

Fermentasi Hidrolisat Kulit Pisang Kepok (*Musa paradisiaca*) Oleh *Zymomonas mobilis* untuk Pembuatan Bioetanol

Msy. Rustinra Khairunnisa¹, Muhammad Yerizam², Erika Dwi Oktaviani

Program Studi Teknologi Kimia Industri, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang, Indonesia

*Koresponden email: msyrustinrakhairunnisa173@gmail.com¹, yerizam@polsri.ac.id²

Diterima: 26 Juli 2026

Disetujui: 29 Agustus 2026

Abstract

Kepok banana peel (*Musa paradisiaca*) is a lignocellulosic biomass waste with significant potential as a feedstock for bioethanol production due to its cellulose, hemicellulose, and starch contents, which can be converted into fermentable sugars. This study aimed to investigate the effects of fermentation time and *Zymomonas mobilis* starter concentration on ethanol yield and to characterize the produced bioethanol. Hydrolysis was carried out using HNO₃ at concentrations of 2, 4, 6, 8, and 10 N with hydrolysis times of 60, 75, and 90 min to determine the optimum hydrolysis conditions. The optimum hydrolysate was subsequently fermented for 24, 48, and 72 h using starter concentrations of 10, 15, 20, 25, and 30%, followed by a distillation process. The distilled bioethanol was characterized based on ethanol content, density, pH, and chemical composition using *Gas Chromatography–Mass Spectrometry* (GC–MS). The results showed that the optimum hydrolysis condition was achieved using 10 N HNO₃ for 60 min, resulting in 16.8 °Bx and a reducing sugar content of 3.54%. The optimum fermentation condition was obtained after 48 h with a 15% starter concentration, producing an ethanol content of 57%. The distilled bioethanol exhibited an ethanol content of 52%, a density of 0.8779 g/mL, and a pH of 6, while GC–MS analysis confirmed ethanol as the predominant compound. These findings demonstrate that kepok banana peel is a promising lignocellulosic biomass for bioethanol production through optimized hydrolysis and fermentation using *Zymomonas mobilis*.

Keywords: acid hydrolysis, kepok banana peel, lignocellulosic biomass, *zymomonas mobilis*, fermentation

Abstrak

Kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca*) merupakan limbah biomassa lignoselulosa yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku bioetanol karena mengandung selulosa, hemiselulosa, dan pati yang dapat dikonversi menjadi gula fermentabel. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh waktu fermentasi dan persentase starter *Zymomonas mobilis* terhadap kadar etanol serta mengarakterisasi bioetanol yang dihasilkan. Hidrolisis dilakukan menggunakan HNO₃ dengan variasi konsentrasi 2, 4, 6, 8, dan 10 N serta waktu hidrolisis 60, 75, dan 90 menit untuk memperoleh kondisi optimum. Hidrolisat terbaik difermentasi selama 24, 48, dan 72 jam dengan variasi starter 10, 15, 20, 25, dan 30%, kemudian didistilasi. Bioetanol hasil distilasi dikarakterisasi berdasarkan kadar etanol, densitas, pH, dan komposisi senyawa menggunakan *Gas Chromatography–Mass Spectrometry* (GC-MS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi hidrolisis optimum diperoleh pada HNO₃ 10 N selama 60 menit dengan nilai 16,8 °Bx dan kadar gula reduksi 3,54%. Kondisi fermentasi optimum dicapai pada waktu fermentasi 48 jam dengan starter 15%, menghasilkan kadar etanol sebesar 57%. Bioetanol hasil distilasi memiliki kadar etanol 52%, densitas 0,8779 g/mL, pH 6, dan GC-MS mengidentifikasi etanol sebagai komponen dominan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa limbah kulit pisang kepok berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku bioetanol melalui optimasi proses hidrolisis dan fermentasi menggunakan *Zymomonas mobilis*.

Kata Kunci: biomassa lignoselulosa, hidrolisis asam, *zymomonas mobilis*, fermentasi, kulit pisang kepok

1. Pendahuluan

Peningkatan kebutuhan energi global serta keterbatasan sumber energi fosil mendorong pengembangan sumber energi alternatif yang bersifat terbarukan dan berkelanjutan. Bioetanol menjadi salah satu energi alternatif yang banyak dikembangkan karena dapat digunakan sebagai bahan bakar nabati dan memiliki potensi untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Selain itu, bioetanol dapat diproduksi dari berbagai sumber biomassa yang mengandung komponen karbohidrat sehingga menjadi salah satu solusi dalam pemanfaatan sumber daya terbarukan [1]. Pemanfaatan biomassa lignoselulosa sebagai bahan baku bioetanol semakin banyak dikaji karena berasal dari limbah pertanian yang tersedia melimpah serta tidak bersaing secara langsung dengan kebutuhan pangan. Biomassa

lignoselulosa tersusun atas komponen utama berupa selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang dapat dikonversi menjadi gula fermentabel melalui proses pre-treatment dan hidrolisis. Gula hasil hidrolisis tersebut selanjutnya dapat dimanfaatkan oleh mikroorganisme dalam proses fermentasi untuk menghasilkan etanol [2]. Salah satu limbah pertanian yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku bioetanol adalah kulit pisang (*Musa paradisiaca*). Tingginya produksi pisang menyebabkan peningkatan jumlah limbah kulit pisang yang belum dimanfaatkan secara optimal. Kulit pisang memiliki kandungan karbohidrat yang berpotensi dikonversi menjadi gula sederhana sehingga dapat digunakan sebagai substrat dalam proses fermentasi bioetanol [3].

