

Produksi Bioetanol dari Hidrolisat Ampas Tebu Sistem Selulase *B. subtilis* Diikuti Fermentasi dengan Variasi Waktu dan Jenis Inokulum

*Bioethanol Production from Sugarcane Bagasse Hydrolysate *B. Subtilis* Cellulase System Followed by Fermentation with Variations in Time and Type of Inoculum*

Cahyaning Rini Utami^{1)*}, Hapsari Titi Palupi¹⁾, Ernawati²⁾

- 1) Prodi Ilmu dan Teknologi Pangan Fakultas Pertanian Pangan Universitas Yudharta Pasuruan, Pasuruan
2) Prodi Teknologi Hasil Perikanan Fakultas Pertanian Pangan Universitas Yudharta Pasuruan, Pasuruan

Email: rini@yudharta.ac.id

ABSTRAK

Produksi bioetanol menggunakan hidrolisat ampas tebu dengan sistem selulase *Bacillus subtilis* memiliki keuntungan karena ampas tebu merupakan bahan baku yang melimpah dan murah, serta proses hidrolisis yang efisien dapat mengonversi lignoselulosa menjadi glukosa yang siap difermentasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi produksi bioetanol dari hidrolisat ampas tebu dengan menggunakan sistem selulase *Bacillus subtilis* dan variasi waktu fermentasi serta jenis inokulum. Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Kelompok (RAK) dengan dua faktor: waktu fermentasi (24, 48, 72 jam) dan jenis inokulum (*Saccharomyces cerevisiae* 5% dan ragi tape 5%), masing-masing pengulangan triplo. Karakteristik bioetanol yang dihasilkan dianalisa rendemen, efisiensi fermentasi dan kadar alkohol. Analisis data dilakukan menggunakan uji ANOVA dua arah, dilanjutkan dengan uji Tukey ($\alpha=0,05\%$) untuk menentukan perlakuan terbaik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan dengan *Saccharomyces cerevisiae* 5% pada waktu fermentasi 48 jam memberikan hasil terbaik, dengan rendemen bioetanol 122,16 mL/kg dan kadar alkohol 76,8%. Implikasi dari hasil ini menunjukkan bahwa pemilihan inokulum dan waktu fermentasi yang tepat sangat penting untuk memaksimalkan produksi bioetanol dari ampas tebu.

Kata kunci: bioetanol, waktu fermentasi, *Saccharomyces cerevisiae*, ragi tape

ABSTRACT

*Bioethanol production using sugarcane bagasse hydrolyzate with a *Bacillus subtilis* cellulase system has advantages because bagasse is an abundant and cheap raw material, and an efficient hydrolysis process can convert lignocellulose into glucose, which is ready to be fermented. This research aims to evaluate bioethanol production from sugarcane bagasse hydrolysate using the *Bacillus subtilis* cellulase system and varying fermentation times and inoculum types. This research used a Randomized Block Design (RBD) with two factors: fermentation time (24, 48, 72 hours) and kind of inoculum (*Saccharomyces cerevisiae* 5% and tape yeast 5%), each in triplicate repetitions. The characteristics of the bioethanol produced were analyzed for yield, fermentation efficiency and alcohol content. Data was analyzed using a two-way ANOVA test and the Tukey test ($\alpha=0.05\%$) to determine the best treatment. The results showed that treatment with 5% *Saccharomyces cerevisiae* at a fermentation time of 48 hours gave the best results, with a bioethanol yield of 122.16 mL/kg and alcohol content of 76.8%. The implications of these results indicate that selecting the right inoculum and fermentation time is very important to maximize bioethanol production from sugarcane bagasse.*

Keywords: *bioethanol, fermentation time, *Saccharomyces cerevisiae*, tape yeast*

PENDAHULUAN

Permintaan terhadap energi terbarukan terus meningkat di tengah kekhawatiran akan menipisnya cadangan energi fosil dan dampak buruknya terhadap lingkungan. Bioetanol telah menjadi salah satu bahan bakar alternatif yang menarik perhatian global karena sifatnya yang terbarukan, ramah lingkungan, dan mampu mengurangi emisi gas rumah kaca (Aggarwal *et al.*, 2022; Osman *et al.*, 2021). Sebagai salah satu bahan bakar berbasis bioetanol, campuran E10 (10% bioetanol dalam bensin) kini telah digunakan secara luas di berbagai negara untuk mendukung transisi energi berkelanjutan. Permintaan global terhadap bioetanol diperkirakan terus meningkat, dengan proyeksi mencapai 65,4 miliar liter pada tahun 2030 (Asase *et al.*, 2024). Keunggulan bioetanol tidak hanya terletak pada sifatnya yang ramah lingkungan, tetapi juga kontribusinya dalam menurunkan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, terutama di sektor transportasi.

Indonesia memiliki peluang besar untuk mengembangkan bioetanol dengan memanfaatkan sumber daya biomassa yang melimpah. Salah satu limbah agroindustri yang memiliki potensi besar untuk diolah menjadi bioetanol adalah ampas tebu. Ampas tebu dihasilkan dalam jumlah besar sebagai hasil samping dari proses produksi gula, dengan estimasi produksi global mencapai 544 juta ton per tahun (Kumari *et al.*, 2024). Di Indonesia, ampas tebu merupakan limbah yang tersedia sepanjang tahun, terutama di daerah penghasil gula seperti Jawa Timur, Lampung, dan Sulawesi Selatan. Kandungan utama ampas tebu berupa selulosa (40-50%) dan hemiselulosa (25-35%) menjadikannya bahan baku yang ideal untuk bioetanol. Namun, lignin yang menyusun 20-30% struktur biomassa ini menjadi penghalang

dalam proses hidrolisis enzimatis, sehingga memerlukan *pretreatment* atau enzim dengan aktivitas tinggi untuk mengatasi hambatan tersebut (Hou *et al.*, 2024).

