

Pembuatan Bioetanol Dari Sekam Padi Dengan Metode Hidrolisis Asam Sulfat Dan Fermentasi *Saccharomyces Cerevisiae*

Risma Widiya Noviyanti¹⁾, Tita Anandha Arunita¹⁾, Abdul Kahar^{1)*}

¹⁾ Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman

*E-mail: a.kahar@ft.unmul.ac.id

ABSTRAK

Bioetanol adalah salah satu jenis bahan bakar alternatif dengan tanaman pertanian, buah-buahan, hingga limbah organik sebagai bahan bakunya. Pembuatan bioetanol dapat menjadi solusi untuk menggunakan limbah pertanian yang melimpah sehingga tidak mencemari lingkungan. Salah satu limbah pertanian tersebut adalah sekam padi yang menjadi bahan baku untuk penelitian ini. Proses pembuatan bioetanol dari sekam padi melibatkan empat proses. *Pre-treatment* melibatkan perlakuan fisik dan kimia pada sekam padi untuk memecah struktur selulosa dan hemiselulosa. Hidrolisis dengan asam sulfat mengubah polimer ini menjadi monomer gula yang dapat difermentasi. Fermentasi dilakukan dengan ragi *Saccharomyces cerevisiae* yang mengubah gula menjadi etanol dan karbon dioksida. Etanol kemudian dipisahkan dari campuran fermentasi melalui distilasi. Hasil analisis kadar bioetanol tertinggi yang didapatkan yaitu 15,9%, yaitu pada suhu 30 °C selama 5 hari fermentasi.

Kata Kunci: Bioetanol, Fermentasi, Hidrolisis, Sekam Padi

Abstract

*Bioethanol is one of the fuel alternatives with crops, fruits, and organic waste as the feedstock. Bioethanol production can be a solution to utilize the abundant agricultural wastes so it doesn't pollute the environment. One of the agricultural wastes is rice husks which is the raw material for this research. The process of making bioethanol from rice husks involves four steps. The pre-treatment step involves physical and chemical treatment to the rice husks in order to break down the cellulose and hemicellulose structures. The hydrolysis step involves sulfuric acid to convert the polymer into fermentable glucose monomers. Fermentation then is carried out with yeast type *Saccharomyces cerevisiae* which converts glucose into ethanol and carbon dioxide. Ethanol is then separated from the fermentation mixture through distillation process. The highest analyzed bioethanol content was 15.9% at 30 °C for 5 days fermentation.*

Keywords: Bioethanol, Fermentation, Hydrolysis, Rice Husk

1. Pendahuluan

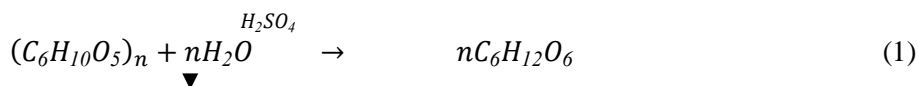
Manusia tidak dapat dipisahkan dari penggunaan energi dalam kehidupan sehari-hari. Sumber energi yang digunakan saat ini yaitu bahan bakar fosil berupa minyak bumi, batu bara, dan gas alam. Bahan bakar fosil terbentuk dari sisa-sisa bahan organik yang hidup jutaan tahun yang lalu. Maka dari itu, bahan bakar fosil tergolong sumber energi tidak terbarukan (*nonrenewable*) karena memerlukan waktu yang lama untuk dibuat kembali. Ketersediaan bahan bakar fosil semakin berkurang tiap tahun. Data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2024) menyatakan bahwa cadangan minyak bumi 2016-2023 mengalami penurunan dari 7,25 ribu MMSTB hingga 4,70 ribu MMSTB serta cadangan gas bumi 2016-2023 mengalami penurunan dari 144,06 TSCF hingga 54,76 TSCF. Penggunaan bahan bakar fosil di sisi lain menghasilkan emisi gas rumah kaca yang memicu pemanasan global. Data oleh *Emissions Database for Global Atmospheric Research* (EDGAR) (2024) menyatakan bahwa emisi gas rumah kaca Indonesia semakin meningkat dari 1050,33915 MTCO₂eq/tahun (2020) hingga 1200,19979 MtCO₂eq/tahun (2023). Pembakaran bahan bakar fosil melepas gas karbon dioksida ke atmosfer. Gas ini memerangkap panas matahari yang seharusnya dipantulkan kembali ke luar angkasa sehingga menyebabkan pemanasan global. Hal ini mengakibatkan peningkatan suhu global, mencairnya es di kutub yang mengarah pada peningkatan air laut, dan perubahan iklim ekstrem. Salah satu upaya untuk mengatasi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil yaitu pengembangan sumber energi alternatif. Bioetanol merupakan salah satu pilihan sumber energi alternatif karena dapat diperbaharui dan ramah lingkungan.