Pemanfaatan limbah kulit pisang sebagai bahan baku bioetanol juga dapat menjadi upaya dalam meningkatkan nilai tambah limbah organik serta mengurangi dampak lingkungan akibat penumpukan limbah pertanian [4]. Tahapan hidrolisis merupakan salah satu faktor penting dalam produksi bioetanol berbasis biomassa lignoselulosa. Proses ini bertujuan untuk memecah struktur karbohidrat kompleks menjadi gula sederhana yang dapat difermentasi oleh mikroorganisme. Jumlah gula fermentabel yang dihasilkan dari proses hidrolisis akan memengaruhi keberhasilan proses fermentasi dan jumlah etanol yang terbentuk [5]. Keberhasilan fermentasi bioetanol juga dipengaruhi oleh jenis mikroorganisme yang digunakan. *Zymomonas mobilis* merupakan salah satu mikroorganisme yang berpotensi digunakan dalam produksi bioetanol karena memiliki kemampuan mengonversi gula menjadi etanol secara efisien melalui jalur metabolisme *Entner–Doudoroff*. Selain itu, *Z. mobilis* memiliki kemampuan menghasilkan etanol dengan produk samping yang relatif rendah sehingga dapat meningkatkan produktivitas fermentasi [6].

Selain pemilihan mikroorganisme, kondisi fermentasi seperti waktu fermentasi dan konsentrasi starter juga menjadi faktor penting dalam menentukan produksi etanol. Waktu fermentasi yang sesuai diperlukan agar mikroorganisme dapat melakukan metabolisme secara optimal, sedangkan konsentrasi starter harus berada pada kondisi yang tepat agar jumlah sel aktif mampu mengkonversi gula secara efektif. Konsentrasi starter yang terlalu rendah dapat menyebabkan proses fermentasi berjalan kurang optimal, sedangkan jumlah starter yang berlebihan dapat menyebabkan keterbatasan nutrisi pada substrat [7]. Beberapa penelitian mengenai produksi bioetanol berbasis biomassa telah banyak dilakukan, namun sebagian penelitian masih menggunakan bahan baku yang berbeda atau hanya mengkaji salah satu parameter fermentasi. Kajian mengenai pengaruh kombinasi waktu fermentasi dan persentase starter *Zymomonas mobilis* pada hidrolisat kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca*) masih perlu dikembangkan untuk memperoleh kondisi fermentasi optimum. Selain itu, karakterisasi bioetanol berdasarkan parameter kadar etanol, densitas, pH, dan analisis GC-MS diperlukan untuk mengetahui kualitas produk yang dihasilkan [8].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi waktu fermentasi dan persentase starter *Zymomonas mobilis* terhadap produksi bioetanol dari hidrolisat kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca*). Penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik bioetanol yang dihasilkan berdasarkan kadar etanol, pH, densitas, dan analisis GC-MS sehingga dapat diperoleh kondisi fermentasi optimum dalam pemanfaatan limbah kulit pisang sebagai sumber energi terbarukan.

2. Metode Penelitian

2.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama kurang lebih tiga bulan yang meliputi tahap persiapan bahan baku, proses hidrolisis, fermentasi, distilasi, analisis karakteristik bioetanol, pengolahan data, hingga penyusunan laporan penelitian. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknologi Kimia Industri, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya. Analisis komponen bioetanol menggunakan instrumen GC-MS dilakukan pada laboratorium pengujian yang memiliki fasilitas analisis kromatografi.

2.2 Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas bahan utama dan bahan pendukung. Bahan utama berupa kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca*) sebagai bahan baku pembuatan bioetanol dan kultur *Zymomonas mobilis* sebagai mikroorganisme fermentasi. Bahan pendukung yang digunakan meliputi bahan untuk proses hidrolisis, nutrisi fermentasi, serta bahan yang digunakan dalam analisis karakteristik bioetanol.

Alat utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi seperangkat alat hidrolisis yaitu refluks, wadah fermentasi (Erlenmeyer), inkubator, alat distilasi, refraktometer ATC, pH meter, piknometer, dan instrumen *Gas Chromatography–Mass Spectrometry* (GC-MS). Alat pendukung yang digunakan meliputi peralatan preparasi bahan baku dan peralatan laboratorium lainnya.

2.3 Prosedur Penelitian

Kulit pisang kepok dilakukan proses preparasi melalui pencucian untuk menghilangkan kotoran, kemudian dikeringkan dan dilakukan pengecilan ukuran. Bahan yang telah dipreparasi selanjutnya digunakan sebagai bahan baku pada proses hidrolisis untuk menghasilkan hidrolisat yang mengandung gula fermentabel. Hidrolisat kulit pisang kepok yang diperoleh kemudian dianalisis karakteristik awal berupa kadar gula sebesar 3,54% dan nilai pH sebesar 5 sebelum digunakan pada proses fermentasi. Proses fermentasi dilakukan menggunakan metode fermentasi batch secara anaerob dengan memanfaatkan *Zymomonas mobilis* sebagai mikroorganisme penghasil etanol. Fermentasi dilakukan menggunakan volume total 110 mL yang terdiri atas 100 mL hidrolisat kulit pisang kepok dan starter *Zymomonas mobilis*. Variasi konsentrasi starter yang digunakan yaitu 10, 15, 20, 25, dan 30%, sedangkan variasi waktu fermentasi dilakukan selama 24, 48, dan 72 jam pada suhu ruang. Setelah proses fermentasi selesai, hasil fermentasi dilakukan pemisahan melalui proses distilasi untuk memperoleh bioetanol dengan konsentrasi lebih tinggi. Produk hasil distilasi kemudian dilakukan pengujian karakteristik meliputi kadar etanol, pH, densitas, dan identifikasi komponen senyawa menggunakan analisis GC-MS.

