

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mikrobiologi Agregasi Mikroba

Agregasi mikroba merupakan fenomena biologis yang terjadi ketika sel-sel mikroba berkumpul membentuk struktur komunitas yang lebih besar. Proses ini dapat terjadi dalam kondisi aerob maupun anaerob dan memiliki peran penting dalam ekosistem serta aplikasi industri. Agregasi mikroba terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu auto-agregasi (antar sel dari spesies yang sama) dan ko-agregasi (antar sel dari spesies yang berbeda). Fenomena ini memainkan peran penting dalam berbagai aplikasi, termasuk pengolahan limbah, fermentasi pangan, serta mekanisme pertahanan terhadap lingkungan yang tidak menguntungkan. (Doloman & Sousa, 2024)

Auto-agregasi terjadi melalui interaksi spesifik antara struktur permukaan sel, termasuk eksopolisakarida (EPS), protein adhesin, dan pili. Sementara itu, ko-agregasi melibatkan interaksi antarspesies melalui pengikatan reseptor-ligand atau interaksi elektrostatis. Studi mengenai agregasi mikroba dalam lingkungan anaerob sangat penting untuk memahami bagaimana mikroba bertahan dan berinteraksi dalam kondisi yang minim oksigen, seperti di saluran pencernaan, sistem pengolahan limbah anaerob, dan fermentasi industri. (Chen et al 2021).

2.2 Bakteri Asam Laktat (BAL)

2.2.1 Deskripsi Bakteri Asam Laktat

Bakteri Asam Laktat (BAL) merupakan kelompok bakteri gram positif yang memanfaatkan karbohidrat sebagai sumber karbon utama. BAL umumnya berbentuk kokus atau basil, tahan terhadap lingkungan asam (pH rendah) (Wang et al., 2021), bersifat anaerob fakultatif, tidak menghasilkan enzim katalase, dan tidak membentuk endospora (Fachrial et al., 2022). Pada proses metabolisme, bakteri ini mengubah karbohidrat melalui fermentasi dengan menghasilkan asam laktat sebagai produk utama (Fachrial et al., 2022).

BAL tergolong dalam kategori Generally Recognized as Safe (GRAS) karena tidak bersifat patogen dan aman bagi manusia, sehingga berpotensi sebagai pengawet alami. Melalui metabolisme, BAL menghasilkan senyawa antimikroba seperti asam organik, hidrogen peroksida, diasetil, serta bakteriosin—protein yang menghambat pertumbuhan mikroba patogen seperti *Listeria*, *Clostridium*, *Bacillus*, dan *Enterococcus* (Asnita & Meryandini, 2023).

2.2.2 Klasifikasi Bakteri Asam Laktat

BAL diklasifikasikan ke dalam empat genus utama, yaitu *Lactobacillus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus*, dan *Streptococcus*. Selain itu, terdapat genus lain seperti *Enterococcus*, *Lactococcus*, *Weisella*, *Carnobacterium*, *Vagococcus*, dan *Oenococcus* (Mastuti, 2022).

2.2.3 Peran Bakteri Asam Laktat

1. Peran dalam Industri Pangan

BAL berperan krusial dalam fermentasi dan pengawetan makanan. Kemampuannya menghambat pertumbuhan mikroba patogen melalui produksi senyawa antimikroba memperpanjang umur simpan produk pangan (Sine, 2023). Fermentasi, sebagai bagian bioteknologi, melibatkan penguraian karbohidrat oleh mikroorganisme menjadi asam organik, polisakarida, gula reduksi, dan senyawa lain yang berpotensi sebagai probiotik (Padang et al., 2024).

Contoh produk fermentasi berbasis BAL antara lain keju, tapai, tempe, terasi, serta makanan tradisional yang memakai bahan-bahan tersebut. BAL turut memengaruhi karakteristik produk melalui peningkatan cita rasa, tekstur, dan nilai gizi (Padang et al., 2024).

2. Peran dalam Kesehatan

Sebagai probiotik, LAB membantu menjaga keseimbangan mikrobiota usus dan mendukung kesehatan pencernaan. Beberapa strain LAB menghasilkan eksopolisakarida (EPS) yang memiliki sifat antitumor, antiulkus, dan

antiinflamasi. EPS juga meningkatkan respons imun tubuh terhadap infeksi (Nasution, 2022).