Pendekatan enzimatis telah menjadi metode pilihan yang ramah lingkungan untuk memecah selulosa menjadi gula sederhana sebelum difermentasi menjadi etanol. *Bacillus subtilis* telah menjadi fokus perhatian karena kemampuannya menghasilkan selulase dengan aktivitas tinggi dan stabilitas enzim yang baik (Tuli & Kuila, 2021). Selulase dari *B. subtilis* tidak hanya efektif dalam memecah ikatan β -1,4-glikosida pada selulosa, tetapi juga memiliki keunggulan dibandingkan selulase dari *Bacillus circulans* yang digunakan pada penelitian sebelumnya, terutama dalam hal stabilitas pH dan aktivitas pada substrat kompleks (Malik & Javed, 2021; Umar, 2024). Dalam metode *Separate Hydrolysis and Fermentation* (SHF), hidrolisis dilakukan secara terpisah sebelum tahap fermentasi untuk memungkinkan optimasi pada masing-masing tahap. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa metode SHF dapat meningkatkan efisiensi konversi substrat hingga 15-20% dibandingkan metode simultan (Afedzi & Parakulsuksatid, 2023). Dengan menggunakan enzim selulase dari *Bacillus subtilis* dalam proses hidrolisis ampas tebu, diharapkan produksi gula sederhana dapat meningkat, sehingga hasil akhir berupa bioetanol juga menjadi lebih tinggi.

Faktor lain yang menentukan keberhasilan produksi bioetanol adalah inokulum dan waktu fermentasi. Waktu fermentasi merupakan parameter penting yang dapat memengaruhi efisiensi konversi substrat menjadi etanol. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa waktu fermentasi yang terlalu singkat dapat menghasilkan rendemen etanol yang rendah karena substrat belum sepenuhnya terkonversi

(Tenkolu et al., 2024). Sebaliknya, fermentasi yang terlalu lama sering kali menyebabkan peningkatan produk sampingan, seperti asam organik, yang dapat menurunkan kemurnian bioetanol (Pratiwi et al., 2024). Oleh karena itu, variasi waktu fermentasi dilakukan dalam penelitian ini untuk menentukan durasi optimal yang menghasilkan rendemen etanol maksimal tanpa mengorbankan kualitas produk. Waktu fermentasi divariasikan untuk mengidentifikasi interaksi antara waktu fermentasi, jenis inokulum, dan kualitas bioetanol yang dihasilkan dalam penelitian ini.

Ragi tape dan *Saccharomyces cerevisiae* digunakan sebagai inokulum untuk mengevaluasi efisiensi fermentasi. Ragi tape, sebagai inokulum tradisional, dikenal kaya akan mikroba seperti *Saccharomyces* sp. dan *Lactobacillus* sp., yang dapat memfermentasi gula menjadi etanol dengan baik (ul-Haque & Mueedin, 2021). Namun, keberagaman mikroorganisme dalam ragi tape sering kali menghasilkan variasi dalam kualitas bioetanol. Sebaliknya, *S. cerevisiae* sebagai ragi murni, memiliki kemampuan konsisten dalam memproduksi etanol dengan efisiensi tinggi hingga 85% pada substrat kaya glukosa (Fernandes et al., 2022). Penelitian ini berfokus pada perbandingan keduanya dalam hal rendemen etanol, efisiensi fermentasi dan kualitas bioetanol yang dihasilkan. Tujuan penelitian adalah untuk mencari perlakuan terbaik dari variasi waktu fermentasi dan jenis inokulum terhadap karakteristik bioetanol yang dihasilkan.

Aspek ekonomi menjadi bagian penting dalam penelitian ini. Perbandingan proses dan analisis optimasi kondisi sangat penting untuk menentukan apakah teknologi yang diusulkan layak untuk diterapkan pada skala industri. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa optimasi pada tahap hidrolisis enzimatis dapat menurunkan biaya produksi bioetanol hingga 15% (Chen et al., 2022). Dalam

penelitian ini, analisis perbandingan proses dilakukan untuk menentukan perlakuan terbaik berdasarkan nilai teknis dan ekonomis. Parameter seperti rendemen bioetanol, efisiensi fermentasi dan kadar alkohol, memberikan indikator penting untuk menilai keberhasilan proses fermentasi.

Penelitian ini memiliki nilai kebaruan yang signifikan, terutama melalui hidrolisis lignoselulosa ampas tebu menggunakan sistem selulase dari *Bacillus subtilis* dalam proses SHF. Selain itu, perbandingan antara ragi tape dan *S. cerevisiae* sebagai inokulum memberikan wawasan baru tentang pengaruh mikroorganisme tradisional dan modern dalam produksi bioetanol. Dengan mengevaluasi pengaruh waktu fermentasi dan jenis inokulum, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan panduan ilmiah yang dapat diadopsi pada skala industri. Hasil penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi pada literatur ilmiah, tetapi juga menjadi dasar bagi pengembangan teknologi bioetanol yang lebih efisien, berkelanjutan, dan ekonomis.

METODE

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Januari hingga April 2024 di Laboratorium Teknologi Pangan dan Laboratorium Biokimia, Fakultas Pertanian, Universitas Yudharta Pasuruan. Analisis bioetanol dilakukan di Laboratorium Biokimia Universitas Negeri Malang.

Bahan dan Alat

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah ampas tebu segar yang diperoleh dari PG Kebon Agung Pakisaji Malang. Mikroorganisme yang digunakan meliputi kultur biakan *Bacillus subtilis*, biakan murni *Saccharomyces cerevisiae*, dan ragi tape merk NKL. Media yang digunakan

meliputi nutrisi broth cair, serbuk agar, dan media garam mineral Berg cair pH 9. Bahan kimia dengan tingkat kemurnian p.a. yang digunakan mencakup glukosa, natrium nitrat, kalium hidrogen fosfat, magnesium sulfat heksahidrat, karboksimetil selulosa (CMC), mangan sulfat monohidrat, natrium karbonat anhidrat, besi (II) sulfat heksahidrat, kalsium klorida dihidrat, tembaga (II) sulfat 5-hidrat, asam sulfat pekat, arsenomolibdat, larutan buffer fosfat pH 5, dan akuades.