Bioetanol (C₂H₅OH atau EtOH) diproduksi dari biomassa yang mengandung gula, pati dan selulosa. Pemakaian bioetanol sebagai bahan bakar dapat dicampur dengan bensin dengan berbagai komposisi. Sebagai negara yang luas pertanian dan perkebunannya, Indonesia kaya dengan bahan baku untuk pembuatan bioetanol. Bahan baku bioetanol dapat diambil dari: (1) bahan dengan kandungan glukosa tinggi

seperti tebu dan sisa produknya (molase, bagase), gula bit, tapioka, kentang manis, sorgum manis; (2) bahan dengan kandungan pati tinggi (*starchy materials*) diantaranya ubi kayu, jagung, sorgum biji, sagu, tapioka, maizena, *barley*, gandum, padi, dan kentang; dan (3) bahan lignoselulosa terdapat di berbagai sumber selulosa dan lignoselulosa yakni limbah seperti serat kayu, sekam padi, jerami, tongkol jagung serta limbah domestik berupa sampah organik (Arlianti, 2018).

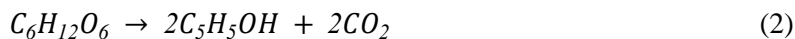
Produksi bioetanol dari bahan baku yang mengandung lignoselulosa menarik dan berkelanjutan karena bahan baku jenis ini bersifat terbarukan dan tidak bersaing dengan tanaman pangan. Bahan baku lignoselulosa tersebar hampir merata di seluruh bumi, dibandingkan dengan sumber daya fosil, yang memberikan keamanan pasokan dengan menggunakan sumber energi domestik. Bahan baku ini dapat diperoleh dari berbagai limbah atau langsung dipanen dari hutan, dan harganya biasanya lebih rendah dibandingkan dengan bahan baku yang mengandung gula atau pati, yang memerlukan pendekatan budidaya pertanian secara penuh (Bušić et al., 2018). Sekam padi merupakan lapisan keras yang meliputi kariopsis yang terdiri dari dua belahan yang disebut lemma dan palea yang saling bertautan. Sekam akan terpisah dari butir beras pada proses penggilingan beras dan menjadi bahan sisa atau limbah. Sekam dikategorikan sebagai biomassa yang dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan seperti bahan baku industri, pakan ternak dan energi atau bahan bakar. Dari proses penggilingan padi biasanya diperoleh sekam sekitar 20-30% dari bobot gabah. Sekam padi memiliki komponen utama seperti selulosa (31,4–36,3 %), hemiselulosa (2,9–11,8 %), dan lignin (9,5–18,4 %). Selulosa dan hemiselulosa adalah suatu polisakarida yang dapat dipecah menjadi monosakarida untuk selanjutnya dapat dimanfaatkan untuk produksi senyawa-senyawa yang berguna, salah satunya adalah bioetanol (Pujotomo, 2017).

Produksi bioetanol lignoselulosa terdiri dari perlakuan awal (*pre-treatment*), hidrolisis, fermentasi, dan pemurnian produk (Novia et al., 2016). *Pre-treatment* adalah langkah pertama dan paling penting dalam proses biokonversi biomassa menjadi bioetanol. Tujuan dari langkah *pre-treatment* yaitu untuk menghilangkan hemiselulosa dan lignin, serta mengurangi kristal selulosa. Proses ini memengaruhi struktur biomassa dengan mengurangi kristalinitas, meningkatkan luas permukaan dan volume pori substrat, serta meningkatkan hasil gula yang dapat difermentasi (Behera et al., 2022). *Pre-treatment* basa melibatkan penggunaan basa seperti natrium hidroksida (NaOH), kalium hidroksida (KOH), kalsium hidroksida (Ca(OH)₂), dan amonium hidroksida (NH₄OH). Hasil utama dari *pre-treatment* basa adalah hancurnya dinding sel yang menyebabkan terputusnya ikatan antara lignin dan karbohidrat sehingga pada akhirnya lignin dapat dihilangkan. Hal ini kemudian menyebabkan peningkatan luas permukaan dan porositas bahan baku, sekaligus menurunkan tingkat polimerisasi. Perubahan ini meningkatkan aksesibilitas dan reaktivitas karbohidrat struktural sehingga memudahkan konversi menjadi gula yang dapat difermentasi (Johannes & Xuan, 2024). Selulosa dan hemiselulosa diuraikan menjadi gula sederhana yang dapat difermentasi selama fase hidrolisis dalam produksi bioetanol. Karena struktur kristalnya, selulosa lebih sulit dihidrolisis dibandingkan hemiselulosa. Akibatnya, hidrolisis selulosa selalu dilakukan menggunakan asam atau enzim khusus. Proses ini disebut hidrolisis kimia atau enzimatis, sementara pemecahan selulosa disebut hidrolisis biokimia atau sakarifikasi (Sudhakar & Naik, 2022).



