TEKNOSAINS
MEDIA INFORMASI SAINS DAN TEKNOLOGI
Journal homepage: https://journal.uin-alauddin.ac.id/index.php/teknosains

Pemanfaatan limbah kulit pisang kepok sebagai sumber prebiotik alami terhadap pertumbuhan *Lactobacillus plantarum* secara in vitro

Hariani[1*], Jamilah[2], Fatmawati Nur[2], Mashuri Masri[2], Hafsan[2]
[1]Program Studi Magister Biologi
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin
Jl. Perintis Kemerdekaan Km. 10, Makassar, Sulawesi Selatan, Indonesia. 90245
[2]Program Studi Biologi
Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar
Jl. H. M. Yasin Limpo No. 36, Gowa, Sulawesi Selatan, Indonesia. 92118
*E-mail: hariani@gmail.com

Abstrak: Kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca* var. balbisiana) merupakan biomassa agro-industri yang melimpah dengan potensi aplikasi sebagai sumber prebiotik alami. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi ekstrak kulit pisang sebagai substrat prebiotik dalam mendukung pertumbuhan *Lactobacillus plantarum* pada kondisi in vitro. Ekstrak disiapkan menggunakan metode dekoksi dan diinkorporasikan ke dalam media pertumbuhan bakteri. Parameter pertumbuhan yang diamati meliputi kerapatan optik (OD), jumlah sel hidup (CFU/mL), pH, laju pertumbuhan spesifik (μ), dan waktu generasi (gt) selama 48 jam inkubasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan ekstrak kulit pisang berpengaruh signifikan terhadap pertumbuhan *Lactobacillus plantarum*. Perlakuan menggunakan kulit pisang matang memberikan kinerja paling optimal, ditandai dengan nilai OD lebih tinggi, jumlah sel hidup dan laju pertumbuhan spesifik yang lebih besar, serta waktu generasi yang lebih singkat dibandingkan perlakuan lainnya ($p < 0,05$). Penurunan pH yang lebih nyata juga teramati, menunjukkan peningkatan aktivitas fermentatif. Ekstrak kulit pisang memiliki potensi sebagai substrat fermentabel yang mampu mendukung pertumbuhan bakteri asam laktat secara in vitro. Temuan ini memberikan dasar ilmiah bagi pemanfaatan limbah kulit pisang sebagai sumber prebiotik alami. Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengevaluasi efektivitasnya secara in vivo, termasuk selektivitas terhadap mikrobiota usus serta stabilitasnya dalam kondisi gastrointestinal.

Kata Kunci: fermentasi, in vitro, kulit pisang, *Lactobacillus plantarum*, prebiotik

Abstract: Kepok banana peel (*Musa paradisiaca* balbisiana) represents an abundant agro-industrial biomass with potential application as a natural prebiotic source. This study aimed to evaluate the potential of banana peel extract as a prebiotic substrate in supporting the growth of *Lactobacillus plantarum* under in vitro conditions. The extract was prepared using a decoction method and incorporated into bacterial growth media. Growth parameters including optical density (OD), viable cell count (CFU/mL), pH, specific growth rate (μ), and generation time (gt) were monitored over 48 hours of incubation. The results demonstrated that the addition of banana peel extract significantly influenced the growth of *Lactobacillus plantarum*. The treatment using ripe banana peel exhibited the most optimal performance, characterized by higher OD values, viable cell counts, and specific growth rates, as well as shorter generation times compared to other treatments ($p < 0.05$). A more pronounced decrease in pH was also observed, indicating enhanced fermentative activity. Banana peel extract shows potential as a fermentable substrate capable of supporting the growth of lactic acid bacteria in vitro. These findings provide a scientific basis for the valorization of banana peel waste as a natural prebiotic source. Further studies are required to evaluate its effectiveness in vivo, including its selectivity toward gut microbiota and its stability under gastrointestinal conditions.

Keywords: banana peel, prebiotic, *Lactobacillus plantarum*, fermentation, in vitro.

Cara Sitasi:
Hariani, H., Jamilah, J., Nur, F., Masri, M., Hafsan, H. (2026). Pemanfaatan limbah kulit pisang kepok sebagai sumber prebiotik alami terhadap pertumbuhan *Lactobacillus plantarum* secara in vitro. *Teknosains: Media Informasi Sains dan Teknologi*, 20(1), 152-162. https://doi.org/10.24252/teknosains.v20i1.67043

Diajukan 15 April 2026; Ditinjau 28 April 2026; Diterima 13 Juni 2026; Diterbitkan 14 Juni 2026
Copyright © 2026. The authors. This is an open access article under the CC BY-SA license

PENDAHULUAN

Pemanfaatan limbah biomassa pertanian merupakan isu strategis dalam pengembangan sistem pangan berkelanjutan di Indonesia. Produksi pisang nasional yang tinggi secara konsisten menghasilkan limbah organik berupa kulit pisang dalam jumlah signifikan yang belum termanfaatkan secara optimal. Limbah ini umumnya dibuang atau hanya dimanfaatkan sebagai pakan ternak dengan nilai ekonomi yang rendah. Pendekatan bioteknologi pangan modern menempatkan limbah biomassa sebagai sumber bahan baku fungsional yang memiliki nilai tambah tinggi, terutama dalam pengembangan komponen bioaktif yang mendukung kesehatan saluran pencernaan (Roberfroid, 2000). Transformasi limbah kulit pisang menjadi bahan prebiotik merupakan salah satu strategi inovatif dalam mendukung ekonomi sirkular berbasis agroindustri.

Kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca* var. balbisiana) diketahui mengandung senyawa karbohidrat kompleks yang bersifat tidak tercerna, seperti fruktooligosakarida dan serat pangan larut, yang berperan sebagai substrat fermentabel bagi mikrobiota usus. Senyawa fruktooligosakarida memiliki karakteristik resisten terhadap hidrolisis enzim pencernaan di usus halus dan secara selektif difermentasi oleh bakteri menguntungkan di kolon (Gibson & Roberfroid, 1995). Proses fermentasi ini menghasilkan asam lemak rantai pendek yang berkontribusi terhadap penurunan pH lumen usus serta mendukung homeostasis mikrobiota. Kandungan fraksi karbohidrat *non-digestible* pada kulit pisang kepok dilaporkan berkisar antara 35% hingga 38% tergantung tingkat kematangan, yang menunjukkan potensi signifikan sebagai sumber prebiotik alami. Karakteristik ini menempatkan kulit pisang kepok sebagai kandidat bahan baku dalam formulasi pangan fungsional berbasis serat prebiotik.

Lactobacillus plantarum merupakan salah satu bakteri asam laktat yang memiliki kapasitas metabolisme sakarolitik yang luas serta adaptasi fisiologis terhadap berbagai kondisi lingkungan. Mikroorganisme ini mampu memfermentasi berbagai jenis karbohidrat kompleks menjadi asam laktat dan metabolit sekunder yang berperan dalam menjaga keseimbangan mikrobiota usus (Zoumpopoulou et al., 2017). Aktivitas probiotik *L. plantarum* mencakup peningkatan integritas mukosa usus, produksi bakteriosin, serta kompetisi terhadap bakteri patogen. Pertumbuhan dan proliferasi sel *L. plantarum* sangat dipengaruhi oleh ketersediaan substrat fermentabel yang sesuai, sehingga keberadaan prebiotik menjadi faktor kunci dalam mendukung aktivitas metaboliknya. Interaksi sinbiotik antara prebiotik dan probiotik ini menjadi dasar pengembangan produk pangan fungsional berbasis mikroba.

Kajian sebelumnya telah menunjukkan bahwa berbagai sumber serat alami memiliki kemampuan dalam menstimulasi pertumbuhan bakteri asam laktat melalui penyediaan substrat fermentabel yang selektif. Serat pangan seperti inulin, fruktooligosakarida, dan pati resisten diketahui tidak tercerna di usus halus, tetapi difermentasi secara selektif oleh mikrobiota usus sehingga meningkatkan proliferasi bakteri probiotik (Gibson & Roberfroid, 1995; Slavin, 2013). Studi eksperimental menunjukkan bahwa suplementasi prebiotik berbasis oligosakarida mampu meningkatkan kepadatan sel *Lactobacillus* dan *Bifidobacterium* secara signifikan dalam sistem in vitro maupun in vivo (Markowiak & Śliżewska, 2017; Roberfroid, 2007).

Sumber prebiotik alami dari bahan pangan juga dilaporkan memiliki efektivitas yang sebanding dengan prebiotik komersial dalam meningkatkan aktivitas metabolik bakteri asam laktat. Mussatto & Mancilha (2007) melaporkan bahwa oligosakarida *non-*

digestible dari bahan lignoselulosa mampu meningkatkan pertumbuhan mikroorganisme probiotik melalui peningkatan ketersediaan substrat fermentabel. Penelitian lain menunjukkan bahwa polisakarida dari sumber tanaman dapat meningkatkan laju pertumbuhan spesifik dan aktivitas fermentasi mikroba melalui peningkatan efisiensi metabolisme karbohidrat (Zhang et al., 2019).

Dalam konteks pisang, kandungan pati resisten dan serat pangan pada berbagai varietas dilaporkan berkontribusi signifikan terhadap aktivitas fermentasi mikrobiota usus. Pati resisten pada pisang, terutama pada kondisi belum matang, diketahui mencapai proporsi yang tinggi dan berfungsi sebagai substrat fermentabel yang efektif bagi bakteri asam laktat (Emaga et al., 2008; Slavin, 2013). Selain itu, perubahan komposisi kimia selama proses pematangan menyebabkan peningkatan fraksi serat larut dan oligosakarida yang lebih mudah difermentasi, sehingga berpotensi meningkatkan pertumbuhan bakteri probiotik. Emaga et al. (2008) melaporkan bahwa kandungan pektin dan komponen serat larut pada kulit pisang meningkat selama pematangan, yang berimplikasi pada peningkatan ketersediaan substrat bagi aktivitas fermentasi mikroba.Variasi komposisi nutrien antara kulit pisang mentah dan matang menunjukkan adanya potensi perbedaan dalam mendukung proliferasi sel mikroba, khususnya terkait ketersediaan gula sederhana hasil degradasi pati selama proses pematangan. Peningkatan kadar gula pereduksi pada bahan matang diketahui dapat mempercepat laju metabolisme mikroba dan mempercepat fase eksponensial pertumbuhan. Meskipun demikian, penelitian yang secara spesifik mengevaluasi efektivitas ekstrak kulit pisang kepok terhadap kinetika pertumbuhan *Lactobacillus plantarum* masih terbatas, terutama yang mengintegrasikan parameter kuantitatif seperti *Total Plate Count* dan analisis *Optical Density* dalam satu desain eksperimental yang komprehensif.

Keterbatasan kajian terdahulu dalam menggabungkan analisis pertumbuhan berbasis turbidimetri dan viabilitas sel menunjukkan adanya kesenjangan metodologis dalam mengevaluasi kapasitas prebiotik bahan alami. Kesenjangan penelitian ini menegaskan perlunya kajian eksperimental yang terstruktur untuk mengevaluasi kapasitas prebiotik limbah kulit pisang kepok secara lebih komprehensif, khususnya dalam konteks hubungan antara komposisi substrat, kinetika pertumbuhan mikroba, dan aktivitas metabolik yang dihasilkan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pemanfaatan limbah kulit pisang kepok sebagai substrat fermentabel yang mendukung pertumbuhan BAL, yang potensial dikembangkan sebagai kandidat prebiotik alami untuk pertumbuhan *Lactobacillus plantarum* secara in vitro. Evaluasi dilakukan melalui pengukuran parameter pertumbuhan mikroba berbasis nilai absorbansi dan *Total Plate Count* untuk mengidentifikasi efektivitas substrat dalam mendukung proliferasi sel. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan bahan pangan fungsional berbasis limbah agroindustri serta memperkuat dasar pemanfaatan prebiotik alami dalam meningkatkan kesehatan sistem pencernaan.