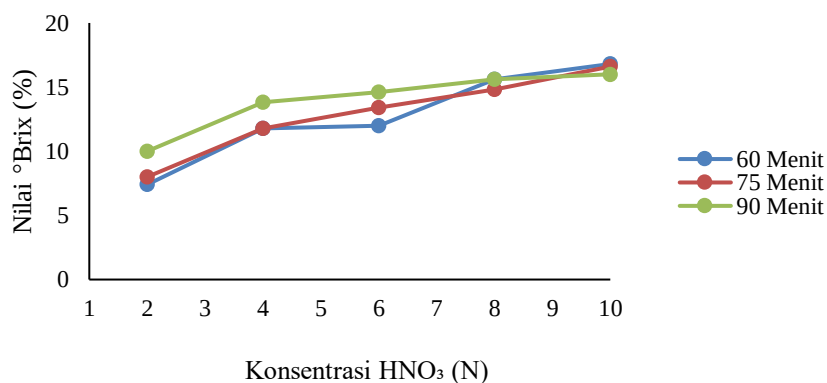
2.4 Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

Data penelitian diperoleh melalui pengamatan langsung selama proses fermentasi dan pengujian laboratorium. Data utama yang diperoleh berupa kadar etanol hasil fermentasi berdasarkan variasi waktu fermentasi dan konsentrasi starter *Zymomonas mobilis*. Data pendukung meliputi nilai pH, densitas, serta hasil identifikasi senyawa bioetanol menggunakan analisis GC-MS. Data hasil penelitian dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan pengaruh variasi waktu fermentasi dan konsentrasi starter terhadap kadar etanol yang dihasilkan. Kondisi fermentasi optimum ditentukan berdasarkan nilai kadar etanol tertinggi yang diperoleh selama proses fermentasi

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Hidrolisat Kulit Pisang Kepok

Karakterisasi hidrolisat kulit pisang kepok dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi konsentrasi asam nitrat (HNO_3) dan waktu hidrolisis terhadap pembentukan gula fermentabel sebelum digunakan pada proses fermentasi. Parameter yang diamati meliputi nilai $^{\circ}\text{Brix}$ sebagai indikator jumlah padatan terlarut hasil hidrolisis serta kadar gula reduksi sebagai indikator jumlah gula sederhana yang dapat dimanfaatkan oleh *Zymomonas mobilis*. Hasil pengukuran nilai $^{\circ}\text{Brix}$ dan kadar gula reduksi disajikan pada **Gambar 1** dan **Gambar 2**.

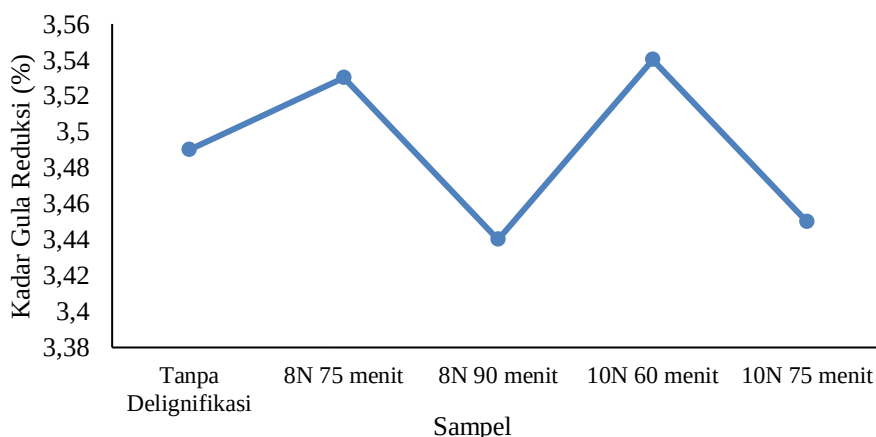


Gambar 1. Pengaruh Konsentrasi HNO_3 dan Waktu Hidrolisis terhadap Nilai $^{\circ}\text{Brix}$ Hidrolisat Kulit Pisang Kepok

Berdasarkan **Gambar 1**, nilai $^{\circ}\text{Brix}$ hidrolisat kulit pisang kepok menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya konsentrasi HNO_3 pada setiap variasi waktu hidrolisis. Pada perlakuan selama 60 menit, nilai $^{\circ}\text{Brix}$ meningkat dari sekitar 7,5 $^{\circ}\text{Bx}$ pada konsentrasi 2 N menjadi sekitar 16,8 $^{\circ}\text{Bx}$ pada konsentrasi 10 N. Tren peningkatan yang serupa juga terlihat pada waktu hidrolisis 75 menit dan 90 menit, meskipun nilai $^{\circ}\text{Brix}$ yang dihasilkan sedikit lebih rendah dibandingkan perlakuan 60 menit pada konsentrasi HNO_3 tertinggi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi HNO_3 mampu meningkatkan jumlah padatan terlarut yang terbentuk selama proses hidrolisis [9].