(Agustina dkk., 2021)

Fermentasi adalah proses biologis di mana mikroorganisme seperti ragi, jamur, atau bakteri mengubah unit monomer gula yang diperoleh selama tahap hidrolisis menjadi etanol, asam, dan gas. Ragi, khususnya *Saccharomyces cerevisiae*, adalah mikroorganisme yang paling sering digunakan karena produksi etanolnya yang tinggi dan batas toleransinya. *Saccharomyces cerevisiae* mengubah glukosa, manosa, atau fruktosa yang diperoleh dari hidrolisis selulosa menjadi etanol, sedangkan xilan (sejenis polisakarida) yang dihasilkan dari hidrolisis hemiselulosa dapat diubah menjadi xilosa (Kazmi dkk., 2025).



(Agustina dkk., 2021)

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh suhu dan lama waktu fermentasi terhadap kadar selulosa, kadar glukosa sisa, dan kadar etanol pada bioetanol yang dihasilkan. Pembuatan bioetanol dalam

penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yaitu *pre-treatment* sekam padi, proses hidrolisis asam dan fermentasi, serta pengujian kadar bioetanol. Hasil penelitian ini diharapkan memberikan masyarakat pemanfaatan lain dari sekam padi serta membuka peluang untuk memanfaatkan bioetanol sebagai sumber energi alternatif ramah lingkungan.

2. Metode Penelitian

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Rekayasa Kimia Fakultas Teknik Universitas Mulawarman dan Laboratorium Mikrobiologi Fakultas Kedokteran Universitas Mulawarman dari tanggal 5 November 2024 – 9 Mei 2025.

B. Variabel Penelitian

Variabel bebas dari penelitian ini yaitu waktu fermentasi (1 hari, 3 hari, 5 hari, dan 7 hari,) dan suhu fermentasi (25 °C, 30 °C, dan 55 °C). Variabel terikatnya adalah penggunaan larutan NaOH sebanyak 250 mL, pH sampel senilai 4-5, ragi tape sebanyak 4 gram tiap sampel yang akan difermentasi, dan nutrisi diamonium fosfat sebanyak 0,4 gram tiap 4 gram ragi tape.

C. Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain sekam padi, ragi tape, akuades, asam sulfat (H_2SO_4), natrium hidroksida (NaOH), dan diamonium fosfat ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$). Alat yang digunakan yaitu gelas kimia 500 mL, gelas kimia 100 mL, blender, *hot plate*, spatula, neraca analitik, mortar, alu, cawan petri, *stirrer*, pipet ukur 10 mL, pipet tetes, *bulb*, batang pengaduk, inkubator, dan botol sampel.

D. Prosedur Penelitian

Persiapan Bahan Baku

Bahan baku berupa sekam padi dikeringkan di bawah sinar matahari selama ± 1 hari. Sekam padi yang kering kemudian dihaluskan dengan blender hingga ukuran 20 mesh.

***Pre-treatment* Bahan Baku**

75 gram sekam padi halus ditimbang lalu dimasukkan ke dalam gelas kimia 500 mL. Akuades ditambahkan hingga batas 500 mL kemudian dipanaskan selama 30 menit pada suhu 100 °C sambil diaduk dengan batang pengaduk. Fase cairan dipisahkan kemudian mengambil sekam padi yang dihasilkan. 250 mL larutan NaOH ditambahkan ke dalam gelas kimia kemudian dipanaskan selama 1 jam pada suhu 100 °C sambil diaduk dengan batang pengaduk. Sampel didinginkan pada suhu kamar kemudian sekam padi dipisahkan dari fase cairan. Sisa-sisa NaOH pada sekam padi dibersihkan dengan akuades agar tidak menjadi kontaminan.

Hidrolisis Sekam Padi

Hasil *pre-treatment* berupa bubur sekam padi dimasukkan ke gelas kimia 500 ml kemudian ditambahkan akuades dan mengatur nilai pH 4-5 dengan asam sulfat. Bubur sekam padi dipanaskan dengan *hot plate* pada suhu 100°C selama 60 menit sambil diaduk dengan batang pengaduk. Bubur sekam padi kemudian didiamkan hingga dingin. Fase cairan dipisahkan dari sekam padi lalu dimasukkan ke dalam botol sampel.

Fermentasi

4 gram ragi tape dan nutrisi diamonium fosfat sebanyak 0,4 gram ditambahkan ke dalam sampel hasil hidrolisis. Suhu inkubator diatur pada suhu 25 °C, 30 °C, dan 55 °C. Proses fermentasi kemudian dilakukan dengan variasi waktu 1 hari, 3 hari, 5 hari, dan 7 hari. Sampel yang telah difermentasi kemudian didistilasi untuk memperoleh bioetanol.