Alat-alat yang digunakan meliputi peralatan gelas, seperti gelas piala (50, 100, 600, 1000, dan 2000 mL), erlenmeyer 250 mL, gelas ukur (5, 10, 25, 50, dan 100 mL), corong kaca, pengaduk, termometer, tabung reaksi, pipet tetes, dan pipet volum (1 mL dan 5 mL). Selain itu, alat khusus meliputi autoklaf untuk sterilisasi (121 °C, 15 psi), laminar flow (*Esco Class II*) untuk inokulasi aseptik, sentrifuge (*Hettich Universal 320*) dengan kecepatan maksimum 6000 rpm, dan spektrofotometer UV-Vis (*GENESYS 20*) dengan panjang gelombang 340–1000 nm. Alat destilasi fraksional dengan pengontrol suhu digunakan untuk destilasi bioetanol. Alat penunjang lain: pemanas listrik, kertas saring kasar, pisau, neraca analitik, statif, klem, kawat kasa, kaki tiga, lampu spiritus, penjepit tabung, botol semprot, autoklaf, laminar flow, sentrifuge, jarum ose, kapas, kassa, aluminium foil, dan oven inkubator.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Kelompok (RAK) dengan 2 faktor yaitu variasi waktu fermentasi dan jenis inokulum menggunakan metode *Separate Hydrolysis and Fermentation* (SHF). Tahapan penelitian meliputi:

1. Produksi ekstrak kasar enzim selulase dari *Bacillus subtilis*

Biakan murni *Bacillus subtilis* yang dibeli dari Lab Mikrobiologi ITB dengan

kode Su-012024 diremajakan pada medium nutrisi agar, diinkubasi pada suhu 37 °C selama 3 hari. Starter dibuat dengan sebanyak 3 ose biakan murni diinokulasi ke dalam medium nutrisi broth cair, diinkubasi selama 24 jam pada suhu 37 °C. Starter sebanyak 2 mL diinokulasi ke dalam 100 mL media garam mineral Berg cair, dalam kondisi optimum yaitu diinkubasi pada suhu 37°C selama 5 hari (Malik & Javed, 2021). Kultur hasil inkubasi disentrifugasi pada 3000 rpm selama 20 menit untuk memperoleh supernatan sebagai ekstrak kasar sistem selulase, diukur aktivitas CMC-ase dan Avicelase.

2. Hidrolisis Ampas Tebu Menggunakan Ekstrak Kasar Selulase *Bacillus subtilis*

Ampas tebu kering sebanyak 100 g dicuci bersih, diautoklaf pada suhu 121 °C selama 30 menit, kemudian direndam dalam larutan H₂SO₄ 0,01M selama 48 jam. Ampas dicuci ulang dengan akuades panas dua kali, lalu disaring. Hidrolisis dilakukan dengan mencampurkan 10g ampas tebu yang sudah mendapat perlakuan awal ditambah 50 mL ekstrak kasar selulase, dan buffer fosfat pH 5 hingga mencapai volume 500ml. Campuran diinkubasi dalam penangas air pada suhu 45°C dengan pengadukan selama 12 jam. Filtrat hasil hidrolisis dianalisis kadar glukosanya menggunakan metode *Somogyi-Nelson* (Nafiqoh & Suryaningrum, 2020).

3. Fermentasi Hasil Hidrolisis dengan Variasi Waktu dan Inokulum

Filtrat hasil hidrolisis yang sudah dipisahkan ampasnya diukur volumenya kemudian dimasukkan wadah plastik digunakan sebagai substrat fermentasi dan jenis inokulum berupa ragi tape merk NKL dan *Saccharomyces cerevisiae* murni yang dibeli di Lab Biokimia UB. Ragi tape NKL yang berbentuk serbuk kering ditimbang konsentrasi 5% b/v dan langsung dicampurkan ke dalam filtrat hidrolisis

yang sudah diukur volumenya tiap perlakuan. *Saccharomyces cerevisiae* murni dari kultur padat (agar miring) diremajakan terlebih dahulu dalam media Broth. Suspensi *S. cerevisiae* dengan konsentrasi 5% (b/v) kemudian ditambahkan ke dalam filtrat hidrolisis. Fermentasi dilakukan pada suhu 37 °C dengan variasi waktu fermentasi 24, 48, dan 72 jam dalam kondisi anaerob. Setelah fermentasi selesai, hasilnya didestilasi menggunakan alat destilasi fraksional pada suhu 75–78°C selama kurang lebih 24 jam sampai tidak ada yang menetes lagi sebagai destilat. Percobaan untuk masing-masing perlakuan dilakukan pengulangan 3 kali. Dari pengulangan perlakuan didapat 18 kali percobaan.

4. Rendemen Bioetanol dan Kadar Alkohol

Rendemen bioetanol dihitung berdasarkan volume destilat cair yang dihasilkan dan kadar alkohol yang diukur menggunakan alkoholmeter (Ansar *et al.*, 2021). Setelah proses fermentasi selesai, sampel cairan hasil destilasi diambil dan didinginkan hingga suhu kamar. Volume destilat yang dihasilkan setelah proses distilasi dicatat, dan kadar alkoholnya diukur dengan alkoholmeter. Alkoholometer kemudian dicelupkan ke dalam sampel cairan, dan pembacaan dilakukan pada skala yang tertera pada alat. Hasil pembacaan alkoholmeter menunjukkan persentase volume alkohol dalam cairan (kadar alkohol) dalam satuan % v/v. Kadar alkohol dihitung dengan rumus:

Kadar alkohol (%) : $\text{Faktor pengenceran} \times \text{Pembacaan skala alkoholmeter (\%)}$.

Rendemen bioetanol ditentukan dengan rumus:

Rendemen
bioetanol=



Efisiensi Fermentasi mengukur seberapa efisien proses fermentasi dalam mengubah glukosa menjadi bioetanol. Efisiensi fermentasi dihitung berdasarkan perbandingan antara jumlah bioetanol yang dihasilkan dengan jumlah glukosa yang tersedia untuk fermentasi. Rumus untuk menghitung efisiensi fermentasi adalah:

$$\text{Efisiensi Fermentasi (\%)} = \frac{\text{Volume bioetanol (ml)} \times \text{kadarbioetanol (\%)}}{\text{kadar glukosa dalam filtrat (mg/ml)} \times \text{volume filtrat (ml)}} \times 100\%$$

Analisis Data

Data yang diperoleh dari penelitian dianalisis menggunakan metode statistik untuk menentukan pengaruh waktu fermentasi dan jenis inokulum terhadap rendemen bioetanol, efisiensi fermentasi dan kadar alkohol. Analisis statistika dilakukan menggunakan perangkat lunak Minitab *release* 20 untuk mempermudah pengolahan data. Analisis varians (ANOVA) dua arah digunakan untuk mengevaluasi interaksi antara waktu fermentasi dan jenis inokulum terhadap parameter yang diukur. Jika ditemukan perbedaan signifikan ($p < 0,05$), analisis dilanjutkan dengan uji *Tukey HSD (Honestly Significant Difference)* untuk mengidentifikasi perlakuan terbaik berdasarkan nilai rata-rata tertinggi pada setiap parameter. Selanjutnya, untuk menentukan perlakuan yang paling optimal dalam produksi bioetanol, digunakan metode indeks efektivitas De Garmo. Hasil analisis dipresentasikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan interpretasi dan penarikan statistika terkait perlakuan terbaik dalam produksi bioetanol.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini berupa data hasil ekstrak kasar sistem selulase dari

