

Peningkatan Produksi Bioetanol dari Rebung Bambu Ampel (*Bambusa vulgaris*) Menggunakan Sakarifikasi dan Fermentasi Simultan Terekayasa

Hendri Ropingi^{1*}, Khaswar Syamsu², Irvan Setiadi Kartawiria³

^{1*}Program Studi Bioteknologi, Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor, Indonesia

²Departemen Teknologi Industri Agroindustri, Fakultas Teknologi Pertanian, dan Pusat Penelitian Bioteknologi, Institut Pertanian Bogor, Indonesia

³Departemen Teknik Kimia, Fakultas Ilmu Hayati dan Teknologi, Universitas Swiss German, Tangerang, Indonesia

Email: ^{1*}hendriropingi@gmail.com, ²iwanks@apps.ipb.ac.id, ³irvankarta@live.com

Abstract

*Bamboo shoots are lignocellulosic with low lignin and high protein content. This study compared bioethanol production from bamboo shoots (*Bambusa vulgaris*) using conventional and engineered simultaneous saccharification and fermentation (SSF) methods. The hydrolysis process was carried out using mold (*Trichoderma reesei*), followed by fermentation with yeast (*Saccharomyces cerevisiae*). The results of proximate analysis showed that bamboo shoots contained $25.51 \pm 0.46\%$ crude protein and $18.89 \pm 0.37\%$ fiber. In addition, the levels of cellulose, hemicellulose, and lignin were measured at $28.40 \pm 0.49\%$, $31.28 \pm 0.23\%$, and $3.77 \pm 0.40\%$, respectively. The results showed that the conventional SSF technique produced ethanol at 3.42 ± 0.02 g/L, with a Yp/s of 0.37 ± 0.01 g/g. After the application of aeration engineering through the engineered SSF method, the ethanol concentration increased to 4.50 ± 0.01 g L⁻¹, with a Yp/s value of 0.50 ± 0.02 g/g. The ethanol formation rate and Yp/s values in the engineered SSF method were also higher, namely 0.06 ± 0.00 g/L/h and 0.50 ± 0.02 g/g compared to the conventional SSF of 0.05 ± 0.00 g/L/h and 0.37 ± 0.02 g/g. The increase in ethanol yield from the engineered SSF method was 1.35 ± 0.05 times compared to the conventional SSF method.*

Keywords: Bioethanol, Bamboo Shoots, *Bambusa Vulgaris*, Conventional SSF, Engineered SSF.

Abstrak

Rebung merupakan lignoselulosa yang memiliki kandungan lignin rendah dan protein tinggi. Penelitian ini membandingkan produksi bioetanol dari rebung bambu ampel (*Bambusa vulgaris*) dengan metode *simultaneous saccharification and fermentation* (SSF) konvensional dan terekayasa. Proses hidrolisis dilakukan menggunakan kapang (*Trichoderma reesei*) dan dilanjutkan dengan fermentasi menggunakan khamir (*Saccharomyces cerevisiae*). Hasil analisis proksimat menunjukkan bahwa rebung mengandung $25,51 \pm 0,46\%$ protein kasar dan $18,89 \pm 0,37\%$ serat. Selain itu, kadar selulosa, hemiselulosa, dan lignin masing-masing terukur sebesar $28,40 \pm 0,49\%$, $31,28 \pm 0,23\%$, dan $3,77 \pm 0,40\%$. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknik SSF konvensional menghasilkan etanol pada konsentrasi $3,42 \pm 0,02$ g/L, dengan nilai Yp/s sebesar $0,37 \pm 0,01$ g/g. Setelah penerapan rekayasa aerasi melalui metode SSF terekayasa, konsentrasi etanol meningkat menjadi $4,50 \pm 0,01$ g L⁻¹, dengan nilai Yp/s sebesar $0,50 \pm 0,02$ g/g. Nilai laju pembentukan etanol dan Yp/s pada metode SSF terekayasa juga lebih tinggi, yaitu $0,06 \pm 0,00$ g/L/jam dan $0,50 \pm 0,02$ g/g dibandingkan dengan SSF konvensional sebesar $0,05 \pm 0,00$ g/L/jam dan $0,37 \pm 0,02$ g/g. Peningkatan rendemen etanol dari metode SSF terekayasa sebesar $1,35 \pm 0,05$ kali lipat dibandingkan dengan metode SSF konvensional.

Kata Kunci: Bioetanol, Rebung, *Bambusa Vulgaris*, SSF Konvensional, SSF Terekayasa.