METODE PENELITIAN

Jenis penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan eksperimental laboratorium yang dirancang untuk mengevaluasi aktivitas prebiotik limbah kulit pisang kepok terhadap pertumbuhan *Lactobacillus plantarum* secara in vitro. Pendekatan eksperimental dipilih karena memungkinkan pengendalian variabel secara sistematis serta menghasilkan data kuantitatif terkait proliferasi sel mikroba pada substrat fermentabel tertentu.

Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi autoklaf (121°C, 15 psi), inkubator mikrobiologi (37°C), spektrofotometer UV-Vis, laminar air flow cabinet, vortex mixer, pH meter digital, serta peralatan gelas standar laboratorium. Pengukuran densitas optik dilakukan menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 600 nm yang umum digunakan untuk estimasi biomassa bakteri dalam kultur cair (Madigan et al., 2018). Bahan penelitian terdiri atas media de Man Rogosa Sharpe Broth (MRSB) dan de Man Rogosa Sharpe Agar (MRSA) sebagai media selektif untuk bakteri asam laktat, isolat Lactobacillus plantarum, akuades steril, serta limbah kulit pisang kepok. Media MRS digunakan karena memiliki komposisi nutrien yang mendukung pertumbuhan optimal bakteri asam laktat, termasuk sumber karbon dan nitrogen spesifik (de Man et al., 1960).

1. Preparasi ekstrak kulit pisang kepok

Preparasi ekstrak dilakukan menggunakan metode dekoksi termodifikasi untuk mengekstraksi senyawa oligosakarida larut air. Kulit pisang dicuci, dipotong, dan dihomogenkan dengan akuades steril dalam rasio 1:2 (b/v) sesuai prosedur ekstraksi substrat cair. Proses pemanasan pada suhu moderat diketahui mampu meningkatkan efisiensi ekstraksi senyawa larut air seperti oligosakarida dan pektin tanpa menyebabkan degradasi signifikan terhadap struktur kimianya (Emaga et al., 2008; Mussatto & Mancilha, 2007).

Filtrat diperoleh melalui proses penyaringan steril dan selanjutnya disterilisasi menggunakan autoklaf pada suhu 121°C selama 15 menit untuk menghilangkan kontaminan mikroba (AOAC, 2005). Standarisasi kadar gula total dilakukan menggunakan metode fenol-sulfat yang berbasis spektrofotometri untuk memastikan konsistensi substrat fermentabel antarperlakuan (Dubois et al., 1956). Metode ini dipilih karena memiliki sensitivitas tinggi dalam mendeteksi total karbohidrat terlarut.

2. Uji aktivitas prebiotik

Uji aktivitas prebiotik dilakukan melalui inokulasi *Lactobacillus plantarum* ke dalam media yang mengandung ekstrak kulit pisang kepok sebagai sumber karbon alternatif dengan pendekatan eksperimental terkontrol. Seluruh perlakuan disusun menggunakan rancangan acak lengkap (RAL) dengan tiga ulangan biologis (n = 3) untuk setiap perlakuan guna memastikan validitas dan reprodusibilitas data.

Kultur *Lactobacillus plantarum* diremajakan terlebih dahulu dalam media de Man Rogosa Sharpe Broth (MRSB) dan diinkubasi pada suhu 37°C selama 24 jam hingga mencapai fase logaritmik pertumbuhan. Kultur kemudian disesuaikan kepadatannya secara awal (pre-inokulum) menggunakan standar $OD_{600} \approx 0{,}5$ untuk memastikan keseragaman jumlah sel awal pada seluruh perlakuan (Madigan et al., 2018).

Sebanyak 1 mL suspensi kultur diinokulasikan ke dalam 14 mL media perlakuan yang terdiri atas: (1) kontrol positif (MRSB), (2) ekstrak kulit pisang matang, (3) ekstrak kulit pisang mentah, (4) kombinasi ekstrak kulit pisang matang dengan MRSB, dan (5) kombinasi ekstrak kulit pisang mentah dengan MRSB. Konsentrasi substrat karbon pada seluruh perlakuan disetarakan berdasarkan kandungan gula total (g/L) yang sebelumnya dianalisis menggunakan metode fenol-sulfat, sehingga perbedaan pertumbuhan mencerminkan efek kualitas substrat, bukan jumlah karbon (Zoumpopoulou et al., 2017). Seluruh kultur diinkubasi pada suhu 37°C selama 48 jam dalam kondisi anaerob fakultatif. Homogenisasi dilakukan menggunakan *vortex mixer* sebelum inkubasi untuk memastikan distribusi sel yang merata dalam medium.

Parameter pertumbuhan mikroba diamati melalui tiga pendekatan, yaitu densitas optik, jumlah sel hidup, dan perubahan pH medium. Pengukuran *Optical Density* (OD)

dilakukan pada panjang gelombang 600 nm menggunakan spektrofotometer pada interval waktu 0, 12, 24, dan 48 jam. Setiap pengukuran dilakukan dalam tiga ulangan teknis untuk meminimalkan kesalahan instrumen.

Jumlah sel hidup ditentukan menggunakan metode *Total Plate Count* (TPC) dengan teknik *pour plate* pada media MRSA. Suspensi kultur diencerkan secara serial hingga tingkat pengenceran yang sesuai, kemudian diinkubasi selama 48 jam pada suhu 37°C. Koloni yang berada dalam rentang 30–300 dihitung dan dinyatakan sebagai CFU/mL. Seluruh perhitungan dilakukan dalam duplo untuk setiap ulangan biologis (Fardiaz, 1993).