E. Analisis Hasil

Uji Kadar Selulosa

Sampel bioetanol yang telah difiltrasi atau sisa padatan setelah fermentasi ditimbang secara akurat. Sampel padatan dimasukkan ke dalam gelas kimia 500 mL lalu ditambahkan 200 mL larutan asam sulfat 1,3% dan dipanaskan selama 2 jam. Campuran disaring untuk mendapatkan padatannya lalu dicuci dengan akuades hingga pH netral. Pencucian dilanjutkan dengan etanol. Residu selulosa dikeringkan dalam oven pada suhu

105 °C sampai berat tetap. Residu kering selulosa ditimbang kemudian kadar selulosa kemudian dihitung dengan rumus (Syafri et al., 2015):

$$\text{Kadar Selulosa} = \frac{\text{Berat Kering Residu Selulosa}}{\text{Berat Kering Sampel Awal}} \times 100 \quad (3)$$

Uji Kadar Glukosa Sisa

Larutan Fehling A dan Fehling B masing-masing 10 mL dimasukkan ke dalam Erlenmeyer kemudian ditambahkan indikator *methylene blue* sebanyak 4 tetes. Campuran Fehling dipanaskan hingga mendidih kemudian dititrasi dengan sampel bioetanol hingga terbentuk endapan merah bata. Kadar glukosa sisa kemudian dihitung dengan rumus (Widodo, 2015):

$$\text{Kadar Glukosa Sisa} = \frac{\text{Volume titrasi}}{\text{Volume sampel}} \times 100 \quad (4)$$

Uji Kadar Bioetanol

Uji kadar bioetanol dilakukan sesuai prosedur oleh (Novia et al. 2014). Piknometer kosong ditimbang terlebih dahulu pada suhu kamar sehingga diperoleh a gram. Piknometer kemudian diisi akuades lalu ditimbang kembali untuk memperoleh b gram. Volume piknometer kemudian dihitung dengan rumus:

$$\text{Vol} = \frac{b - a}{0,995797} = c \text{ mL} \quad (5)$$

Piknometer diisi dengan sampel bioetanol lalu ditimbang sehingga diperoleh d gram. Densitas sampel bioetanol kemudian dihitung dengan mengurangi berat piknometer sampel bioetanol dengan berat piknometer kosong kemudian dibagi dengan volume piknometer:

$$\text{Densitas} = \frac{d - a}{c} \quad (6)$$

Kadar alkohol (bioetanol) yang terkandung pada sampel dapat ditentukan dengan melihat tabel densitas standar etanol pada suhu kamar. Analisa ini dilakukan terhadap hasil fermentasi yang telah didistilasi untuk mengetahui kadar bioetanol yang terdapat dalam hasil fermentasi.

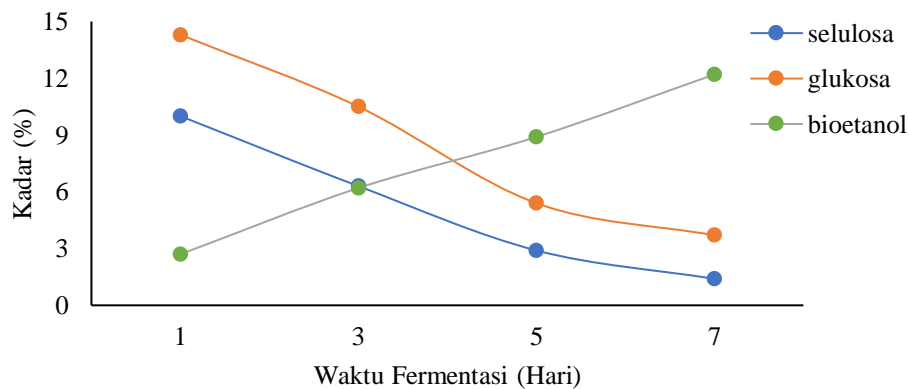
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik yang di dalamnya mencakup variabel-variabel yang diamati, yaitu suhu dan waktu fermentasi. Data hasil penelitian berupa kadar selulosa, kadar glukosa, dan kadar bioetanol dapat dilihat pada grafik dan pembahasannya sebagai berikut.

A. Kadar Selulosa, Glukosa, dan Bioetanol pada Suhu 25°C

Tabel 1. Hasil Uji Bioetanol dari Sekam Padi pada Suhu 25 °C

Perlakuan			Hasil Uji		
Suhu (°C)	Waktu (hari)	pH	Kadar Selulosa (%)	Kadar Glukosa (%)	Kadar Bioetanol(%)
25	1	4	10	14,3	2,7
	3	4	6,3	10,5	6,2
	5	4	2,9	5,4	8,9
	7	4	1,4	3,7	12,2