5. Efisiensi Fermentasi

Bacillus subtilis diisolasi berdasarkan Malik & Javed (2021). Setiap kali isolasi, sebelum digunakan, sistem selulase tersebut perlu ditentukan aktivitasnya untuk menjaga konsistensi dengan penelitian sebelumnya. Perbandingan aktivitas sistem selulase hasil penelitian dengan penelitian Malik & Javed (2021) terdapat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Penentuan Aktivitas Sistem Selulase *B. Subtilis* Hasil Isolasi
Table 1. Data for Determining Cellulase System Activity *B. Subtilis* Isolation Results

		Rata-rata Aktivitas Enzim (U/ml)	Rata-rata Konsentrasi Glukosa (mg/ml)
		Average Enzyme Activity (U/ml)	Average Glucose Concentration (mg/ml)
pH	Parameter	58,81±0,08	44,45±0,07
	CMC-ase	111,13±0,09	87,65±0,04

Sistem selulase yang digunakan dalam penelitian ini memiliki dua parameter utama aktivitas enzim, yaitu Avicelase dan CMC-ase, yang diukur untuk memastikan efektivitasnya dalam proses hidrolisis substrat. Perbedaan aktivitas antara kedua jenis enzim ini menunjukkan bahwa CMC-ase memiliki kemampuan yang lebih tinggi dalam memutus ikatan β -1,4-glikosidik pada selulosa amorf dibandingkan Avicelase (Elnagdy et al., 2024). Hal ini mendukung efisiensi hidrolisis substrat, yang menjadi tahap awal penting sebelum proses fermentasi. Nilai-nilai konsentrasi glukosa ini mengindikasikan potensi hidrolisis yang cukup seragam pada perlakuan awal, yang relevan untuk menjaga homogenitas hasil sebelum dilakukan variasi waktu dan jenis inokulum pada proses fermentasi.

Data hasil penelitian produksi bioetanol dari hidrolisat ampas tebu menggunakan sistem selulase *B. subtilis* dengan variasi waktu fermentasi (24, 48, 72 jam) telah dianalisis statistik menggunakan ANOVA dua arah dan uji Tukey HSD menunjukkan perbedaan signifikan pada beberapa perlakuan, tersaji pada Tabel 2.

Rendemen Bioetanol

Berdasarkan data yang diperoleh, rendemen bioetanol menunjukkan variasi yang signifikan tergantung pada waktu fermentasi dan jenis inokulum yang digunakan. Pada waktu fermentasi 48 jam dengan inokulum *Saccharomyces cerevisiae* (5%), rendemen tertinggi tercatat sebesar 122,16 ml/kg, yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan lainnya.. Rendemen yang tinggi ini dapat dijelaskan oleh efisiensi fermentasi *Saccharomyces cerevisiae*, yang dikenal memiliki kemampuan superior dalam mengonversi glukosa menjadi etanol. Namun, karena *Saccharomyces cerevisiae* tidak memiliki enzim untuk menghidrolisis karbohidrat kompleks seperti selulosa dan hemiselulosa, maka pada penelitian ini dilakukan hidrolisis awal terhadap ampas tebu. Hidrolisis dilakukan menggunakan ekstrak kasar enzim selulase dari *Bacillus subtilis*, yang menguraikan selulosa dan hemiselulosa menjadi glukosa, sehingga glukosa tersedia sebagai substrat fermentasi untuk menghasilkan etanol. Hal ini sejalan dengan temuan oleh Saisa & Syabriana (2018) yang menunjukkan bahwa *S. cerevisiae* menghasilkan bioetanol dengan rendemen tinggi, terutama ketika fermentasi dilakukan dalam durasi yang cukup panjang.

Tabel 2. Rerata parameter produksi bioetanol dari hidrolisat ampas tebu dengan variasi waktu fermentasi dan jenis inokulum

Table 2. Average bioethanol production parameters from sugarcane bagasse hydrolyzate with variations in fermentation time and inoculum type

Waktu Fermentasi (jam) Time of Fermentation (hour)	Inokulum Inoculum	Rerata Mean				
		Rendemen Bioetanol (ml/Kg) Bioethanol Yield (ml/Kg)	Efisiensi Fermentasi (%) Fermentation Efficiency (%)	Kadar Alkohol (%) Alcohol Content (%)	Glukosa sebelum Hidrolisis (mg/ml) Glucose before hydrolysis (mg/ml)	Glukosa setelah Hidrolisis (mg/ml) Glucose after hydrolysis (mg/ml)
24	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> 5%	50,87 ^e ±0,08	47,73 ^c ±0,03	63,20 ^c ±0,08	43,91±0,03	86,43±0,02
48		122,16 ^a ±0,07	61,37 ^a ±0,02	76,80 ^e ±0,06	45,12±0,03	87,61±0,02
72		86,87 ^c ±0,09	57,65 ^b ±0,01	71,40 ^f ±0,07	44,67±0,03	86,76±0,02
24	Ragi Tape 5%	35,90 ^c ±0,08	35,55 ^e ±0,02	51,20 ^a ±0,06	44,56±0,02	87,34±0,03
48		73,47 ^{cd} ±0,05	47,91 ^c ±0,02	55,90 ^b ±0,04	43,76±0,02	86,53±0,03
72		100,54 ^b ±0,07	42,21 ^d ±0,03	60,70 ^d ±0,06	43,97±0,02	86,90±0,03

Keterangan: Angka yang mempunyai notasi huruf yang berbeda menyatakan beda nyata pada uji Tukey ($\alpha=0,05\%$)

Note: Numbers that have different letter notations indicate significant differences in the Tukey test ($\alpha=0.05\%$)

