

BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar belakang

Krisis energi global terus meningkat seiring dengan pertumbuhan kebutuhan energi yang tidak diimbangi oleh ketersediaan sumber energi fosil yang bersifat tidak terbarukan. Selain itu, penggunaan energi fosil berkontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca, terutama CO₂, sehingga berdampak negatif terhadap lingkungan dan mempercepat perubahan iklim (Osman dkk., 2023). Kondisi ini mendorong pengembangan sumber energi alternatif yang lebih berkelanjutan, ramah lingkungan, dan mampu memanfaatkan sumber daya secara efisien, salah satunya melalui pemanfaatan bioenergi berbasis biomassa dan limbah organik (Osman dkk., 2023). MFC menjadi teknologi bioelektrokimia yang menjanjikan karena mampu mengonversi energi kimia dari senyawa organik menjadi energi listrik secara langsung melalui aktivitas metabolik mikroorganisme, sekaligus berpotensi diaplikasikan dalam pengolahan limbah sebagai konsep *waste to energy* (Obileke dkk., 2021).

Prinsip kerja MFC melibatkan proses oksidasi substrat organik oleh mikroorganisme di anoda yang menghasilkan elektron dan proton, di mana elektron kemudian ditransfer ke elektroda dan mengalir melalui rangkaian eksternal untuk menghasilkan arus Listrik (Obileke dkk., 2021). Kinerja MFC sangat dipengaruhi oleh efisiensi metabolisme mikroorganisme serta kemampuannya dalam melakukan *extracellular electron transfer* (EET) ke permukaan elektroda. Dengan demikian, pemilihan mikroorganisme yang tepat, khususnya mikroorganisme elektroaktif,

menjadi faktor kunci dalam menentukan efisiensi produksi listrik pada sistem MFC (Araújo Soares dkk., 2025). Namun, Sebagian besar bakteri elektroaktif memiliki keterbatasan dalam menghadapi kondisi lingkungan ekstrem, seperti salinitas tinggi, yang dapat menghambat aktivitas metabolik, menurunkan efisiensi transfer elektron, dan berdampak pada penurunan performa sistem MFC (Castellano-Hinojosa dkk., 2025). Dalam hal ini, *Bacillus clausii* sebagai bakteri Gram positif yang bersifat halotoleran hingga halofilik memiliki kemampuan adaptasi yang baik melalui mekanisme osmoregulasi, seperti produksi senyawa osmoprotektan untuk menjaga kestabilan sel pada tekanan osmotik tinggi (Febriyanti & Asy'ari, 2024; Rafanomezantsoa dkk., 2025).

MFC memiliki potensi besar sebagai sumber energi terbarukan sekaligus sistem pengolahan limbah. Namun, kinerjanya masih dipengaruhi oleh berbagai faktor, terutama kondisi lingkungan yang dapat memengaruhi aktivitas metabolik mikroorganisme serta efisiensi transfer elektron ke elektroda, sehingga berdampak pada produksi listrik yang dihasilkan (Castellano-Hinojosa dkk., 2025). Pada sistem berbasis *Bacillus clausii* J1G-0%B, karakteristik elektrokimia yang dimiliki memang telah menunjukkan potensi yang baik, seperti kemampuan bertahan pada kondisi hipersalin dan berperan sebagai biokatalis (Christwardana dkk., 2025a). Namun, faktor-faktor yang dapat meningkatkan kinerja bakteri dari sisi metabolisme internal, seperti optimalisasi jalur metabolik, peningkatan produksi elektron, serta efisiensi pembentukan biofilm, masih belum banyak dieksplorasi secara mendalam.

Peningkatan performa MFC halofilik telah dilakukan melalui berbagai pendekatan, seperti optimasi kondisi lingkungan, penambahan nutrisi, modifikasi material elektroda, serta pengaturan pembentukan biofilm untuk meningkatkan efisiensi transfer elektron (Dakal dkk., 2025; R. Zhang dkk., 2025). Pada sistem berbasis *Bacillus clausii*, beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa optimasi kadar NaCl, penambahan sumber karbon seperti asetat, laktat, dan sitrat, serta penambahan sumber nitrogen mampu memengaruhi parameter penting, seperti nilai konstanta afinitas substrat (k_s), tegangan, densitas daya, serta jumlah biofilm yang terbentuk pada permukaan elektroda (Christwardana dkk., 2025a; Christwardana dkk., 2026; Christwardana dkk., 2025c). Hasil tersebut menegaskan bahwa kondisi lingkungan eksternal dan komposisi medium memiliki peran signifikan dalam menentukan kinerja MFC. Namun demikian, pendekatan-pendekatan tersebut umumnya masih berfokus pada aspek eksternal sistem. Padahal, aktivitas metabolisme bakteri juga sangat dipengaruhi oleh keberadaan kofaktor enzim yang berperan dalam jalur metabolisme sel (Y. Sun dkk., 2023).