Gambar 1. Grafik Kadar Selulosa, Glukosa, dan Bioetanol pada Suhu 25 °C

Gambar 1 menunjukkan hubungan antara waktu fermentasi (dalam hari) dengan perubahan kadar tiga komponen penting dalam proses produksi bioetanol dari sekam padi, yaitu selulosa, glukosa, dan bioetanol. Percobaan dilakukan pada suhu tetap 25°C dengan pH 4, dan hasil menunjukkan pola reaksi yang khas dari proses hidrolisis selulosa dan fermentasi glukosa. Fermentasi bioetanol pada suhu 25°C menunjukkan pola perubahan kadar selulosa, glukosa, dan bioetanol selama 7 hari proses. Pada awal fermentasi, kadar selulosa berada pada sekitar 10% kemudian menurun secara bertahap hingga sekitar 1% pada hari ke-7. Hal ini menandakan bahwa proses hidrolisis selulosa menjadi glukosa berlangsung secara efektif, meskipun pada suhu 25°C aktivitas hidrolisis relatif lebih lambat dibanding suhu yang lebih tinggi. (Lynd et al., 2002) menyatakan bahwa fermentasi bekerja optimal pada kisaran suhu 25–35°C, namun laju degradasi selulosa cenderung lebih rendah pada suhu yang lebih rendah.

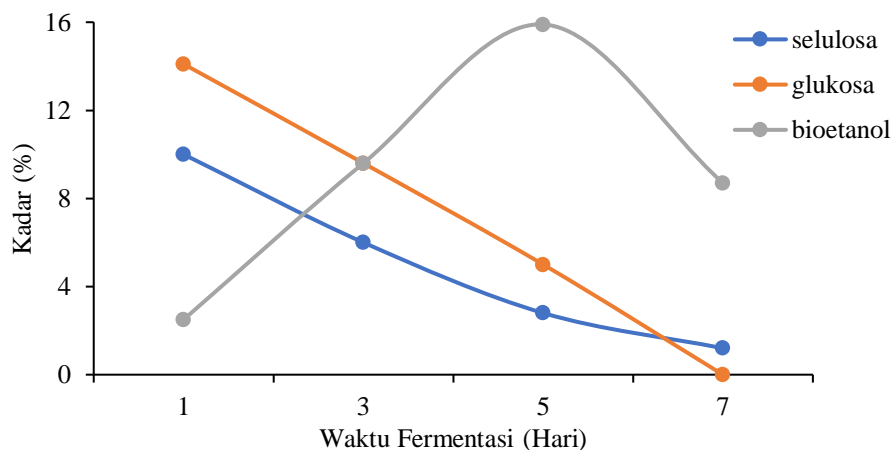
Kadar glukosa pada awal fermentasi relatif tinggi yaitu sekitar 14%. Seiring berjalannya waktu, glukosa mengalami penurunan signifikan hingga sekitar 4% pada hari ke-7. Pola penurunan glukosa ini disebabkan oleh konsumsi glukosa oleh mikroba fermentatif, terutama *Saccharomyces cerevisiae*, yang menggunakannya sebagai substrat utama dalam menghasilkan etanol. Namun, pada suhu 25°C, konsumsi glukosa berlangsung lebih lambat. (Hahn-Hägerdal et al 2006) menjelaskan bahwa suhu yang lebih rendah menyebabkan aktivitas metabolisme sel lebih lambat sehingga konversi glukosa menjadi etanol juga membutuhkan waktu lebih lama.

Produksi bioetanol mengalami peningkatan bertahap sejak hari pertama dengan kadar awal 2,7%. Peningkatan ini terus berlangsung dan mencapai kadar tertinggi 12,2% pada hari ke-7. Pada 25°C puncak produksi bioetanol terjadi lebih lambat karena laju metabolisme sel *yeast* lebih rendah. Hal ini sesuai dengan temuan (Bai et al., 2008) bahwa suhu yang lebih rendah dapat memperlambat sintesis etanol, tetapi di sisi lain dapat mengurangi efek toksik etanol terhadap sel, sehingga fermentasi bisa berlangsung lebih lama.

B. Kadar Selulosa, Glukosa, dan Bioetanol pada Suhu 30°C

Tabel 2. Hasil Uji Bioetanol dari Sekam Padi pada Suhu 30 °C

Perlakuan			Hasil Uji		
Suhu (°C)	Waktu (hari)	pH	Kadar Selulosa (%)	Kadar Glukosa (%)	Kadar Bioetanol(%)
30	1	4	10	14,1	2,5
	3	4	6,1	9,6	9,6
	5	4	2,8	5	15,9
	7	4	1,2	2,5	8,7



Gambar 2. Grafik Kadar Selulosa, Glukosa dan Bioetanol pada Suhu 30 °C

Gambar 2. menunjukkan hubungan antara waktu fermentasi (1, 3, 5, dan 7 hari) dengan kadar selulosa, glukosa, dan bioetanol pada suhu 30°C. Data ini digunakan untuk menganalisis efisiensi proses konversi biomassa (sekam padi) menjadi bioetanol. Fermentasi bioetanol pada suhu 30°C menunjukkan perubahan signifikan pada kandungan selulosa, glukosa, dan bioetanol selama proses 7 hari. Pada awal fermentasi, konsentrasi selulosa sekitar 10% dan secara bertahap menurun hingga hampir 1% pada hari ke-7. Hal ini menunjukkan bahwa 30°C merupakan kondisi yang cukup optimal untuk proses hidrolisis selulosa menjadi glukosa berlangsung lebih cepat dibandingkan suhu yang lebih rendah. (Lynd et.al 2002) melaporkan bahwa enzim selulosa bekerja secara efektif dalam rentang suhu moderat (25–35°C), dengan peningkatan hingga 30°C mempercepat laju hidrolisis selulosa.