1. PENDAHULUAN

Meningkatnya ketergantungan pada bahan bakar fosil memiliki efek merugikan terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat. Penggunaan bahan bakar fosil berkontribusi terhadap polusi udara dan menyebabkan berbagai masalah kesehatan termasuk asma, infeksi saluran pernapasan bawah, penyakit paru obstruktif kronis, diabetes yang terkait dengan kondisi kronis, penyakit jantung iskemik, kanker paru-paru, stroke, dan kelahiran prematur (Farrow et al., 2020; Kurasz et al., 2024). Pengembangan bahan bakar terbarukan terus berlanjut karena dapat membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan masalah yang ditimbulkannya. Salah satu contoh bahan bakar terbarukan yang dikembangkan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah bioetanol. Bioetanol menawarkan beberapa kelebihan seperti nilai oktan tinggi, emisi rendah, ketersediaan bahan baku yang melimpah, meningkatkan kinerja dan efisiensi mesin, ramah lingkungan, titik didih yang rendah, mudah terbakar, rasio kompresi yang lebih tinggi, dan waktu pembakaran yang lebih singkat (Mohammed et al., 2021; Tanwar et al., 2023).

Bioetanol generasi pertama diproduksi menggunakan biomassa yang dapat dikonsumsi seperti pati dan gula. Namun, bentuk bioetanol jenis ini memiliki kelemahan seperti adanya konflik dengan ketahanan pangan, penggunaan lahan pertanian yang luas, dan tingginya penggunaan air (Cavelius et al., 2023). Penggunaan bahan baku lignoselulosa untuk produksi bioetanol merupakan alternatif yang layak dan dapat mengatasi keterbatasan tersebut. Bahan lignoselulosa tersedia secara luas dan merupakan salah satu bahan organik yang paling melimpah di bumi. Setiap tahun, produksi lignoselulosa di alam berjumlah sekitar 181,5 miliar ton (Singh et al., 2022). Salah satu lignoselulosa yang potensial sebagai bahan baku bioetanol adalah tanaman bambu (Aizuddin et al., 2023; Gopan et al., 2024).

Kandungan lignoselulosa bervariasi dalam setiap spesies bambu. Dilaporkan bahwa *Phyllostachys edulis* mengandung selulosa 37,57-38,29%, hemiselulosa 28,50-30,38%, dan lignin 23,61-28,41% (Gao et al., 2021). Untuk spesies *Dendrocalamus strictus* mengandung selulosa, hemiselulosa, dan lignin secara berturut-turut sebesar 40,4, 26,8, dan 30,5% (Ummalyima et al., 2024). Kandungan lignin pada bambu yang relatif tinggi dapat menghambat proses hidrolisis dan produksi bioetanol. Produksi bioetanol dari bambu memerlukan proses *pretreatment* untuk menghilangkan komponen lignin, akan tetapi proses tersebut menyebabkan proses tidak efisien, lama, dan biaya yang tinggi.

Pretreatment menggunakan asam memiliki kelemahan seperti korosif, diperlukan netralisasi, dan tidak ramah lingkungan. *Pretreatment* menggunakan basa memiliki kelemahan seperti panas dilepaskan selama pelarutan NaOH, diperlukan dalam jumlah yang banyak, dan waktu tinggal yang lama. *Pretreatment* menggunakan cara fisika seperti hidrotermal membutuhkan suhu dan tekanan tinggi dan sedikit mempengaruhi terhadap kristalinitas selulosa. *Pretreatment* dengan metode biologi memerlukan waktu yang lama, tidak terlalu efisien untuk lignin dan kristalinitas tinggi, selulosa dan hemiselulosa dikonsumsi oleh mikroorganisme, sebagian besar bakteri tidak dapat dibiakkan dalam kondisi laboratorium, ada persaingan, dan cenderung mahal (Baksi et al., 2023; Z. Wu et al., 2022).

Beberapa penelitian tentang produksi bioetanol dari bambu telah dilakukan. Walaupun telah dilakukan *pretreatment*, kadar lignin pada bambu tidak sepenuhnya dapat dihilangkan. Bambu jenis *D. strictus* yang awalnya memiliki kandungan lignin sebesar 30,5% setelah dilakukan *pretreatment* menggunakan NaOH, H₂O₂, dan NaOH/H₂O₂ turun secara berturut-turut sebesar 18, 15,4 dan 14% (Ummalyima et al., 2024). Pada bambu jenis *D. branddisii* memiliki nilai delignifikasi sebesar 85,87-91,61%

menggunakan gabungan sulfometilasi dan Fenton oksidasi (SFP-DB). Akan tetapi reagen tersebut memerlukan jumlah besar Fe^{2+} dan H_2O_2 yang menyebabkan konsumsi reagen yang besar, meningkatkan biaya, dan dampak negatif terhadap lingkungan (Liu et al., 2024). Penelitian Zakaria & Che Pa (2023), analisis FTIR menunjukkan bahwa proses *pretreatment acid-alkaline* efektif mengurangi lignin dalam *Bambusa wray*. Akan tetapi pada penelitian tersebut tidak berhasil mendeteksi keberadaan etanol dalam sampel hasil fermentasi.