Peningkatan nilai $^{\circ}\text{Brix}$ terjadi karena ion hidrogen (H^+) dari HNO_3 mempercepat pemutusan ikatan glikosidik pada selulosa dan hemiselulosa sehingga menghasilkan senyawa yang larut dalam hidrolisat, termasuk gula sederhana. Semakin tinggi konsentrasi HNO_3 , proses hidrolisis berlangsung lebih efektif sehingga jumlah padatan terlarut yang terbentuk semakin meningkat. Namun demikian, nilai $^{\circ}\text{Brix}$

menggambarkan total padatan terlarut sehingga belum dapat menunjukkan secara spesifik jumlah gula fermentabel yang dihasilkan. Oleh karena itu, dilakukan analisis kadar gula reduksi untuk mengetahui jumlah gula sederhana yang benar-benar dapat dimanfaatkan pada proses fermentasi [10–11].



Gambar 2. Pengaruh Konsentrasi HNO_3 dan Waktu Hidrolisis terhadap Kadar Gula Reduksi Hidrolisat Kulit Pisang Kepok

Berdasarkan **Gambar 2**, kadar gula reduksi hidrolisat berada pada kisaran 3,44–3,54%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa variasi konsentrasi HNO_3 dan waktu hidrolisis memberikan pengaruh terhadap jumlah gula sederhana yang dihasilkan. Perlakuan 10 N selama 60 menit menghasilkan kadar gula reduksi tertinggi sebesar 3,54%, sedangkan perlakuan 8 N selama 90 menit menghasilkan kadar gula reduksi terendah sebesar 3,44%. Tingginya kadar gula reduksi pada perlakuan optimum menunjukkan bahwa proses hidrolisis berlangsung lebih efektif dalam mengonversi komponen lignoselulosa menjadi gula sederhana yang bersifat fermentabel [12].

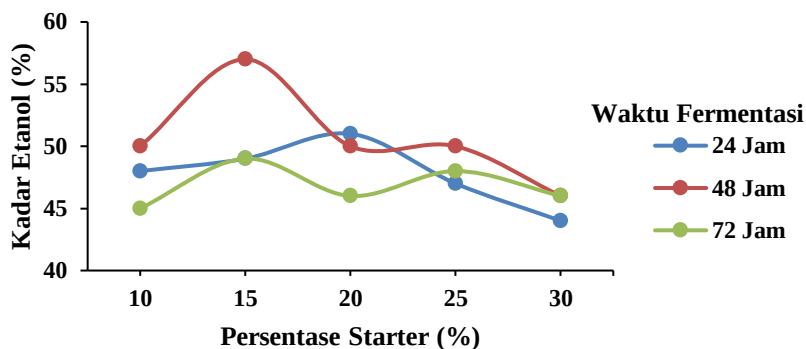
Apabila dibandingkan dengan hasil pengukuran nilai $^{\circ}\text{Brix}$, terlihat bahwa perlakuan dengan nilai $^{\circ}\text{Brix}$ yang tinggi tidak selalu menghasilkan kadar gula reduksi yang meningkat secara proporsional. Hal tersebut disebabkan karena nilai $^{\circ}\text{Brix}$ mencerminkan seluruh padatan terlarut dalam hidrolisat, sedangkan kadar gula reduksi hanya mengukur gula sederhana yang dapat dimanfaatkan oleh mikroorganisme selama proses fermentasi. Oleh karena itu, analisis kadar gula reduksi digunakan sebagai parameter utama dalam menentukan kondisi hidrolisis optimum [13].

Berdasarkan hasil pengukuran nilai $^{\circ}\text{Brix}$ dan kadar gula reduksi, kondisi hidrolisis optimum diperoleh pada penggunaan HNO_3 10 N selama 60 menit, yang menghasilkan nilai $^{\circ}\text{Brix}$ sekitar 16,8 $^{\circ}\text{Bx}$ dan kadar gula reduksi sebesar 3,54%. Hidrolisat yang diperoleh pada kondisi tersebut selanjutnya digunakan sebagai substrat pada proses fermentasi menggunakan *Zymomonas mobilis*. Sebelum fermentasi dilakukan, hidrolisat memiliki nilai pH sebesar 5, sehingga masih berada pada kisaran yang sesuai untuk mendukung pertumbuhan bakteri dan proses pembentukan etanol [14].

3.2 Pengaruh Waktu Fermentasi dan Persentase Starter terhadap Kadar Etanol

Kadar etanol merupakan parameter utama yang digunakan untuk mengevaluasi keberhasilan proses fermentasi hidrolisat kulit pisang kepok oleh *Zymomonas mobilis*. Pengaruh variasi waktu fermentasi dan konsentrasi starter terhadap kadar etanol yang dihasilkan ditunjukkan pada **Gambar 3**.

Berdasarkan **Gambar 3**, kadar etanol menunjukkan kecenderungan meningkat hingga waktu fermentasi 48 jam pada hampir seluruh variasi persentase starter, kemudian mengalami penurunan pada waktu fermentasi 72 jam. Pola tersebut menunjukkan bahwa aktivitas fermentasi berlangsung optimum pada waktu fermentasi 48 jam, sedangkan fermentasi yang berlangsung lebih lama menyebabkan efisiensi pembentukan etanol mulai menurun. Kondisi ini menunjukkan bahwa waktu fermentasi merupakan salah satu faktor yang memengaruhi kemampuan *Zymomonas mobilis* dalam mengonversi gula fermentabel menjadi etanol [15].



