

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sampah plastik menjadi salah satu tantangan global utama dalam perkembangan lingkungan dari waktu ke waktu. Plastik memainkan peran penting dalam kehidupan manusia karena serbaguna, tahan korosi, dapat terisolasi dengan baik, serta memiliki konduktivitas panas yang rendah. Berdasarkan hal ini produksi plastik tahunan di seluruh dunia akan terus meningkat (Zhu & Wang, 2020). Menurut Guglielmi (2017) diperkirakan di tahun 2050 sampah plastik paska konsumsi akan menghasilkan sebanyak 26 miliar, dengan sebagian dari sampah tersebut langsung dibuang ke lingkungan dan hanya kurang dari 10% plastik tersebut akan didaur ulang. Berdasarkan data dari Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPN), di tahun 2024 Indonesia telah menyumbang sampah sebanyak 35 juta ton, dengan sekitar 19,64% dari keseluruhan sampah tersebut adalah sampah plastik. Sampah yang dikelola mencapai 62,85% atau sekitar 22 juta ton pertahun. Namun, sampah yang tidak terkelola masih cukup banyak, yakni sekitar 37,15% atau 13 juta ton pertahunnya.

Permasalahan ini dapat ditangani dengan pengembangan dan penggunaan plastik *biodegradable*. Wang *et al.*, (2016) menyatakan bahwa plastik *biodegradable* ini mampu terurai menjadi karbon dioksida (CO₂) dan air (H₂O) dalam jangka waktu yang lebih singkat dibandingkan dengan plastik konvensional yang membutuhkan waktu seratus hingga ribuan tahun. Proses

penguraian dipengaruhi oleh beberapa faktor eksternal, seperti kelembaban, oksigen, dan jumlah mikroba yang ada di lingkungan telah sesuai. Menurut Briassoulis *et al.*, (2021) plastik *biodegradable* merupakan plastik yang mudah terurai oleh aktivitas dari berbagai mikroba. Penggunaan plastik *biodegradable* dalam jangka panjang mampu mengurangi emisi gas rumah kaca. Hal tersebut disebabkan plastik *biodegradable* diproduksi dengan bahan alami atau terbarukan sehingga dapat mengurangi ketergantungan terhadap minyak bumi dan akan mengurangi jumlah emisi karbon ke atmosfer (Coppola *et al.*, 2021).

Berdasarkan sumber untuk produksinya polimer *biodegradable* ini terbagi menjadi dua jenis, yakni dengan menggunakan biomassa dari tumbuhan dan memanfaatkan mikroba. Jenis biomassa tumbuhan yang digunakan dapat berupa pati, selulosa, gelatin, wol, lemak, dan minyak (Ranakoti *et al.*, 2018). Penelitian yang telah dilakukan oleh Narancic *et al.*, (2018) menyatakan bahwa plastik *biodegradable* khususnya yang terbuat dari pati tidak memiliki kinerja sebaik plastik non-*biodegradable* sehingga perlu memadukan polimer khusus untuk mendapatkan karakteristik yang sesuai atau memanfaatkan mikroba untuk menghasilkan polimer yang lebih kuat. Macam-macam polimer yang diproduksi dengan memanfaatkan mikroba diantaranya adalah *poly lactic acid* (PLA), *polyhydroxyalkanoates* (PHA), *polyglcolide* (PGA), dan lain sebagainya (Karande *et al.*, 2015).

Jenis bakteri yang umum digunakan untuk memproduksi polimer *biodegradable* ialah bakteri asam laktat. Bakteri asam laktat (BAL) yang umumnya hanya digunakan di bidang makanan, saat ini dapat diaplikasikan ke

berbagai industri, khususnya industri pembuatan plastik *biodegradable*. Bakteri asam laktat adalah bakteri Gram positif yang memiliki toleransi terhadap kondisi asam dan berbentuk bulat atau batang (Nicolescu *et al.*, 2023). Bakteri asam laktat ini juga mampu menghasilkan asam organik, seperti asam laktat dan asam asetat melalui metabolisme tertentu (Bintsis 2018). Berdasarkan mekanisme untuk memproduksi asam laktat, bakteri ini dibagi menjadi tiga jenis, yakni homofermentatif dan heterofermentatif. BAL homofermentatif mengubah gula heksosa menjadi asam laktat melewati jalur Embden-Meyerhof-Parnas (EMP-P), sementara BAL golongan heterofermentatif mengubah heksosa dan pentosa menjadi asam laktat melalui jalur fosfoketolase (PKP) ataupun pentosa fosfoketolase (PPP). Bakteri asam laktat heterofermentatif fakultatif mengubah dua jenis gula di dua jalur yang berbeda, yaitu heksosa melewati jalur EMP-P dan pentosa melalui PKP/PPP (Zhang *et al.*, 2018).

