

Preparasi Logam Oksida-Biogenik Silika dan Aplikasinya Dalam Penghilangan Zat Warna: Sebuah Telaah Pustaka

Setyo Eko Nugroho, dan Salprima Yudha S*

Didaftarkan: [18 Juni 2024] Direvisi: [25 Juni 2024] Terbit: [30 Juni 2024]

ABSTRAK: Silika telah menjadi material yang populer karena sifat khas yang unik dan kelimpahannya yang tinggi. Bahan ini telah banyak dimodifikasi dengan menambahkan logam oksida lain untuk mendapat sifat yang menarik. Biogenik silika dapat diproduksi dan diekstraksi dari limbah agroindustri seperti sekam padi, daun bambu, salak, dan kelapa sawit. Artikel ini membahas tentang biogenik silika yang berasal dari limbah agroindustri sebagai pengganti silika komersil dalam sintesis material berbasis silika-logam oksida. Artikel ini menyorot preparasi bahan biogenik silika-logam oksida dari limbah agroindustri dan kemampuannya sebagai bahan penghilang zat warna. Selain itu, hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa biogenik silika pengganti silika komersil dalam materi silika-logam oksida memiliki potensi yang sangat baik sebagai bahan penghilang zat warna.

PENDAHULUAN

Silika atau silikon dioksida (SiO_2) merupakan mineral yang paling banyak ditemukan di kerak bumi. Silika merupakan senyawa hasil dari polimerisasi asam silikat dengan penyusun rantai satuan SiO_4 tetrahedral serta memiliki formula umum SiO_2 [1]. Silika merupakan bahan material yang berharga karena memiliki sifat yang unik seperti sifat inert, sifat adsorpsi dan pertukaran ion yang baik, sangat mudah untuk dimodifikasi dengan senyawa lain sehingga dapat meningkatkan kinerjanya, kestabilan termal yang baik, dan bersifat reversibel [2].

Penggabungan silika dengan oksida logam lain merupakan salah satu metode untuk meningkatkan keberdayagunaan silika sebagai material yang kaya akan manfaat. Material berbasis logam oksida-silika merupakan logam yang bereaksi dengan senyawa silika dan menghasilkan senyawa baru. Logam oksida-silika memiliki kemampuan katalisis dalam sintesis senyawa organik [3] dan dalam proses penghilangan zat warna. Beberapa jenis logam oksida yang sering digabungkan dengan silika adalah CuO [4], ZnO [5], ZrO_2 [6], TiO_2 [7], NiO [8], SnO_2 [9], dan logam oksida lainnya.

Sebagian besar penggunaan silika pada sintesis material logam oksida-silika telah digantikan oleh silika yang didapatkan dari ekstraksi bahan alami seperti limbah agrikultural yang biasanya hanya dibuang atau dibakar tanpa pengolahan dan dapat menimbulkan polusi [10]. Silika yang berasal dari bahan alam atau biogenik silika memiliki prospek yang sangat tinggi untuk dikembangkan karena dapat membantu mengurangi permasalahan lingkungan. Diantara sumber biogenik silika yang telah dimanfaatkan untuk sintesis material logam oksida-silika adalah sekam padi, bagas tebu, daun bambu, kelapa sawit, dan salak. Melalui tulisan ini menampilkan preparasi material berbasis logam oksida-biogenik silika dan serta pengaplikasiannya pada proses penghilangan zat warna.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sumber Biogenik Silika

a. Sekam Padi

Sekam padi merupakan produk samping dari industri agrikultural beras. Sekam padi mengandung kadar silika yang tinggi yaitu sekitar 15 %-28 % [11] dan abu sekam padi mengandung silika 87 %- 97 % berat kering [12]. Kadar silika yang tinggi membuat sekam padi telah banyak dilaporkan sebagai prekursor biogenik silika pada sintesis logam oksida-silika. Beberapa material logam oksida-biogenik silika yang telah disintesis menggunakan sekam padi adalah $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ [13], MgO-SiO_2 [14], $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ [11], $\text{CuO}\cdot\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ [15], dan NiO-SiO_2 [16].

b. Bagas Tebu

Bagas tebu atau ampas tebu merupakan produk samping yang didapatkan dari industri gula dan industri etanol. Bagas tebu memiliki kadar silika yang cukup tinggi. Abu bagas tebu memiliki kadar silika 43 %- 52 % berat dan kadar silika tersebut dapat ditingkatkan hingga >95 % dengan perlakuan pencucian oleh asam klorida (HCl) baik sebelum maupun sesudah proses kalsinasi [17]. Material yang telah berhasil disintesis menggunakan bagas tebu sebagai sumber biogenik silika diantaranya adalah $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ [18, 19] dan alumina silikat [20].

