

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Logam berat merupakan salah satu dampak dari aktivitas industri yang merugikan bagi masyarakat karena dapat merusak tatanan lingkungan hidup. Logam Pb dikategorikan sebagai salah satu logam berat yang dihasilkan dari aktivitas industri di Indonesia yang semakin berkembang. Kuantitas aktivitas industri di Indonesia terus meningkat seiring dengan kebutuhan hidup manusia (Dicky dkk., 2022). Hal ini menyebabkan muncul logam-logam berat dengan konsentrasi berlimpah yang dihasilkan dari aktivitas industri dan bersifat toksik yang dapat menimbulkan masalah darurat sehingga perlu diminimalisir guna mencegah dampak-dampak negatif yang merugikan bagi lingkungan dan ekosistem (Jeong dkk., 2023).

Selain logam Pb, beberapa logam jenis lain seperti Cd, Cr, Hg, dan Zn juga dapat menyebabkan kerusakan pada tatanan lingkungan. Menurut Penias dkk. (2021) dalam studi dampak pencemaran logam berat terhadap kualitas air dan strategi untuk mengurangi kandungan logam berat, logam-logam berat tidak dapat terurai secara hayati, sehingga diperlukan metode efektif yang dapat meminimalisir pencemaran logam berat. Secara ilmiah, sangat luas teori yang menunjang penghilangan logam berat, di antaranya adalah adsorpsi, elektrokoagulasi, degradasi mikroba, filtrasi membran, dan sebagainya (Shen dkk., 2023).

Metode adsorpsi merupakan salah satu metode yang menarik perhatian karena mudah dilakukan, menggunakan energi yang minim, dan biaya rendah (Zhu

dkk., 2023). Pada proses adsorpsi, suatu zat tertentu terperangkap pada permukaan adsorben akibat pengaruh gaya tarik antar molekul adsorbat dengan permukaan adsorben (Ramadani dkk., 2023). SiO_2 merupakan salah satu senyawa yang umum digunakan sebagai adsorben. Senyawa ini dapat diperoleh dari sekam padi dengan kandungan SiO_2 sebanyak 85-95% yang melalui proses ekstraksi (Nzereogu dkk., 2023). Umumnya, SiO_2 yang dihasilkan memiliki struktur amorf dan luas permukaan yang besar sehingga mampu berperan sebagai adsorben, akan tetapi sifatnya yang amorf menunjukkan sifat mekaniknya kurang optimum dan menyebabkan SiO_2 mudah mengalami aglomerasi (Utary dkk., 2023) dan (Sugiura dkk., 1995). Oleh karena itu diperlukan suatu zat yang dapat memaksimalkan peranan SiO_2 sebagai adsorben.

Xu dkk. (2020) mendeteksi bahwa senyawa magnesium oksida dapat digunakan untuk menghilangkan logam Pb(II) . Magnesium oksida (MgO) merupakan salah satu senyawa yang memiliki sifat mekanik maksimum dan memiliki reaktivitas tinggi (Shah dkk., 2022) dan (Trisnayanti, 2020). Penambahan MgO pada SiO_2 dapat meningkatkan sifat mekanik oksida $\text{SiO}_2\text{-MgO}$, dengan demikian terjadi peningkatan stabilitas oksida $\text{SiO}_2\text{-MgO}$ dan mempertahankan sifat $\text{SiO}_2\text{-MgO}$ agar tidak mudah mengalami aglomerasi (Sugiura dkk., 1995) dan (Shah dkk., 2022). Hal ini dapat meningkatkan kontak antara adsorben dengan adsorbat sehingga menghasilkan kemampuan adsorpsi yang optimum.

Penelitian yang telah dilakukan sebelumnya oleh Xu dkk. (2020), oksida $\text{SiO}_2\text{-MgO}$ dibuat dengan metode elektrospinning. Melalui penelitian ini, pembentukan oksida $\text{SiO}_2\text{-MgO}$ dilakukan dengan metode sol gel dari sumber

natrium silikat yang berbeda yaitu natrium silikat sintesis berbahan dasar abu sekam padi dan natrium silikat komersial. Senyawa SiO_2 yang direaksikan dengan MgO diharapkan mampu berperan maksimal dalam adsorpsi ion logam Pb(II) . Untuk mengetahui tingkat keefektifan adsorben oksida $\text{SiO}_2\text{-MgO}$, maka dalam penelitian ini digunakan 2 jenis oksida $\text{SiO}_2\text{-MgO}$ dengan sumber sol silika yang berbeda, yaitu antara sol silika sintesis dari sekam padi dan sol silika komersial.

I.2 Tujuan

Penelitian pengaruh variasi sumber natrium silikat pada adsorben oksida $\text{SiO}_2\text{-MgO}$ terhadap kapasitas adsorpsi ion logam Pb(II) bertujuan untuk:

1. Memperoleh adsorben $\text{SiO}_2\text{-MgO}$ dengan sumber natrium silikat sintesis dari sekam padi dan natrium silikat komersial
2. Membandingkan karakteristik adsorben $\text{SiO}_2\text{-MgO}$ dengan sumber natrium silikat sintesis dari sekam padi dan natrium silikat komersial
3. Menentukan kapasitas adsorpsi logam Pb(II) oleh adsorben $\text{SiO}_2\text{-MgO}$ dari natrium silikat sintesis dan natrium silikat komersial.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Limbah Industri

Aktivitas industri di Indonesia terus berkembang sejalan dengan kebutuhan hidup manusia, hal ini merupakan jalan bagi manusia untuk mengembangkan kualitas hidupnya (Dicky dkk., 2022) dan (Emrani dkk., 2016). Menurut penelitian yang telah dilakukan oleh Emrani dkk. (2016), aktivitas industri di Indonesia dapat menciptakan lapangan pekerjaan dan menunjang pembangunan bangsa, serta peningkatan pendapatan yang akan menciptakan ketentraman hidup. Di kehidupan ini, manusia memiliki aktivitas dengan kuantitas yang jamak, sehingga manusia memegang peran penting dalam kehidupan dan dapat menjadi tolak ukur bagi lingkungan sekitar (Emrani dkk., 2016).