Menurut Nduko & Taguchi (2021) asam laktat yang dihasilkan oleh bakteri ini memiliki enansiomer berupa L-laktat dan D-laktat. Asam L-laktat merupakan bentuk enansiomer yang paling dominan digunakan di berbagai industri, khususnya industri makanan dan telah diproduksi dalam skala besar melalui fermentasi bakteri asam laktat. Sementara itu, asam D-laktat ini kurang umum diaplikasikan di industri (Huang *et al.*, 2021). Menurut Yu *et al.*, (2023) sifat fisik dan kimia dari asam L-laktat dan asam D-laktat memiliki kesamaan. Suhu lebur dari kedua isomer tersebut berada di kisaran 52,7°C - 53°C, titik didih berada di suhu 16,4°C hingga 18°C, dan nilai pKa sekitar 3,79 hingga

3,86. Dengan selarasnya sifat fisik dan kimia yang dimiliki oleh asam D-laktat dan asam L-laktat menyebabkan sulitnya untuk memisahkan kedua isomer tersebut ketika bakteri asam laktat tidak memiliki kemampuan untuk menghasilkan kemurnian yang tinggi disalah satu isomernya. Kondisi tersebut sangat menentukan kualitas dari polimer poli-asam laktat (PLA).

Poli-asam laktat (PLA) dianggap sebagai biopolimer inovatif dan cukup banyak diproduksi sebagai plastik *biodegradable*, yang diperkirakan jumlah produksinya sekitar 0,88 juta ton pada tahun 2017 dan akan meningkat hingga 5,33 juta di tahun 2026 (Ali *et al.*, 2023). Sintesis poli-asam laktat ini mampu menghasilkan empat konfigurasi, yakni poli (L-laktida) (PLLA), poli (D-laktida) (PDLA), poli (meso-laktida), dan poli (*rac*-latida) (PDLLA) (Nofar *et al.*, 2019). Annunziata *et al.*, 2017 menyatakan bahwa L-laktat memiliki kristalinitas yang lebih tinggi dibandingkan D-laktat, meskipun daya penyerapan cenderung lebih lambat. Hal tersebut yang memengaruhi sifat keseluruhan dari PLLA dan PDLA yang dihasilkan, yang mana PLLA memiliki sifat hemikristalin, sementara PDLA bersifat amorf dan sifat tersebut menjadi alasan PLLA lebih banyak digunakan di bidang medis. Penggunaan PLA, khususnya PLLA di bidang medis sangat diminati sejak tahun 1960-an karena serbaguna dan mampu dapat dicetak menjadi beberapa struktur, seperti perangkat untuk perbaikan tulang rawan, jaringan otot, dan trakea, serta pencangkokan tulang. Pada penelitian yang dilakukan Oh *et al.*, (2023) PLLA digunakan untuk memperbaiki volume di kulit. Polimer tersebut merangsang

fibroblas yang diinduksi oleh makrofag untuk mensintesis kolagen sehingga volume kulit dapat bertambah.

Selain asam laktat yang umum digunakan untuk pembuatan polimer *biodegradable* berupa poli-asam laktat (PLA), salah satu jenis produk sampingan dari bakteri asam laktat yang dapat dimanfaatkan sebagai polimer plastik adalah asam fenil laktat. Asam fenil laktat ini menghasilkan polimer berupa *poly (phenyllactic acid)* (PPhLA). Polimer ini membentuk dua stereoisomer berupa *poly (L-phenyllactic acid)* (PPhLLA) dan *poly (D-phenyllactic acid)* (PPhDLA). Tiap enansiomer dari asam ini memiliki sifat yang mirip, tetapi untuk memproduksi plastik *biodegradable* tersebut membutuhkan PPhLA yang murni secara optik. Contohnya hanya menggunakan asam L-fenil laktat ataupun asam D-fenil laktat sebagai monomer pembuatan *poly (phenyllactic acid)* (Zheng *et al.*, 2015).

Kedua jenis polimer tersebut memiliki biodegradabilitas dan degradabilitas yang cukup baik. Selain itu, stabilitas termal dari polimer ini lebih baik dibandingkan dengan polimer lainnya (Lee *et al.*, 2024). Menurut Zheng *et al.*, (2015) *poly (L-phenyllactic acid)* memiliki sifat penyerapan sinar UV lebih baik dibandingkan dengan poli (L-asam laktat) (PLLA). Hal tersebut disebabkan PPhLLA memiliki rantai samping aromatik yang besar pada C3. Selain itu, *poly (D-phenyllactic acid)* (PPhDLA) juga memiliki sifat ketahanan dan stabilitas termal yang lebih baik dibandingkan dengan poli (D-asam laktat) (Kawaguchi *et al.*, 2017).