Bambu muda atau rebung merupakan sumber lignoselulosa yang memiliki kandungan lignin rendah, mudah diolah, pertumbuhan yang cepat, dan penyebaran yang luas (Jara et al., 2020). Berbeda dengan bambu, rebung memiliki tingkat kristalinitas selulosa lebih rendah dibanding bambu dewasa karena dinding selnya masih muda dan belum mengalami proses pematangan dan penguatan struktur (Naim et al., 2022). Seperti yang dilaporkan oleh Ramadhani et al. (2024) kandungan lignin pada rebung bambu ampel kuning hanya sebesar 0,85%. Sedangkan pada bambu dengan jenis yang sama, kadar lignin saat bambu dewasa sekitar 24% (Maulana et al., 2020). Rebung juga memiliki kandungan asam amino dan mineral baik mikro maupun makro (Rana et al., 2022). Ramadhani et al. (2024) memproduksi bioetanol dari rebung bambu ampel kuning menggunakan metode SSF konvensional menggunakan kapang untuk hidrolisis dan khamir untuk fermentasi. Namun metode tersebut memiliki kelemahan yang hanya bisa dilakukan dalam satu kondisi saja, sehingga pertumbuhan kapang atau khamir berjalan kurang maksimal.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini melakukan pendekatan baru dengan memproduksi bioetanol menggunakan rebung bambu ampel (*B. vulgaris*) tanpa dilakukan proses *pretreatment* dengan metode SSF terekayasa. Teknik SSF terekayasa dapat meningkatkan produksi bioetanol lebih tinggi dibandingkan SSF konvensional karena menggeser dari kondisi aerobik ke anaerobik. Disaat kapang memproduksi gula mencapai maksimal (aerobik), aerasi akan dihentikan sehingga kapang akan mengalami fase kematian lebih cepat dan dikonsumsi oleh khamir sebagai nutrisi tambahan. Ketika kondisi anaerobik, khamir akan memproduksi etanol lebih tinggi dikarenakan oksigen yang minim dan lebih banyak terbentuk produk daripada sel. Selain itu metode ini juga dapat mengurangi waktu produksi dan biaya yang efisien (Rahayuningsih et al., 2022). Selain itu, rebung juga mengandung mineral baik makro maupun mikro sehingga pada penelitian ini juga tidak dilakukan penambahan mineral pada tahap fermentasi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat terhadap eksplorasi bahan baku lignoselulosa yang rendah lignin dan aplikasi rekayasa bioproses dalam memproduksi bioetanol sehingga prosesnya efisien dan maksimal.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Bahan

Rebung yang digunakan dalam penelitian ini adalah bambu ampel (*Bambusa vulgaris*) yang diperoleh dari Desa Puspasari, Kecamatan Citeureup, Kabupaten Bogor. *Trichoderma reesei* IPBCC 93.0260 dan *Saccharomyces cerevisiae* IPBCC.Y. 05.540 diperoleh dari IPBCC, Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor. Bahan untuk kultivasi dan fermentasi dalam penelitian ini meliputi ekstrak khamir (Himedia), pepton bakteriologis (Himedia), $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (Merck), KH_2PO_4 (Merck), $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Merck), Glukosa (Merck), ekstrak malt (Homebrew Fermentomania), urea (Merck) dan CMC (Sigma-Aldrich). Alat utama yang digunakan adalah bioreaktor (Duran GLS 80) berpengaduk magnetik dengan kapasitas total volume kerja 1500-2000 mL yang sudah dimodifikasi.

2.2 Preparasi Rebung

Rebung dikupas terlebih dahulu untuk menghilangkan kulitnya, kemudian dicuci hingga bersih. Selanjutnya, rebung disimpan dalam kondisi beku di dalam freezer sebelum dihancurkan menggunakan blender untuk proses selanjutnya. Rebung yang telah hancur kemudian dikeringkan pada suhu 50°C selama 24 jam. Setelah dikeringkan, rebung dibuat menjadi bubuk dengan ukuran 40 mesh. Rebung dianalisis untuk menentukan kadar fraksi proksimat (kadar air, kadar abu, protein kasar, serat kasar, dan lemak kasar) dan fraksi lignoselulosa (selulosa, hemiselulosa, dan lignin).

