

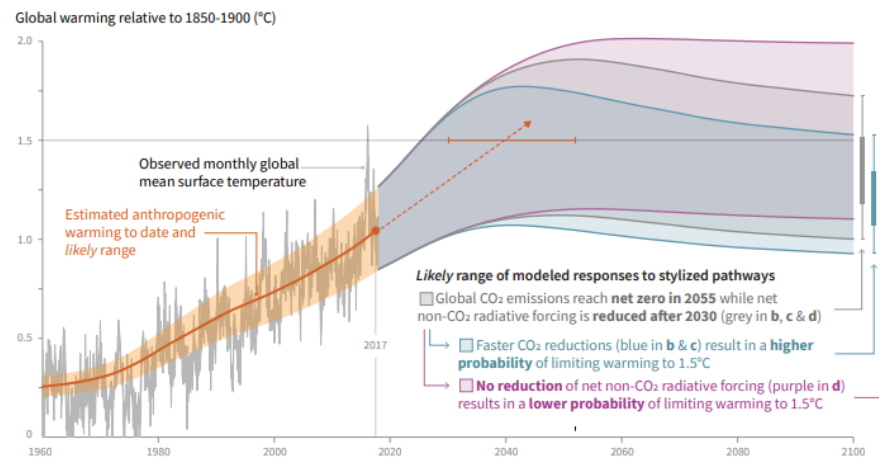
I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam menghadapi krisis iklim global, berbagai negara telah menetapkan target pencapaian *net zero emission*, yaitu kondisi ketika jumlah emisi gas rumah kaca yang dilepaskan ke atmosfer sebanding dengan jumlah yang diserap kembali melalui mekanisme alamiah maupun teknologi. Pada Gambar 1.1 menunjukkan proyeksi kenaikan suhu global relatif terhadap periode pra-industri (1850–1900) hingga dekade 2006–2015 suhu meningkat sekitar 0,75°C-0,99°C akibat aktivitas manusia (Allen *et al.* 2019). Konsentrasi CO₂ meningkat sekitar 20 ppm per dekade sejak tahun 2000, mencapai tingkat yang jauh melebihi perubahan alami dalam 800.000 tahun terakhir. Jika perkembangan saat ini berlanjut, suhu global diperkirakan naik 1,5°C pada sekitar tahun 2040 (Dotaniya, 2015; Mohanty *et al.*, 2015).

Negara Indonesia, sektor energi adalah penyumbang emisi karbon terbesar (43,83%), Emisi didominasi oleh pembangkit listrik (43%), diikuti oleh transportasi (24,8%), industri manufaktur (21,4%), residensial (4,0%), emisi dari minyak dan gas (2,8%), 2,4% untuk industri migas, 0,8% untuk yang tidak ditentukan, 0,4% emisi dari pertambangan batu bara permukaan, 0,3% untuk komersial, dan 0,003% untuk pengolahan batu bara (Boer *et al.*, 2021). Berdasarkan laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (Allen *et al.*, 2019; IPCC, 2018), untuk membatasi kenaikan suhu global di bawah 1,5°C dibandingkan era pra industri, emisi karbon dioksida (CO₂) global

perlu dikurangi sekitar 45% dari tingkat emisi tahun 2010 pada tahun 2030, dan mencapai *net zero* sekitar tahun 2050.



Gambar 1.1 Pemanasan Global Relatif terhadap Periode 1850–1900

(°C) (Allen *et al.*, 2019).

Pada tingkat nasional, komitmen terhadap pengendalian emisi gas rumah kaca telah dirumuskan dalam *Enhanced Nationally Determined Contribution (NDC)* tahun 2022 melalui UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*), Indonesia meningkatkan target penurunan emisinya menjadi 32% atau setara dengan 912 juta metrik ton CO₂. Berdasarkan skenario yang sesuai dengan target 1,5°C, emisi gas rumah kaca akan mencapai puncaknya pada tahun 2030 yaitu sebesar 1,24 giga metrik ton CO₂ dan kemudian akan terus menurun hingga mencapai 0,54 giga metrik ton CO₂ pada tahun 2050. Indonesia menargetkan untuk mencapai *net zero emission* pada tahun 2060 atau mungkin lebih cepat (Amelinda & Soekarno, 2023). Untuk mencapai sasaran tersebut, transisi energi menuju sumber energi rendah karbon menjadi langkah strategis (Allen *et al.*, 2019). Salah satu pendekatan yang