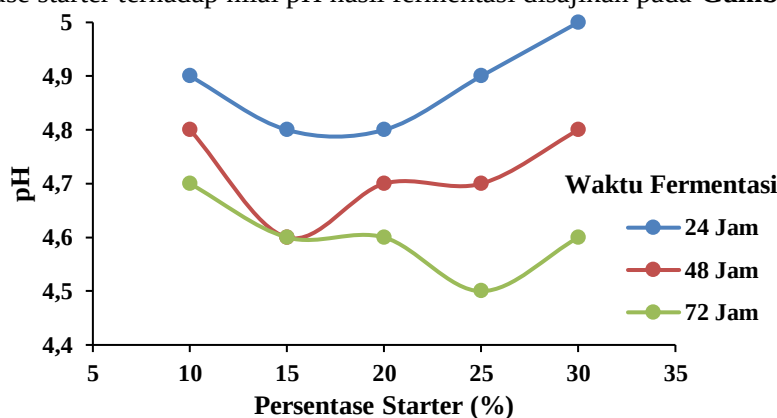
Gambar 3. Grafik pengaruh waktu fermentasi dan Persentase Starter terhadap Kadar Etanol

Pengaruh persentase starter juga terlihat dari perubahan kadar etanol yang dihasilkan. Peningkatan persentase starter hingga 15% menghasilkan kadar etanol tertinggi, sedangkan penambahan starter di atas 15% tidak lagi meningkatkan kadar etanol secara signifikan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa jumlah starter yang terlalu tinggi tidak selalu menghasilkan produksi etanol yang lebih besar karena ketersediaan substrat menjadi faktor pembatas. Selain itu, meningkatnya jumlah sel dalam media fermentasi dapat menyebabkan kompetisi antar mikroorganisme dalam memanfaatkan nutrisi sehingga efisiensi fermentasi menurun [16].

Penurunan kadar etanol pada waktu fermentasi 72 jam diduga disebabkan oleh semakin berkurangnya gula fermentabel yang tersedia sebagai substrat serta meningkatnya akumulasi etanol di dalam media fermentasi. Akumulasi etanol dapat menghambat aktivitas metabolisme *Zymomonas mobilis*, sehingga laju pembentukan etanol menjadi lebih rendah dibandingkan pada waktu fermentasi optimum [17]. Hasil penelitian ini sejalan dengan beberapa penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa fermentasi menggunakan *Zymomonas mobilis* umumnya mencapai produksi etanol optimum pada kisaran 48 jam, kemudian mengalami penurunan apabila waktu fermentasi diperpanjang akibat berkurangnya substrat dan meningkatnya efek inhibisi etanol terhadap pertumbuhan mikroorganisme [18]. Dengan demikian, kombinasi waktu fermentasi 48 jam dan persentase starter 15% merupakan kondisi optimum pada penelitian ini dengan kadar etanol tertinggi sebesar 57%.

3.3 Pengaruh Waktu Fermentasi dan Persentase Starter terhadap pH

Nilai pH merupakan salah satu parameter penting dalam proses fermentasi karena berpengaruh terhadap aktivitas metabolisme *Zymomonas mobilis* dalam mengonversi gula fermentabel menjadi etanol. Perubahan pH selama fermentasi dapat mencerminkan aktivitas mikroorganisme dalam memanfaatkan substrat serta pembentukan metabolit yang memengaruhi kondisi media fermentasi. Pengaruh variasi waktu fermentasi dan persentase starter terhadap nilai pH hasil fermentasi disajikan pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Grafik pengaruh waktu fermentasi dan Persentase Starter terhadap pH

Berdasarkan **Gambar 4**, nilai pH hasil fermentasi menunjukkan kecenderungan menurun seiring bertambahnya waktu fermentasi. Fermentasi selama 24 jam menghasilkan nilai pH yang relatif lebih tinggi dibandingkan fermentasi 48 jam dan 72 jam, sedangkan nilai pH terendah diperoleh pada fermentasi 72

jam. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa aktivitas metabolisme *Zymomonas mobilis* selama fermentasi menyebabkan terbentuknya metabolit yang meningkatkan keasaman media, sehingga nilai pH mengalami penurunan [19].

Variasi persentase starter juga memengaruhi perubahan pH media fermentasi. Meskipun pola perubahan pH pada setiap waktu fermentasi menunjukkan sedikit fluktuasi, secara umum nilai pH masih berada pada kisaran 4,5–5,0. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa media fermentasi masih mampu mempertahankan lingkungan yang sesuai bagi pertumbuhan dan aktivitas *Zymomonas mobilis*. Fluktuasi yang terjadi diduga berkaitan dengan perbedaan jumlah sel aktif dan laju pemanfaatan gula fermentabel pada setiap perlakuan sehingga pembentukan metabolit selama fermentasi tidak berlangsung dengan tingkat yang sama [20].

Apabila dibandingkan dengan hasil kadar etanol pada **Gambar 1**, kondisi optimum diperoleh pada waktu fermentasi 48 jam dengan persentase starter 15%, yaitu saat kadar etanol mencapai 57%. Pada kondisi tersebut, nilai pH masih berada dalam kisaran optimum bagi pertumbuhan *Zymomonas mobilis*, sehingga aktivitas enzim dan proses konversi gula menjadi etanol dapat berlangsung secara efektif. Sebaliknya, penurunan pH pada fermentasi 72 jam tidak diikuti oleh peningkatan kadar etanol, yang menunjukkan bahwa produksi etanol tidak hanya dipengaruhi oleh perubahan pH, tetapi juga oleh berkurangnya ketersediaan substrat dan meningkatnya akumulasi etanol yang dapat menghambat aktivitas mikroorganisme [21][22].