Secara garis besar, produksi asam laktat dan asam fenil laktat ini dipengaruhi oleh enzim laktat dehidrogenase (LDH). Enzim tersebut memiliki dua jenis, yakni L-laktat dehidrogenase (L-LDH) dan D-laktat dehidrogenase (D-LDH). Kedua enzim ini berperan penting untuk mengubah asam piruvat menjadi asam D/L-laktat maupun asam D/L-fenil laktat (Sun *et al.*, 2016). Aktivitas dari tiap enzim tersebut disandi oleh gen *ldh*. Gen *ldhL* menyandi enzim L-laktat dehidrogenase, sementara gen *ldhD* menyandi enzim D-laktat dehidrogenase (Ge *et al.*, 2015). Di sisi lain, Lee *et al.*, (2019) menyatakan bahwa gen *ldh* berhubungan secara evolusioner dengan gen 2-hidroksi asam dehidrogenase (*2-HADH*). Kedua gen tersebut mengkode enzim dari *family* oksidoreduktase yang memiliki dua motif Rossmann-*fold* dan membentuk domain katalitik serta pengikat kofaktor yang serupa. Meskipun memiliki kesamaan domain dengan gen *ldh*, gen *2-HADH* ini hanya berperan secara spesifik untuk menghasilkan asam fenil laktat (Matelska *et al.*, 2018).

Beberapa asam laktat dan asam fenil laktat yang diproduksi di industri dihasilkan melalui fermentasi menggunakan glukosa. Fermentasi dengan glukosa memerlukan konsumsi energi yang cukup tinggi. Selain glukosa terdapat banyak jenis gula lainnya yang mampu digunakan sebagai substrat dalam fermentasi. Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah penggunaan substrat lignoselulosa yang tersedia secara melimpah di alam dan bersifat terbarukan. Lignoselulosa terdiri atas selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Selulosa juga mengandung glukosa, tetapi tidak sering digunakan sebagai substrat. Hal tersebut dikarenakan struktur dari selulosa ini lebih kaku dan tidak

mudah untuk terdegradasi oleh enzim pada bakteri. Sementara hemiselulosa ini memiliki struktur yang lebih amorf dan mudah terdegradasi oleh bakteri sehingga lebih efisien dalam proses fermentasi. Namun, pemanfaatan hemiselulosa, khususnya xilosa sebagai substrat masih terbatas. Hal ini disebabkan hanya sedikit mikroba yang mampu mengolah xilosa sebagai substrat (Abdel-Rahman, 2016). Salah satu genus bakteri asam laktat yang memiliki kemampuan untuk mengonsumsi xilosa dengan baik adalah *Lactobacillus* (Zhang *et al.*, 2015). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan sumber karbon berupa xilosa dalam menghasilkan rasio D-/L- laktat, asam laktat, dan asam fenil laktat selama fermentasi, serta gen yang memengaruhinya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian di atas dapat dirumuskan beberapa masalah sebagai berikut:

- 1.2.1 Apakah perbedaan konsentrasi glukosa + xilosa dapat memengaruhi rasio asam D-/L-laktat dan produk asam laktat secara keseluruhan yang dihasilkan oleh beberapa bakteri asam laktat selama fermentasi?
- 1.2.2 Apakah asam fenil laktat dapat dihasilkan oleh bakteri asam laktat yang digunakan dalam penelitian ini?
- 1.2.3 Bagaimana sekuen gen penyandi pada bakteri uji mampu memengaruhi produk asam laktat dan asam fenil laktat yang dihasilkan?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1.3.1 Mengetahui pengaruh konsentrasi glukosa + xilosa terhadap rasio asam D-/L-laktat yang produk asam laktat secara keseluruhan dihasilkan oleh beberapa bakteri asam laktat selama proses fermentasi.
- 1.3.2 Mengetahui kemampuan bakteri asam laktat untuk memproduksi asam fenil laktat.
- 1.3.3 Mengevaluasi pengaruh gen penyandi untuk produksi asam laktat dan asam fenil laktat selama fermentasi.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan manfaat bagi mahasiswa sebagai berikut:

- 1.4.1 Memberikan gambaran tentang pengaruh glukosa + xilosa terhadap rasio D-/L- laktat dan jumlah asam laktat yang dihasilkan.
- 1.4.2 Memberikan gambaran terkait kemampuan bakteri asam laktat dalam menghasilkan asam fenil laktat.
- 1.4.3 Memberikan pemahaman lebih lanjut mengenai gen yang berperan untuk produksi asam laktat dan asam fenil laktat.
- 1.4.4 Sebagai bahan pertimbangan dan masukan dalam melakukan pengembangan *strain* rekombinan dengan karakteristik lebih baik untuk produksi polimer *biodegradable*.