

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan resistensi bakteri terhadap antibiotik sudah menjadi satu dari sekian ancaman serius dalam bidang kesehatan global. Fenomena ini menyebabkan penurunan efektivitas antibiotik konvensional, sehingga infeksi bakteri menjadi lebih sulit diobati, berlangsung lebih lama, dan berpotensi menimbulkan komplikasi yang lebih berat (World Health Organization, 2023). Kondisi tersebut mendorong perlunya pengembangan strategi alternatif untuk mengendalikan bakteri yang efektif tanpa meningkatkan resistensi yang telah ada.

Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan adalah penggunaan material anorganik sebagai agen antibakteri berbasis pelepasan ion logam secara terkendali. Sistem ini memungkinkan ion aktif dilepaskan secara bertahap sehingga ion logam tetap tersedia untuk berinteraksi dengan bakteri (Tania dkk., 2016). Material berbasis silika menjadi salah satu kandidat yang potensial karena dapat digunakan sebagai matriks pembawa ion logam serta dapat dimodifikasi melalui metode sintesis sol-gel untuk menghasilkan material dengan sifat yang sesuai kebutuhan aplikasi (Nabilah dkk., 2025). Nanomaterial logam bekerja melalui mekanisme non-spesifik seperti pelepasan ion logam, interaksi membran, dan pembentukan ROS sehingga berpotensi mengurangi kemungkinan munculnya resistensi bakteri (Eweis dkk., 2024).

Di antara berbagai jenis silika, silika mesopori (Mesoporous Silica, MS) mempunyai luas permukaan spesifik yang tinggi dan struktur pori teratur sehingga berpotensi digunakan pada berbagai aplikasi seperti katalisis heterogen, pemisahan makromolekul, sensor biologi, dan perangkat fungsional. Namun demikian, sifat kimia silika yang relatif inert membatasi pengembangan fungsi material sehingga diperlukan modifikasi melalui substitusi heteroatom untuk menghasilkan situs aktif pada kerangka silika (Miao dkk., 2019).

Salah satu metode modifikasi yang dapat dilakukan adalah melalui pemasukan ion logam ke dalam struktur material (Miao dkk., 2019). Tembaga

diketahui memiliki aktivitas antibakteri terhadap beragam mikroorganisme, contohnya *Staphylococcus aureus*, *Salmonella enterica*, *Campylobacter jejuni*, *Escherichia coli* serta *Listeria monocytogenes* (Zalevskaya & Gur'eva, 2021). Cu(II) menunjukkan aktivitas antibakteri melalui adhesi pada dinding sel, gangguan struktur protein membran, denaturasi protein intraseluler, serta interaksi dengan DNA (Nabilah dkk., 2025). Selain itu, ion Cu(II) juga dapat memicu pembentukan spesies oksigen reaktif (*Reactive Oxygen Species*, ROS) yang mengakibatkan stres oksidatif pada sel (Zhong dkk., 2022). Pengikatan ion Cu(II) pada material silika dapat terjadi melalui interaksi dengan gugus silanol (Si-OH) maupun siloksan (Si-O-Si) pada permukaan material (Nabilah dkk., 2025; Tania dkk., 2016). Oleh karena itu, penggunaan Cu sebagai agen antibakteri pada bahan pendukung berpori berpotensi menghasilkan bahan antibakteri yang efektif. Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa bahan berbasis silika yang dimodifikasi Cu mempunyai aktivitas antibakteri terhadap bakteri Gram-positif ataupun Gram-negatif (Nabilah dkk., 2025; Tania dkk., 2016).

Dalam sintesis material mesopori, penggunaan biomassa sebagai pencetak pori menjadi alternatif yang menarik karena bersifat terbarukan dan berpotensi digunakan sebagai sumber pencetak pori berbiaya rendah. Hidroksietil selulosa (HEC) merupakan turunan selulosa yang larut dalam air akibat substitusi gugus hidroksietil yang mengganggu ikatan hidrogen antarrantai polimer. Sifat tersebut menjadikan HEC sebagai pencetak pori organik yang sesuai untuk sintesis silika melalui metode sol-gel (Doungdej dkk., 2025). HEC mampu membentuk agregat dalam larutan dan berinteraksi dengan spesies silikat melalui ikatan hidrogen sehingga dapat mendorong pembentukan struktur mesopori selama proses sol-gel (Lyu dkk., 2020). Penggunaan HEC sebagai *soft template* juga dilaporkan mampu meningkatkan luas permukaan, volume pori, dan perkembangan struktur mesopori pada material silika. Selain itu, penggunaan HEC menawarkan pendekatan sintesis yang lebih ramah lingkungan karena dapat digunakan sebagai pencetak pori organik dalam sintesis sol-gel berbasis air serta berasal dari sumber biomassa yang relatif berbiaya rendah (Doungdej et al., 2025).