Pengukuran pH dilakukan secara periodik menggunakan pH meter digital yang telah dikalibrasi dengan buffer standar (pH 4,0 dan 7,0). Pengukuran ini bertujuan untuk mengevaluasi dinamika produksi asam organik sebagai indikator aktivitas fermentasi oleh Lactobacillus plantarum (Ray & Bhunia, 2013).

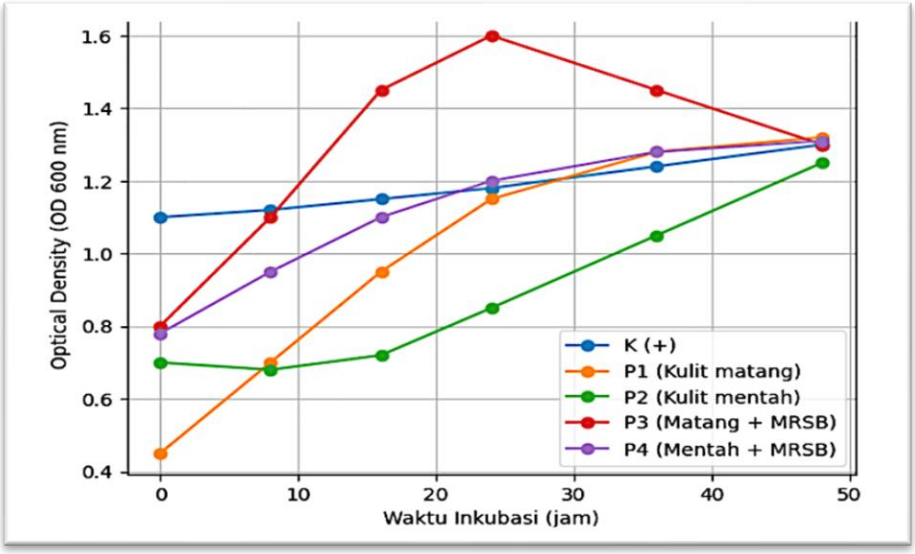
3. Analisis data

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan uji *Analysis of Variance* (ANOVA) satu arah untuk mengidentifikasi pengaruh perlakuan terhadap pertumbuhan *Lactobacillus plantarum*. Uji lanjut dilakukan menggunakan metode *Duncan Multiple Range Test* untuk menentukan perbedaan signifikan antarperlakuan pada taraf kepercayaan 95% ($p < 0,05$). Analisis statistik dilakukan menggunakan perangkat lunak SPSS versi 24.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pengaruh ekstrak kulit pisang kepok terhadap pertumbuhan *Lactobacillus plantarum*

Pertumbuhan *Lactobacillus plantarum* pada media yang ditambahkan ekstrak kulit pisang kepok menunjukkan respons proliferasi yang lebih tinggi dibandingkan kontrol, yang mengindikasikan bahwa ekstrak berperan sebagai sumber prebiotik alami yang efektif. Peningkatan pertumbuhan ini berkaitan dengan ketersediaan substrat fermentabel yang mampu mendukung aktivitas metabolisme sakarolitik bakteri asam laktat. Data kinetika pertumbuhan berdasarkan nilai OD selama 48 jam inkubasi disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kurva pertumbuhan *Lactobacillus plantarum* pada berbagai perlakuan

Kurva pada Gambar 1 menunjukkan bahwa perlakuan yang mengandung ekstrak kulit pisang kepok memperlihatkan percepatan fase logaritmik dibandingkan kontrol, yang ditandai dengan peningkatan nilai OD yang lebih tajam pada interval 8 hingga 24 jam. Perlakuan kombinasi ekstrak dan MRSB (P3) menunjukkan laju pertumbuhan tertinggi pada fase eksponensial, sedangkan perlakuan P1 menunjukkan kestabilan pertumbuhan hingga fase stasioner. Perlakuan P2 memperlihatkan fase adaptasi yang lebih panjang sebelum memasuki fase logaritmik, yang mencerminkan keterbatasan ketersediaan substrat fermentabel pada kulit pisang mentah. Pola kinetika pertumbuhan yang diamati menunjukkan bahwa ekstrak kulit pisang kepok tidak hanya meningkatkan jumlah sel, tetapi juga memodulasi dinamika pertumbuhan mikroba melalui percepatan fase eksponensial, yang merupakan indikator utama efektivitas suatu substrat sebagai prebiotik. Pola ini mengindikasikan bahwa kandungan substrat fermentabel dalam ekstrak berperan dalam meningkatkan aktivitas metabolisme sakarolitik *Lactobacillus plantarum*.

Untuk memperkuat analisis kinetika pertumbuhan, dilakukan perhitungan laju pertumbuhan spesifik (μ) dan waktu generasi (*generation time*, gt) pada fase logaritmik (8–24 jam), yang disajikan pada Tabel 2.

Tabel 1. Laju pertumbuhan spesifik (μ) dan waktu generasi (gt)*

Perlakuan	μ (jam^{-1})	gt (jam)
K (+)	0,0032 ± 0,0002^{c}	216,6 ± 12,5^{a}
P1 (Matang)	0,0306 ± 0,0015^{a}	22,6 ± 1,8^{c}
P2 (Mentah)	0,0139 ± 0,0008^{b}	49,9 ± 3,2^{b}
P3 (Matang + MRSB)	0,0234 ± 0,0012^{a}	29,6 ± 2,1^{c}
P4 (Mentah + MRSB)	0,0148 ± 0,0009^{b}	46,8 ± 3,0^{b}

*Nilai disajikan sebagai rata-rata ± standar deviasi. Huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji lanjut Tukey pada taraf signifikansi 5% ($p < 0,05$).

