

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengelolaan Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) di rumah sakit masih menghadapi beberapa tantangan. Berdasarkan evaluasi di berbagai rumah sakit, efektivitas IPAL sering kali belum optimal dalam memenuhi standar kualitas air limbah yang ditetapkan (Phitamara et al., 2023). Limbah rumah sakit berpotensi mengandung berbagai senyawa farmasi, termasuk antibiotik. Penelitian terkini menunjukkan bahwa antibiotik dengan konsentrasi tinggi terdeteksi pada air limbah rumah sakit dan influen air limbah (Ekwanzala et al., 2020). Penelitian lain menunjukkan bahwa air limbah rumah sakit menyajikan lebih banyak jenis-jenis gen resistensi antibiotik, dan kelimpahannya lebih tinggi daripada yang ada di sebagian besar sistem air limbah (S. Zhang et al., 2020).

Fenomena lain di lapangan juga menunjukkan bahwa berbagai jenis antibiotik telah terdeteksi di air minum, air limbah, air tanah, dan air permukaan (Velpandian et al., 2018). Jenis antibiotik yang banyak dikonsumsi oleh manusia dan hewan secara berturut adalah amoxicillin trihydrate dan Betamox LA yang berfungsi untuk pengobatan infeksi bakteri (Klein et al., 2018)(Tran et al., 2019)(Chowdhury & Uddin, 2022)(Lee et al., 2021) serta rifampicin yang dikonsumsi oleh manusia untuk mengobati tuberkolosis (Abulfathi et al., 2019). Hal ini menjadi isu serius bagi lingkungan dan kesehatan.

Limbah antibiotik yang berada di lingkungan perairan akan mengakibatkan dampak toksik bagi organisme air dan tanah karena sifatnya yang dapat bertahan dalam jangka waktu yang lama (persisten) (Akhtar et al., 2022)(Cycoń et al., 2019). Limbah antibiotik dapat terakumulasi sebagai biokonsentrat dalam organisme air atau jaringan tanaman (bioakumulasi), dan mengalami biomagnifikasi ke tingkat trofik rantai makanan, sehingga berpotensi menimbulkan risiko terhadap kesehatan dan ekosistem, serta kontribusi terhadap resistensi anti mikroba (Gomes, 2024). Oleh karena itu, limbah antibiotik perlu diolah secara memadai sebelum dibuang ke lingkungan untuk

mencegah biokonsentrasi, bioakumulasi, biomagnifikasi, dan resistensi antibiotik.

Terdapat berbagai teknologi pengolahan air konvensional yang sudah dilaporkan dalam pengolahan limbah antibiotik di perairan, yaitu secara fisika dan kimia meliputi koagulasi, sedimentasi, osmosis, ultrafiltrasi, dan filter membran, serta secara biologis melibatkan bakteri (He et al., 2021)(Wang et al., 2024). Metode pengolahan air secara fisika dan kimia memiliki kelemahan yaitu hanya dapat memusatkan polutan, bukan menghilangkan atau mendegradasi polutan, serta pengolahan limbah secara biologi perlu mempertimbangkan generasi superbakteri yang resisten terhadap obat dalam proses pengobatan (Wang et al., 2024). Walaupun sudah diolah dengan cara konvensional, konsentrasi antibiotik tetap terdeteksi dalam air limbah yang telah diolah (Li et al., 2020). Hal ini menunjukkan bahwa metode pengolahan konvensional belum mampu menghilangkan antibiotik secara menyeluruh. Oleh karena itu, perlunya teknologi pengolahan yang lebih efektif (Fernandes et al., 2016), salah satu alternatifnya adalah menggunakan metode *Advanced Oxidation Processes* (AOPs).