Konsentrasi glukosa awalnya tinggi, sekitar 14%, sebagai hasil degradasi selulosa pada tahap awal. Namun, tingkat ini terus menurun hingga 2,5% pada hari ke-7. Penurunan glukosa pada 30°C lebih tajam dibandingkan pada 25°C, menunjukkan bahwa konsumsi glukosa oleh mikroba fermentatif, terutama *Saccharomyces cerevisiae*, lebih intensif. Kondisi yang lebih hangat meningkatkan metabolisme sel, memungkinkan konversi glukosa menjadi etanol berlangsung lebih cepat. Hahn-Hägerdal et al (2006) menjelaskan bahwa suhu optimum sekitar 30°C mempercepat glikolisis, memungkinkan glukosa diubah dengan cepat menjadi piruvat dan selanjutnya menjadi etanol.

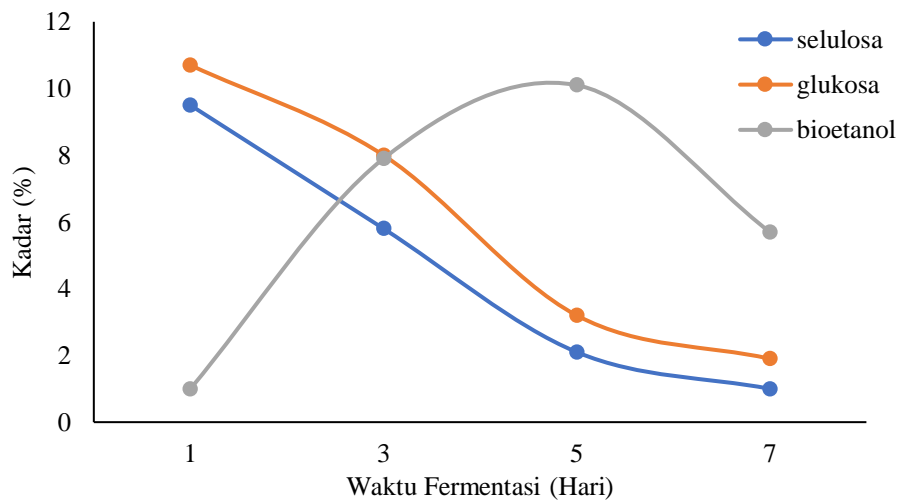
Konsentrasi bioetanol meningkat secara cepat sejak awal fermentasi, dimulai sekitar 3% pada hari ke-1 dan mencapai puncaknya pada hari ke-5 dengan nilai 15,9%. Setelah itu, konsentrasi etanol menurun menjadi 8,7% pada hari ke-7. Dibandingkan dengan 25°C, produksi etanol pada 30°C mencapai puncaknya lebih awal dan pada konsentrasi yang lebih tinggi, menunjukkan bahwa 30°C menyediakan kondisi metabolik yang lebih optimal bagi mikroorganisme. Penurunan setelah hari ke-5 yang lebih tajam akibat dua faktor: habisnya glukosa dan efek toksik konsentrasi etanol yang tinggi. (Bai et al., (2008) menekankan bahwa suhu yang lebih tinggi dapat memperparah toksisitas etanol dengan meningkatkan permeabilitas membran sel, yang menyebabkan penurunan aktivitas mikroorganisme lebih cepat.

Hasil ini menunjukkan bahwa 30°C lebih menguntungkan untuk produksi etanol dalam waktu yang lebih singkat dibandingkan 25°C. Fermentasi pada 30°C mencapai kondisi optimum pada hari ke-5, sedangkan pada suhu yang lebih rendah, kondisi optimum cenderung terjadi lebih lambat. Hal ini konsisten dengan temuan Sun & Cheng (2002), yang menyatakan bahwa suhu moderat mempercepat aktivitas enzim dan metabolisme mikroba, tetapi waktu fermentasi yang lebih lama dapat mengurangi hasil karena keterbatasan substrat dan penumpukan produk penghambat.