Data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa perlakuan dengan penambahan ekstrak kulit pisang kepok menghasilkan nilai laju pertumbuhan spesifik (μ) yang lebih tinggi dibandingkan kontrol, yang mengindikasikan peningkatan laju proliferasi sel *Lactobacillus plantarum*. Analisis statistik menunjukkan bahwa perlakuan P1 dan P3 memiliki nilai μ yang lebih tinggi dan berbeda nyata dibandingkan perlakuan lainnya ($p < 0,05$), sedangkan kontrol menunjukkan nilai terendah. Perlakuan P1 menghasilkan nilai μ tertinggi yang diikuti dengan waktu generasi (gt) terpendek, yang menunjukkan bahwa substrat kulit pisang matang memiliki efisiensi tertinggi dalam mendukung pembelahan sel mikroba. Nilai gt yang lebih rendah mencerminkan kemampuan sel untuk menggandakan diri dalam waktu yang lebih singkat, sehingga menjadi indikator utama efektivitas substrat sebagai sumber energi.

Fenomena peningkatan laju pertumbuhan ini konsisten dengan konsep bahwa substrat prebiotik berbasis oligosakarida mampu meningkatkan aktivitas metabolisme bakteri asam laktat melalui penyediaan sumber karbon yang selektif. Salah satu studi menjelaskan bahwa prebiotik seperti fruktooligosakarida difermentasi secara selektif oleh mikrobiota, sehingga meningkatkan proliferasi bakteri probiotik (Gibson & Roberfroid, 1995). Penelitian lain juga menegaskan bahwa senyawa seperti inulin dan FOS dapat meningkatkan densitas sel *Lactobacillus* secara signifikan dalam sistem kultur (Roberfroid, 2000, 2007).

Temuan ini sejalan dengan laporan bahwa substrat berbasis serat alami mampu meningkatkan laju pertumbuhan spesifik melalui peningkatan efisiensi metabolisme sakarolitik (Patel & Goyal, 2012). Selain itu, oligosakarida yang berasal dari limbah agroindustri dilaporkan memiliki efektivitas yang sebanding dengan prebiotik komersial dalam mendukung pertumbuhan mikroba probiotik (Mussatto & Mancilha, 2007).

Dalam konteks bahan baku, limbah kulit pisang dilaporkan memiliki kandungan fraksi karbohidrat *non-digestible* seperti fruktooligosakarida dan pati resisten yang berfungsi sebagai substrat fermentabel. Komponen ini berperan dalam mendukung aktivitas metabolisme mikroba serta meningkatkan laju pertumbuhan bakteri asam laktat (Emaga et al., 2008). Peningkatan ketersediaan senyawa fermentabel selama proses pematangan juga berkontribusi terhadap percepatan fase logaritmik, sebagaimana tercermin pada perlakuan P1 dalam penelitian ini.

Pola kinetika pertumbuhan yang diamati menunjukkan bahwa ekstrak kulit pisang kepok tidak hanya meningkatkan jumlah sel, tetapi juga memodulasi dinamika pertumbuhan mikroba melalui percepatan fase eksponensial. Kondisi ini mencerminkan efisiensi pemanfaatan substrat oleh mikroorganisme dan menegaskan potensi ekstrak kulit pisang kepok sebagai sumber prebiotik alami yang efektif dalam mendukung pertumbuhan *Lactobacillus plantarum*.

2. Jumlah sel hidup *Lactobacillus plantarum* berdasarkan *Total Plate Count* (TPC)

Viabilitas sel *Lactobacillus plantarum* pada berbagai perlakuan substrat dianalisis menggunakan metode *Total Plate Count* untuk mengonfirmasi hasil pengukuran turbidimetri. Parameter ini memberikan gambaran kuantitatif mengenai jumlah sel hidup yang mampu membentuk koloni, sehingga merepresentasikan keberhasilan proliferasi sel secara biologis. Data jumlah sel hidup setelah 48 jam inkubasi disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Jumlah sel hidup *Lactobacillus plantarum* (CFU/mL) pada 48 jam inkubasi*

Perlakuan	Jumlah sel (CFU/mL)
K (+)	$(6{,}2 \pm 0{,}4) \times 10^{7b}$
P1 (Kulit matang)	$(8{,}5 \pm 0{,}5) \times 10^{7a}$
P2 (Kulit mentah)	$(1{,}1 \pm 0{,}2) \times 10^{7c}$
P3 (Matang + MRSB)	$(7{,}8 \pm 0{,}4) \times 10^{7a}$
P4 (Mentah + MRSB)	$(7{,}1 \pm 0{,}3) \times 10^{7b}$

*Nilai disajikan sebagai rata-rata ± standar deviasi. Huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji lanjut Tukey pada taraf signifikansi 5% ($p < 0{,}05$).

Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa penambahan ekstrak kulit pisang kepok berpengaruh terhadap jumlah sel hidup *Lactobacillus plantarum*. Analisis statistik menunjukkan bahwa perlakuan P1 dan P3 menghasilkan jumlah sel yang lebih tinggi dan tidak berbeda nyata satu sama lain, namun keduanya berbeda nyata dibandingkan kontrol dan perlakuan P2 ($p < 0{,}05$). Perlakuan P2 menunjukkan jumlah sel terendah dan berbeda nyata dibandingkan seluruh perlakuan lainnya.