c. Daun Bambu

Daun bambu merupakan sumber silika biogenik yang baik mengandung kadar silika yang tinggi. Abu daun bambu dapat mengandung 70 % dan dapat ditingkatkan kadarnya dengan perlakuan pencucian dengan HCl sebelum dikalsinasi [21]. Selain itu, bambu merupakan tanaman yang sangat mudah ditemui dan terdapat lebih dari 125 jenis bambu yang tumbuh di Indonesia [22]. Beberapa material yang telah berhasil disintesis menggunakan daun bambu adalah $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ [23], ZnO-SiO_2 [5], $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ [24], dan $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$ [25].

d. Salak

Kulit buah salak dan daun salak merupakan produk samping dari industri agrikultural yang mengandung kadar silika yang tinggi. Pada pengamatan menggunakan *energy-dispersive X-ray spectroscopy* (EDX) kulit buah salak mengandung karbon (55,73%), oksigen (23,28%), silikon (20,36%) komponen lain sebagai Cl dan K (0,63%) [26]. Pada daun salak juga terdapat kadar silika yang tinggi yaitu sebanyak 98,7 %. Material seperti ZnO-SiO_2 [27] dan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ [28] telah dilaporkan berhasil disintesis menggunakan daun salak sebagai sumber biogenik silika.

e. Kelapa sawit

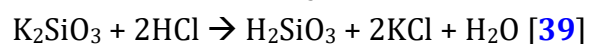
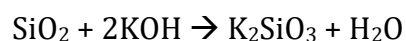
Kelapa sawit merupakan sumber biomassa yang sangat menjanjikan. Produk samping dari industri kelapa sawit dapat dimanfaatkan sebagai sumber biogenik silika. Cangkang kelapa sawit mengandung kadar silika sebesar 54,35 % dan campuran mineral lainnya [29]. Abu terbang sisa pembakaran kelapa sawit juga masih mengandung kadar silika sekitar 19,18 % [30]. Tandan buah kosong dari kelapa sawit juga telah dilaporkan memiliki kandungan silika yang cukup tinggi yaitu sekitar 45,6 % setelah ekstraksi [31]. Produk samping dari perkebunan kelapa sawit seperti daun kelapa sawit juga memiliki kadar silika yang sangat

tinggi yaitu sebanyak 95,3 % [32]. Beberapa material yang telah disintesis menggunakan sumber biogenik silika dari kelapa sawit adalah ZnO-SiO₂ [31] yang menggunakan tandan buah kosong kelapa sawit serta kalsium silikat (Ca₂SiO₄) [33], ZnO-SiO₂ dan Zn₂SiO₄ [34] yang menggunakan daun kelapa sawit.

Preparasi Biogenik Silika

Secara umum preparasi dari silika biogenik terbagi menjadi 3 tahap, yaitu pencucian dengan asam seperti HCl, HNO₃, H₂SO₄ (leaching) [35], kalsinasi pada suhu tinggi selama 2-4 jam, dan ekstraksi silika dengan menggunakan basa alkali. Proses pencucian menggunakan asam bertujuan untuk menghilangkan pengotor logam yang terdapat pada sumber biogenik silika [36]. Selain menggunakan asam kuat, proses leaching juga dapat menggunakan asam organik seperti asam karboksilat [35]. Daun kelapa sawit yang telah dikalsinasi tanpa perlakuan pencucian dengan asam menunjukkan 4 puncak difraktogram pada pengamatan menggunakan XRD. Puncak tersebut merupakan puncak dari mineral *minehillite* [K₃Ca₂₈Zn₄Al₄Si₄₀O₁₁₂(OH)₁₆], *cristobalite* (SiO₂), *hematite* (Fe₂O₃) dan *schaferite* [NaCa₂Mg₂(VO₄)₃]. Pada abu daun kelapa sawit yang telah diberikan perlakuan asam, hanya puncak dari *cristobalite* dan *minehillite* yang terdapat pada difraktogram [32]. Proses pencucian dengan asam dapat dilakukan pada saat sebelum atau sesudah dilakukannya proses kalsinasi. Pencucian dengan asam yang dilakukan pada saat sebelum kalsinasi dapat mengakibatkan meningkatnya kadar silika yang terdapat pada sumber biogenik silika.