Aktivitas industri yang ada tentunya memiliki dampak yang signifikan. Perusahaan-perusahaan industri tersebut memiliki ranah menghasilkan pencemaran lingkungan, khususnya menciptakan limbah industri yang bersifat toksik. Limbah industri tidak hanya mencemari satu dua wilayah Indonesia, namun kenyataannya hampir semua wilayah Indonesia menghadapi pencemaran lingkungan (Emrani dkk., 2016).

Dampak dari pencemaran lingkungan adalah menyebabkan muncul logam-logam berat dengan konsentrasi berlimpah yang bersifat toksik dan dapat menimbulkan masalah darurat sehingga perlu diminimalisir guna mencegah dampak-dampak negatif yang merugikan bagi lingkungan dan ekosistem (Jeong dkk., 2023). Logam-logam seperti Pb, Cd, Cr, Hg, dan Zn adalah logam berat yang

dapat menyebabkan kerusakan pada tatanan lingkungan. Menurut Penias dkk. (2021) dalam studi dampak pencemaran logam berat terhadap kualitas air dan strategi untuk mengurangi kandungan logam berat, logam-logam berat tidak dapat terurai secara hayati sehingga diperlukan suatu tindakan untuk meminimalisir nya.

II.2 Logam Berat

Logam berat merupakan zat yang dapat menyebabkan polusi dan bersifat toksik sehingga dapat menimbulkan masalah darurat dan perlu diminimalisir guna mencegah dampak-dampak negatif yang merugikan bagi lingkungan dan ekosistem (Jeong dkk., 2023). Logam berat dapat diserap oleh tubuh manusia bahkan organisme dan menyebabkan nyeri (Pratiwi, 2020). Adapun beberapa contoh logam-logam berat yaitu Pb, Cd, Cr, dan Ni. Pencemaran logam-logam berat ini terdistribusi pada lingkungan perairan, pertanian, pertambangan, perusahaan industri, dan lingkungan lainnya (Handayani dkk., 2022).

Menurut data badan perencanaan pembangunan nasional (Bappenas) sekitar 496 hektar wilayah Indonesia tercemar logam berat. Kementerian energi dan sumber daya mineral juga menyatakan persebaran logam-logam berat di Indonesia hampir ada di setiap daerah baik itu di daratan, perairan, maupun udara. Beberapa faktor yang sangat memengaruhi persebaran logam-logam berat menurut penelitian terdahulu oleh Fadilah & Herumurti (2021) yaitu adveksi, dispersi, dan retardasi.

II.2.1 Karakteristik Logam Berat

Secara umum, logam berat memiliki karakteristik yaitu bersifat toksik, tidak dapat terurai, dapat tertimbun dalam rantai makanan, dan dapat merugikan makhluk hidup (Indirawati, 2017).

Secara kimia, logam berat memiliki karakteristik yaitu unsur dengan nomor atom 22-34 dan 40-50 dapat merespon secara biokimia terhadap organisme hidup (Hariyoto, 2021).

II.2.2 Metode Penghilangan Logam Berat

Secara ilmiah, sangat luas teori yang menunjang penghilangan logam berat, di antaranya adalah adsorpsi, elektrokoagulasi, degradasi mikroba, filtrasi membran, dan sebagainya (Shen dkk., 2023). Masing-masing metode tersebut memiliki kelebihan dan kesukaran. Metode yang akan digunakan untuk menghilangkan logam berat dapat disesuaikan dengan kebutuhannya.

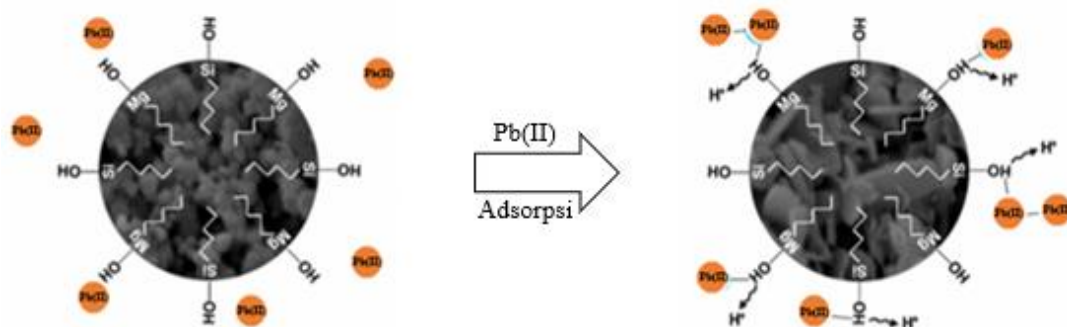
Salah satu metode yang sangat efektif untuk menghilangkan logam berat adalah adsorpsi. Adsorpsi bukan merupakan sebuah metode baru. Banyak penelitian-penelitian terdahulu yang menggunakan metode adsorpsi dan memberikan hasil yang maksimal dalam penghilangan logam berat. Salah satunya adalah penelitian yang dilakukan oleh Zhu dkk. (2023) yang menggunakan metode adsorpsi karena mudah dilakukan, menggunakan energi yang minim, dan biaya rendah. Selain itu, menurut Anggraini dkk. (2022) metode adsorpsi juga dapat menggunakan berbagai jenis adsorben seperti silika, karbon aktif, grafen, zeolit, dan jenis lainnya yang tidak sulit dicari.