prospektif adalah pemanfaatan bahan bakar nabati seperti bioethanol yang telah terbukti mampu menurunkan emisi CO₂ sebesar 30%-70%, sedangkan bioetanol generasi kedua dapat mengurangi emisi CO₂ hingga 90%. Selain itu, bioetanol merupakan bahan bakar terbarukan yang berpotensi mengurangi polusi gas karena bioetanol menghasilkan lebih sedikit emisi partikulat, sulfur dioksida, dan racun udara daripada bahan bakar fosil (Iskandar *et al.*, 2022). Perubahan ini menimbulkan risiko yang signifikan terhadap pertanian, sumber daya air, kesehatan manusia, dan infrastruktur, sehingga mempengaruhi stabilitas ekonomi dan kesejahteraan sosial. Oleh karena itu, mitigasi emisi CO₂ merupakan prioritas global yang sangat penting yang membutuhkan solusi yang inovatif dan berkelanjutan (Alli *et al.*, 2024).

Pendekatan yang sedang berkembang dan transformatif dalam ilmu lingkungan adalah konsep mengubah CO₂ dari limbah menjadi sumber daya yang berharga. Salah satu pendekatannya yaitu dengan teknologi *Carbon Capture and Utilization* (CCU) merupakan teknologi yang bertujuan untuk mengubah CO₂ menjadi sumber daya untuk membuat produk yang berharga (Haverkämper *et al.*, 2023). Dengan menangkap emisi CO₂ pada sumbernya dan memanfaatkannya kembali menjadi produk yang bernilai komersial, CCU mendorong pengembangan ekonomi karbon sirkular. Dalam model ini, CO₂ didaur ulang secara terus menerus dan tidak dilepaskan ke atmosfer, sehingga secara signifikan mengurangi dampak lingkungan. Selain mengurangi jejak karbon global, pendekatan ini membuka aplikasi industri baru dan mendorong pertumbuhan ekonomi dengan menciptakan pasar untuk produk inovatif yang

berasal dari CO₂. Meskipun banyak tinjauan telah mengeksplorasi berbagai aspek CCU (Davoodi *et al.*, 2023; McLaughlin *et al.*, 2023). Dengan demikian, teknologi CCU berperan penting dalam mendukung transisi energi yang lebih berkelanjutan dengan mengubah CO₂ menjadi produk bernilai tinggi seperti bahan kimia, bahan bakar, bahan bangunan, dan polimer melalui proses katalitik, elektrokimia, dan biologis (Alli *et al.*, 2024).

Proses konversi biologis dan enzimatik menawarkan jalur inovatif untuk mengubah karbon dioksida (CO₂) dan bahan baku lainnya menjadi produk yang berharga. Fermentasi mikroba adalah teknik yang memanfaatkan kemampuan alami mikroorganisme untuk mengubah CO₂ menjadi bahan bakar, bahan kimia, dan material. Salah satu konversi dari hasil fermentasi mikroba yaitu bioetanol yang memanfaatkan mikroba dengan penyerapan substrat seperti CO₂ dan terjadi konversi metabolisme dengan menggunakan enzim di dalam mikroorganisme yang mengkatalis reaksi serta mengubah substrat menjadi *intermediate metabolites*, metabolit ini selanjutnya diubah menjadi produk akhir yang dapat disekresikan oleh sel (Alli *et al.*, 2024).

Hingga saat ini, sebagian besar penelitian berfokus pada produksi bioetanol dari bahan baku lignoselulosa. Namun, keberlanjutan bahan baku ini masih menjadi perdebatan karena beberapa alasan yang perlu diperhatikan. Pertama, beberapa bahan baku lignoselulosa, seperti jagung, tebu, dan kelapa sawit juga merupakan sumber pangan yang sangat penting, sehingga menimbulkan persaingan antara sektor pangan dan energi (Bertrand *et al.*, 2016). Kedua, bahan baku lignoselulosa berbasis limbah agroindustri sering

kali tersedia secara musiman, sehingga kurang mendukung produksi skala industri dalam jangka panjang (Limayem & Ricke, 2012). Ketiga, memanfaatkan bahan baku lignoselulosa berbasis limbah perkotaan cukup sulit untuk diproses karena adanya campuran berbagai komponen, termasuk logam, kertas, plastik, dan sisa makanan, terutama di Indonesia, yang menyulitkan tahap prahulu produksi bioetanol (Farmanbordar *et al.*, 2020).