Di sisi lain, natrium silikat nonahidrat merupakan sumber silika anorganik yang relatif ekonomis dibandingkan prekursor organosilikat. Penggunaan silikat anorganik juga diketahui mampu mendukung pembentukan struktur mesopori yang stabil melalui metode sol-gel (Lyu dkk., 2020). Kombinasi natrium silikat dan HEC melalui metode sol-gel diketahui bisa menghasilkan material silika dengan struktur pori yang lebih berkembang (Doungdej dkk., 2025). Dengan demikian, kombinasi HEC sebagai pencetak pori dan natrium silikat sebagai sumber silika menjadi pendekatan yang menarik dalam sintesis silika mesopori berbasis bahan anorganik. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa penggunaan HEC sebagai *soft template* mampu menghasilkan silika dengan struktur mesopori yang berkembang serta mendukung dispersi Cu yang lebih merata pada material. Namun penelitian tersebut difokuskan pada aplikasi katalis sehingga potensi material HECMS-Cu sebagai agen antibakteri belum dievaluasi (Doungdej dkk., 2025).

Bakteri *E. coli* serta *S. aureus* dipergunakan selaku bakteri uji dalam penelitian aktivitas antibakteri karena mewakili kelompok bakteri Gram-negatif serta Gram-positif yang mempunyai karakteristik dinding sel berbeda (Nabilah dkk., 2025). Bakteri Gram-positif mempunyai lapisan peptidoglikan yang relatif tebal serta struktur dinding sel yang lebih sederhana, sementara bakteri Gram-negatif mempunyai lapisan peptidoglikan yang lebih tipis serta struktur dinding sel yang lebih kompleks (Hayati dkk., 2020). Perbedaan karakteristik dinding sel tersebut dapat mempengaruhi interaksi dan efektivitas bahan antibakteri berbasis ion logam sehingga kedua bakteri tersebut banyak digunakan untuk mengevaluasi aktivitas antibakteri suatu bahan.

Beberapa penelitian sebelumnya telah melaporkan sintesis material silika termodifikasi ion logam untuk berbagai aplikasi. Lyu dkk. (2020) berhasil mensintesis HECMS, Cu-HECMS, dan Ce-HECMS melalui metode sol-gel *one-pot* untuk aplikasi adsorpsi zat warna, sementara Nabilah dkk. (2025) melaporkan sintesis silika gel-Cu(II) yang menunjukkan aktivitas antibakteri terhadap *E. coli* dan *S. aureus*. Selain itu, Doungdej dkk. (2025) melaporkan penggunaan HEC sebagai *soft template* dalam sintesis silika berpori yang mampu meningkatkan dispersi Cu pada material untuk aplikasi katalis. Namun demikian, kajian mengenai

Pengaruh modifikasi Cu(II) terhadap karakteristik material HECMS serta aktivitas antibakterinya terhadap bakteri Gram-negatif serta Gram-positif masih sangat terbatas. Oleh karena itu, materi pengembangan HECMS dan HECMS-Cu melalui metode sol-gel *one-pot* untuk aplikasi antibakteri menjadi menarik untuk dipelajari lebih lanjut.

Berdasarkan uraian tersebut, sintesis HECMS-Cu telah dilaporkan untuk berbagai aplikasi dan material berbasis Cu-silika telah menunjukkan aktivitas antibakteri. Namun kajian mengenai pengaruh modifikasi Cu(II) terhadap karakteristik HECMS serta aktivitas antibakteri bahan HECMS dan HECMS-Cu terhadap bakteri Gram-negatif serta Gram-positif masih amat terbatas. Sehingga, studi ini dijalankan guna mensintesis HECMS dan HECMS-Cu melalui metode sol-gel *one-pot* serta mengevaluasi aktivitas antibakterinya terhadap bakteri *E. coli* serta *S. aureus* sebagai model bakteri Gram-negatif dan Gram-positif.

1.2 Tujuan Penelitian

Berikut tujuan dari penelitian ini.

1. Memperoleh komposit HECMS dan HECMS-Cu melalui metode sol-gel *one-pot* serta menentukan struktur kimia, morfologi, komposisi unsur, dan sifat pori material yang dihasilkan.
2. Menentukan aktivitas antibakteri dari komposit HECMS dan HECMS-Cu terhadap bakteri *E. coli*.
3. Menentukan aktivitas antibakteri dari komposit HECMS dan HECMS-Cu terhadap bakteri *S. aureus*.