3.4 Karakteristik Bioetanol Hasil Distilasi

Berdasarkan **Tabel 1**, bioetanol hasil distilasi memiliki kadar etanol sebesar 52%, densitas 0,8779 g/mL, dan nilai pH 6. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses distilasi mampu menghasilkan bioetanol dengan karakteristik fisik yang lebih baik melalui pemisahan sebagian air dan komponen volatil lainnya dari hasil fermentasi. Meskipun demikian, kadar etanol dan densitas yang diperoleh menunjukkan bahwa bioetanol hasil distilasi masih mengandung komponen selain etanol sehingga kemurniannya belum mencapai etanol absolut [23].

Tabel 1. Bioetanol hasil distilasi

Parameter	Hasil
Kadar etanol (%)	52
Densitas (g/mL)	0,8779
pH	6

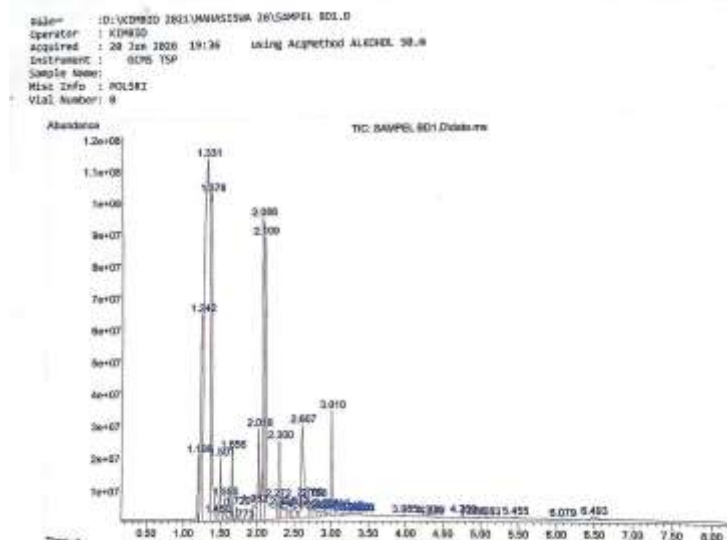
Nilai densitas sebesar 0,8779 g/mL yang lebih tinggi dibandingkan densitas etanol murni menunjukkan bahwa proses pemurnian belum sepenuhnya memisahkan campuran etanol dengan air. Kondisi tersebut umum dijumpai pada proses distilasi sederhana karena sistem etanol–air membentuk campuran azeotrop yang membatasi peningkatan kemurnian etanol tanpa perlakuan pemurnian lanjutan. Oleh karena itu, karakteristik densitas yang diperoleh masih mencerminkan keberadaan komponen lain dalam distilat [24].

Selain itu, bioetanol hasil distilasi memiliki nilai pH 6, yang menunjukkan bahwa sebagian besar senyawa asam yang terbentuk selama proses fermentasi telah berkurang setelah tahap pemurnian. Nilai pH yang mendekati netral mengindikasikan bahwa proses distilasi tidak hanya meningkatkan kualitas bioetanol dari sisi pemisahan komponen, tetapi juga menghasilkan produk dengan karakteristik yang lebih stabil [25].

Secara keseluruhan, hasil karakterisasi menunjukkan bahwa proses distilasi mampu memperbaiki sifat fisik bioetanol yang dihasilkan dari fermentasi hidrolisat kulit pisang kepok. Namun, densitas yang masih lebih tinggi dibandingkan etanol absolut menunjukkan bahwa bioetanol yang diperoleh belum sepenuhnya murni. Oleh karena itu, diperlukan analisis menggunakan GC-MS untuk mengidentifikasi komposisi senyawa penyusun bioetanol hasil distilasi secara lebih spesifik [26].

3.5 Analisis Bioetanol Menggunakan Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC-MS)

Bioetanol hasil distilasi pada kondisi optimum, yaitu waktu fermentasi 48 jam dengan persentase starter 15%, dianalisis menggunakan Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC-MS) untuk mengidentifikasi senyawa yang terkandung di dalamnya. Hasil analisis kromatogram disajikan pada **Gambar 5**, sedangkan identifikasi senyawa utama ditampilkan pada **Tabel 1**.



Gambar 5. Kromatogram Sampel Bioetanol Hasil Distilasi Dari Kondisi Optimum Fermentasi Hidrolisat Kulit Pisang Kepok

Berdasarkan **Gambar 5**, hasil analisis GC-MS menunjukkan bahwa bioetanol hasil distilasi mengandung senyawa etanol sebagai komponen utama dengan kadar sebesar 52%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses fermentasi hidrolisat kulit pisang kepok menggunakan *Zymomonas mobilis* yang dilanjutkan dengan proses distilasi mampu menghasilkan produk bioetanol dengan kandungan etanol yang cukup tinggi. Keberadaan puncak lain dengan intensitas lebih rendah menunjukkan kemungkinan adanya senyawa pengotor atau senyawa hasil samping fermentasi yang masih terdapat dalam distilat setelah proses pemurnian.

Hasil analisis GC-MS tersebut memiliki nilai yang berbeda dibandingkan dengan pengukuran kadar etanol menggunakan refraktometer pada tahap fermentasi, yaitu sebesar 57%. Perbedaan nilai tersebut dapat terjadi karena kedua metode memiliki prinsip analisis yang berbeda. Pengukuran menggunakan refraktometer didasarkan pada perubahan indeks bias larutan yang dapat dipengaruhi oleh keberadaan etanol dan komponen terlarut lainnya, sedangkan GC-MS melakukan pemisahan dan identifikasi senyawa berdasarkan waktu retensi serta spektrum massa sehingga memberikan hasil yang lebih spesifik terhadap kandungan etanol dalam sampel.