Proses kalsinasi ditujukan untuk mendekomposisi sisa material organik yang terdapat pada sumber silika biogenik [37]. Proses ini juga dapat digunakan untuk memodifikasi porositas yang ada atau untuk menghasilkan pori-pori baru dengan menggunakan gugus organik sebagai templat pori [38]. Suhu yang digunakan pada proses kalsinasi silika biogenik adalah 600 °C - 900 °C dengan waktu tahan 2-4 jam. Abu dari produk hasil kalsinasi sumber silika biogenik umumnya telah dapat digunakan sebagai prekursor silika pada sintesis material logam oksida-biogenik silika [17]. Beberapa penelitian melanjutkan preparasi biogenik silika dengan mengekstraksi silika tersebut menggunakan basa alkali seperti NaOH [12] dan KOH [39]. Proses ekstraksi ini dilakukan dengan cara melarutkan abu dari produk hasil kalsinasi dengan larutan basa alkali dengan bantuan pemanasan. Pada penelitian lain, proses ekstraksi dilakukan menggunakan metode refluks [37]. Hasil dari proses ekstraksi menggunakan basa alkali adalah natrium silikat atau kalium silikat. Proses ekstraksi menggunakan KOH mengikuti persamaan reaksi berikut:



Beberapa penelitian telah melaporkan penggunaan biogenik silika dalam sintesis material logam oksida-biogenik silika tanpa melalui tahap preparasi yang panjang atau memotong beberapa tahap preparasi seperti langsung mencampurkan sumber silika biogenik dengan larutan logam kemudian dikalsinasi. Sekam padi dapat langsung digunakan sebagai sumber

silika biogenik dalam sintesis material $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ dengan mencampurkan sekam padi ke dalam larutan SnCl_2 dan amonium hidrosida sebagai pengatur pH dan kemudian dipanaskan di dalam *microwave furnace* dengan suhu $500\text{ }^\circ\text{C}$ selama 5 jam [13]. Pada penelitian lain, daun kelapa sawit juga dapat langsung digunakan untuk sintesis material ZnO-SiO_2 dan Zn_2SiO_4 dengan metode yang hampir sama [34].

Metode Sintesis Logam Oksida-Biogenik Silika

Biogenik silika pada material logam oksida-biogenik silika umumnya berfungsi sebagai cetakan dari material logam karena biogenik silika memiliki permukaan yang berpori [13]. Metode yang umumnya digunakan untuk mensintesis material logam oksida-biogenik silika adalah metode sol gel. Pada metode ini, larutan natrium silikat dan kalium silikat adalah sumber silika biogenik yang digunakan. telah diekstraksi terlebih dahulu menggunakan NaOH atau KOH. Material $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ [23], ZnO-SiO_2 [5], dan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ [24] dari daun bambu, dan $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ [18] dari bagas tebu. Metode sol gel dalam sintesis material logam oksida-biogenik silika telah mengalami modifikasi. Penggabungan metode sol gel dan metode hidrotermal telah berhasil dilakukan untuk mensintesis $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ dari sekam padi [11] serta ZnO-SiO_2 [27] dan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ [28] dari daun salak. Pada metode ini umumnya ditambahkan senyawa pengarah struktur seperti CTAB untuk mendapatkan morfologi material yang diinginkan [40]. menggunakan metode sol gel dalam sintesisnya. Kelebihan dari metode sol gel adalah mudah, ekonomis, dan mudah diproduksi dalam jumlah yang besar. Namun kelemahan dalam metode ini adalah distribusi ukuran yang luas dan konsentrasi cacat yang tinggi [41]. Selain itu pada sintesis material logam oksida-biosilika, metode ini memiliki kelemahan dimana proses yang terlalu panjang dan banyak memerlukan prekursor kimia tambahan lainnya.

Metode implegrasi dan metode kopresitipasi telah dilaporkan berhasil digunakan untuk mensintesis material logam oksida-biogenik silika. Metode implegrasi bertujuan untuk mengisi pori-pori dari silika dengan larutan logam aktif untuk mendapatkan material katalis heterogen [42]. Material seperti $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ dari bagas tebu telah berhasil disintesis menggunakan metode implegrasi diikuti proses kalsinasi pada suhu $600\text{ }^\circ\text{C}$ selama 4 jam [19]. Selain itu $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$ dari daun bambu [25] juga telah berhasil disintesis menggunakan metode ini. Kelebihan metode ini adalah kesederhanaan teknis, biaya yang rendah, dan tidak banyak menghasilkan limbah. Namun kekurangan dari metode ini adalah material logam yang diendapkan pada situs biogenik silika cenderung tidak homogen [43]. Metode kopresitipasi telah berhasil mensintesis material $\text{CuO}\cdot\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ dari sekam padi [15]. Prinsip metode ini didasarkan pada pengendapan lebih dari satu zat secara bersamaan. Kelebihan dari metode ini adalah tidak memerlukan perlakuan suhu pada prosesnya dan cenderung sederhana. Kekurangan dari metode ini adalah kurang cocok untuk mensintesis senyawa murni, bergantung pada kelarutan prekursor yang digunakan, dan tidak ada kondisi reaksi yang universal untuk pembentukan beberapa oksida logam [44].