2.3 Persiapan Kultur *T. reesei* dan *S. cerevisiae*

Media pertumbuhan *T. reesei* untuk menghasilkan enzim selulase dengan memodifikasi media dari penelitian Syadiah et al. (2018) yang terdiri dari: 0,15 g ekstrak ragi, 0,225 g pepton bakteriologis, 0,196 g (NH₄)₂SO₄, 0,3 g KH₂PO₄, 0,00075 g FeSO₄·7H₂O, 0,375 g glukosa, dan 0,75 mL larutan campuran CMC 1% dengan 1% rebung (1:1). Bahan-bahan tersebut dilarutkan dalam 150 mL buffer sitrat pH 5. Kemudian media disterilkan dengan autoklaf. Selanjutnya, *T. reesei* diinokulasi dalam 1 slop dan diinkubasi dalam rotary shaker pada 125 rpm pada suhu kamar (± 30°C) selama 7 hari. Komposisi media pertumbuhan untuk *S. cerevisiae* sama dengan yang dilaporkan sebelumnya (Syadiah et al., 2018).

2.4 Kultivasi *T. reesei*

100 gram rebung dan 1 gram urea ditambahkan ke 1 L H₂O dalam bioreaktor 2 L. Setelah didinginkan, media inokulum yang mengandung *T. reesei* ditambahkan sebanyak 10% (v/v). Proses kultivasi dilakukan dengan aerasi penuh 1 vvm, suhu kamar (30°C), dan agitasi 150 rpm. Proses pengambilan sampel dilakukan dua kali setiap 12 jam selama periode 72 jam.

2.5 Produksi Bioetanol Melalui Metode SSF Konvensional dan Terekayasa

100 gram rebung dan 1 gram urea ditambahkan ke 1 L H₂O dalam bioreaktor 2 L. Setelah pendinginan, media inokulum yang mengandung *T. reesei* dan *S. cerevisiae* ditambahkan masing-masing 10% (v/v). Proses produksi bioetanol untuk metode SSF konvensional dilakukan dengan aerasi penuh 1 vvm, suhu kamar (30°C), dan agitasi 150 rpm. Untuk metode SSF terekayasa, aerasi dihentikan ketika produksi glukosa berada pada kondisi maksimal yang diperoleh dari waktu hidrolisis selulosa menjadi glukosa pada tahap kultivasi *T. reesei*. Proses pengambilan sampel dilakukan dua kali setiap 12 jam selama periode 72 jam.

2.5 Parameter Kultivasi

Parameter yang diukur dan dihitung sebagai indikator kinerja proses kultivasi dan fermentasi adalah total biomassa (X), total plate count (TPC), bioetanol yang dihasilkan (P), residu substrat selulosa yang tersisa di media (S), dan residu glukosa. Laju pertumbuhan spesifik maksimum (μ_{maks}) yang ditunjukkan oleh kemiringan kurva pertumbuhan pada fase eksponensial yang diperoleh dengan memplot $\ln X$ dari waktu ke waktu. Hasil produksi bioetanol antara metode SSF konvensional dan metode SSF terekayasa, dilakukan analisis menggunakan uji t-test pada taraf signifikansi 5%.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakterisasi Rebung

Proses pengeringan dilakukan pada suhu 50°C untuk mengurangi kadar air pada rebung segar. Menurut Rohadi *et al.* (2020), kadar air pada rebung segar mencapai 90,96%. Selain itu, proses penghalusan rebung bertujuan untuk meningkatkan luas

permukaan dan interaksi antara polisakarida dengan enzim dan mikroorganisme. Komponen fraksi proksimat rebung bambu ampel (*B. vulgaris*) dapat dilihat pada Tabel 1. Rebung kemudian juga dianalisis untuk mengetahui kadar selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Komposisi fraksi lignoselulosa dalam rebung disajikan pada Tabel 2.

Tabel 1 menunjukkan kandungan protein kasar dan serat pada rebung sebesar $25,51 \pm 0,46\%$ dan $18,89 \pm 0,37\%$. Kedua komponen utama ini penting untuk pertumbuhan mikroorganisme dan substrat untuk produksi bioetanol. Protein menyediakan nutrisi penting bagi sel, karena terdiri dari C, H, O, dan N. Selain itu, asam amino berkontribusi pada metabolisme khamir, memungkinkan produksi bioetanol lebih efisien (Peteghem et al., 2022). Kadar abu menunjukkan kandungan mineral pada rebung. Menurut Rana et al., (2022), rebung mengandung mineral baik makro maupun mikro. Mineral seperti kalsium dapat meningkatkan produktivitas bioetanol (Alminderej et al., 2022). Lemak juga dapat memainkan peran penting dalam memodifikasi fluiditas membran dan adaptasi ragi terhadap kondisi lingkungan (Bonatto, 2022).