Advanced Oxidation Processes (AOPs) atau metode oksidasi lanjutan merupakan teknologi pengolahan yang lebih efektif dalam mengolah limbah antibiotik dibandingkan metode pengolahan limbah secara fisika, kimia, atau biologis (Wang & Zhuan, 2020). Hal ini karena generasi in-situ dari radikal bebas pengoksidasi yang sangat aktif, terutama radikal hidroksil ($-OH$). Radikal bebas aktif ini dapat mengoksidasi polutan organik menjadi CO_2 , H_2O atau ion anorganik tertentu, dan menghindari pembentukan produk sampingan yang dapat membatasi degradasi total polutan target (Brillas & Martínez-Huitle, 2015). Disamping itu, AOPs waktu reaksinya singkat, kecepatan reaksinya cepat, dan prosesnya dapat dikontrol dan tidak selektif sehingga dapat mendegradasi semua jenis polutan organik (Wang et al., 2024). Menurut kondisi reaksi yang digunakan, AOPs dapat dibagi menjadi oksidasi ozon, oksidasi fenton, fotokatalisis, dan elektrokatalisis (Wang & Zhuan, 2020)(Hu, 2022).

Oksidasi ozon memiliki kelemahan yaitu biaya operasional yang tinggi karena menggunakan generator ozon. Ozonasi dapat menghasilkan produk samping beracun, Bromat (BrO_3^-) yang bersifat karsinogenik (Wang & Zhuan, 2020). Oksidasi fenton memiliki beberapa kelemahan, yaitu terbatas pada kondisi asam, dan menghasilkan lumpur yang mengandung besi dalam jumlah besar yang sulit untuk dibuang. Elektrokatalisis memiliki kekurangan diantaranya, mahal, kompleks, bergantung pada kondisi operasional, risiko degradasi elektrode dan produk samping. Fotokatalisis telah diakui sebagai salah satu teknologi yang paling menjanjikan untuk mendekontaminasi bahan organik dan obat-obatan (Liu et al., 2020). Fotokatalisis merupakan proses yang ramah lingkungan untuk mendekontaminasi air limbah, karena hanya membutuhkan sinar matahari atau sinar ultraviolet (UV) buatan untuk mendorong mineralisasi kontaminan secara menyeluruh. Selain itu, fotokatalis heterogen dapat didaur ulang dan digunakan kembali beberapa kali dalam proses yang sama dengan sedikit kehilangan efisiensi (Wang et al., 2017).

Fotokatalisis diklasifikasikan sebagai proses oksidasi tingkat lanjut (AOP) dan dilakukan dengan bantuan (katalis) oksida logam berstruktur nano atau semikonduktor sulfida seperti TiO_2 (Lucas et al., 2025), ZnO (T. H. Nguyen et al., 2024), SnO_2 (Ramanathan & Murali, 2022), SiO_2 , dan CeO_2 (Montini et al., 2016), karena stabilitas kimia dan termalnya yang tinggi, serta kemampuannya dalam menyerap energi cahaya untuk menghasilkan pasangan elektron-hole yang aktif dalam proses fotokatalisis. TiO_2 dilaporkan telah banyak digunakan dalam fotokatalisis (Kutuzova et al., 2021)(Bayan et al., 2021)(Yeole et al., 2024). Aplikasi titania yang meluas untuk aplikasi fotokatalisis berasal dari sifat-sifatnya yang tak tertandingi yaitu tidak beracun, mudah diaktivasi dengan sinar UV (memiliki *band gap* sesuai), stabilitas kimiawi, ramah lingkungan, tahan terhadap korosi, dan berbiaya rendah (Anucha et al., 2022)(Chauke et al., 2025)(Huang Kong et al., 2025). Dalam prosesnya, TiO_2 memiliki kelemahan yaitu keterbatasan luas permukaan, adsorpsi substrat pada permukaan TiO_2 , dan sulit dipisahkan dari air setelah digunakan (Alsaoud et al., 2018). Untuk mengatasi hal ini, perlu untuk menggabungkan TiO_2 dengan material

pendukung lain yang memiliki luas permukaan besar, daya adsorpsi tinggi, mudah dimodifikasi, dan mudah dipisahkan dari air.