Sumber karbon alternatif yang dapat digunakan dalam produksi bioetanol dengan memanfaatkan substrat karbon tunggal (C1) antara lain metanol, sodium format (Cheon *et al.*, 2023). Pemanfaatan metanol, dan sodium format sebagai bahan baku kimia memainkan peran penting dalam berbagai proses industri, memberikan kontribusi untuk produksi berbagai produk bernilai tambah (Alli *et al.*, 2024). Metanol merupakan alkohol sederhana yang dapat diperoleh dari gas alam, biomassa, atau hasil konversi CO₂ melalui proses hidrogenasi (Dalena *et al.*, 2018). *Formic Acid* adalah asam karboksilat paling sederhana. Penemuan asam ini pada produk distilasi semut biasanya dikaitkan dengan ilmuwan Inggris John Gray pada tahun 1671, meskipun ada bukti bahwa Samuel Fisher telah membuat penemuan tersebut setahun sebelumnya. Nama “format” berasal dari kata *formica*, bahasa latin untuk semut, yang juga merupakan nama genus dari banyak spesies semut. (Hietala *et al.*, 2016). Selain senyawa berbasis karbon satu, glukosa juga dapat menjadi sumber karbon alternatif yang banyak digunakan dalam fermentasi bioetanol karena ketersediaannya yang melimpah dan efisiensi penggunaannya oleh berbagai mikroorganisme. Penggunaan substrat berbasis karbon satu (C1) ini

memungkinkan produksi bioetanol yang lebih berkelanjutan serta mengurangi ketergantungan terhadap bahan baku konvensional berbasis lignoselulosa atau pangan (Espinosa *et al.*, 2020).

Salah satu mikroorganisme yang berpotensi dalam produksi bioetanol adalah *Ogataea*, yaitu genus dari khamir metilotrofik yang mampu memanfaatkan metanol sebagai sumber karbon dalam metabolisme dan fermentasi etanol. *Ogataea* dianggap cocok untuk biokonversi metanol yang efisien karena memiliki karakteristik untuk potensi adaptasi yang lebih baik pada lingkungan metanol yang tinggi (Cai *et al.*, 2022). Selain keunggulannya dalam memanfaatkan metanol, pemilihan *Ogataea* dalam penelitian ini didasarkan pada kombinasi karakter yang lebih unggul dibanding khamir metilotrof lainnya, seperti *Candida* maupun *Komagataella*. *Ogataea* memiliki karakteristik unggul, seperti toleransi terhadap rentang pH yang luas, kemampuan tumbuh hingga kepadatan sel yang tinggi, dan promotor induksi metanol yang kuat. Secara khusus, kemampuannya untuk mentoleransi suhu hingga 50°C menjadikannya organisme yang menjanjikan untuk produksi bahan kimia berbasis metanol (Manfrão-Netto *et al.*, 2019; Zhai *et al.*, 2021; Wefelmeier *et al.*, 2023).

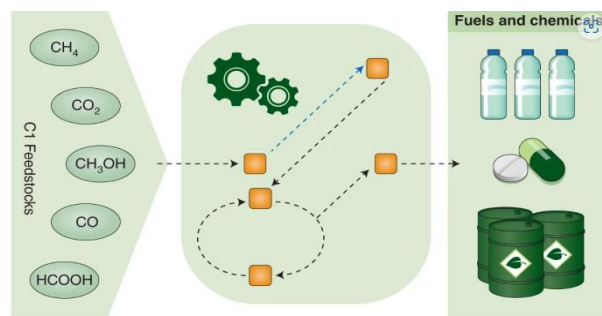
Pada *Komagataella* spp. suhu optimal di mana pertumbuhan terbaik terjadi pada kisaran 28-30°C, dan suhu di atas 32°C dapat menurunkan viabilitas sel dan ekspresi protein (Carneiro *et al.*, 2022). Sementara itu, *Candida* spp. meskipun juga mampu memanfaatkan metanol tetapi regulasi ekspresinya lebih longgar atau (*less tight*) dibanding *Ogataea* dan

pertumbuhannya menunjukkan efisiensi pemanfaatan yang relatif rendah pada suhu 30°C (Zhai *et al.*, 2021; Jigami *et al.*, 1979). Berdasarkan penelitian, *Ogataea sp.* ditemukan berasal dari *gut dissection* (Liebal *et al.*, 2021).