II.3 Proses Adsorpsi

Pada adsorpsi, suatu zat tertentu terperangkap pada permukaan adsorben akibat pengaruh gaya tarik antar molekul adsorbat dengan permukaan adsorben (Ramadani dkk., 2023). Adsorpsi akan berjalan optimum ketika adsorben memiliki luas permukaan yang besar dan tingkat kemurnian tinggi. Beberapa faktor yang

mendukung proses adsorpsi adalah luas permukaan, ukuran partikel, dan komposisi kimia adsorben (Komala dkk., 2021).

Adsorben berkemampuan melakukan pertukaran ion akibat pengaruh gaya tarik antar molekulnya dan menyebabkan molekul meninggalkan larutan kemudian menempel pada permukaan adsorben seperti pada **Gambar II.1** yang menguraikan proses adsorpsi ion Pb(II) oleh SiO₂-MgO (Uğurlu dkk., 2023). Jika pori dari suatu adsorben berukuran besar, maka proses adsorpsi lebih mudah terjadi sebab adsorbat dapat dengan mudah masuk ke dalam pori adsorben (Hardyanti dkk., 2017).



Gambar II.1 Mekanisme penyerapan ion logam Pb(II) pada SiO₂-MgO

Kemampuan adsorben dalam menyerap adsorbat tertentu disebut sebagai selektivitas adsorpsi (Mukhlisin dkk., 2020). Selektivitas adsorpsi antara logam berbeda antar satu dengan yang lainnya. Hal ini bergantung dengan jenis logam dan adsorben yang digunakan (Sprynskyy dkk., 2006). Penelitian oleh Erdem dkk. (2004) menginformasikan selektivitas adsorpsi antar logam menggunakan zeolit alam adalah $\text{Co}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Mn}^{2+}$, sedangkan penelitian oleh Srivastava dkk. (2006) menggunakan kaolinit menyebutkan bahwa selektivitas adsorpsi antar logam adalah $\text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Pb}^{2+}$.

II.3.1 Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi didefinisikan sebagai layer penyerapan adsorpsi yang dapat dilihat ketika sejumlah ion teradsorp per-massa adsorben dalam larutan sampel (Rahman & Sedyadi, 2020a). Apabila penyerapan ion terjadi pada mono lapisan (*monolayer*) maka tergolong dalam isoterm langmuir, sedangkan jika terjadi pada multi lapisan (*multilayer*) maka tergolong dalam isoterm freundlich (Muhajjalin dkk., 2021). Menurut penelitian oleh Mandasari dkk. (2023), penyerapan ion yang terjadi pada model isoterm langmuir terjadi secara kimia, sedangkan penyerapan ion yang terjadi pada model isoterm frendlich terjadi secara fisika.

Persamaan langmuir dinyatakan dengan persamaan (II.1) dan (II.2) dan persamaan freundlich dinyatakan dengan persamaan (II.3) dan (II.4).

$$q_e = \frac{Q_m \cdot K \cdot C_e}{1 + K \cdot C_e} \quad \dots \text{ (II.1)}$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_m} C_e + \frac{1}{Q_m \cdot K} \quad \dots \text{ (II.2)}$$

$$q_e = K \cdot C_e^{\frac{1}{n}} \quad \dots \text{ (II.3)}$$

$$\log q_e = \log K + \frac{1}{n} \log C_e \quad \dots \text{ (II.4)}$$

Dengan, q_e kapasitas adsorpsi

C_e konsentrasi adsorbat

Q_m kapasitas maksimum adsorpsi

K konstranta langmuir n intensitas adsorpsi

K konstranta freundlich.

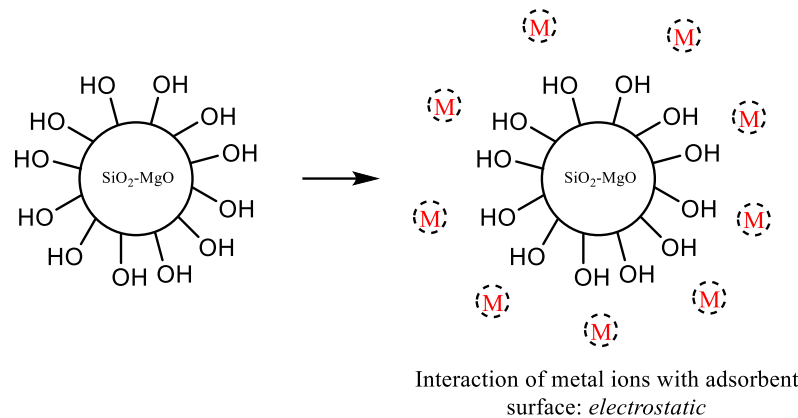
Interaksi yang terjadi pada model isoterm langmuir tergolong kuat karena kinerja adsorben yang bersifat homogen dan mampu menghasilkan kapasitas

adsorpsi yang maksimal, sedangkan interaksi yang terjadi pada model isotherm freundlich adsorben bersifat heterogen sehingga interaksi yang terjadi tergolong lemah dan kapasitas adsorpsi yang dihasilkan kurang maksimal (Hardianti & Octaviannus, 2021).