Waktu fermentasi yang lebih lama memungkinkan mikroorganisme untuk mengonversi lebih banyak substrat menjadi bioetanol, meskipun kecepatan fermentasi cenderung menurun seiring berjalannya waktu. Pada waktu fermentasi 72 jam, rendemen bioetanol meningkat menjadi 86,87 ml/kg untuk *Saccharomyces cerevisiae*, meskipun tidak seoptimal pada waktu fermentasi 48 jam, yang menunjukkan bahwa pada titik tertentu, kecepatan fermentasi mulai menurun. Semakin lama waktu fermentasi, semakin banyak substrat yang terfermentasi, tetapi kecepatan fermentasi berkurang karena jumlah substrat yang semakin sedikit. *Saccharomyces cerevisiae* menunjukkan kecepatan fermentasi yang lebih tinggi dan aktivitas fermentasi yang lebih baik dibandingkan dengan ragi tape. Pada waktu fermentasi 24 jam, *S. cerevisiae* menghasilkan 35,90 ml/kg bioetanol, sedangkan ragi tape menghasilkan lebih sedikit bioetanol dalam waktu yang sama.

S. cerevisiae lebih efisien dalam mengonversi glukosa menjadi bioetanol, berkat toleransi alkohol yang lebih tinggi dan kemampuannya untuk bertahan dalam kondisi lingkungan dengan konsentrasi alkohol yang lebih tinggi (Mohd Azhar et al., 2017), sehingga meningkatkan aktivitas fermentasi. Penurunan laju fermentasi pada waktu yang lebih lama, meskipun meningkatkan rendemen bioetanol, mengindikasikan bahwa proses fermentasi pada *S. cerevisiae* tetap lebih efisien dalam mengonversi substrat menjadi etanol, bahkan pada waktu fermentasi yang lebih panjang.

Efisiensi Fermentasi

Efisiensi fermentasi merupakan parameter penting untuk mengukur kemampuan mikroorganisme dalam mengkonversi glukosa menjadi bioetanol. Secara teoritis, konversi maksimal glukosa menjadi etanol oleh *Saccharomyces cerevisiae* adalah 0,51gram etanol per

gram glukosa yang dikonsumsi (*Hou et al.*, 2024). Namun, dalam penelitian ini, perhitungan efisiensi fermentasi didasarkan pada rendemen bioetanol yang dihasilkan dibandingkan dengan glukosa yang tersedia setelah hidrolisis, dengan mempertimbangkan adanya residu glukosa dari inokulum awal sebesar 5% dan fakta bahwa analisis glukosa dilakukan pada filtrat hasil hidrolisis, bukan pada saat 0 jam fermentasi. Data menunjukkan bahwa efisiensi fermentasi tertinggi dicapai pada waktu fermentasi 48 jam dengan inokulum *S. cerevisiae*, yaitu sebesar 61,37%. Angka ini menunjukkan bahwa fermentasi berjalan efektif dan menghasilkan etanol dalam jumlah signifikan. Efisiensi ini lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan ragi tape, yang hanya mencapai 47,91% pada waktu fermentasi yang sama. Perbedaan efisiensi ini mengindikasikan bahwa *S. cerevisiae* lebih efisien dalam mengkonversi substrat ampas tebu hasil hidrolisis menjadi bioetanol dibandingkan ragi tape. Penurunan efisiensi fermentasi pada waktu 72 jam, baik pada *S. cerevisiae* (57,65%) maupun ragi tape (42,21%), kemungkinan disebabkan oleh akumulasi etanol yang mulai menghambat aktivitas mikroorganisme. Meskipun demikian, *S. cerevisiae* tetap menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan ragi tape pada semua waktu fermentasi yang diuji.

Penelitian ini memperkuat bahwa *S. cerevisiae* lebih unggul dalam mengkonversi filtrat ampas tebu hasil hidrolisis menjadi bioetanol dibandingkan ragi tape, terutama pada waktu fermentasi 48 jam. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa *S. cerevisiae* merupakan mikroorganisme yang umum dan efektif digunakan dalam produksi bioetanol dari berbagai sumber biomassa (*Zhuang et al.*, 2021). Meskipun akumulasi etanol dapat menghambat laju fermentasi pada waktu yang lebih lama, pengelolaan kondisi fermentasi yang tepat, seperti pengaturan suhu dan pengurangan akumulasi etanol, dapat meminimalkan

dampak negatif ini dan meningkatkan efisiensi fermentasi (*Tenkolu et al.*, 2024). Analisis glukosa pada filtrat hasil hidrolisis menunjukkan bahwa masih terdapat senyawa glukosa rantai 2 atau lebih yang belum terdegradasi sempurna menjadi monosakarida. Selama fermentasi, senyawa-senyawa ini terus terdegradasi dan dimanfaatkan oleh *S. cerevisiae* sebagai substrat. Hal ini penting untuk dipertimbangkan dalam perhitungan efisiensi fermentasi, karena total glukosa yang tersedia untuk fermentasi mungkin lebih tinggi dari yang terukur pada awal hidrolisis. Meskipun konversi teoritis glukosa menjadi etanol oleh *S. cerevisiae* adalah 51%, penelitian ini menunjukkan efisiensi fermentasi yang signifikan hingga 61,37% dalam mengkonversi filtrat ampas tebu. Temuan ini mengindikasikan potensi *S. cerevisiae* untuk melampaui batas teoritis dalam kondisi yang tepat, meskipun mekanisme yang mendasarinya dalam konteks hidrolisis ampas tebu masih memerlukan penelitian lebih lanjut. Sebagai perbandingan, *Chang et al.* (2018) menunjukkan bahwa efisiensi yang lebih tinggi dapat dicapai melalui optimasi kondisi, termasuk penggunaan metode fed-batch, yang menekankan pentingnya faktor-faktor eksternal dalam memaksimalkan produksi bioetanol.