C. Kadar Selulosa, Glukosa, dan Bioetanol pada Suhu 55 °C

Tabel 3. Hasil Uji Bioetanol dari Sekam Padi pada Suhu 55 °C

Perlakuan			Hasil Uji		
Suhu (°C)	Waktu (hari)	pH	Kadar Selulosa (%)	Kadar Glukosa (%)	Kadar Bioetanol(%)
55	1	4	9,5	10,7	1
	3	4	5,8	8	7.9
	5	4	2,1	3,2	10.1
	7	4	1	1,9	5,7



Gambar 3. Grafik Kadar Selulosa, Glukosa dan Bioetanol pada suhu 55 °C

Berdasarkan gambar 3 proses fermentasi bioetanol pada suhu 55°C menunjukkan pola konsentrasi substrat (selulosa), glukosa, dan produk (bioetanol) yang berbeda dibandingkan dengan fermentasi pada rentang suhu optimum (30–35°C). Berdasarkan grafik, konsentrasi selulosa secara konsisten menurun dari hari ke-1 hingga hari ke-7. Penurunan ini menunjukkan bahwa hidrolisis selulosa menjadi glukosa terjadi, meskipun proses degradasi tidak berlangsung pada potensi maksimumnya. Fenomena ini dapat dikaitkan dengan enzim selulosa, yang umumnya berfungsi optimal pada suhu sedang; oleh karena itu, pada kondisi suhu tinggi seperti 55°C, aktivitasnya menurun. Akibatnya, meskipun degradasi selulosa teramati, lajunya relatif lebih lambat dibandingkan pada suhu yang lebih rendah.

Konsentrasi glukosa menunjukkan penurunan tajam selama proses fermentasi. Pada hari pertama, tingkat glukosa relatif tinggi, tetapi menurun secara signifikan, mencapai hampir 2% pada hari ketujuh. Tren ini menunjukkan bahwa sebagian besar glukosa dimetabolisme oleh mikroorganisme fermentatif. Namun, efisiensi konversi glukosa menjadi etanol pada 55°C kemungkinan berkurang akibat stres panas pada sel ragi, terutama *Saccharomyces cerevisiae*, yang umum digunakan dalam fermentasi etanol. Suhu yang terlalu tinggi dapat mengganggu stabilitas membran sel dan mengurangi aktivitas enzim glikolitik, sehingga metabolisme glukosa menjadi kurang efisien.

Konsentrasi bioetanol meningkat secara bertahap sejak hari pertama, mencapai puncak sekitar 10% pada hari kelima. Peningkatan ini menunjukkan bahwa fermentasi masih terjadi pada suhu tinggi, meskipun dengan efisiensi terbatas. Menariknya, setelah mencapai puncaknya, konsentrasi bioetanol menurun pada hari ketujuh. Penurunan ini mungkin disebabkan oleh degradasi etanol pada kondisi suhu tinggi atau penurunan viabilitas sel, karena sebagian besar strain ragi konvensional tidak dapat bertahan dalam paparan panas yang berkepanjangan. Pengamatan ini sejalan dengan laporan (Singh et al 1998), yang menyebutkan bahwa hanya strain ragi yang tahan panas, seperti *Kluyveromyces marxianus*, yang dapat mempertahankan produksi etanol di atas 45°C, sedangkan strain ragi konvensional menunjukkan penurunan produktivitas yang tajam.

Secara keseluruhan, hasil fermentasi pada 55°C menunjukkan bahwa meskipun konversi selulosa menjadi glukosa dan selanjutnya menjadi bioetanol masih terjadi, baik laju maupun efisiensinya jauh lebih rendah dibandingkan dengan kondisi optimal. Degradasi selulosa berlangsung secara bertahap, glukosa berkurang akibat metabolisme mikroba, dan bioetanol mengikuti kurva yang mencapai puncak sebelum akhirnya menurun. Temuan ini menyoroti pentingnya menjaga suhu fermentasi dalam rentang optimal untuk mikroorganisme yang digunakan, karena panas berlebihan dapat menghambat pertumbuhan sel, mengurangi viabilitas, dan menurunkan hasil etanol secara keseluruhan (Limtong et al., 2007). Oleh karena itu, meskipun suhu yang lebih tinggi dapat mempercepat reaksi hidrolisis awal, hasil akhir tetap kurang menguntungkan untuk produktivitas bioetanol jangka panjang.

4. Kesimpulan

Kadar selulosa semakin menurun seiring bertambahnya waktu fermentasi. Kadar glukosa mengalami penurunan seiring bertambahnya waktu fermentasi. Kadar bioetanol tertinggi diperoleh pada suhu 30°C dan waktu fermentasi 5 hari dengan nilai 15,9%, mengindikasikan kondisi tersebut sebagai titik optimum

fermentasi untuk produksi bioetanol dari sekam padi. Kondisi fermentasi pada suhu 25 °C membuat puncak produksi lebih lama dicapai daripada suhu 30 °C karena aktivitas metabolik dan pertumbuhan ragi yang lebih lambat dibandingkan pada suhu optimal. Fermentasi pada suhu 55 °C menjadi kurang efisien ditandai dengan kadar selulosa dan glukosa sisa yang relatif tinggi serta kadar bioetanol yang lebih rendah, kemungkinan akibat stres panas terhadap aktivitas ragi. Dengan demikian, suhu fermentasi moderat dan waktu fermentasi yang cukup lama merupakan kondisi terbaik untuk menghasilkan bioetanol dari sekam padi.