II.4 Oksida SiO₂-MgO

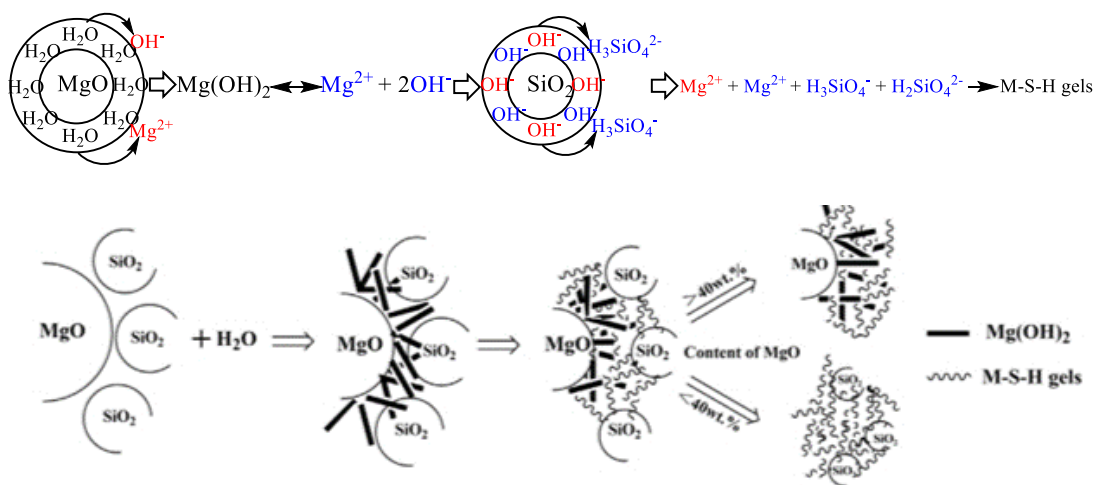
Oksida SiO₂-MgO dapat dibentuk dari MgO berbahan dasar MgSO₄ dan SiO₂ (Razzak dkk.2019). SiO₂ bersifat sangat reaktif sehingga ketika direaksikan dengan MgO akan menghasilkan senyawa oksida SiO₂-MgO dengan komposisi dan karakteristik yang berbeda daripada unsur SiO₂ dan MgO. Dalam hal ini MgO berperan sebagai penyokong sedangkan SiO₂ sebagai zat utama, sehingga ketika keduanya direaksikan menghasilkan oksida SiO₂-MgO dengan karakteristik sifat mekanik yang optimum dan membuat oksida cenderung lebih stabil melalui penambahan MgO (Shah dkk., 2022).

Kestabilan struktural dari SiO₂-MgO membantu oksida mempertahankan sifatnya untuk tidak mudah mengalami aglomerasi sehingga memungkinkan perlakuan kontak yang baik antara adsorben dan adsorbat (Shah dkk., 2022). SiO₂-Mg dapat berperan sebagai adsorben karena memiliki gugus hidroksil (-OH), gugus hidroksil akan melakukan interaksi dengan ion logam pada adsorbat dipermukaan adsorben seperti yang digambarkan pada **Gambar II.2** (Ciesielczyk dkk., 2016). Interaksi yang terjadi antara adsorben dengan adsorbat merupakan reaksi elektrostatik, di mana terjadi pertukaran muatan antara ion logam pada adsorbat dengan ion pada adsorben (Joshi, 2013).



Gambar II.2 Skema interaksi ion logam pada permukaan SiO₂-MgO

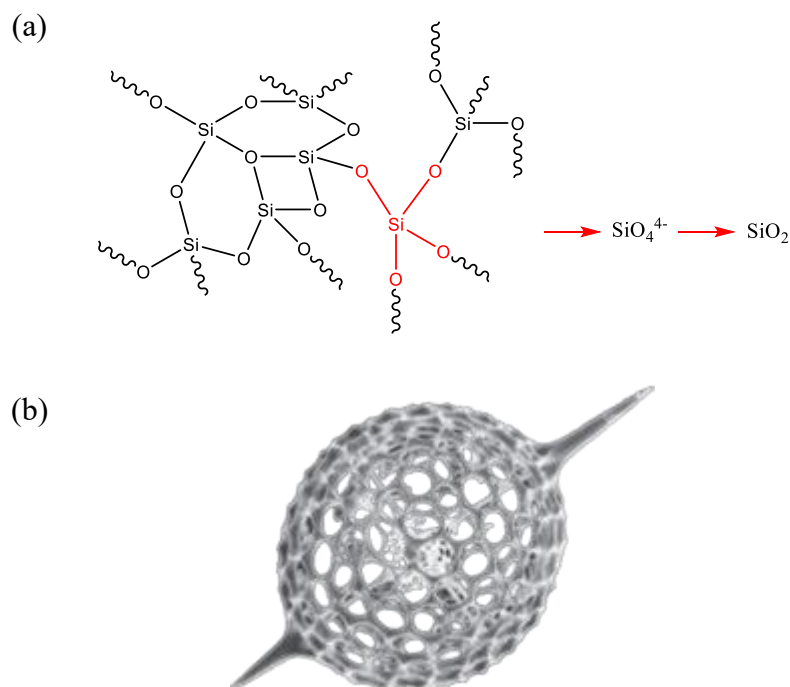
SiO₂ dan MgO akan mendesak temperatur tertentu untuk membentuk senyawa oksida SiO₂-MgO. Razzak dkk. (2019) dan Gu dkk. (2018) menyatakan bahwa temperatur yang dibutuhkan oleh SiO₂-MgO dalam proses kalsinasi adalah suhu 700-1000°C sehingga tidak mengurangi luas permukaan senyawa dan dapat berperan maksimal sebagai adsorben. Dalam temperatur tersebut akan terjadi distribusi partikel yang mendorong senyawa SiO₂-MgO menciptakan luas permukaan yang besar (Wang dkk., 2023). Adapun mekanisme pembentukan oksida SiO₂-MgO tertera pada **Gambar II.3** berikut.