Perlakuan P1 (kulit pisang matang) menghasilkan jumlah koloni tertinggi sebesar $(8{,}5 \pm 0{,}5) \times 10^7$ CFU/mL, sedangkan perlakuan P2 (kulit pisang mentah) menunjukkan jumlah koloni paling rendah sebesar $(1{,}1 \pm 0{,}2) \times 10^7$ CFU/mL. Perlakuan kombinasi (P3 dan P4) menunjukkan jumlah sel yang lebih tinggi dibandingkan kontrol, meskipun secara statistik P4 tidak berbeda nyata dengan kontrol. Pola ini mengindikasikan bahwa

penambahan substrat dari kulit pisang, khususnya pada kondisi matang, memberikan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan viabilitas sel.

Peningkatan jumlah koloni pada perlakuan yang mengandung ekstrak kulit pisang menunjukkan bahwa substrat tersebut mampu mendukung viabilitas sel secara optimal. Kandungan oligosakarida dan karbohidrat kompleks dalam kulit pisang matang lebih mudah difermentasi menjadi sumber energi, sehingga meningkatkan efisiensi pembelahan sel dan mempertahankan kelangsungan hidup mikroba. Nilai CFU/mL yang lebih tinggi pada perlakuan P1 menunjukkan bahwa substrat alami tidak hanya berfungsi sebagai sumber karbon, tetapi juga berkontribusi dalam menciptakan kondisi lingkungan yang mendukung pertumbuhan mikroba.

Konsistensi antara peningkatan nilai *Optical Density* dan jumlah CFU/mL menunjukkan bahwa peningkatan kekeruhan media berbanding lurus dengan peningkatan jumlah sel hidup. Hubungan ini menguatkan bahwa ekstrak kulit pisang kepok berperan sebagai prebiotik yang efektif dalam meningkatkan pertumbuhan dan viabilitas *Lactobacillus plantarum*. Metode *Total Plate Count* sebagai pendekatan kultur langsung memberikan validasi terhadap hasil turbidimetri yang bersifat tidak langsung, sehingga memperkuat interpretasi bahwa peningkatan populasi sel mencerminkan peningkatan sel hidup, bukan hanya biomassa non-viabel (Fardiaz, 1993).

Kemampuan ekstrak kulit pisang kepok dalam meningkatkan pertumbuhan *Lactobacillus plantarum* berkaitan dengan kandungan polisakarida kompleks yang berfungsi sebagai substrat fermentabel. Polisakarida seperti pektin, hemiselulosa, dan fruktooligosakarida mengalami proses hidrolisis menjadi unit gula yang lebih sederhana, yang selanjutnya dimanfaatkan dalam metabolisme sel. Secara umum, bakteri asam laktat memiliki sistem enzimatik yang memungkinkan pemanfaatan berbagai substrat karbohidrat kompleks melalui aktivitas enzim hidrolitik, meskipun jenis dan aktivitas enzim tersebut bergantung pada kondisi lingkungan dan sumber substrat (Mussatto & Mancilha, 2007).

Senyawa hasil hidrolisis tersebut kemudian ditranspor ke dalam sel melalui sistem transport membran dan dimetabolisme melalui jalur Embden-Meyerhof-Parnas, yang menghasilkan energi dalam bentuk ATP serta asam laktat sebagai produk akhir fermentasi (Madigan et al., 2018). Aktivitas metabolisme sakarolitik ini menjelaskan peningkatan nilai OD dan jumlah CFU/mL pada perlakuan yang mengandung ekstrak kulit pisang kepok.

Ketersediaan substrat yang mudah difermentasi mempercepat laju pembelahan sel, sehingga meningkatkan densitas populasi mikroba. Kondisi ini juga menjelaskan percepatan fase logaritmik yang teramati pada perlakuan P1 dan P3, yang menunjukkan bahwa bakteri mampu beradaptasi lebih cepat terhadap lingkungan yang kaya substrat fermentabel.

3. Perubahan pH medium sebagai indikator aktivitas fermentasi

Aktivitas metabolisme *Lactobacillus plantarum* dalam memanfaatkan substrat prebiotik dapat diamati melalui perubahan pH medium selama inkubasi. Parameter ini digunakan sebagai indikator tidak langsung dari produksi metabolit asam, khususnya asam laktat, yang merupakan produk utama fermentasi karbohidrat oleh bakteri asam laktat. Data perubahan pH selama inkubasi disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perubahan pH medium selama inkubasi*

Perlakuan	0 jam	12 jam	24 jam	36 jam	48 jam
K (+)	6,5 ± 0,05	6,2 ± 0,07	5,8 ± 0,08	5,2 ± 0,10	4,8 ± 0,09

P1 (Kulit matang)	6,5 ± 0,04	5,9 ± 0,06	5,3 ± 0,07	4,7 ± 0,09	4,3 ± 0,08
P2 (Kulit mentah)	6,5 ± 0,05	6,1 ± 0,08	5,7 ± 0,09	5,1 ± 0,10	4,6 ± 0,09
P3 (Matang + MRSB)	6,5 ± 0,04	5,7 ± 0,06	5,0 ± 0,07	4,6 ± 0,08	4,2 ± 0,07
P4 (Mentah + MRSB)	6,5 ± 0,05	5,8 ± 0,07	5,2 ± 0,08	4,8 ± 0,09	4,4 ± 0,08

*Nilai disajikan sebagai rata-rata ± standar deviasi. Huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji lanjut Tukey pada taraf signifikansi 5% ($p < 0,05$).

Data pada Tabel 3 menunjukkan bahwa seluruh perlakuan mengalami penurunan pH selama inkubasi, yang mengindikasikan adanya aktivitas fermentasi oleh *Lactobacillus plantarum*. Analisis statistik menunjukkan bahwa penurunan pH pada perlakuan yang mengandung ekstrak kulit pisang kepok berbeda nyata dibandingkan kontrol pada sebagian besar waktu inkubasi ($p < 0,05$), khususnya pada interval 24 hingga 48 jam.