Penurunan kadar etanol dari 57% sebelum distilasi menjadi 52% setelah distilasi berdasarkan GC-MS dapat dipengaruhi oleh proses pemisahan selama tahap pemurnian serta perbedaan metode pengukuran. Selain itu, selama proses distilasi dimungkinkan terjadi kehilangan sebagian etanol akibat sifat etanol yang mudah menguap. Namun demikian, hasil GC-MS tetap menunjukkan bahwa etanol merupakan senyawa dominan dalam produk bioetanol yang dihasilkan.

Hasil analisis GC-MS juga mendukung karakterisasi fisik bioetanol hasil distilasi yang memiliki nilai densitas sebesar 0,8779 g/mL dan pH sebesar 6. Nilai densitas yang masih lebih tinggi dibandingkan densitas etanol murni menunjukkan bahwa bioetanol hasil distilasi belum mencapai tingkat kemurnian tinggi dan masih memungkinkan mengandung air maupun senyawa lain dalam jumlah tertentu. Hal tersebut sesuai dengan hasil kromatogram GC-MS yang menunjukkan adanya beberapa puncak selain etanol.

Berdasarkan hasil analisis tersebut, dapat disimpulkan bahwa fermentasi hidrolisat kulit pisang kepok menggunakan *Zymomonas mobilis* pada kondisi optimum 48 jam fermentasi dengan starter 15% mampu menghasilkan bioetanol yang dikonfirmasi melalui analisis GC-MS dengan kadar etanol sebesar 52%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kulit pisang kepok berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku bioetanol berbasis biomassa.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, hidrolisat kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca*) yang diperoleh melalui proses hidrolisis menggunakan HNO_3 konsentrasi 10 N selama 60 menit menghasilkan kondisi optimum dengan nilai °Brix sebesar 16,8°Bx dan kadar gula reduksi sebesar 3,54%, sehingga layak digunakan sebagai substrat fermentasi. Variasi waktu fermentasi dan persentase starter *Zymomonas mobilis* berpengaruh terhadap kadar etanol yang dihasilkan, dengan kondisi optimum diperoleh pada waktu fermentasi 48 jam dan persentase starter 15%, yang menghasilkan kadar etanol tertinggi sebesar 57%.

Karakterisasi bioetanol hasil distilasi menunjukkan kadar etanol sebesar 52%, densitas 0,8779 g/mL, dan pH 6, sedangkan analisis menggunakan GC-MS mengonfirmasi bahwa etanol merupakan komponen utama dalam bioetanol yang dihasilkan. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan hidrolisat kulit pisang kepok melalui optimasi kondisi hidrolisis dan fermentasi menggunakan *Zymomonas mobilis* mampu menghasilkan bioetanol dengan karakteristik yang mendukung pemanfaatannya sebagai bahan bakar alternatif. Temuan ini memberikan informasi mengenai kondisi proses yang optimum sekaligus memperkuat potensi limbah kulit pisang kepok sebagai bahan baku bioetanol berbasis biomassa lignoselulosa dalam mendukung pengembangan energi terbarukan yang berkelanjutan.