Metode *solution-solid* juga telah dilaporkan berhasil digunakan dalam sintesis material logam oksida-biogenik silika. Kelebihan dari metode ini adalah sumber biogenik silika dapat langsung digunakan dalam proses sintesis tanpa harus mengalami proses ekstraksi maupun leaching. Material seperti kalsium silika (Ca_2SiO_4) [33], ZnO-SiO_2 dan Zn_2SiO_4 [34] dari daun kelapa sawit telah berhasil disintesis menggunakan metode ini. Selain itu, metode ini dapat dikombinasikan dengan bantuan *microwave* yang telah berhasil mensintesis material $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$. Kelemahan dari metode ini adalah energi yang diperlukan cukup tinggi [13].

Penghilangan Zat Warna Menggunakan Material Berbasis Logam Oksida-Biogenik Silika

Banyaknya penelitian terkait material berbasis logam oksida-silika tidak lepas dari manfaat material tersebut yang sangat beragam. Salah satu pengaplikasian dari material ini adalah untuk menghilangkan zat warna pada air limbah. Penghilangan zat warna pada air limbah menggunakan material berbasis logam oksida-silika dapat terjadi melalui proses adsorpsi, fotodegradasi, dan meliputi kedua proses tersebut. Adsorpsi adalah pelekatan atau ikatan fisik ion dan molekul ke permukaan molekul lain, yang terjadi ketika zat terlarut gas atau cair terakumulasi pada permukaan padatan atau cairan (sorben) untuk membentuk lapisan molekul atau atom [45]. Proses adsorpsi dapat didefinisikan sebagai akumulasi adsorbat pada permukaan adsorben untuk tujuan pemurnian atau pemisahan dari suatu media [46]. Fotodegradasi adalah proses penguraian zat warna secara katalitik dengan menggunakan bantuan energi foton (sinar UV dan sinar tampak) dan material fotokatalis. Kinerja dari material berbasis logam oksida-silika dalam penghilangan zat warna dapat dipelajari melalui pendekatan kinetika kimia reaksi yang terjadi. Model kinetika pada proses penghilangan zat warna digunakan untuk mengetahui laju proses penghilangan zat warna. Analisis kinetika juga dapat membantu untuk melihat beberapa faktor yang mempengaruhi proses penghilangan zat warna tersebut. Kinetika penghilangan zat warna dapat disesuaikan oleh beberapa proses yang dapat bertindak secara seri maupun paralel, seperti transfer eksternal atau internal massa, difusi massa, kemisorpsi, serta difusi antar partikel. Mekanisme penghilangan zat warna bergantung pada sifat karakteristik fisika dan kimia dari material penjerap dan katalis yang digunakan.

Model kinetika pada proses penghilangan zat warna digunakan untuk mengetahui laju proses penghilangan zat warna. Analisis kinetika juga dapat membantu untuk melihat beberapa faktor yang mempengaruhi proses penghilangan zat warna tersebut. Kinetika penghilangan zat warna dapat disesuaikan oleh beberapa proses yang dapat bertindak secara seri maupun paralel, seperti transfer eksternal atau internal massa, difusi massa, kemisorpsi, serta difusi antar partikel. Mekanisme penghilangan zat warna bergantung pada sifat karakteristik fisika dan kimia dari material penjerap dan katalis yang digunakan [47]. Beberapa pengamatan penghilangan zat warna oleh material berbasis logam oksida-biogenik silika dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengamatan Penghilangan Zat Warna Oleh Beberapa Material Berbasis Logam Oksida-Biogenik Silika