Perlakuan P3 menunjukkan penurunan pH paling signifikan dengan nilai akhir yang berbeda nyata dibandingkan kontrol. Perlakuan P1 juga menunjukkan penurunan pH yang signifikan dan tidak berbeda nyata dengan P3 pada beberapa titik waktu, tetapi berbeda nyata dibandingkan perlakuan P2. Kondisi ini mengindikasikan bahwa substrat dari kulit pisang matang memiliki ketersediaan senyawa fermentabel yang lebih tinggi dibandingkan kulit pisang mentah.

Perlakuan P2 menunjukkan penurunan pH yang lebih lambat dan secara statistik berada pada kelompok yang berbeda dibandingkan P1 dan P3 pada fase akhir inkubasi. Hal ini menunjukkan bahwa komposisi substrat pada kulit pisang mentah kurang optimal dalam mendukung aktivitas fermentasi mikroba dibandingkan substrat yang telah mengalami pematangan. Penurunan pH medium berkaitan langsung dengan aktivitas metabolisme sakarolitik *Lactobacillus plantarum* dalam mengonversi karbohidrat menjadi asam laktat melalui jalur Embden-Meyerhof-Parnas. Proses ini menghasilkan akumulasi ion hidrogen yang menyebabkan penurunan pH lingkungan kultur (Madigan et al., 2018). Intensitas penurunan pH mencerminkan tingkat aktivitas fermentasi dan efisiensi pemanfaatan substrat oleh sel mikroba.

Perlakuan yang mengandung ekstrak kulit pisang menunjukkan penurunan pH yang lebih cepat, yang mengindikasikan bahwa kandungan oligosakarida dan gula sederhana dalam ekstrak berperan sebagai substrat fermentabel yang mudah diakses. Kondisi ini mempercepat produksi asam laktat sebagai metabolit primer, yang berkontribusi terhadap pembentukan lingkungan asam. Lingkungan dengan pH rendah merupakan kondisi selektif yang mendukung dominasi bakteri asam laktat. Kemampuan *Lactobacillus plantarum* dalam bertahan pada kondisi asam memberikan keuntungan kompetitif dibandingkan mikroorganisme lain, sehingga meningkatkan stabilitas komunitas mikroba. Kondisi ini memungkinkan bakteri asam laktat mendominasi sistem fermentasi dan menekan pertumbuhan mikroorganisme patogen (Ray & Bhunia, 2013).

Hubungan antara peningkatan pertumbuhan sel dan penurunan pH menunjukkan bahwa substrat kulit pisang kepok tidak hanya mendukung proliferasi mikroba, tetapi juga meningkatkan aktivitas metabolik yang menghasilkan efek antimikroba secara tidak langsung. Mekanisme ini merupakan salah satu karakteristik utama dari interaksi sinbiotik antara prebiotik dan probiotik.

4. Keunggulan *Musa paradisiaca* balbisiana sebagai sumber prebiotik

Efektivitas ekstrak kulit pisang kepok sebagai sumber prebiotik menunjukkan kesetaraan fungsional dengan prebiotik komersial seperti inulin dan fruktooligosakarida murni. Inulin dikenal sebagai substrat selektif yang difermentasi oleh bakteri asam laktat

dan bifidobakteri untuk meningkatkan populasi mikrobiota menguntungkan dalam saluran pencernaan (Roberfroid, 2000).

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa ekstrak kulit pisang kepok mampu menghasilkan pola pertumbuhan yang sebanding dengan substrat prebiotik standar, yang ditunjukkan oleh peningkatan nilai OD dan jumlah CFU/mL yang signifikan. Perbedaan utama terletak pada kompleksitas komposisi substrat alami yang tidak hanya mengandung satu jenis oligosakarida, tetapi juga berbagai senyawa bioaktif lain seperti serat pangan, fenolik, dan antioksidan. Kompleksitas ini memberikan potensi efek sinergis yang tidak dimiliki oleh prebiotik komersial tunggal. Kombinasi berbagai komponen bioaktif dalam ekstrak alami dapat meningkatkan efisiensi fermentasi serta memberikan manfaat tambahan dalam menjaga kesehatan sistem pencernaan.

Kulit pisang kepok memiliki keunggulan komposisi nutrisi dibandingkan varietas pisang lainnya, terutama dalam hal kandungan karbohidrat kompleks dan serat pangan. Pisang kelompok plantain, termasuk Musa paradisiaca, diketahui memiliki kandungan pati resisten dan serat pangan yang lebih tinggi dibandingkan pisang dessert, sehingga berpotensi lebih besar sebagai sumber prebiotik alami (Emaga et al., 2008; Zhang et al., 2019). Kandungan fraksi karbohidrat *non-digestible* seperti pati resisten dan oligosakarida berperan sebagai substrat fermentabel yang mendukung pertumbuhan bakteri probiotik dalam sistem fermentasi.

Karakteristik fisiologis varietas kepok yang termasuk kelompok plantain menyebabkan akumulasi pati yang lebih tinggi pada fase awal perkembangan buah. Pati tersebut selama proses pematangan mengalami degradasi enzimatik menjadi gula sederhana dan oligosakarida yang lebih mudah difermentasi oleh mikroorganisme. Perubahan komposisi ini telah dilaporkan secara luas pada buah pisang, di mana terjadi penurunan pati dan peningkatan gula terlarut selama pematangan, yang berdampak langsung terhadap peningkatan ketersediaan substrat fermentabel (Slavin, 2013; Zhang et al., 2019). Kondisi ini menjelaskan mengapa perlakuan kulit pisang matang menunjukkan pertumbuhan mikroba yang lebih optimal dibandingkan kulit pisang mentah.

