada 1050–1170 cm⁻¹. Analisis SEM memperlihatkan partikel tidak beraturan dengan ukuran bervariasi dan cenderung beraglomerasi, sementara uji TGA menunjukkan stabilitas termal hingga 1000°C.

Nelson et al. (2023) mengekstrak silika dari abu TKKS melalui metode termokimia. Abu hasil pirolisis pada suhu 800°C mengandung SiO₂ 59,85%, kemudian dileaching dengan HCl 1% dan diendapkan menggunakan NH₄OH 3M. Produk akhir dikalsinasi pada 550°C, menghasilkan silika dengan kemurnian 99,44% (XRF) dan pengotor utama Al₂O₃ (0,68%) serta K₂O (0,38%). Pola XRD menunjukkan puncak melebar pada $2\theta = 33\text{--}35^\circ$, mengindikasikan fasa amorf yang serupa dengan silika komersial. Analisis FTIR mengonfirmasi keberadaan gugus Si-O-Si (1069–1085 cm⁻¹), Si-O (797 cm⁻¹), dan Si-OH (1620–1700 cm⁻¹). SEM memperlihatkan partikel berukuran sekitar 200 nm dengan morfologi tidak beraturan. Studi lain oleh Aliyu et al. (2025) melaporkan silika dari TKKS dengan indeks kristalinitas 22,16% dan stabilitas termal tinggi (kehilangan massa hanya 0,34% hingga 700°C).

Silika dari limbah sawit tidak hanya berdiri sendiri sebagai produk akhir, tetapi sering dikombinasikan dengan material lain untuk meningkatkan fungsionalitasnya. Rahmat et al. (2021) mensintesis komposit ZnO-SiO₂ menggunakan silika dari TKKS sebagai sumber silika, yang berpotensi untuk aplikasi optik dan fosfor. Santi et al. (2019) memanfaatkan kompos TKKS yang diperkaya silika sebagai pupuk bio-silika (BioSilAc) untuk tanaman kelapa sawit, yang terbukti meningkatkan produksi tandan buah segar hingga 9,23 ton/ha/tahun. Selain itu, silika amorf dari limbah sawit juga berpotensi sebagai bahan pengisi dalam komposit polimer, penyangga katalis, dan adsorben logam berat. Dengan demikian, sintesis silika dari limbah padat kelapa sawit tidak hanya memberikan solusi pengelolaan limbah, tetapi juga membuka peluang pengembangan material fungsional bernilai tambah.