Material	Zat Warna	Sumber Biogenik Silika	Hasil Pengamatan	Referensi
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$	Rhodamin B	Daun salak	Maksimum degradasi dicapai pada perlakuan pH 7, dosis fotokatalis $0,5 \text{ gL}^{-1}$ selama 60 menit di bawah sinar UV	[28]
ZnO-SiO_2	Metilen Biru	Daun kelapa sawit	85,9 % dari MB berhasil dihilangkan di bawah penyinaran sinar matahari selama 180 menit	[34]
$\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$	Metilen Biru Metil Orange	Bagas tebu	71 % dari MB dan 15 % dari MO berhasil dihilangkan dibawah sinar UV selama 120 menit	[18]
$\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$	Metilen Biru	Daun bambu	Maksimum degradasi pewarna pada 120 menit di bawah sinar UV, mekanisme penghilangan memenuhi kinetika Orde reaksi pertama pseudo	[23]
$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	Rhodmin B	Sekam padi	Maksimum degradasi pada perlakuan foto oksidasi dengan penambahan H_2O_2 pada 180 menit di bawah sinar UV, mekanisme penghilangan memenuhi kinetika Orde reaksi pertama pseudo	[48]
$\text{SiO}_2/\text{TiO}_2\text{-Fe}$	Congo Red	Bagas tebu	98,18 % dari congo red berhasil dihilangkan selama 90 menit di bawah lampu LED 12 W	[49]
$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	Tartrazine	Sekam padi	98,5 % dari tartrazine dihilangkan dalam 80 menit dengan penambahan H_2O_2 dan 86,7 % dari tartrazine dihilangkan pada siklus ketiga kali	[11]
$\text{CuO}\cdot\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$	Tartrazine	Sekam padi	93,3 % dari tartrazine dihilangkan dalam 80 menit dan 55,1 % dari tartrazine dihilangkan pada siklus ketiga kali	[15]

Secara garis besar, kemampuan penghilangan zat warna menggunakan material berbasis logam oksida-biogenik silika bergantung pada sifat dari logam oksida yang menempel pada silika yang bertindak sebagai cetakan untuk memperkecil ukuran logam oksida [13].

KESIMPULAN

Limbah agrikultural dapat dimanfaatkan sebagai sumber biogenik silika untuk mensintesis material berbasis logam oksida-biogenik silika. Terdapat tiga metode preparasi dari sumber biogenik silika sebelum digunakan sebagai prekursor silika, yaitu leaching dengan asam, kalsinasi, dan ekstraksi dengan menggunakan NaOH atau KOH. Metode sintesis yang digunakan untuk mensintesis material berbasis logam oksida-biogenik silika adalah sol gel, hidrotermal, impregnasi, korespretisipasi, dan *solution-solid* metode. Material berbasis logam oksida-biogenik silika dikenal baik memiliki kemampuan dalam menghilangkan zat warna karena memiliki permukaan pori-pori yang cukup luas serta kemampuan khas dari logam oksida yang menempel dengannya. Perkembangan kajian tentang biogenik silika terus berkembang. Pemanfaatan biogenik silika sebagai pengganti silika komersil dalam

sintesis material berbasis logam oksida-silika harus digiatkan, mengingat Indonesia merupakan negara yang kaya akan sumber daya alamnya.

PROSEDUR PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dengan mengumpulkan literatur ilmiah terkait tentang topik preparasi, sintesis, dan karakterisasi sumber biogenik silika yang berbasis limbah agrikultural serta pemanfaatannya dalam sintesis material berbasis logam oksida-silika diikuti aplikasi logam oksida-silika dalam penghilangan zat warna. Hanya publikasi online yang dapat diakses dalam bahasa Indonesia dan bahasa Inggris antara tahun 2000-2023 yang dikumpulkan melalui Google Scholar, Semantic Scholar, dan Scopus.

DEKLARASI

Artikel ini belum pernah dipublikasikan sebelumnya, dibuktikan dengan hasil cek similariti.

PERSANTUNAN

-

INFORMASI TENTANG PENULIS

Penulis Rujukan:

Salprima Yudha S
Laboratorium Kimia Anorganik Fisik
Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA)
Universitas Bengkulu

Pusat Riset Produk Bahan Alam dan Material Fungsional
Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM)
Universitas Bengkulu

Para Penulis

Setyo Eko Nugroho
Program Studi Magister (S2) Kimia, Jurusan Kimia
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Bengkulu; jalan W.R.
Supratman, Kandang Limun, Kota Bengkulu

PUSTAKA

- [1] Silviana. *Silika Dan Pemanfaatannya*. Penerbit Andi; 2021.
- [2] Hardyanti, IS.; Nurani, I; Hardjono, H.P.D.S.; Apriliani, E.; Wibowo, E.A.P. Pemanfaatan Silika (SiO₂) dan Bentonit sebagai Adsorben Logam Berat Fe pada Limbah Batik. *JST (Jurnal Sains Terapan)*. 2017 Oct 13;3(2).
- [3] Ramanathan, A.; Subramaniam, B. Metal-Incorporated Mesoporous Silicates: Tunable Catalytic Properties and Applications. *Molecules*. 2018 Jan 29;23(2):263.
- [4] Yaseen, M.; Humayun, M.; Khan, A.; Idrees, M.; Shah, N.; Bibi, S. Photo-Assisted Removal of Rhodamine B and Nile Blue Dyes from Water Using CuO–SiO₂ Composite. *Molecules*. 2022 Aug 22;27(16):5343.