Gambar II.3 Mekanisme pembentukan SiO₂-MgO (Z. Li dkk., 2014)

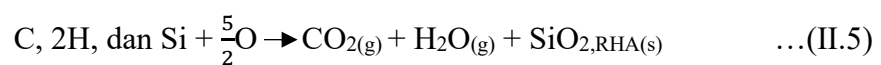
II.4.1 Silika

Silika dengan rumus kimia SiO_2 merupakan komponen kimia anorganik yang memiliki ukuran nano. Silika memiliki beragam bentuk mulai dari gel, kristal, dan amorf. Silika dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan suatu produk untuk aplikasi tertentu, salah satunya sebagai adsorben karena silika merupakan material berpori seperti **Gambar II.4 (b)** dengan luas permukaan sebesar $200\text{-}800\text{ m}^2/\text{g}$ (Yusmaniar dkk., 2014). Silika dengan luas permukaan yang besar memungkinkan molekul-molekul untuk berdifusi dan berperan sebagai adsorben, oleh karena itu dapat digunakan untuk menyerap suatu adsorbat (Hardyanti dkk., 2017). Struktur kimia silika dapat dilihat pada **Gambar II.4 (a)** yang menunjukkan ikatan atom silikon dan oksigen yang berikatan secara kovalen sehingga membentuk silika (Nzereogu dkk., 2023).

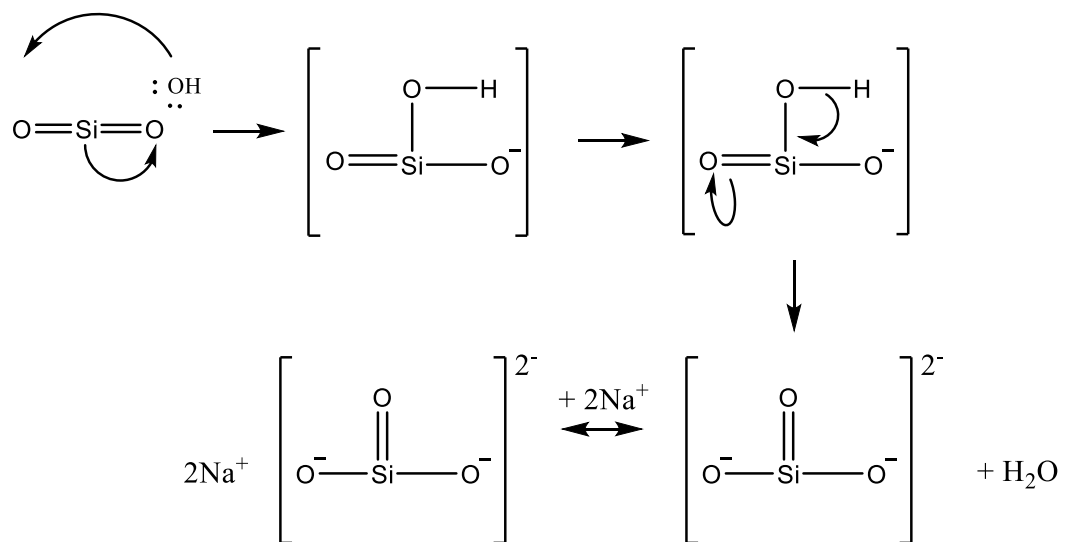


Gambar II.4 (a) Struktur kimia silika gel (Nzereogu dkk., 2023) & (b) struktur silika berpori (Shiver & Atkins, 2010)

Penelitian oleh Nzereogu dkk. (2023) memberikan informasi bahwa silika dapat diperoleh dari sekam padi dengan kandungan silika sebanyak 85% hingga 95%, untuk memperoleh silika dari sekam padi perlu melalui kalsinasi pada suhu 550-750°C agar menghasilkan kadar abu yang tinggi dan silika dengan struktur yang amorf (Nuryono dkk., 2005). Proses kalsinasi (pengabuan) membentuk reaksi dekomposisi sebagai berikut:

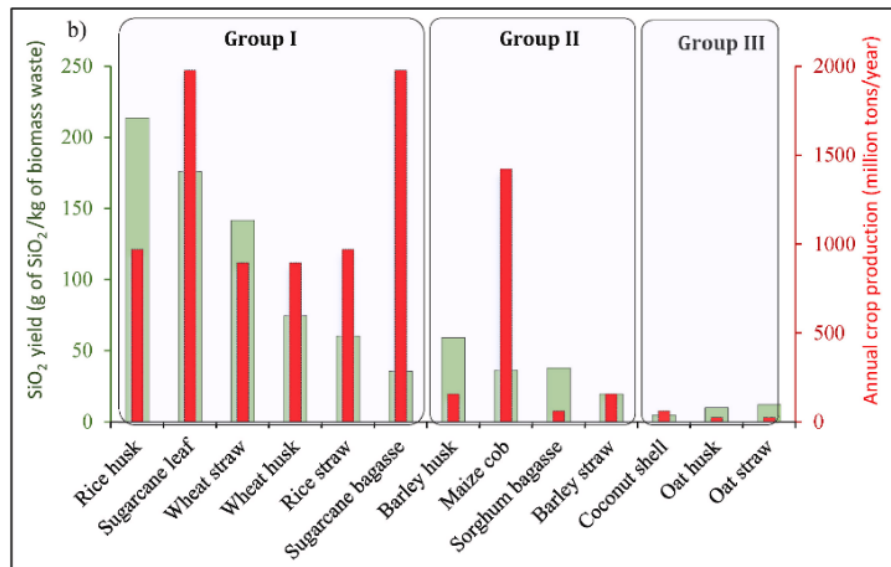


Silika dari abu sekam padi dapat diperoleh dengan metode sol gel yang melalui tahap hidrolisis pada persamaan **II.8** dan kondensasi pada persamaan **II.9**. Pembentukan silika dibantu oleh dorongan prekursor natrium silikat, adapun mekanisme pembentukan natrium silikat tertera pada **Gambar II.5** berikut:



Gambar II.5 Mekanisme pembentukan natrium silikat (Ismail dkk., 2009)

Selain sekam padi, terdapat beberapa limbah yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber silika yaitu tebu, gandum, tongkol jagung, dan sebagainya sebagaimana yang tercantum pada **Gambar II.6** (Gebretatios dkk., 2023).



Gambar II.6 Penggolongan limbah biomassa bersumber pada produktivitas tahunan global dan sumber ekstraksi silika (Gebretatios dkk., 2023)

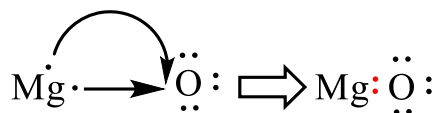
II.4.2 Magnesium Oksida

Magnesium oksida (MgO) dengan struktur pada **Gambar II.7** merupakan mineral yang berbentuk serbuk dengan warna putih dan merupakan suatu komponen yang dapat dimanfaatkan sebagai adsorben (Imran, 2020) dan (Jatyaraga dkk, 2016).

Hal yang mendorong MgO efektif digunakan sebagai adsorben yaitu kemampuan distribusi molekul yang baik. Ion Mg^{2+} dan O^{2-} mampu mengalami interaksi dengan unsur lain dan memungkinkan pembentukan senyawa baru dengan luas permukaan yang besar (Taherpoor dkk., 2024). Selain itu, magnesium oksida (MgO) merupakan salah satu senyawa yang memiliki sifat mekanik maksimum dan memiliki reaktivitas tinggi (Shah dkk., 2022) dan (Trisnayanti, 2020).

Studi oleh Zhang dkk. (2022) memberikan informasi bahwa MgO memiliki konsentrasi ion yang rendah, sehingga perlu dibentuk dari senyawa lain yang

memiliki konsentrasi ion tinggi. MgO dapat dihasilkan dari magnesium sulfat heptahidrat ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) yang dikalsinasi pada suhu 700°C (Razzak dkk. 2019). Selain itu, studi oleh Hu dkk. (2018) menyatakan bahwa MgO dapat diperoleh dari pemecahan senyawa $\text{Mg}(\text{OH})_2$ atau MgCO_3 dengan suhu kalsinasi $700\text{-}1000^\circ\text{C}$. Suhu $700\text{-}1000^\circ\text{C}$ dianggap sebagai suhu optimum dalam pembentukan MgO sehingga tidak mengurangi luas permukaan yang ada, apabila kalsinasi dilakukan pada suhu diatas 1000°C akan mengurangi luas permukaan dari senyawa (Razzak dkk. 2019).



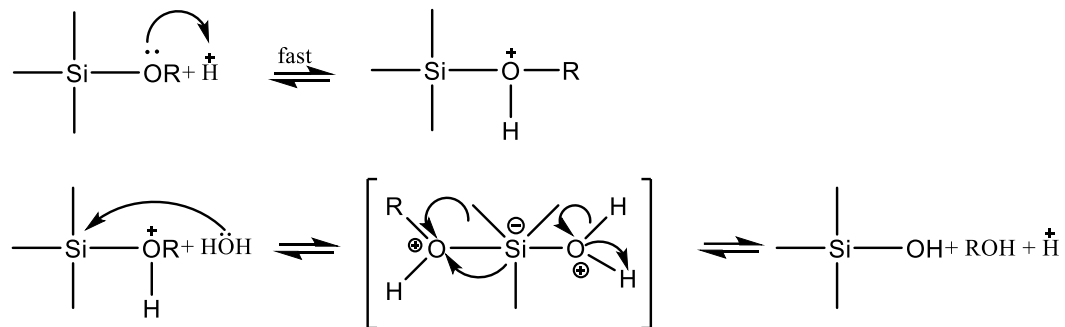
Gambar II.7 Struktur kimia magnesium oksida (Putra, 2012)