Terdapat beberapa material pendukung seperti SiO_2 , zeolit, clay, *Carbon Nano Tubes* (CNT), *Graphene Oxide* (GO), karbon aktif, *biochar*, dan Al_2O_3 yang sudah digunakan untuk mendukung kinerja TiO_2 (Lucas et al., 2025)(Jalloul et al., 2024)(Kharouf et al., 2024)(Miklec et al., 2023)(Xinyu, 2023)(Mehralipour et al., 2023)(Hu, 2022)(Svetlakova et al., 2021). Dilaporkan bahwa SiO_2 sebagai logam oksida memiliki sifat unggul dalam menjadi material pendukung bagi TiO_2 . Hal ini karena SiO_2 mendukung distribusi dan penyebaran material aktif, memperkuat struktur komposit sehingga tidak mudah rusak saat digunakan berulang kali atau saat kalsinasi. SiO_2 membantu menjaga ukuran partikel kecil dan terdistribusi, yang penting untuk reaktivitas, SiO_2 tidak menyerap sinar UV, sehingga tidak menghalangi cahaya masuk ke permukaan TiO_2 . Selain itu, sifat semikonduktor dan kemudahan modifikasi struktur permukaan menjadikan SiO_2 (kelompok oksida logam) sebagai kandidat unggul dalam aplikasi pengolahan limbah dan konversi energi (Joseph et al., 2021).

Silika dapat diperoleh dari berbagai sumber. Silika dapat diperoleh dengan mudah dari limbah agroindustri, seperti dari abu sekam padi (SiO_2 93.8%), abu daun bambu (SiO_2 93.9%), dan abu bonggol jagung (SiO_2 91.7%) (Delimunthe, 2024). Kandungan SiO_2 yang tinggi pada abu sekam padi serta kelimpahan sekam padi yang tinggi, yaitu mencapai 378,18 ribu ton gabah kering giling (GKG), menjadikannya limbah yang potensial untuk dijadikan sumber silika (Badan Pusat Statistik, 2024).

Istilah “silika” mengacu pada silikon dioksida, yang memiliki dua bentuk terpisah, yaitu amorph dan kristalin. Silika amorph (silica gel, fumed silica) memiliki struktur kristal dan pori tidak teratur dan silika kristalin (kuarsa, kristobalit, dan tridimit) memiliki struktur dan pori teratur yang digunakan dalam industri material/kaca/keramik (Mbule, 2016). Disisi lain, terdapat silika mesopori yang memiliki struktur amorph dengan luas permukaan besar dan pori

yang dapat diatur. Hal ini menjadikan silika mesopori unik karena menggabungkan sifat amorf dengan keteraturan struktural pada skala nano.

Silika mesopori memiliki kemampuan adsorpsi yang tinggi, dapat mendistribusikan partikel TiO_2 lebih baik, stabilitas dan kemudahan pemisahan setelah proses (Kamegawa et al., 2015). Jenis silika mesopori terbaru, yaitu silika berserat/*fibrous silica* yang disintesis untuk pertama kalinya pada tahun 2010 dengan nama *Korean Conventional Center-1* (KCC-1) dianggap sebagai kandidat pendukung potensial baru untuk merancang fotokatalis yang efisien untuk degradasi polutan organik (Bayal et al., 2016)(Soltani, Pelalak, et al., 2021). KCC-1 menawarkan bentuk alternatif yang unik, yang belum pernah terlihat pada material silika, yaitu morfologi permukaan berserat yang tersusun dalam struktur tiga dimensi membentuk bola. Tidak seperti silika berbasis porus tradisional, nanosfer ini memiliki struktur berserat yang secara dramatis meningkatkan aksesibilitas ke sebagian besar area permukaan yang tersedia, sehingga meningkatkan aktivitas katalitik secara signifikan (Soltani, Pelalak, et al., 2021)(Soltani et al., 2020)(Soltani, Pishnamazi, et al., 2021)(Bayal et al., 2016).