- [5] Fatimah, I.; Fadillah, G.; Sahroni, I.; Kamari, A.; Sagadevan, S.; Doong, R.A. Nanoflower-like composites of ZnO/SiO₂ synthesized using bamboo leaves ash as reusable photocatalyst. *Arabian Journal of Chemistry*. 2021 Mar;14(3):102973.
- [6] Padovini DSS, Magdalena AG, Capeli RG, Longo E, Dalmaschio CJ, Chiquito AJ, et al. Synthesis and characterization of ZrO₂@SiO₂ core-shell nanostructure as nanocatalyst: Application for environmental remediation of rhodamine B dye aqueous solution. *Mater Chem Phys*. 2019 May;233:1–8.
- [7] Nandanwar, R.; Bamne, J.; Singh, N.; Sharma, P.K.; Singh, P; Umar. A, et al. Synthesis of Titania/Silica Nanocomposite for Enhanced Photodegradation of Methylene Blue and Methyl Orange Dyes under UV and Mercury Lights. *ES Materials & Manufacturing*. 2022;
- [8] Rubab, R.; Ali, S.; Rehman, A.U.; Khan, S.A.; Khan, A.M. Templated synthesis of NiO/SiO₂ nanocomposite for dye removal applications: Adsorption kinetics and thermodynamic properties. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*. 2021 Apr;615:126253.
- [9] Hermida, L.; Purwati, L.; Agustian, J. Inkorporasi Oksida Timah (SnO₂) ke dalam Silika Berpori dari Kaolin Alam Lampung dan Kajian Aplikasinya sebagai Fotokatalis untuk Fotodegradasi Rhodamin B. 2020.
- [10] Luthfiah, A.; Deawati, Y.; Firdaus, M.L.; Rahayu, I.; Eddy, D.R. Silica from Natural Sources: a Review on the Extraction and Potential Application as a Supporting Photocatalytic Material for Antibacterial Activity. *Science and Technology Indonesia*. 2021 Jul 22;6(3):144–55.
- [11] Vu, A.T.; Xuan, T.N.; Lee, C.H. Preparation of mesoporous Fe₂O₃·SiO₂ composite from rice husk as an efficient heterogeneous Fenton-like catalyst for degradation of organic dyes. *Journal of Water Process Engineering*. 2019 Apr;28:169–80.
- [12] Handayani, P.A.; Nurjanah, E.; Rengga, W.D.P. Pemanfaatan Limbah Sekam Padi Menjadi Silika Gel. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*. 2014 Dec 1;3(2).
- [13] Vijayan, R.; Kumar, G.S.; Karunakaran, G.; Surumbarkuzhali, N.; Prabhu, S.; Ramesh, R. Microwave combustion synthesis of tin oxide-decorated silica nanostructure using rice husk template for supercapacitor applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2020 Apr 28;31(7):5738–45.
- [14] Sembiring, S.; Riyanto, A.; Simanjuntak, W.; Situmeang, R. Effect of MgO-SiO₂ Ratio on the Forsterite (Mg₂SiO₄) Precursors Characteristics Derived from Amorphous Rice Husk Silica. *Oriental Journal of Chemistry*. 2017 Aug 28;33(04):1828–36.
- [15] Ngoc, K.H.P.; Vu, A.T. Simple Preparation of the CuO•Fe₃O₄/Silica Composite from Rice Husk for Enhancing Fenton-Like Catalytic Degradation of Tartrazine in a Wide pH Range. *Adsorption Science & Technology*. 2022 Jun 16;2022:1–16.
- [16] Rizamarhaiza, M.; Ahmad, S.; Rahman, H.A.; Taib, H. The Effect of Sintering Temperature on Silica Derived from Rice Husk Ash - Nickel Oxide (SiO₂ -NiO) Foam Fabrication via Slurry Technique. *J Phys Conf Ser*. 2018 Aug;1082:012020.
- [17] Bortolotto, T.L.; Guzi, d.M.E.; Paolinelli, S.G.; Falk, G.; Novaes, d.O.A.P. Obtaining Biogenic Silica from Sugarcane Bagasse and Leaf Ash. *Waste Biomass Valorization*. 2021 Jun 10;12(6):3205–21.
- [18] Rongchapo, W.; Deekamwong, K.; Chanlek, N.; Prayoonpokarach, S.; Wittayakun, J. Enhancement of Titanium Dioxide by Bagasse Silica for Photocatalytic Degradation of Dyes. *Environment Asia*. 2022;15.