Kemampuan unggul *Ogataea* dalam asimilasi substrat C1 (khususnya metanol) menetapkan sebagai platform mikrobial yang menjanjikan untuk pengembangan teknologi produksi bioetanol berbasis *Carbon Capture and Utilization* (CCU) yang berkelanjutan (Li *et al.*, 2022). Salah satu opsi inovatif menggabungkan konversi CO₂ menjadi senyawa C1 seperti metanol atau asam format dengan aplikasi selanjutnya dalam fermentasi metilotrofik mikroba. Secara umum, metanol atau sodium format merupakan sumber karbon utama dalam metilotrof. Mikroba metilotrofik adalah kelompok mikroorganisme yang beragam, seperti bakteri atau khamir, yang mampu memanfaatkan senyawa karbon satu tereduksi untuk pertumbuhan, pembangkitan energi, dan pada akhirnya produksi bahan kimia, material, atau bahan pangan dan pakan bernilai tambah. Salah satu mikroorganisme seperti *Ogataea* yang mampu memanfaatkan sumber karbon alternatif, dan dapat menjadikannya lebih berkelanjutan serta mendukung upaya mitigasi perubahan iklim global (Wegat *et al.*, 2022).

Pada Gambar 1.2 menampilkan biomanufaktur berbasis C1 yang mengasimilasi senyawa karbon C1 seperti metanol, formaldehida, atau metana. Diagram ini menunjukkan bagaimana C1 *feedstock* diambil oleh sel mikroba dan diubah melalui serangkaian reaksi enzimatik menjadi metabolit perantara metabolit ini selanjutnya diubah menjadi produk akhir seperti bahan bakar dan

semacamnya. Berdasarkan tantangan keberlanjutan energi dan keunggulan biologis dari khamir metilotrof seperti *Ogataea*, diperlukan penelitian yang berfokus pada pemanfaatan substrat turunan CO₂ untuk fermentasi bioetanol. Penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan alternatif baru dalam teknologi bioenergi, tetapi juga memperkuat kontribusi bioteknologi dalam mitigasi perubahan iklim.



Gambar 1.2 Biomanufaktur berbasis C1 (Jiang *et al.*, 2021).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian yang dilakukan yaitu:

- 1.2.1 Bagaimana kemampuan strain *Ogataea philodendri* dalam memanfaatkan glukosa, metanol, dan sodium format sebagai sumber karbon untuk produksi bioetanol?
- 1.2.2 Apakah perbedaan substrat karbon (glukosa, metanol, dan sodium format) memengaruhi morfologi sel khamir sebagaimana terlihat dari hasil SEM?
- 1.2.3 Bagaimana potensi substrat yang berasal dari CO₂ untuk mendukung pertumbuhan dan aktivitas fermentasi khamir dalam menghasilkan etanol?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

- 1.3.1 Mengevaluasi kemampuan khamir *Ogataea philodendri* yang mampu memanfaatkan substrat berbasis CO₂ sebagai sumber karbon dalam fermentasi etanol.
- 1.3.2 Mengamati dan mendeskripsikan morfologi sel *Ogataea philodendri* pada masing-masing substrat karbon menggunakan SEM.
- 1.3.3 Mengevaluasi potensi substrat berbasis karbon dari CO₂ (seperti metanol, dan sodium format) dalam mendukung pertumbuhan khamir dan aktivitas fermentasinya dalam menghasilkan etanol.

1.4 Manfaat penelitian

Kegiatan ini diharapkan memberikan manfaat bagi mahasiswa sebagai berikut:

- 1.4.1 Memberikan solusi inovatif bagi industri bioetanol dengan menawarkan alternatif khamir yang lebih efektif dalam memanfaatkan CO₂ sebagai sumber karbon, sehingga meningkatkan produktivitas dan mengurangi biaya produksi.
- 1.4.2 Penelitian ini dapat berkontribusi pada pemanfaatan CO₂, yang merupakan gas rumah kaca, sebagai sumber karbon dalam fermentasi etanol, membantu mengurangi emisi karbon dioksida di atmosfer.