2.3 Konsep Dasar Autoagregasi

Autoagregasi merupakan proses di mana sel-sel mikroorganisme dari populasi yang sama saling menempel dan membentuk kelompok atau kluster. Proses ini terjadi secara spontan dan didorong oleh interaksi antar molekul pada permukaan sel. Salah satu komponen kunci dalam proses ini adalah eksopolisakarida (EPS), yang berfungsi sebagai matriks polimerik yang menghubungkan sel-sel individu. EPS tidak hanya memberikan dukungan struktural, tetapi juga menciptakan lingkungan mikro yang kondusif bagi interaksi seluler, sehingga memungkinkan terbentuknya agregat yang stabil. Menurut Petrova et al. (2022), EPS memainkan peran sentral dalam menjaga integritas komunitas mikroba, terutama dalam kondisi lingkungan yang fluktuatif.

Autoagregasi merujuk pada kemampuan bakteri untuk saling melekat sehingga membentuk koloni yang kokoh dan stabil. Proses ini memungkinkan interaksi antar bakteri dalam membentuk jaringan kompleks yang meningkatkan ketahanan hidup dan kemampuan reproduksi mereka. Dengan demikian, autoagregasi merupakan atribut vital bagi bakteri probiotik dalam menjaga kelangsungan hidup mereka di lingkungan yang kompetitif, seperti saluran pencernaan (Riani et al., 2020).

Selain EPS, protein adhesin juga menjadi elemen penting dalam autoagregasi. Protein adhesin berperan sebagai “jembatan” molekuler yang memungkinkan sel untuk saling mengenali dan berikatan satu sama lain. Variasi dalam tingkat ekspresi protein adhesin antar strain BAL seringkali menghasilkan perbedaan signifikan dalam kemampuan mereka untuk membentuk agregat. Dengan demikian, autoagregasi tidak hanya merupakan fenomena mekanistik semata, tetapi juga mencerminkan keanekaragaman genetik dan fisiologis di antara BAL.

Keterbentukan kelompok oleh koloni sejenis (autoagregasi) memberikan kontribusi positif terhadap kestabilan mikroflora usus dan berfungsi sebagai penghalang terhadap infeksi bakteri patogen. Skor autoagregasi di bawah 20%

dikategorikan sebagai rendah, nilai antara 20% hingga 70% diklasifikasikan sebagai sedang, sedangkan skor yang melebihi 70% dianggap sebagai tinggi (Setiarto, 2021).

2.4 Mekanisme Molekuler dalam Autoagregasi pada BAL

Secara molekuler, proses autoagregasi melibatkan interaksi kompleks antara komponen-komponen permukaan sel. EPS yang disintesis oleh BAL berfungsi sebagai "lem" alami yang menempelkan sel-sel bersama-sama. Di samping itu, struktur seperti pili atau fimbriae turut berperan dalam meningkatkan kekuatan ikatan antar sel. Pili, yang merupakan struktur protein berbentuk heliks, berperan dalam memediasi kontak awal antar sel dan meningkatkan afinitas adhesi. Hasil penelitian oleh Lin *et al.* (2019) menegaskan bahwa ekspresi pili dan adhesin sangat berkorelasi dengan tingkat autoagregasi pada BAL.

Komponen molekuler lain yang turut terlibat adalah protein adhesin. Protein ini memungkinkan sel untuk mengenali dan mengikat sel sejenis dengan selektivitas tinggi. Perbedaan dalam ekspresi dan struktur adhesin antar strain dapat menghasilkan variasi dalam kekuatan dan kestabilan agregat yang terbentuk. Dengan kata lain, semakin tinggi ekspresi adhesin, semakin kuat pula kecenderungan sel untuk melakukan autoagregasi. Mekanisme molekuler ini mendasari kemampuan BAL untuk bertahan di lingkungan yang menantang, seperti dalam kondisi fermentasi atau di dalam saluran pencernaan, di mana stabilitas struktur biofilm sangat penting untuk kelangsungan hidup mikroorganisme.

2.5 Hubungan Autoagregasi dengan Pembentukan Biofilm

Pembentukan biofilm merupakan salah satu konsekuensi langsung dari autoagregasi. Biofilm adalah struktur tiga dimensi yang terdiri dari komunitas mikroba yang tertanam dalam matriks EPS. Proses pembentukan biofilm dimulai dengan adhesi sel ke permukaan, dilanjutkan dengan pertumbuhan dan pembentukan agregat yang semakin kompleks. Biofilm memiliki peran penting dalam melindungi sel-sel mikroba dari stres lingkungan, seperti perubahan pH, keberadaan antibiotik, dan serangan patogen. Dalam konteks BAL, biofilm yang

terbentuk melalui autoagregasi mendukung fungsi probiotik dengan meningkatkan kemampuan sel untuk bertahan dan berkolonisasi di dalam usus manusia.