Kadar Alkohol

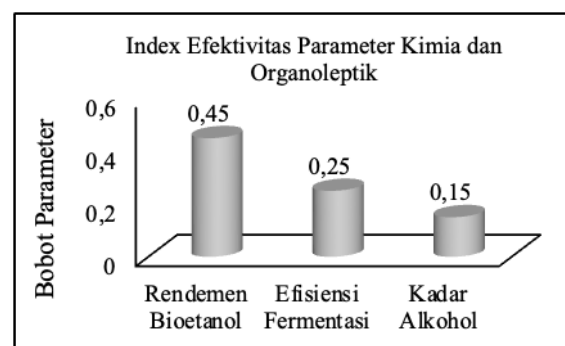
Hasil pengukuran kadar alkohol menunjukkan bahwa *Saccharomyces cerevisiae* 5% menghasilkan kadar alkohol yang lebih tinggi dibandingkan dengan ragi tape 5%, yang berhubungan erat dengan kemampuan masing-masing mikroorganisme dalam mengonversi substrat menjadi bioetanol. Pada waktu fermentasi 48 jam, *S. cerevisiae* menghasilkan kadar alkohol sekitar 75-80%, sementara ragi tape hanya menghasilkan sekitar 55-60% pada waktu fermentasi yang sama. Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh kapasitas fermentasi dan toleransi alkohol yang lebih tinggi dari *S.*

cerevisiae, yang dapat bertahan lebih lama dalam lingkungan dengan konsentrasi alkohol yang tinggi (Mohd Azhar *et al.*, 2017). *Saccharomyces cerevisiae* merupakan kultur murni yang terfokus pada produksi etanol, sedangkan ragi tape adalah biakan campuran yang mengandung berbagai mikroorganisme, termasuk *Saccharomyces spp.* dan *Aspergillus spp.*, yang dapat mempengaruhi efisiensi konversi glukosa menjadi etanol (Chamidy *et al.*, 2023). Keberagaman kultur pada ragi tape mengarah pada kompetisi antar mikroorganisme, yang dapat mengurangi laju fermentasi dan menghasilkan kadar alkohol yang lebih rendah.

Korelasi antara waktu fermentasi dan kadar alkohol menunjukkan bahwa pada waktu fermentasi yang lebih lama, terjadi penurunan efisiensi fermentasi, terutama pada ragi tape. Pada waktu fermentasi 72 jam, ragi tape menunjukkan peningkatan kadar alkohol hingga 60-65%, namun tetap lebih rendah dibandingkan dengan *S. cerevisiae* yang mencapai kadar alkohol 70-75% pada waktu yang sama. Penurunan efisiensi fermentasi pada waktu fermentasi yang lebih lama pada ragi tape dapat diatribusikan pada akumulasi etanol yang menghambat aktivitas mikroorganisme dalam biakan campuran tersebut (Iwuozor *et al.*, 2024). Sebaliknya, *S. cerevisiae* cenderung lebih stabil dan efisien dalam mengonversi glukosa menjadi etanol pada waktu yang lebih panjang, berkat kemampuannya untuk bertahan dalam kondisi lingkungan yang lebih ekstrem, seperti konsentrasi alkohol yang tinggi (Utami, 2017). Implikasi dari hasil ini menunjukkan bahwa meskipun ragi tape dapat menghasilkan bioetanol, penggunaan *S. cerevisiae* sebagai inokulum memberikan hasil yang lebih efisien dalam memaksimalkan kadar alkohol, terutama pada waktu fermentasi yang lebih panjang.

Perlakuan Terbaik

Berdasarkan hasil eksperimen yang diperoleh, perlakuan terbaik dalam penelitian ini ditentukan dengan menggunakan metode indeks efektivitas, yang mempertimbangkan empat parameter utama dalam produksi bioetanol. Gambar 1 menunjukkan bobot masing-masing parameter yang dihitung dengan rumus indeks efektivitas. Dasar penentuan indeks efektivitas dalam penelitian ini didasarkan pada empat parameter utama yang memiliki peran krusial dalam menentukan kualitas dan kuantitas bioetanol yang dihasilkan, yaitu rendemen bioetanol, efisiensi substrat, efisiensi fermentasi, dan kadar alkohol. Masing-masing parameter ini diberikan bobot yang berbeda berdasarkan kontribusinya terhadap tujuan utama penelitian, yakni memaksimalkan produksi bioetanol dengan kualitas yang baik. Bobot untuk rendemen bioetanol diberikan nilai tertinggi, yakni 0,45 karena memberikan gambaran langsung mengenai hasil akhir dari proses fermentasi, yaitu volume bioetanol yang berhasil diproduksi (Gambar 1). Bobot tertinggi kedua yaitu efisiensi fermentasi memiliki bobot 0,25; yang mencerminkan seberapa baik mikroorganisme mengubah glukosa menjadi etanol. Kadar alkohol, meskipun memiliki bobot terendah (0,16), tetap berperan dalam menentukan kualitas bioetanol, meskipun lebih dipengaruhi oleh proses destilasi daripada fermentasi itu sendiri.

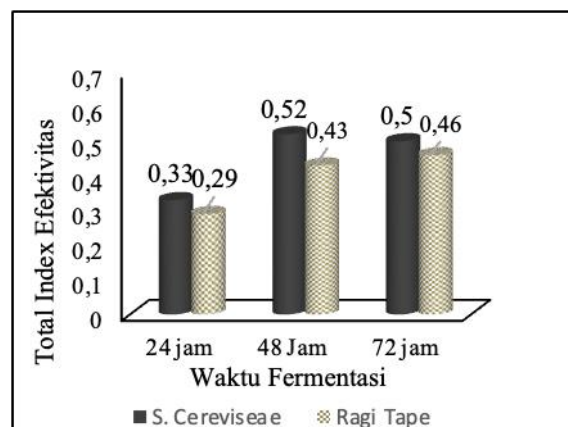


Gambar 1. Hasil Bobot Parameter Produksi Bioetanol

Figure 1. Weighted Results of Bioethanol Production Parameters

Berdasarkan perhitungan indeks efektivitas yang dilakukan secara statistik, perlakuan terbaik dalam penelitian ini adalah kombinasi waktu fermentasi 48 jam dengan inokulum *Saccharomyces cerevisiae* 5%, yang memberikan nilai indeks efektivitas tertinggi, yaitu 0,52 ditunjukkan Gambar 2. Perlakuan ini menunjukkan hasil yang sangat baik pada semua parameter yang diukur, dengan rendemen bioetanol sebesar 122,16 mL/kg, efisiensi fermentasi 61,37%, dan kadar alkohol 76,8%. Hasil ini mendukung temuan sebelumnya yang menunjukkan bahwa *Saccharomyces cerevisiae* adalah salah satu mikroorganisme yang paling efisien dalam proses fermentasi, terutama karena kemampuannya untuk bertahan pada konsentrasi alkohol yang lebih tinggi dan mengoptimalkan konversi substrat menjadi etanol (Fernandes et al., 2022). Keunggulan *S. cerevisiae* dalam hal toleransi alkohol dan kemampuan fermentasi pada waktu fermentasi 48 jam ini mengarah pada peningkatan kualitas bioetanol yang dihasilkan, yang sangat penting untuk aplikasi industri bioenergi. Teori kinetika fermentasi juga menjelaskan bahwa pada waktu fermentasi yang optimal, mikroorganisme seperti *S. cerevisiae* dapat mencapai titik konversi substrat yang maksimal, mengonversi sebagian besar glukosa menjadi etanol sebelum mencapai inhibisi alkohol (Lao-Martil et al., 2022).