Selain itu, kandungan serat pangan dan senyawa bioaktif dalam kulit pisang kepok memberikan kontribusi terhadap stabilitas substrat fermentasi. Komponen seperti pektin dan hemiselulosa dalam kulit pisang diketahui memiliki sifat fermentabilitas yang bertahap, sehingga mampu menyediakan sumber energi yang berkelanjutan bagi mikroorganisme. Emaga et al. (2008) menunjukkan bahwa komposisi serat pangan pada kulit pisang mengalami perubahan selama pematangan, yang meningkatkan ketersediaan fraksi larut dan mendukung aktivitas fermentasi mikroba. Densitas nutrisi ini memungkinkan substrat berfungsi tidak hanya sebagai sumber energi awal, tetapi juga sebagai substrat yang mempertahankan pertumbuhan mikroba dalam fase inkubasi yang lebih panjang.Temuan studi ini menunjukkan bahwa ekstrak kulit pisang kepok tidak hanya meningkatkan jumlah sel, tetapi juga mempercepat kinetika pertumbuhan mikroba. Hal ini menegaskan bahwa limbah kulit pisang kepok memiliki potensi sebagai sumber prebiotik alami yang efektif dalam mendukung pertumbuhan *Lactobacillus plantarum*.

KESIMPULAN

Limbah kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca* balbisiana) berpotensi sebagai sumber prebiotik alami yang dapat mendukung pertumbuhan *Lactobacillus plantarum* melalui peningkatan aktivitas metabolisme sakarolitik dan percepatan fase logaritmik. Perlakuan dengan substrat kulit pisang matang menunjukkan kinerja paling optimal dalam meningkatkan proliferasi sel dibandingkan perlakuan lainnya, yang

mengindikasikan bahwa tingkat kematangan berpengaruh terhadap ketersediaan senyawa fermentabel. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa ekstrak kulit pisang kepok dapat berfungsi sebagai sumber substrat fermentabel yang mendukung viabilitas bakteri asam laktat dalam sistem in vitro. Pemanfaatan limbah ini memiliki implikasi praktis sebagai alternatif bahan baku prebiotik yang ekonomis dan berkelanjutan, dengan potensi untuk dikembangkan dalam industri pangan fungsional dan pengolahan limbah agroindustri berbasis bioteknologi.

Keterbatasan penelitian ini terletak pada penggunaan sistem in vitro sederhana yang belum mengevaluasi aspek selektivitas terhadap mikrobiota lain maupun interaksi dalam sistem biologis yang kompleks. Oleh karena itu, penelitian lanjutan diperlukan untuk menguji efektivitas prebiotik ini secara in vivo serta mengevaluasi ketahanan *Lactobacillus plantarum* terhadap kondisi saluran pencernaan, termasuk paparan asam lambung dan garam empedu, guna memastikan aplikabilitasnya dalam sistem biologis yang lebih kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

AOAC. (2005). *Official methods of analysis (18th ed.)*. Gaithersburg, Maryland: Association of Official Analytical Chemists.

Dalgaard, P., Ross, T., Kamperman, L., Neumeyer, K., & McMeekin, T. A. (1994). Estimation of bacterial growth rates from turbidimetric data. *International Journal of Food Microbiology*, 23(3–4), 391–404. https://doi.org/10.1016/0168-1605(94)90165-1.

de Man, J. C., Rogosa, M., & Sharpe, M. E. (1960). A medium for the cultivation of Lactobacilli. *Journal of Applied Bacteriology*, 23(1), 130–135. https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1960.tb00188.x.

Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350–356. https://doi.org/10.1021/ac60111a017.

Emaga, T. H., Robert, C., Ronkart, S. N., Wathelet, B., & Paquot, M. (2008). Dietary fibre components and pectin chemical features of peels during ripening in banana and plantain varieties. *Bioresource Technology*, 99(10), 4346–4354. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.08.030

Fardiaz, S. (1993). Analisis mikrobiologi pangan. Makassar: PT Raja Grafindo Persada.

Gibson, G. R., & Roberfroid, M. B. (1995). Dietary modulation of the human colonic microbiota: Introducing the concept of prebiotics. *Journal of Nutrition*, 125(6), 1401–1412. https://doi.org/10.1093/jn/125.6.1401.

Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2018). *Brock biology of microorganisms (15th ed.)*. London: Pearson.

Markowiak, P., & Śliżewska, K. (2017). Effects of probiotics, prebiotics, and synbiotics on human health. *Nutrients*, 9(9), 1-30. https://doi.org/10.3390/nu9091021.

Mussatto, S. I., & Mancilha, I. M. (2007). Non-digestible oligosaccharides: A review. Carbohydrate Polymers, 68(3), 587–597. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.12.011.

Patel, S., & Goyal, A. (2012). The current trends and future perspectives of prebiotics research. 3 Biotech, 2(2), 115–125. https://doi.org/10.1007/s13205-012-0044-x.

Ray, B., & Bhunia, A. (2013). *Fundamental food microbiology (5th ed.)*. Florida: CRC Press.

Roberfroid, M. (2000). Prebiotics and probiotics: Are they functional foods? *The American Journal of Clinical Nutrition*, 71(6), 1682S-1687S. https://doi.org/10.1093/ajcn/71.6.1682S.

Roberfroid, M. (2007). Prebiotics: The concept revisited. *The Journal of Nutrition*, 137(3), 830S-837S. https://doi.org/10.1093/jn/137.3.830S.

Slavin, J. (2013). Fiber and prebiotics: Mechanisms and health benefits. *Nutrients*, 5(4), 1417–1435. https://doi.org/10.3390/nu5041417.

Zhang, N., Huang, X., Zeng, Y., Wu, X., & Peng, X. (2019). Study on prebiotic effectiveness of neutral and acidic polysaccharides from plant sources. Food Chemistry, 279, 394–401. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.024.

Zoumpopoulou, G., Foligné, B., Christodoulou, K., Grangette, C., & Pot, B. (2017). Lactic acid bacteria in the gut: Mechanisms of action. Microbial Cell Factories, 16(1), 1–12. https://doi.org/10.1186/s12934-017-0642-9.