- [19] Hendra, S.W.; Egiyawati, C.; Setyani, P.A.; Fathoni, A.A.; Rizkiana, J.; Sasongko, D. Titania Modified Silica from Sugarcane Bagasse Waste for Photocatalytic Wastewater Treatment. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2021 Apr 1;1143(1):012073.
- [20] TIP Taslimah; Linda, S.S. Pemanfaatan Katalis Silika Alumina Dari Bagasse Pada Pembuatan Biodiesel Dari Minyak Goreng Sisa Pakai. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*. 2015 Aug 7;25(1).
- [21] Sa'diyah, H.; Nurhimawan, S.; Fatoni, S.A.; Irmansyah, I.; Irzaman, I. Ekstraksi Silikon Dioksida Dari Daun Bambu. In: *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal) SNF2016 UNJ. Pendidikan Fisika dan Fisika FMIPA UNJ*; 2016. p. SNF2016-BMP-13-SNF2016-BMP-16.
- [22] Mulyono, T. *Bahan Bangunan Dan Konstruksi*. Stiletto Book; 2021.
- [23] Fatimah, I.; Prakoso, N.I.; Sahroni, I.; Musawwa, M.M.; Sim, Y.L.; Kooli, F.; et al. Physicochemical characteristics and photocatalytic performance of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ catalyst synthesized using biogenic silica from bamboo leaves. *Heliyon*. 2019 Nov;5(11):e02766.
- [24] Fatimah, I.; Amaliah, S.N.; Andrian, M.F.; Handayani, T.P.; Nurillahi, R.; Prakoso, N.I.; et al. Iron oxide nanoparticles supported on biogenic silica derived from bamboo leaf ash for rhodamine B photodegradation. *Sustain Chem Pharm*. 2019 Sep;13:100149.
- [25] Fatimah, I.; Taushiyah, A.; Najah, F.B.; Azmi, U. ZrO_2 /bamboo leaves ash (BLA) Catalyst in Biodiesel Conversion of Rice Bran Oil. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2018 Apr;349:012027.
- [26] Agus, T. D.; Yudha, S.S.; Falahudin, A. Electron Microscope and Diffraction Study of Snake Fruit (*Salacca zalacca* (Gaert.) Voss) Peels. *J Phys Conf Ser*. 2021 Jun 1;1940(1):012038.
- [27] Fatimah, I.; Purwiandono, G.; Sahroni, I.; Sagadevan, S.; Chun-Oh, W. Ghazali, S.A.I.S.M.; et al. Recyclable Catalyst of ZnO/SiO_2 Prepared from Salacca Leaves Ash for Sustainable Biodiesel Conversion. *S Afr J Chem Eng*. 2022 Apr;40:134–43.
- [28] Purwiandono, G.; Fatimah, I.; Sahroni, I.; Citradewi, P.W.; Kamari, A.; Sagadevan, S.; et al. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ nanoflakes synthesized using biogenic silica from *Salacca zalacca* leaf ash and the mechanistic insight into adsorption and photocatalytic wet peroxidation of dye. *Green Processing and Synthesis*. 2022 Apr 12;11(1):345–60.
- [29] Imoisili, P.E.; Ukoba, K.O.; Jen, T.C. Green technology extraction and characterisation of silica nanoparticles from palm kernel shell ash via sol-gel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020 Jan;9(1):307–13.
- [30] Regna, T.J.; Jerry; Miftahurrahmah. Ekstraksi Silika dari Fly Ash Pabrik Kelapa Sawit Menggunakan Variasi Pelarut Karbonat. *Jurnal Teknik Kimia USU*. 2023 Mar 24;12(1):9–17.
- [31] Rahmat, F.; Fen, Y.W.; Anuar, M.F.; Omar, N.A.S.; Zaid, M.H.M.; Matori, K.A.; et al. Synthesis and Characterization of $\text{ZnO}-\text{SiO}_2$ Composite Using Oil Palm Empty Fruit Bunch as a Potential Silica Source. *Molecules*. 2021 Feb 18;26(4):1061.
- [32] Onoja, E.; Attan, N.; Chandren, S.; Abdul, R.F.I.; Abdul, K.A.S.; Mahat, N.A.; et al. Insights into the physicochemical properties of the Malaysian oil palm leaves as an alternative source of industrial materials and bioenergy. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 2017 Dec 26;13(4):623–31.
- [33] Yudha, S.S.; Falahudin, A.; Kaus, N.H.M.; Thongmee, S.; Ikram, S.; Asdim, A. Preliminary Synthesis of Calcium Silicates using Oil Palm Leaves and Eggshells. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*. 2020 Aug 1;15(2):561–7.