4. KESIMPULAN

Sekam padi, bonggol jagung, tandan kosong kelapa sawit, cangkang sawit, dan ampas tebu merupakan sumber limbah perkebunan yang layak dan berkelanjutan untuk produksi silika, dengan sekam padi menunjukkan kandungan SiO₂ relatif paling tinggi, namun sumber lainnya tetap kompetitif setelah proses pemurnian. Tujuan penelitian untuk membandingkan potensi sumber biomassa dan mengevaluasi metode sintesis telah terjawab melalui temuan bahwa metode ekstraksi alkali menggunakan NaOH yang diikuti pengasaman merupakan pendekatan paling umum dan efektif dalam menghasilkan silika amorf berkadar tinggi. Perbedaan komposisi awal biomassa dan variasi kondisi proses, seperti konsentrasi basa/asam, suhu, dan waktu reaksi, secara signifikan memengaruhi kemurnian, struktur, dan sifat fisik silika yang dihasilkan. Dengan demikian, pemilihan bahan baku sebaiknya mempertimbangkan ketersediaan lokal dan efisiensi proses, sedangkan keberhasilan sintesis sangat ditentukan oleh optimasi parameter reaksi untuk memperoleh karakteristik silika yang sesuai dengan aplikasi lanjutan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Aghashahi Ardestani, E., Sheikh Zakariaee, S. J., Haji Pour Shirazi Fard, M., & Mirshekari, B. (2025). Synthesis of biogenic mesoporous silica nanoparticles from rice husks waste materials via sol-gel method. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15, 29191–29206. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05872-z>
- Agusnar, H., Sugita, P., & Nainggolan, I. (2022). Preparation sodium silicate from rice husk to synthesize silica nanoparticles by sol-gel method for adsorption water in analysis of methamphetamine. *Rasayan Journal of Chemistry*, 15(3), 2125–2128. <https://doi.org/10.31788/RJC.2022.1536974>
- Aghashahi Ardestani, E., Sheikh Zakariaee, S. J., Haji pour Shirazi Fard, M., & Mirshekari, B. (2025). [Sudah dicantumkan di atas — tidak diduplikasi]
- Ajeel, S. A., Sukkar, K. A., & Zedin, N. K. (2021). Extraction high purity nanosilica corn cob by modified precipitation technique [Preprint]. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-719553/v1>
- Aliyu, A. S., Aliyu, U. S., Hamza, A. M., Nyakuma, B. B., Liman, M. S., Gaya, U. I., Dunama, A. M., Zira, J. D., & Liman, M. M. (2025). Synthesis and characterisation of rice husk and palm fruit bunch silica: Compositional, structural, and thermal analyses. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15, 3533–3544. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05525-1>
- Arfiana, E., Finali, R., Noor, I., Murti, S. S., Suratno, H., Rosyadi, E., Saputra, H., & Noda, R. (2021). Oil palm empty fruit bunch ash as a potassium source in the synthesis of NPK fertilizer. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 749(1), Article 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/749/1/012038>
- Arumugam, S. M., Sharma, S., Kumar, S., Mahala, S., Devi, B., & Elumalai, S. (2021). Chemistry of plant biomass. In *Biomass for bioenergy and biomaterials* (pp. 1–30).
- Azat, S., Sartova, Z., Bekseitova, K., & Askaruly, K. (2019). Extraction of high-purity silica from rice husk via hydrochloric acid leaching treatment. *Turkish Journal of Chemistry*, 43, 1258–1269. <https://doi.org/10.3906/kim-1903-53>
- Bakar, R. A., Yahya, R., & Gan, S. N. (2016). Production of high purity amorphous silica from rice husk. *Procedia Chemistry*, 19, 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.092>
- Chanadee, T., & Chaiyarat, S. (2016). Preparation and characterization of low cost silica powder from sweet corn cobs (*Zea mays saccharata* L.). *Journal of Materials and Environmental Science*, 7(7), 2369–2374.
- Chandrasekhar, S., Pramada, P. N., & Majeed, J. (2006). Effect of calcination temperature and heating rate on the optical properties and reactivity of rice husk ash. *Journal of Materials Science*, 41, 7926–7933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0859-0>
- Cho, E. J., Trinh, L. T. P., Song, Y., Lee, Y. G., & Bae, H. (2019). Bioconversion of biomass waste into high value chemicals. *Bioresource Technology*, 298, 122386.