Salah satu pendekatan yang berpotensi meningkatkan aktivitas metabolik mikroorganisme adalah penambahan vitamin B1 atau tiamin. Di dalam sel, tiamin akan dikonversi menjadi *thiamine pyrophosphate* (TPP). Senyawa ini berperan sebagai kofaktor penting bagi beberapa enzim kunci dalam metabolisme karbohidrat, seperti transketolase (TKT), pyruvate dehydrogenase (PDH), α -ketoglutarate dehydrogenase (α -KGDH), dan branched-chain α -ketoacid dehydrogenase (BCKDH) (Bettendorff & Wins, 2013; Zastre dkk., 2013). Enzim-enzim tersebut berperan dalam jalur metabolisme yang menghasilkan energi serta

senyawa pereduksi yang berkontribusi terhadap produksi elektron (Mao & Verwoerd, 2013; Zastre dkk., 2013).

Suplementasi tiamin dapat meningkatkan aktivitas metabolik mikroorganisme serta berkontribusi terhadap peningkatan produksi energi seluler melalui peningkatan pembentukan ATP (LeBlanc dkk., 2017). Peningkatan produksi energi seluler tersebut berkaitan dengan meningkatnya pembentukan reduktan seperti NADH dan FADH₂ yang berperan sebagai donor elektron dalam proses EET, sehingga berpotensi meningkatkan kinerja sistem bioelektrokimia seperti (B. E. Logan dkk., 2006). Hal ini menunjukkan bahwa aspek vitamin dan regulasi metabolisme internal berpotensi memengaruhi performa MFC. Namun, hingga saat ini belum banyak kajian yang secara spesifik membuktikan pengaruh suplementasi vitamin B1 terhadap metabolisme *Bacillus clausii* J1G-0%B dalam sistem MFC, khususnya terhadap karakteristik elektrokimia, performa listrik, dan pembentukan biofilm pada permukaan elektroda.

Untuk itu, dilakukan penelitian untuk mengatasi keterbatasan kinerja MFC melalui penambahan vitamin B1 (tiamin) pada proses inkubasi *Bacillus clausii* J1G-0%B. Koenzim NADH dan FADH₂ yang terbentuk dari hasil suplementasi vitamin B1 berfungsi sebagai donor elektron dalam rantai transpor elektron, sehingga berpotensi mendukung transfer elektron menuju anoda pada sistem MFC (B. E. Logan dkk., 2006). Adapun enzim-enzim kunci yang berperan dalam metabolisme tersebut juga terdapat pada bakteri *Bacillus clausii* J1G-0%B (Khatiri dkk., 2019; Willecke & Pardee, 1971). Dengan demikian, penambahan vitamin B1 berpotensi meningkatkan aktivitas metabolisme, produksi energi seluler, serta

aliran elektron menuju elektroda, yang pada akhirnya dapat memengaruhi kinerja elektrokimia MFC.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara sistematis pengaruh variasi konsentrasi vitamin B1 (tiamin) pada proses inkubasi *Bacillus clausii* J1G-0%B, serta dampaknya terhadap performa sistem MFC. Pengaruh tersebut akan diamati dari berbagai aspek, meliputi aktivitas metabolisme bakteri, karakteristik elektrokimia, kinerja MFC, serta kemampuan pembentukan biofilm pada permukaan elektroda. Untuk memperoleh gambaran yang komprehensif, analisis akan dilakukan melalui uji *half-cell* guna mengevaluasi karakteristik elektrokimia dasar, seperti perilaku redoks dan laju transfer elektron, serta uji *full-cell* untuk menilai performa aktual MFC, termasuk parameter tegangan dan densitas daya yang dihasilkan. Selain itu, analisis biofilm akan dilakukan untuk mengamati pembentukan dan ketebalan lapisan bakteri pada elektroda sebagai faktor penting dalam transfer elektron. Perbandingan antar variasi konsentrasi vitamin B1 akan digunakan untuk menentukan kondisi optimum yang memberikan pengaruh paling signifikan terhadap peningkatan kinerja sistem.

I.2. Tujuan Penelitian

1. Memperoleh dan mengetahui karakteristik elektrokimia sistem *MFC* yang menggunakan bakteri halofilik *Bacillus clausii* J1G-0%B pada berbagai variasi konsentrasi suplementasi vitamin B1.
2. Memperoleh kinerja MFC yang optimal dengan bakteri halofilik *Bacillus clausii* J1G-0%B pada berbagai konsentrasi vitamin B1.
3. Mendapatkan konsentrasi vitamin B1 yang memberikan efek paling baik terhadap peningkatan karakteristik elektrokimia dan performa MFC dengan bakteri halofilik *Bacillus clausii* J1G-0%B.