5. Referensi

- [1] A. N. Sawarkar, N. Kirti, A. Tagade, and S. P. Tekade, "Bioethanol from various types of banana waste: A review," *Bioresource Technology Reports*, vol. 18, Art. no. 101092, 2022, doi: 10.1016/j.biteb.2022.101092.
- [2] M. El Hage, H. N. Rajha, Z. Maache-Rezzoug, M. Koubaa, and N. Louka, "Intensification of Bioethanol Production from Different Lignocellulosic Biomasses, Induced by Various Pretreatment Methods: An Updated Review," *Energies*, vol. 15, no. 19, 2022, Art. 6912, doi: 10.3390/en15196912.
- [3] J. Ferreira, V. A. Q. Santos, and C. H. G. Cruz, "Ethanol production by co-culture of *Zymomonas mobilis* and *Pachysolen tannophilus* using banana peels hydrolysate as substrate," *Acta Scientiarum. Technology*, vol. 40, Art. e35169, 2018, doi: 10.4025/actascitechnol.v40i1.35169.
- [4] B. Zheng, S. Yu, Z. Chen, and Y.-X. Huo, "A consolidated review of commercial-scale high-value products from lignocellulosic biomass," *Frontiers in Microbiology*, vol. 13, Art. no. 1046103, 2022, doi: 10.3389/fmicb.2022.1046103.
- [5] M. Rastogi, S. Shrivastava, and R. Singh, "Recent progress in lignocellulosic bioethanol production technologies," *Fuel*, vol. 331, Art. no. 125909, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.125909.
- [6] A. Braga, D. Gomes, J. Rainha, C. Amorim, B. B. Cardoso, E. J. Gudiña, S. C. Silvério, J. L. Rodrigues, and L. R. Rodrigues, "*Zymomonas mobilis* as an emerging biotechnological chassis for the production of industrially relevant compounds," *Bioresources and Bioprocessing*, vol. 8, Art. no. 128, 2021, doi: 10.1186/s40643-021-00483-2.
- [7] L. Liu, J. Li, S. Li, Y. Wang, Y. Zhao, X. Wang, and X. Zhang, "The potential use of *Zymomonas mobilis* for the food industry," *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 64, no. 13, pp. 4134–4154, 2024.
- [8] S. Abbas, M. N. Ali, and M. A. Arshad, "Bacterial metabolic engineering for the production of second-generation (2G) bioethanol and biobutanol: A review," *Journal of Applied Microbiology*, vol. 134, no. 2, 2023.
- [9] S. Kumar, P. Saini, and R. K. Sharma, "Acid pretreatment strategies for enhanced bioethanol production from lignocellulosic biomass," *Bioresource Technology Reports*, vol. 22, Art. no. 101387, 2023.
- [10] A. G. Nitsos, E. Matsakas, and P. Christakopoulos, "Recent developments in biomass hydrolysis toward bioethanol production," *Energies*, vol. 15, no. 21, Art. no. 8075, 2022.
- [11] F. Shah, M. Tahir, A. Mahmood, M. Bilal, H. M. N. Iqbal, M. A. Nadeem, and M. Irfan, "Recent advances in lignocellulosic biomass conversion into bioethanol," *Sustainability*, vol. 14, no. 20, Art. no. 13240, 2022.
- [12] V. Ashokkumar, Y.-S. Chen, S. Rengasamy, N. Krishnamoorthy, and P. Arivalagan, "Recent advances in lignocellulosic biomass for biofuels and value-added bioproducts – A critical review," *Bioresource Technology*, vol. 344, Art. no. 126195, 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2021.126195.
- [13] D. S. Pendse, M. Deshmukh, and A. Pande, "Different pre-treatments and kinetic models for bioethanol production from lignocellulosic biomass: A review," *Heliyon*, vol. 9, no. 6, Art. no. e16604, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e16604.
- [14] S. Asefi, H. Nouri, G. Pourmohammadi, M. Ebrahimi, S. M. Mousavi, M. M. Mortazavi, and M. G. Maragheh, "Comprehensive network of stress-induced responses in *Zymomonas mobilis* during bioethanol production: From physiological and molecular responses to the effects of system metabolic engineering," *Microbial Cell Factories*, vol. 23, Art. no. 180, 2024, doi: 10.1186/s12934-024-02459-1.
- [15] E. C. Boismier, E. A. Aboulmaga, and M. A. TerAvest, "*Zymomonas mobilis*: Bringing an Ancient Human Tool into the Genomic Era," *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 92, Art. no. 103257, 2025, doi: 10.1016/j.copbio.2025.103257.

- [16] M. M. Karim, M. A. Islam, and M. A. Rahman, "Current advances in microbial bioethanol production using *Zymomonas mobilis*," *Fermentation*, vol. 10, no. 1, Art. no. 34, 2024.
- [17] J. Lou, X. Wang, R. Li, J. Yao, J. Hu, X. Qin, M. Jin, and S. Yang, "Integration of metabolic and evolutionary processes to construct efficient xylose-utilizing strain of *Zymomonas mobilis* for lignocellulosic ethanol production," *Synthetic and Systems Biotechnology*, vol. 10, no. 3, pp. 858–867, 2025, doi: 10.1016/j.synbio.2025.04.009.
- [18] R. Ravindran, S. S. Hassan, G. A. Williams, and A. K. Jaiswal, "A review on bioconversion of lignocellulosic biomass to bioethanol: Process optimization and sustainability," *Bioresource Technology*, vol. 320, Art. no. 124353, 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2020.124353.
- [19] M. K. Mohd Azhar, A. A. Hussain, J. C. Chong, and N. J. Abdullah, "A review on bioethanol production from lignocellulosic biomass using *Zymomonas mobilis*," *Biomass and Bioenergy*, vol. 143, Art. no. 105839, 2020, doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105839.
- [20] Y. Wang, H. Zhang, L. Chen, X. Li, Y. Zhao, and S. Bao, "Metabolic engineering of *Zymomonas mobilis* for efficient ethanol production from lignocellulosic hydrolysates," *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, vol. 17, Art. no. 96, 2024.
- [21] R. Kumar, N. Kumar, S. Saini, C. Singh, P. Barnwal, and A. Panghal, "Ethanol from lignocellulosic biomass: Pretreatment challenges and opportunities in sustainable waste management and energy production," *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 19, no. 6, pp. 2712–2738, 2025, doi: 10.1002/bbb.70039.
- [22] C. He, Y. Zhang, X. Li, Y. Wang, and S. Bao, "Advances in metabolic engineering of *Zymomonas mobilis* for efficient bioethanol production from lignocellulosic biomass," *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, vol. 17, Art. 61, 2024.
- [23] J. A. M. Santos, P. R. Silva, and L. F. Oliveira, "Advances in microbial fermentation technologies for bioethanol production from agricultural residues," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 184, Art. no. 113572, 2023.
- [24] N. Novia, E. Melwita, A. M. Jannah, Selpiana, Yandriani, B. D. Afrah, and M. Rendana, "Current advances in bioethanol synthesis from lignocellulosic biomass: Sustainable methods, technological developments, and challenges," *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 2025, doi: 10.1007/s43994-025-00212-x.
- [25] Q. Li, H. Xu, J. Zhao, Y. Wang, X. Liu, and S. Chen, "Recent progress in stress tolerance engineering of *Zymomonas mobilis* for industrial bioethanol production," *Microbial Biotechnology*, vol. 18, no. 2, 2025.
- [26] T. H. Nassir and S. Al-Sahlany, "Bioethanol Production from Agricultural Wastes by *Zymomonas mobilis* and Used in Vinegar Production," *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, vol. 11, no. 3, e3709, 2021, doi: 10.15414/jmbfs.3709.