II.5 Metode Sol Gel

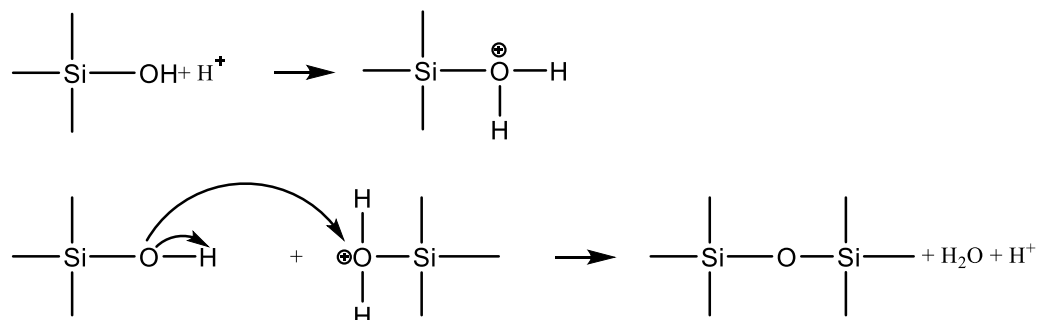
Metode sol gel sebagai metode sintesis nanopartikel memerlukan dorongan suatu prekursor. Prinsip dari metode ini sederhana, sehingga sangat umum digunakan karena dapat diaplikasikan secara luas, dan memiliki banyak keunggulan di antaranya yaitu bersifat fleksibel, ramah lingkungan, dan menghasilkan tingkat kemurnian yang maksimum (Innocenzi, 2023).

Pada prosesnya, metode sol gel melewati 2 tahap yaitu hidrolisis dan kondensasi. Hidrolisis merupakan tahap pengalihan gugus karboksil menjadi gugus alkoksida dengan bantuan katalis seperti pada **Gambar II.8**. Penggunaan katalis asam akan menyebabkan gugus alkoksida terprotonasi dengan cepat, sedangkan katalis basa menyebabkan protonasi terjadi lebih lama. Hasil dari proses hidrolisis yaitu terbentuk ikatan silanol (Si-OH) dalam sayawa. Sedangkan, **Gambar II.9**

menjelaskan tahap kondensasi silikon yang bersifat lebih elektrofilik diserang oleh asam nukleofilik, sedangkan basa nukleofilik menyerang silanol yang terdeprotonasi sehingga terbentuk ikatan siloksan (Si-O-Si) dalam senyawa (Liza dkk., 2018).



Gambar II.8 Mekanisme hidrolisis (Hayati dkk., 2017)



Gambar II.9 Mekanisme kondensasi (Hayati dkk., 2017)

II.6 Karakterisasi Hasil Uji

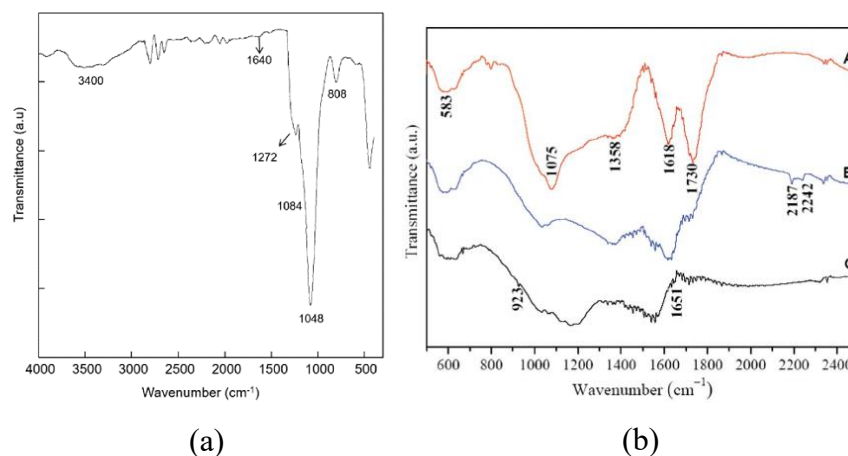
Karakterisasi hasil uji diperlukan guna mengkonfirmasi kandungan unsur dan karakteristik dari sampel yang diciptakan. Setiap sampel dibentuk secara spesifik dengan maksud yang tertentu, termasuk sifat yang diharapkan nya. Karakterisasi setiap sampel dapat dengan jelas menginformasikan karakteristik seperti kandungan unsur, sifat, dan morfologi sampel. Karakterisasi ini diperlukan

sebagai data penunjang dalam hasil pengujian. Berikut ini 4 macam karakterisasi hasil uji yang digunakan dalam penelitian ini:

II.6.1 *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*

Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) merupakan alat uji karakterisasi yang pada prosesnya akan mendeteksi senyawa dalam panjang gelombang tertentu, dengan prinsip interaksi antara energi dan materi. Proses terciptanya panjang gelombang yang tertentu dihasilkan dari penyerapan energi oleh molekul. Molekul semata-mata menyerap energi yang berupa frekuensi radiasi inframerah tertentu (Pavia dkk., 2013).

Adapun contoh dari karakterisasi hasil uji FTIR dapat dilihat pada **Gambar II.10** berikut.