Tabel 2 menunjukkan komponen lignoselulosa dari rebung bambu ampel (*B. vulgaris*). Selulosa dan hemiselulosa dapat dihidrolisis oleh *T. reesei* menjadi gula sederhana. Kandungan lignin dari rebung bambu ampel (*B. vulgaris*) adalah 3,77%. Sebaliknya, bambu muda dan dewasa dari spesies yang sama memiliki kandungan lignin mulai dari 16,27% hingga 21,86% (Sulaiman et al., 2016). Kadar lignin yang lebih rendah dalam biomassa lignoselulosa memfasilitasi hidrolisis mikroba atau enzimatik dari substrat selulosa (Wu et al., 2023). Kadar proksimat dan lignoselulosa pada rebung bervariasi dikarenakan adanya faktor-faktor seperti jenis bambu, genetik, bagian spesifik yang dianalisis, usia tunas, dan kondisi lingkungan (Fan et al., 2023; Qian et al., 2025; Singhal et al., 2021).

Tabel 1. Komposisi komponen fraksi proksimat rebung bambu ampel

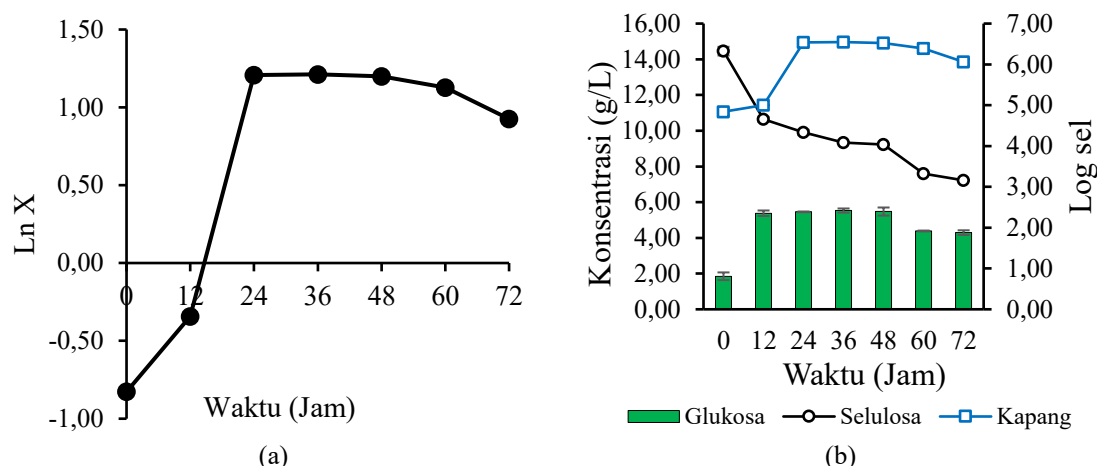
Komponen	Hasil penelitian (%)
Kadar air	$10,43 \pm 0,28$
Kadar abu	$8,88 \pm 0,02$
Protein kasar	$25,51 \pm 0,46$
Kadar serat	$18,89 \pm 0,37$
Lemak kasar	$2,43 \pm 0,08$

Tabel 2. Komposisi komponen lignoselulosa dalam rebung bambu ampel

Komponen	Hasil penelitian (%)
Selulosa	$28,40 \pm 0,49$
Hemiselulosa	$31,28 \pm 0,23$
Lignin	$3,77 \pm 0,40$

3.2 Kultivasi *T. reesei*

Gambar 1a menunjukkan kurva pertumbuhan kapang (*T. reesei*) berdasarkan berat biomassa kering sel. Fase awal dimulai pada 0 jam ketika kultur *T. reesei* diinokulasi ke dalam media rebung yang sudah disterilkan. Pertumbuhan kapang rendah dapat diamati pada awal kultivasi karena beradaptasi dengan lingkungan baru. Antara jam ke-12 dan ke-24, terjadi fase pertumbuhan eksponensial yang menunjukkan bahwa kapang telah berhasil beradaptasi dan berkembang dalam kondisi baik. Dari jam ke-24 hingga ke-48, pertumbuhan memasuki fase stasioner yang mana grafik membentuk pola mendatar. Kondisi tersebut terjadi karena jumlah sel hidup dan mati mencapai kondisi yang seimbang. Pada jam ke 60-72, jumlah sel mulai menurun karena tingkat kematian lebih tinggi dibandingkan sel yang hidup yang disebabkan oleh penurunan kadar substrat dan nutrisi dalam media pertumbuhan.