- <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122386>
- Dhaneswara, D., Fatriansyah, J. F., Situmorang, F. W., & Haqoh, A. N. (2020). Synthesis of amorphous silica from rice husk ash: Comparing HCl and CH₃COOH acidification methods and various alkaline concentrations. *International Journal of Technology*, 11(1), 200–208. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v11i1.3335>
- Gu, S., Zhou, J., Luo, Z., Wang, Q., & Shi, Z. (2015). Kinetic study on the preparation of silica from rice husk under various pretreatments. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 119, 2159–2169. <https://doi.org/10.1007/s10973-014-4219-z>
- Habte, G. A., Bullo, T. A., & Ahmed, Y. (2025). Statistical optimization characteristics and eco-friendly synthesis of silica from sugarcane bagasse. *Scientific Reports*, 15, Article 8252. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89366-6>
- Hamidu, I., Afotey, B., Kwakye-Awuah, B., & Anang, D. A. (2025). Synthesis of silica and silicon from rice husk feedstock: A review. *Heliyon*, 11, e42491. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42491>
- Hidayati, N., & Ekayuliana, A. (2022). Studi potensial energi biomassa dari limbah pertanian dan perkebunan di Indonesia. *Seminar Nasional Inovasi Vokasi*, 1, 130–135.
- Imoisili, P. E., Ukoba, K. O., & 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>
- Issa, A., & Luyt, A. (2019). Kinetics of alkoxysilanes and organoalkoxysilanes polymerization: A review. *Polymers*, 11(3), 537. <https://doi.org/10.3390/polym11030537>
- Nelson, E. S., Iyuke, S., Daramola, M. O., & Okewale, A. (2023). Extraction and characterization of silica from empty palm fruit bunch (EPFB) ash. *Processes*, 11(6), Article 1684. <https://doi.org/10.3390/pr11061684>
- Okoronkwo, E. A., Imoisili, P. E., Olubayode, S. A., & Olusunle, S. O. O. (2016). Development of silica nanoparticle from corn cob ash. *Advances in Nanoparticles*, 5(2), 135–139. <https://doi.org/10.4236/anp.2016.52015>
- Permatasari, N., Sucahya, T. N., & Nandiyanto, A. B. D. (2016). Review: Agricultural wastes as a source of silica material. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 1(1), 82. <https://doi.org/10.17509/ijost.v1i1.8619>
- Pinheiro, S. C., Paiva, O. A., Toledo Filho, R. D., & Cordeiro, G. C. (2025). Minimizing heterogeneity of sugarcane bagasse ash by silica extraction via sol–gel process. *Next Materials*, 10, Article 101171.
- Prastyo, H., Fadila, M. A., Syabena, M. F., Umadi, S. S., & Heryanto, A. Y. (2025). Biomassa sebagai sumber energi alternatif dan terbarukan melalui systematic literature review. *Jurnal Informasi, Sains dan Teknologi*, 8(2), 407–425. <https://doi.org/10.55606/isaintek.v8i2.362>
- Purnawira, B., Purwaningsih, H., Ervianto, Y., Pratiwi, V. M., Susanti, D., Rochiem, R., & Purniawan, A. (2019). Synthesis and characterization of mesoporous silica nanoparticles (MSNp) MCM-41 from natural waste rice husk. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 541, Article 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/541/1/012018>
- Rajan, R., Zakaria, Y., Shamsuddin, S., & Hassan, N. F. (2020). Robust synthesis of mono-dispersed spherical silica nanoparticle from rice husk for high definition latent fingerprint development. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(11).* <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.09.042>
- Rahmat, F., Fen, Y. W., Anuar, M. F., Omar, N. A. S., Zaid, M. H. M., Matori, K. A., & Khaidir, R. E. M. (2021). Synthesis and characterization of ZnO–SiO₂ composite using oil palm empty fruit bunch as a potential silica source. *Molecules*, 26(4), Article 1061. <https://doi.org/10.3390/molecules26041061>
- Rama Rao, P., & Ramakrishna, G. (2022). Oil palm empty fruit bunch fiber: Surface morphology, treatment, and suitability as reinforcement in cement composites—A state of the art review. *Cleaner Materials*, 6, Article 100144. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100144>
- Santi, L. P., Kalbuadi, D. N., & Goenadi, D. H. (2019). Empty fruit bunches as potential source for biosilica fertilizer for oil palm. *Journal of Tropical Biodiversity and Biotechnology*, 4(3), 90–96. <https://doi.org/10.22146/jtbb.38749>

- September, L. A., Kheswa, N., Seroka, N. S., & Khotseng, L. (2026). Green synthesis of amorphous silica nanoparticles (SiO₂NPs) from sugarcane bagasse ash by sol–gel method. *Next Materials*, 10, Article 101396. <https://doi.org/10.1016/j.nxm.2025.101396>
- Shim, J., Velmurugan, P., & Oh, B.-T. (2015). Extraction and physical characterization of amorphous silica made from corn cob ash at variable pH conditions via sol–gel processing. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 30, 155–160. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.05.029>
- Sholeh, M., Rochmadi, R., Sulisty, H., & Budhijanto, B. (2021). Nanostructured silica from bagasse ash: The effect of synthesis temperature and pH on its properties. *Journal of Sol–Gel Science and Technology*, 97, 126–137. <https://doi.org/10.1007/s10971-020-05416-7>
- Todkar, B. S., Deorukhkar, O. A., & Deshmukh, S. M. (2016). Extraction of silica from rice husk. *International Journal of Engineering Research and Development*, 12(3), 69–74.
- Wardhani, G. A. P. K., Nurlala, & Azizah, M. (2017). Silica content and structure from corncob ash with various acid treatment (HCl, HBr, and citric acid). *Indonesian Journal of Chemistry*, 17(3), 1–8. <https://doi.org/10.22146/ijc.25486>
- Zhou, C., & Wang, Y. (2020). Recent progress in the conversion of biomass wastes into functional materials for value-added applications. *Science and Technology of Advanced Materials*, 21(1), 787–804. <https://doi.org/10.1080/14686996.2020.1848213>.