- [34] Yudha, S.S.; Robkhob, P.; Imboon, T.; Falahudin, A.; Asdim; Thongmee, S. ZnO-SiO₂ and Zn₂SiO₄ Synthesis Utilizing Oil Palm Leaves for Degradation of Methylene Blue Dye in Aqueous Solution. *Journal of the Indonesian Chemical Society*. 2020 Aug 31;3(2):94.
- [35] Faizul, C.P.; Abdullah, C.; Fazlul, B. Review of Extraction of Silica from Agricultural Wastes Using Acid Leaching Treatment. *Adv Mat Res*. 2012 Dec;626:997–1000.
- [36] Miratsi, L.; Aprilianti, R.; Hamrin, N.; Febriani, Y.; Afriani, F. Karakteristik Silika Abu Ampas Tebu Melalui Metode Sol-Gel. In: *Proceedings Of National Colloquium Research And Community Service*. 2021. p. 152–4.
- [37] Suryadi, J.; Nabila, N.; Bayhaqi, S.N.; Andrijanto, E. Pengaruh Temperatur Kalsinasi Terhadap Kapasitas Ion Katalis Asam Heterogen Berbasis Silika dan Aplikasinya pada Sintesis Metil Oleat. *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*. 2023 Aug 31;9(2):122–31.
- [38] Loy, D.A. Sol–Gel Processing. In: Meyers RA, editor. *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*. New York: Academic Press; 2003. p. 257–76.
- [39] Sy, M.R.H.; Mardina, P. Ekstraksi silika dari abu sekam padi dengan pelarut KOH. *Konversi*. 2013;2(1):28–31.
- [40] Purbaningtias, T.E.; Kurniawati, P.; Wiyantoko, B.; Prasetyoko, D.; Suprpto, S. Pengaruh Penambahan Surfaktan Pada Modifikasi Material Alam. *Akta Kimia Indonesia*. 2019 Oct 8;4(2):118.
- [41] Hong, K.J.; Tan, C.H.; Tan, S.T.; Chong, K.K. Chapter 30 - Morphology and topography of quantum dots. In: Al-Douri Y, editor. *Graphene, Nanotubes and Quantum Dots-Based Nanotechnology*. Woodhead Publishing; 2022. p. 727–70.
- [42] Rashid, U.; Soltani, S.; Al-Resayes, S.I.; Nehdi, I.A. 11 - Metal oxide catalysts for biodiesel production. In: Wu Y, editor. *Metal Oxides in Energy Technologies*. Elsevier; 2018. p. 303–19.
- [43] Sietsma, J.R.A.; Jos, V.D.A.; de Jongh, P.E.; de Jong, K.P. Application of ordered mesoporous materials as model supports to study catalyst preparation by impregnation and drying. In: Gaigneaux EM, Devillers M, De Vos DE, Hermans S, Jacobs PA, Martens JA, et al., editors. *Studies in Surface Science and Catalysis*. Elsevier; 2006. p. 95–102.
- [44] Ningsih, S.K.W. *Sintesis Anorganik*. UNP Press; 2016.
- [45] Tsai, P.J.; Uang, S.N.; Wang, S.M.; Wu, T.N.; Shih, T.S. 1.09 - Exposure Assessment in the Workplace. In: Pawliszyn J, editor. *Comprehensive Sampling and Sample Preparation*. Oxford: Academic Press; 2012. p. 163–90.
- [46] Aryee, A.A.; Han, R.; Qu, L. Occurrence, detection and removal of amoxicillin in wastewater: A review. *J Clean Prod*. 2022;368:133140.
- [47] Ho, Y.S.; McKay G. The kinetics of sorption of divalent metal ions onto sphagnum moss peat. *Water Res*. 2000;34(3):735–42.
- [48] Fatimah, I.; Fadhilah, S.; Mawardani, S.; Yulan. γ-Fe₂O₃ Nanoparticles immobilized in SiO₂ aerogel synthesized from rice husk ash for photofenton like degradation of rhodamine B. *Rasayan Journal of Chemistry*. 2018 Apr 2;11.
- [49] Budiasih, K.S.; Prodjosantosa, A.K.; Utomo, M.P.; Christyan, T. Sintesis Dan Aplikasi SiO₂ Dari Daun Bambu Wulung (*Gigantochloa atroviolacea*) Sebagai Pengemban Fotokatalis Untuk Degradasi Pewarna Congo Red. *Jurnal Sains Dasar*. 2019;8(1):1–5.