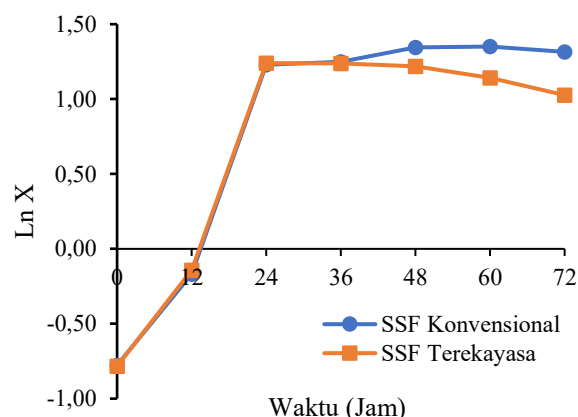
Gambar 1. Kurva pertumbuhan biomassa kering kapang (*T. reesei*) pada substrat rebung (a) dan produksi glukosa menggunakan metode batch pada substrat rebung (b)

Pada Gambar 2b menunjukkan kandungan glukosa terlarut mengalami peningkatan dari awal masa inkubasi hingga jam ke-12. Setelah itu, pada jam ke-12 sampai ke-48 kandungan glukosa berada pada kadar yang konstan. Produksi glukosa tertinggi terjadi pada jam ke-36 yaitu sebesar $5,53 \pm 0,12$ g/L. Sedangkan pada jam ke 60-72 kadar glukosa menurun. Kadar selulosa dari awal kultivasi mengalami penurunan karena dipecah oleh enzim selulase yang dihasilkan oleh *T. reesei* menjadi glukosa. Enzim selulase yang dihasilkan oleh kapang *Trichoderma* yaitu endoglukanase, selobiohidrolase (eksoglukanase), dan β -glukosidase yang bekerja secara sinergis dalam menghidrolisis selulosa menjadi glukosa (Algifari et al., 2025).

Hasil menunjukkan nilai μ_{maks} berbasis sel biomassa kering diperoleh sebesar $0,13 \pm 0,00$ jam⁻¹. Nilai μ_{maks} berbasis TPC sebesar $0,30 \pm 0,02$ jam⁻¹. Nilai tersebut menunjukkan kecepatan terbesar pertumbuhan kapang *T. reesei* pada fase eksponensial. Nilai $Y_{x/s}$ sebesar $0,39 \pm 0,02$ g/g, hal ini menunjukkan bahwa seberapa besar kapang memanfaatkan substrat untuk membentuk sel. Efisiensi untuk penggunaan substrat selulosa sebesar $50,03 \pm 0,84\%$. Walaupun kandungan lignin dan sifat kristalinitas yang rendah, penyebab efisiensi substrat yang relatif sedang dikarenakan substrat tidak larut dan adanya senyawa sianida pada rebung. Substrat yang tidak larut dapat membatasi akses enzim, sehingga laju hidrolisis selulosa lebih lambat (Petrásek & Nidetzky, 2025). Selain itu, adanya sianida dalam rebung dapat menghambat pertumbuhan jamur dan memengaruhi efisiensi metabolisme. Rebung ampel yang tidak diolah memiliki konsentrasi sianida 730 ppm (Venagaya et al., 2017). Beberapa spesies *Trichoderma* dapat bioremediasi sianida, tetapi kemampuan ini tidak melebihi 15 mM (400 ppm) (Malmir et al., 2022).

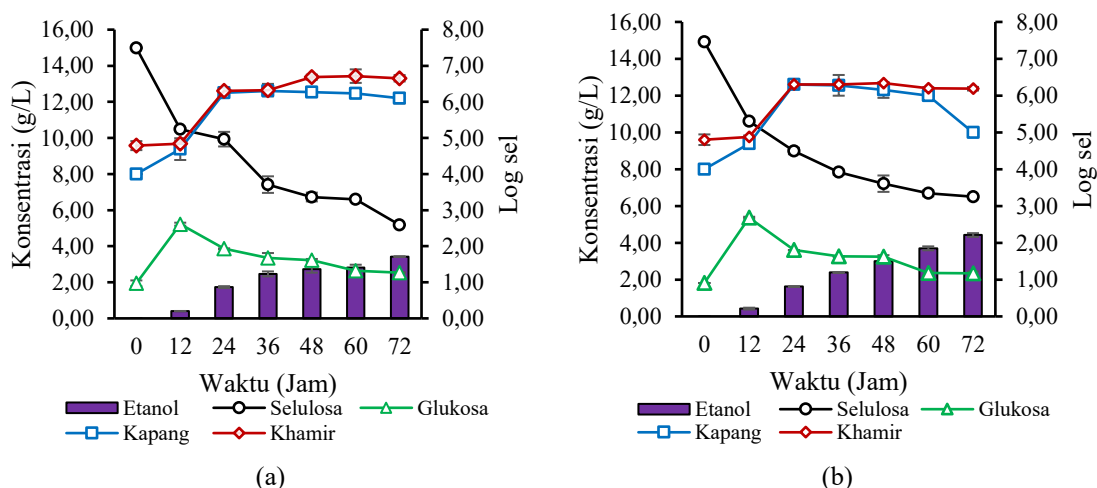
3.3 Perbandingan Produksi Bioetanol Melalui Metode SSF Konvensional dan Terekayasa