Berdasarkan data di Tabel 3, *Saccharomyces cerevisiae* menghasilkan rendemen bioetanol yang lebih tinggi (122,16 mL/kg) dalam waktu fermentasi yang lebih singkat (48 jam), dibandingkan dengan ragi tape yang menghasilkan 100,54 mL/kg pada waktu fermentasi yang lebih lama (72 jam). Hal ini dapat dijelaskan oleh kemampuan fermentasi *S. cerevisiae* yang lebih efisien dalam mengonversi substrat menjadi etanol, bahkan dalam durasi fermentasi yang lebih pendek. *S. cerevisiae* memiliki toleransi alkohol yang lebih baik dan kemampuan untuk mengasimilasi gula lebih cepat, yang menjadikannya pilihan utama dalam proses fermentasi industri (Parapouli et al., 2020).



Gambar 2. Perlakuan Terbaik Sesuai Nilai Index Efektivitas

Figure 2. Best Treatment According to the Effectiveness Index Value

Tabel 3. Perbandingan Proses Optimum Fermentasi hidrolisis ampas tebu dengan *Saccharomyces cerevisiae* dan Ragi Tape

Table 3. Comparison of the Optimum Fermentation Process for Sugarcane Bagasse Hydrolysis with *Saccharomyces cerevisiae* and Yeast Tape

Parameter	<i>S. Cerevisiae</i> (48 jam)	Ragi Tape (72 jam)
Parameter	<i>S. Cerevisiae</i> (48 hours)	Yeast Tape (72 hours)
Rendemen Bioetanol (ml/Kg)	122,16 mL/kg	100,54 mL/kg
Jumlah inokulum 5%	25 mL (5% dari 500 mL)	25 g (5% dari 500 g)
Peralatan yang diperlukan	Gelas ukur, Laminar flow, Autoklaf, Oven inkubator, Shaker inkubator	Laminar flow, Oven inkubator
Waktu Fermentasi	2 hari	3 hari

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang diperoleh, *Saccharomyces cerevisiae* 5% pada waktu fermentasi 48 jam menunjukkan hasil terbaik dalam hal rendemen bioetanol, efisiensi substrat (hidrolisat ampas tebu), efisiensi fermentasi dan kadar alkohol dibandingkan dengan ragi tape. Perlakuan ini menghasilkan 122,16 mL/kg rendemen bioetanol, efisiensi fermentasi 61,37%, dan kadar alkohol 76,8%. Analisis menggunakan metode indeks efektivitas menunjukkan bahwa kombinasi waktu fermentasi yang optimal dan inokulum *Saccharomyces cerevisiae* memberikan hasil produksi bioetanol yang paling efisien dan berkualitas tinggi. Meskipun *S. cerevisiae* membutuhkan biaya produksi yang lebih tinggi, efisiensi yang lebih besar dalam konversi substrat menjadi etanol menjadikannya pilihan unggul dalam produksi bioetanol yang optimal. Oleh karena itu, penggunaan *Saccharomyces cerevisiae* pada waktu fermentasi 48 jam memberikan keseimbangan terbaik antara hasil produksi yang tinggi dan kualitas bioetanol yang baik, yang menjadikannya pilihan yang lebih baik untuk produksi bioetanol dari ampas tebu.

DAFTAR PUSTAKA

- Afedzi, A. E. K., & Parakulsuksatid, P. (2023). Recent advances in process modifications of simultaneous saccharification and fermentation (SSF) of lignocellulosic biomass for bioethanol production. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 102961.
- Aggarwal, N. K., Kumar, N., & Mittal, M. (2022). *Bioethanol production: Past and present*. Springer Nature.
- Ansar, Nazaruddin, Azis, A. D., & Fudholi, A. (2021). Enhancement of bioethanol production from palm sap (Arenga pinnata (Wurmb) Merr) through optimization of *Saccharomyces cerevisiae* as an inoculum. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 548–554. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.085>
- Arviani, D. N. , H. A. D. , S. W. , U. C. R. (2024). *Kimia Organik*. Hei Publishing.
- Asase, R. V., Okechukwu, Q. N., & Ivantsova, M. N. (2024). Biofuels: present and future. *Environment, Development and Sustainability*, 1–29. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04992-w>
- Chamidy, H. N., Saripudin, S., & Permanasari, A. R. (2023). Pengaruh waktu, jumlah yeast, dan konsentrasi substrat pada fermentasi limbah kulit nanas menjadi bioetanol skala home industry. *Jurnal Serambi Engineering*, 8(4). <https://doi.org/10.32672/jse.v8i4.6784>
- Chang, Y. H., Chang, K. S., Chen, C. Y., Hsu, C. L., Chang, T. C., & Jang, H. D. (2018). Enhancement of the efficiency of bioethanol production by *Saccharomyces cerevisiae* via gradually batch-wise and fed-batch increasing the glucose concentration. *Fermentation*, 4(2), 45. <https://doi.org/10.3390/fermentation4020045>
- Chen, X., Zheng, X., Pei, Y., Chen, W., Lin, Q., Huang, J., Hou, P., Tang, J., & Han, W. (2022). Process design and techno-economic analysis of fuel ethanol production from food waste by enzymatic hydrolysis and fermentation. *Bioresource Technology*, 363, 127882. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127882>
- Elnagdy, N. A., Ragab, T. I., Fadel, M. A., Abou-Zeid, M. A., & Esawy, M. A. (2024). Bioethanol Production from Characterized Pre-treated Sugarcane