Autoagregasi berperan dalam pembentukan biofilm, yaitu lapisan yang dihasilkan oleh koloni bakteri. Biofilm ini menyediakan perlindungan terhadap kondisi ekstrem di usus, seperti paparan asam lambung, aktivitas enzim pencernaan, dan zat antimikroba. Selain itu, biofilm juga berperan sebagai penghalang fisik yang mencegah bakteri patogen menempel pada dinding usus (Purbowati et al., 2024).

Selain itu, biofilm memfasilitasi terjadinya komunikasi antar sel melalui mekanisme quorum sensing, di mana mikroorganisme saling bertukar sinyal kimia untuk mengkoordinasikan aktivitas kolektif. Hal ini memungkinkan komunitas mikroba dalam biofilm untuk menanggapi perubahan lingkungan secara lebih terkoordinasi. Menurut Pakdela *et al.* (2019), pembentukan biofilm yang kokoh adalah salah satu faktor yang menentukan efektivitas BAL dalam menjalankan fungsi probiotik, karena biofilm tidak hanya berfungsi sebagai pelindung tetapi juga meningkatkan interaksi antara sel dan lingkungan inang.

2.6 Autoagregasi dan Kemampuan Biosorpsi

Salah satu aplikasi penting dari autoagregasi pada BAL adalah kemampuannya untuk mengadsorpsi zat-zat toksik, terutama logam berat. Biosorpsi merupakan proses di mana permukaan sel mikroba mengikat ion logam melalui interaksi elektrostatik dan ikatan kimiawi. Proses ini sangat dipengaruhi oleh sifat permukaan sel yang telah mengalami autoagregasi. Dengan terbentuknya agregat, luas permukaan yang tersedia untuk berinteraksi dengan ion logam meningkat secara signifikan, sehingga mempercepat proses pengikatan. Penelitian oleh Ameen et al. (2020) mengungkapkan bahwa strain BAL yang memiliki kemampuan autoagregasi tinggi juga menunjukkan efisiensi biosorpsi yang lebih baik terhadap ion Pb(II) dan Cd(II).

George *et al.* (2021) juga menyoroti bahwa hubungan antara autoagregasi dan kemampuan biosorpsi tidak hanya terbatas pada peningkatan luas permukaan kontak, tetapi juga melibatkan modifikasi gugus fungsional pada permukaan sel yang memfasilitasi ikatan dengan ion logam. Hal ini membuka peluang untuk

pemanfaatan BAL sebagai agen biosorbent dalam aplikasi detoksifikasi pangan, di mana mikroorganisme dapat digunakan untuk mengurangi kontaminasi logam berat secara alami dan ramah lingkungan.

2.7 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Autoagregasi pada BAL

Kemampuan autoagregasi pada BAL tidak terjadi secara uniform, melainkan dipengaruhi oleh berbagai faktor internal dan eksternal. Faktor internal meliputi karakteristik genetik, tingkat produksi EPS, dan ekspresi protein adhesin pada masing-masing strain. Variabilitas genetik antar strain menyebabkan perbedaan signifikan dalam kemampuan membentuk agregat. Sebagai contoh, strain dengan ekspresi tinggi protein adhesin dan produksi EPS yang melimpah cenderung menunjukkan autoagregasi yang lebih kuat dan cepat.

Sementara itu, faktor eksternal yang mempengaruhi proses autoagregasi meliputi kondisi lingkungan seperti pH, suhu, dan konsentrasi ion dalam medium. Kondisi pH yang mendekati nilai fisiologis umumnya mendukung interaksi elektrostatis antar sel, sedangkan pH yang ekstrem dapat mengganggu kestabilan muatan permukaan sel sehingga menurunkan efisiensi agregasi. Suhu juga memainkan peran penting; suhu optimal pertumbuhan mikroba biasanya akan mendukung proses autoagregasi, sedangkan suhu yang terlalu tinggi atau rendah dapat menghambat aktivitas enzimatik dan sintesis komponen struktural yang diperlukan untuk agregasi. Selain itu, konsentrasi ion seperti kalsium atau magnesium dapat berperan sebagai mediasi dalam pembentukan ikatan antar sel, sehingga perubahan konsentrasi ion dapat mempengaruhi tingkat agregasi secara signifikan (Lin et al., 2019).

Penelitian eksperimental telah menunjukkan bahwa kombinasi antara faktor internal dan eksternal ini menentukan efektivitas autoagregasi pada BAL. Kondisi-kondisi optimal untuk pembentukan agregat perlu ditentukan secara sistematis melalui pengujian laboratorium, agar dapat menghasilkan kondisi yang mendukung aplikasi praktis seperti peningkatan kualitas produk fermentasi dan peningkatan kapasitas biosorpsi.