Gambar 2 menunjukkan kurva pertumbuhan kapang (*T. reesei*) dan khamir (*S. cerevisiae*) berdasarkan berat biomassa kering sel pada metode SSF konvensional dan terekayasa. Inokulasi kapang dan khamir secara bersamaan dapat mempercepat pembentukan produk karena hidrolisis selulosa dan fermentasi bioetanol terjadi secara bersamaan (Syamsu et al., 2020). Prosedur dimulai pada jam 0 dengan inokulasi kultur *T. reesei* dan *S. cerevisiae* ke media rebung yang sudah disterilkan. Dari jam ke-12 hingga ke-24 merupakan fase pertumbuhan eksponensial. Pada metode SSF konvensional, pada jam ke 36-72 berat biomassa sel kering lebih tinggi dibandingkan SSF terekayasa karena kapang dan khamir tumbuh lebih banyak karena aerasi masih terus diberikan.



Gambar 2. Kurva pertumbuhan biomassa sel kering menggunakan metode SSF konvensional dan terekayasa

Hasil produksi bioetanol dari rebung bambu ampel menggunakan metode SSF konvensional dan terekayasa dapat Gambar 3. Gambar 3 menunjukkan bahwa konsentrasi etanol meningkat selama proses produksi. Nilai perbandingan nilai parameter kultivasi pada metode SSF konvensional dan terekayasa dapat dilihat pada Tabel 3. Efisiensi penggunaan substrat untuk metode SSF baik konvensional maupun rekayasa lebih tinggi dibandingkan pada kultivasi *T. reesei* karena adanya metabolisme mikroba yang komplementer. Satu mikroorganisme dapat mengubah substrat menjadi produk antara, yang kemudian dimanfaatkan oleh mikroorganisme lain untuk menghasilkan produk akhir (Mori et al., 2016). Selain itu, efisiensi dapat ditingkatkan karena sianida dalam rebung yang mengganggu kerja *T. reesei* dalam menghidrolisis selulosa juga dapat terdegradasi oleh khamir (Shen et al., 2021).



Gambar 3. Produksi bioetanol menggunakan substrat rebung secara SSF konvensional (a) dan SSF terekayasa (b)

Tabel 3. Perbandingan nilai parameter kultivasi pada metode SSF konvensional dan terekayasa

Parameter kultivasi	SSF konvensional	SSF terekayasa
μ_{maks} (X) (jam^{-1})	$0,12 \pm 0,03$	$0,12 \pm 0,01$
μ_{maks} (TPC) kapang (jam^{-1})	$0,30 \pm 0,04$	$0,31 \pm 0,02$
μ_{maks} (TPC) khamir (jam^{-1})	$0,28 \pm 0,02$	$0,27 \pm 0,01$
$Y_{x/s}$ (g/g)	$0,39 \pm 0,01$	$0,36 \pm 0,01$
$Y_{p/s}$ (g/g)	$0,37 \pm 0,01$	$0,50 \pm 0,02$
Efisiensi substrat (%)	$65,44 \pm 0,00$	$56,37 \pm 0,27$
Etanol (g L^{-1})	$3,42 \pm 0,02$	$4,50 \pm 0,01$
Laju pembentukan etanol ($\text{g L}^{-1} \text{jam}^{-1}$)	$0,05 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,00$

Sedangkan untuk efisiensi penggunaan substrat selulosa untuk produksi bioetanol melalui metode SSF konvensional lebih tinggi dibandingkan SSF terekayasa. Hal ini disebabkan oleh perubahan aerasi menjadi anaerobik menyebabkan kapang mengalami kematian lebih cepat dibandingkan dengan pemberian aerasi penuh. Hal ini bisa dilihat pada log sel untuk kapang pada jam 36-72 pada SSF terekayasa lebih rendah dibandingkan dengan SSF konvensional. Selain rebung memiliki kandungan nutrisi, kapang yang mengalami kematian akan dikonsumsi oleh khamir sebagai nutrisi tambahan. Sehingga proses produksi pada penelitian ini tidak dilakukan penambahan nutrisi pada proses fermentasi.