- Trash and Jatropha Agrowastes. *Journal of Biotechnology*, 386, 28-41. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2024.02.015>
- Fernandes, D. F., de Souza, É. S., Carneiro, L. M., Alves Silva, J. P., de Souza, J. V. B., & da Silva Batista, J. (2022). Current ethanol production requirements for the yeast *saccharomyces cerevisiae*. *International Journal of Microbiology*, 2022(1), 1–14. <https://doi.org/10.1155/2022/7878830>
- Hou, J., Zhang, Q., Tian, F., Liu, F., Jiang, J., Qin, J., Wang, H., Wang, J., Chang, S., & Hu, X. (2024). Structure changes of lignin and their effects on enzymatic hydrolysis for bioethanol production: a focus on lignin modification. *Journal of Biotechnology*, 393, 61–73. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2024.07.012>
- Iwuozor, K. O., Emmanuel, S. S., Bello-Hassan, M. T., Emenike, E. C., & Adeniyi, A. G. (2024). Advancements in high gravity fermentation strategies for optimizing ethanol production from sugarcane-based substrates. *Sugar Tech*, 26(4), 1016–1032. <https://doi.org/10.1007/s12355-024-01455-4>
- Kartika, I. N., & Ibrahim, M. (2021). Efek Manipulasi pH pada Aktivitas Enzim Selulase Bakteri *Bacillus subtilis* Strain FNCC 0059 dalam Mendegradasi Selulosa. *LenteraBio: Berkala Ilmiah Biologi*, 10(1), 51-57. <https://doi.org/10.26740/lenterabio.v10n1.p51-57>
- Kumari, R., Singh, A., Sharma, R., & Malaviya, P. (2024). Conversion of food waste into energy and value-added products: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(4), 1759–1790. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01742-2>
- Lao-Martil, D., Verhagen, K. J., Schmitz, J. P., Teusink, B., Wahl, S. A., & van Riel, N. A. (2022). Kinetic modeling of *Saccharomyces cerevisiae* central carbon metabolism: achievements, limitations, and opportunities. *Metabolites*, 12(1), 74. <https://doi.org/10.3390/metabo12010074>
- Malik, W. A., & Javed, S. (2021). Biochemical Characterization of Cellulase From *Bacillus subtilis* Strain and its Effect on Digestibility and Structural Modifications of Lignocellulose Rich Biomass. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 800265. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.800265>
- Mendiburu, A. Z., Lauermann, C. H., Hayashi, T. C., Mariños, D. J., Rodrigues da Costa, R. B., Coronado, C. J. R., Roberts, J. J., & de Carvalho, J. A. (2022). Ethanol as a renewable biofuel: Combustion characteristics and application in engines. *Energy*, 257, 124688. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124688>
- Mohd Azhar, S. H., Abdulla, R., Jambo, S. A., Marbawi, H., Gansau, J. A., Mohd Faik, A. A., & Rodrigues, K. F. (2017a). Yeasts in sustainable bioethanol production: A review. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 10, 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2017.03.003>
- Mohd Azhar, S. H., Abdulla, R., Jambo, S. A., Marbawi, H., Gansau, J. A., Mohd Faik, A. A., & Rodrigues, K. F. (2017b). Yeasts in sustainable bioethanol production: A review. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 10, 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2017.03.003>
- Nafiqoh, N., & Suryaningrum, L. H. (2020). Hidrolisis ampas tebu

- menggunakan enzim selulase dari bakteri *Bacillus subtilis* dalam upaya pemanfaatannya sebagai bahan pakan ikan. *Prosiding Seminar Nasional Biologi*, 6(1), 428–435. <https://doi.org/https://doi.org/10.24252/psb.v6i1.16022>
- Osman, A. I., Qasim, U., Jamil, F., Al-Muhtaseb, A. H., Jrai, A. A., Al-Riyami, M., Al-Maawali, S., Al-Haj, L., Al-Hinai, A., Al-Abri, M., Inayat, A., Waris, A., Farrell, C., Maksoud, M. I. A. A., & Rooney, D. W. (2021). Bioethanol and biodiesel: Bibliometric mapping, policies and future needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111677. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111677>
- Parapouli, M., Vasileiadi, A., Afendra, A.-S., & Hatziloukas, E. (2020). *Saccharomyces cerevisiae* and its industrial applications. *AIMS Microbiology*, 6(1), 1–32. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2020001>
- Pratiwi, I., Miarti, A., Setiorini, I. A., Kurniasari, D., & Kusniawati, E. (2024). *Teknik Bioenergi*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Saisa, & Syabriana, M. (2018). Produksi bioetanol dari limbah kulit kopi menggunakan enzim *Zymomonas mobilis* dan *Saccharomyces cerevisiae*. *Jurnal Serambi Engineering*, 3(1). <https://doi.org/10.32672/jse.v3i1.356>
- Sulistiawan, A., & Nurdiansyah, D. (2022). The development of bioethanol from iles-iles tubers using hydrolyzed fermentation method for alternative fuels. *The 4th International Conference on University Community Engagement (ICON-UCE 2022)*, 4, 40–46. Retrieved from <https://icon-uce.com/index.php/icon-uce/article/view/6>.
- Tenkolu, G. A., Kuffi, K. D., & Gindaba, G. T. (2024). Optimization of fermentation condition in bioethanol production from waste potato and product characterization. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(4), 5205–5223. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02974-4>
- Tuli, D. K., & Kuila, A. (2021). *Current status and future scope of microbial cellulases*. Elsevier.
- ul-Haque, Dr. S. N. S. M., & Mueedin, N. (2021). Fermentation of tapai and alcohol content released from tapai. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1053(1), 012050. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1053/1/012050>
- Umar, A., Usman, N., Wali, M., & Augustine, O. (2024). Assessment and characterisation of *Bacillus subtilis* as a potential probiotic agent for cellulose digestion. *European Journal of Scientific Research and Reviews*, 0, 1. <https://doi.org/10.5455/EJSRR.20240823083355>
- Utami, C. R. (2017). Pengaruh waktu fermentasi terhadap karaktersitik kimia dan organoleptik tape pisang kepok. *TEKNOLOGI PANGAN: Media Informasi Dan Komunikasi Ilmiah Teknologi Pertanian*, 8(1), 99–106. <https://doi.org/10.35891/tp.v8i1.904>
- Zhuang, S., Renault, N., & Archer, I. (2021). A brief review on recent development of multidisciplinary engineering in fermentation of *Saccharomyces cerevisiae*. *Journal of Biotechnology*, 339, 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.07.013>