5. Pengakuan

Kami mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Mikrobiologi Fakultas Kedokteran Universitas Mulawarman yang telah membantu jalannya penelitian ini dengan peminjaman alat penelitian berupa inkubator.

6. Daftar Pustaka

- Agustina, E., Safitri, G. I., Fatiha, I. I., Pratama, M. I., Rahmania, Safitri, R., Andriarna, F., & Hidayati, I. (2021). Pemanfaatan Limbah Kulit Buah dan Sayur Sebagai Bahan Bakar Bioetanol dengan Variasi Konsentrasi Katalis. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 10(1).
- Arlianti, L. (2018). Bioetanol sebagai Sumber Green Energy Alternatif yang Potensial di Indonesia. *UNISTEK*, 5(1).
- Bai, F. W., Anderson, W. A., & Moo-Young, M. (2008). Ethanol fermentation technologies from sugar and starch feedstocks. *Biotechnology Advances*.
- Behera, S. S., Saranraj, P., & Ray, R. C. (2022). Microbial Bioethanol Fermentation Technologies—Recent Trends and Future Prospects. *Biofuels and Biorefining*.
- Bušić, A., Mardetko, N., Kundas, S., Morzak, G., Belskaya, H., Šantek, M. I., Komes, D., Novak, S., & Šantek, B. (2018). Bioethanol Production from Renewable Raw Materials and Its Separation and Purification: A Review. *Food Technology & Biotechnology*, 56(3).
- Crippa, M., Guizzard, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf, E., Monforti-Ferrario, F., Becker, W., Quadrelli, R., Riquez Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Köykkä, J., Grassi, G., Rossi, S., Melo, J., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., Manca, G., ... Pekar, F. (2024). *GHG Emissions of All World Countries*.
- Hahn-Hägerdal, B., Galbe, M., Gorwa-Grauslund, M. F., Lidén, G., & Zacchi, G. (2006). Bio-ethanol – the fuel of tomorrow from the residues of today. *Trends in Biotechnology*, 24(12).
- Johannes, L. P., & Xuan, T. D. (2024). Comparative Analysis of Acidic and Alkaline Pretreatment Techniques for Bioethanol Production from Perennial Grasses. *Energies*, 17(5).
- Kazmi, A., Sultana, T., Ali, A., Nijabat, A., Li, G., & Hou, H. (2025). Innovations in bioethanol production: A comprehensive review of feedstock generations and technology advances. *Energy Strategy Reviews*, 57.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2024). *Statistik Minyak dan Gas Bumi Tahun Semester I 2024*.
- Limtong, S., Sringiew, C., & Yongmanitchai, W. (2007). Production of fuel ethanol at high temperature from sugar cane juice by a newly isolated *Kluyveromyces marxianus*. *Bioresource Technology*.
- Lynd, L. R., Weimer, P. J., van Zyl, W. H., & Pretorius, I. S. (2002). Microbial Cellulose Utilization: Fundamentals and Biotechnology. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 66(3).
- Novia, Pareek, V. K., & Agustina, T. E. (2016). Bioethanol production from sodium hydroxide – dilute sulfuric acid pretreatment of rice husk via simultaneous saccharification and fermentation . *SICEST*.
- Novia, Windarti, A., & Rosmawati. (2014). Pembuatan Bioetanol dari Jerami Padi dengan Metode Ozonolisis – Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF). *Jurnal Teknik Kimia*, 20(3).
- Pujotomo, I. (2017). Potensi Pemanfaatan Biomassa Sekam Padi untuk Pembangkit Listrik Melalui Teknologi Gasifikasi. *Energi & Kelistrikan*, 9(2).
- Singh, D., Banat, I. M., Nigam, P., & Marchant, R. (1998). Industrial scale ethanol production using the thermotolerant yeast *Kluyveromyces marxianus* IMB3 in an Indian distillery. *Biotechnology Letters*, 20.
- Sudhakar, V., & Naik, S. S. (2022). Pretreatment, Hydrolysis and Fermentation of Lignocellulosic Biomass for Bioethanol. *Current World Environment*, 17(1).
- Sun, Y., & Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology*.
- Syafri, E., Kasim, A., Abral, H., & Asben, A. (2015). Pengaruh Chemical Treatment terhadap Sifat Fisik, Kandungan Selulosa dan Kekuatan Tarik Serat Alam Rami. *Jurnal Teknologi Pertanian Andalas*, 19(2).
- Widodo, F. A. (2015). *Pembuatan Bioetanol dari Alga Hijau (Chaetomorpha) dengan Proses Hidrolisa Enzim dan Fermentasi*. Institut Teknologi Sepuluh November.