Berdasarkan latar belakang ini, silika mesopori dari limbah sekam padi terdekorasi titania diharapkan dapat menjadi solusi tepat guna dan ramah lingkungan untuk penanganan limbah medis seperti antibiotik amoxicillin trihydrate, Betamox LA, dan rifampicin melalui fotokatalisis. Penelitian ini menjadi lebih penting mengingat belum ada penelitian sebelumnya. Berbagai studi mengenai komposit $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ sudah banyak dilakukan, namun sumber silika yang digunakan tidak menggunakan limbah dari sekam padi, melainkan dari kimia seperti TEOS dan silika yang dibuat bukan jenis silika mesopori (Y. Wang et al., 2017) (Gatou et al., 2023) (Guettaia et al., 2023) (Tahanpour et al., 2023), serta penggunaan komposit tidak diperuntukkan untuk antibiotik (amoxicillin trihydrate, Betamox, dan rifampicin), namun untuk fotodegradasi obat ibuprofen (Guettaia et al., 2023), senyawa Rhodamin B dan fenol (Gatou et al., 2023), senyawa arsenik (Y. Wang et al., 2017), dan quinoline (Jesus et al., 2021).

Penelitian ini akan dilakukan dengan melakukan optimasi sintesis silika mesopori (SM), dilanjutkan optimasi dekorasi menggunakan titania untuk mendapatkan komposit silika mesopori – titania (SMT), karakterisasi dan uji kinerjanya dalam mendegradasi limbah antibiotik amoxicillin trihydrate, Betamox, dan rifampicin diukur menggunakan UV-VIS serta uji mineralisasi dengan analisis *Total Organic Carbon* (TOC). Karakterisasi material dilakukan dengan menggunakan *Field Emission Scanning Electron Microscopy* (FESEM) untuk mengetahui morfologi, fisisorpsi gas N₂ untuk mengetahui luas permukaan, diameter, dan volume pori, *X-ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui komposisi material, *X-ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui struktur kristal, UV-Vis *Diffuse Reflectance* (UV-DR) untuk mengetahui celah pita, dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk mengetahui gugus fungsi yang ada.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah diuraikan dalam beberapa pertanyaan penelitian, yaitu sebagai berikut:

1. Bagaimana kondisi optimum sintesis silika mesopori dari limbah sekam padi dan komposit silika mesopori terdekorasi titania?
2. Bagaimana karakteristik silika mesopori dari limbah sekam padi dan komposit silika mesopori terdekorasi titania?
3. Bagaimana kinerja komposit silika mesopori terdekorasi titania dalam meremediasi limbah antibiotik amoxicillin trihydrate, Betamox LA, dan rifampicin?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, penelitian ini bertujuan untuk memperoleh informasi mengenai:

1. Kondisi optimum sintesis silika mesopori dari limbah sekam padi dan komposit silika mesopori terdekorasi titania.

2. Karakteristik silika mesopori dari limbah sekam padi dan komposit silika mesopori terdekorasi titania.
3. Kinerja komposit silika mesopori terdekorasi titania dalam meremediasi limbah antibiotik amoxicillin trihydrate, Betamox LA, dan rifampicin.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dapat memberikan informasi mengenai:

1. Pengembangan material pendukung katalis dalam bidang fotokatalis berbahan dasar limbah sekam padi.
2. Pengembangan komposit silika mesopori terdekorasi titania sebagai katalis dalam fotodegradasi antibiotik.
3. Teknologi pengolahan limbah antibiotik amoxicillin trihydrate, Betamox LA, dan rifampicin yang unggul.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

1. Proses optimasi sintesis silika dari limbah sekam padi dibatasi pada variasi waktu dan suhu proses. Keberhasilan sintesis ditentukan oleh parameter %yield dan *bulk density*.
2. Proses optimasi sintesis silika mesopori terdekorasi titania dibatasi pada variasi komposisi $\text{SiO}_2:\text{TiO}_2$ yang hasilnya ditentukan oleh parameter % degradasi antibiotik.
3. Keberhasilan sintesis ditentukan oleh karakterisasi luas permukaan, ukuran pori, ukuran partikel, komposisi, kristanilitas, gugus fungsi, penyebaran titania, dan nilai *band gap*.
4. Proses uji kinerja dibatasi pada optimasi dosis katalis. Kemudian uji kinerja melibatkan tiga jenis limbah model antibiotik, yaitu amoxicillin, rifampicin, dan Betamox LA (jenis amoxicillin) yang diukur % degradasi menggunakan UV-VIS dan % mineralisasi menggunakan analisis TOC.