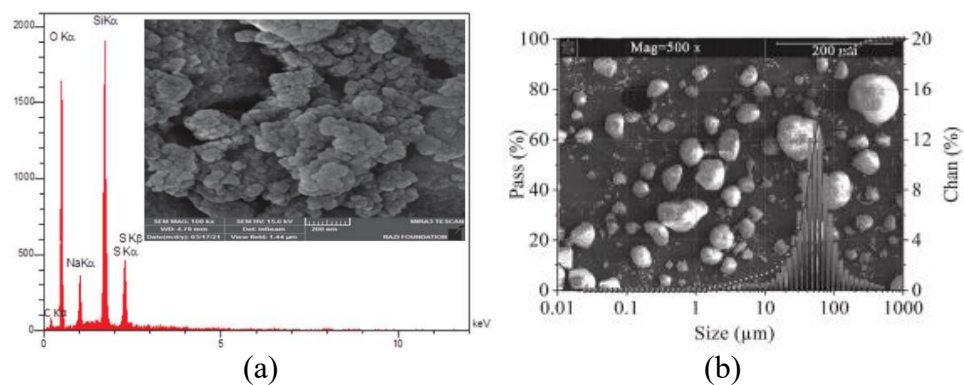
Gambar II.10 Spektra (a) SiO₂ (Ramalla dkk., 2015) & (b) MgO (Selvam dkk., 2011)

II.6.2 *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray (SEM EDX)*

Scanning electron microscope-energy dispersive x-ray (SEM-EDX) merupakan alat uji karakterisasi yang dapat mendeteksi muatan unsur (Hulungo dkk., 2022). Kinerja dalam instrumen SEM memiliki sentral pada volume interaksi atom-atom di dalamnya. Hal ini terjadi akibat adanya interaksi berkas elektron

dengan atom spesimen sehingga menembus spesimen dan menghadirkan informasi morfologi, komposisi, dan sifat kristal dari sampel yang di analisa (Girão dkk., 2017).

Adapun contoh dari karakterisasi hasil uji SEM dapat dilihat pada **Gambar II.11** berikut.

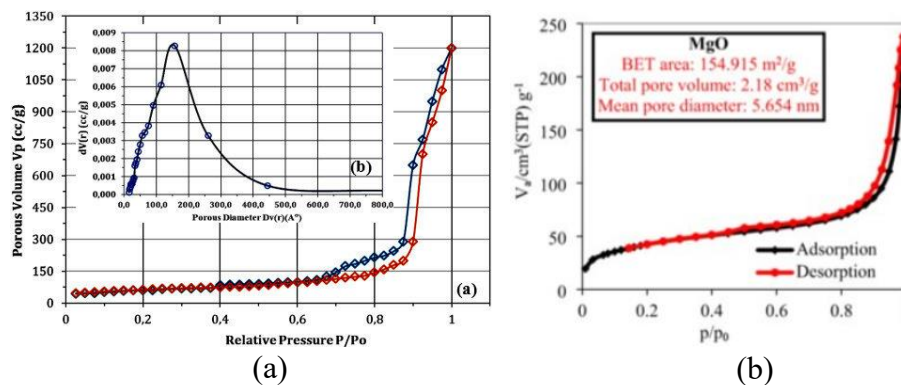


Gambar II.11 Hasil uji morfologi SEM-EDX (a) SiO₂ (Ali dan Drea, 2021) & (b) MgO (Zhang dkk., 2022)

II.6.3 Gas Sorption Analyzer (GSA)

Gas sorption analyzer (GSA) merupakan alat uji karakterisasi yang pada prosesnya akan mendeteksi luas permukaan suatu sampel (Kurniawan dkk., 2014). Setiap permukaan diketahui memiliki tingkat energi yang setara, dimana energi adsorpsi akan tetap sama setelah proses adsorpsi sehingga molekul-molekul tidak mengalami interaksi pada prosesnya. GSA digunakan untuk menjumpai luas permukaan yang nampak atas pori-pori permukaan baik itu ukuran pori, bentuk pori, maupun susunan pori dalam partikel (Zulichatun dkk., 2015).

Adapun contoh dari karakterisasi hasil uji GSA dapat dilihat pada **Gambar II.12** berikut.



Gambar II.12 GSA adsorpsi dan desorpsi (a) SiO₂ (Munasir dkk., 2020) & (b) MgO (Foroutan dkk., 2020)

II.6.4 Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

Atomic absorption spectrophotometer (AAS) merupakan alat uji karakterisasi yang dapat mendeteksi muatan-muatan logam dalam suatu sampel dapat diuraikan dengan deteksi sampel secara langsung tanpa melalui pemisahan (Yus Nasution dkk., 2021). Muatan logam akan terdeteksi akibat adanya penyerapan energi oleh sebab atom yang memenuhi panjang gelombang tertentu (Purnamasari dkk., 2021). Penguraian dalam instrumen ini dapat berjalan dengan cepat karena atom-atom dalam sampel dapat dengan mudah mengalami eksitasi secara singkat (Marliyana, 2021).

Standar pengujian logam berat di Indonesia tercantum dalam SNI yang diakui. Sebagai contoh, pengujian logam Pb dapat dilakukan dengan spektrofotometer serapan atom secara destruksi asam yang tercantum dalam

SNI (06-6992.3: 2004), dengan penambahan zat asam berupa asam nitrat. Hasil pengujian AAS memberikan data linearitas berupa persamaan garis yang menggambarkan hubungan antara konsentrasi awal logam dengan absorbansi yang dihasilkan (Marliyana & Sugito, 2021).