Nilai $Y_{p/s}$ dari metode SSF terekayasa lebih tinggi dibandingkan SSF konvensional, hal ini disebabkan pada proses fermentasi metode SSF terekayasa lebih efisien dalam mengubah gula menjadi etanol dan CO_2 . Di sisi lain, selama fermentasi menggunakan metode SSF terekayasa terjadi peningkatan sebesar $1,35 \pm 0,04$ kali dibandingkan SSF konvensional dalam memproduksi etanol. Metode SSF terekayasa mengubah lingkungan dari aerobik ke anaerobik sehingga menggeser proses metabolisme dari respirasi ke fermentasi. Dalam kondisi anaerobik, jamur memasuki fase kematian yang lebih cepat, yang kemudian dapat digunakan oleh ragi sebagai sumber nutrisi (Rahayuningsih et al., 2022).

4. KESIMPULAN

Produksi bioetanol dari rebung bambu ampel (*B. vulgaris*) telah berhasil dilakukan. Analisis proksimat dan serat menunjukkan bahwa rebung bambu memiliki kandungan protein yang tinggi dan kandungan lignin yang rendah. Penerapan metode SSF yang direkayasa meningkatkan rendemen etanol sebesar $1,35 \pm 0,04$ kali lipat dibandingkan dengan metode SSF konvensional. Rebung bambu memiliki kandungan selulosa dan protein yang tinggi, menjadikannya substrat yang menjanjikan untuk produksi bioetanol. Dengan kemajuan teknologi rekayasa bioproses, produksi bioetanol juga dapat ditingkatkan secara signifikan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis mengucapkan terima kasih yang kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) atas pendanaan penelitian ini.

REFERENCES

- Aizuddin, K. N. A. K., Lai, K.-S., Baharum, N. A., Yong, W. T. L., Hoon, L. N., Cheng, W. H., Hamid, M. Z. A., & Abdullah, J. O. (2023). Bamboo for biomass energy production. *BioResources*, 18(1), 2386–2407. <https://doi.org/10.15376/biores.18.1.Aizuddin>
- Algifari, M. H., Prismantoro, D., Hafsari, A. R., Abd, W., Qadr, A., Ozturk, A. B., Ilham, Z., Joshi, R. C., & Doni, F. (2025). Performance of hydrolytic enzymes produced by *Trichoderma* in sustainable crop production: Current insights and future perspectives. *Sustainable Environment*, 8511, 2593746. <https://doi.org/10.1080/27658511.2025.2593746>
- Alminderej, F. M., Hamden, Z., El-Ghoul, Y., Hammami, B., Saleh, S. M., & Majdoub, H. (2022). Impact of calcium and nitrogen addition on bioethanol production by *S. cerevisiae* fermentation from date by-products: Physicochemical characterization and technical design. *Fermentation*, 8, 583. <https://doi.org/10.3390/fermentation8110583>
- Baksi, S., Saha, D. S. S., & Basu, U. S. D. (2023). Pre-treatment of lignocellulosic biomass : Review of various physico-chemical and biological methods influencing the extent of biomass depolymerization. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20, 13895–13922. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04838-4>

- Bonatto, D. (2022). The multiple roles of lipid metabolism in yeast physiology during beer fermentation. *Genetics and Molecular Biology*, 45, e20210325. <https://doi.org/10.1590/1678-4685-gmb-2021-0325>
- Cavelius, P., Engelhart-Straub, S., Mehlmer, N., Lercher, J., Awad, D., & Brück, T. (2023). The potential of biofuels from first to fourth generation. *PLoS Biology*, 21(3), e3002063. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PBIO.3002063>
- Fan, L., Hu, J., Guo, Z., Chen, S., & He, Q. (2023). Shoot nutrition and flavor variation in two *Phyllostachys* species: Does the quality of edible bamboo shoot diaphragm and flesh differ? *Foods*, 12, 1180. <https://doi.org/10.3390/foods12061180>
- Farrow, A., Miller, K. A., & Myllyvirta, L. (2020). *Toxic air: The price of fossil fuels*. Greenpeace Southeast Asia.
- Gao, H., Wang, Y., Yang, Q., Peng, H., Li, Y., Zhan, D., Wei, H., Lu, H., Bakr, M. M. A., Ei-sheekh, M. M., Qi, Z., Peng, L., & Lin, X. (2021). Combined steam explosion and optimized green-liquor pretreatments are effective for complete saccharification to maximize bioethanol production by reducing lignocellulose recalcitrance in one-year-old bamboo. *Renewable Energy*, 175, 1069–1079. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.016>
- Gopan, G., Krishnan, R., & Arun, M. (2024). Review of bamboo biomass as a sustainable energy. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 19, 2733–2745. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctae237>
- Jara, A. A., Razal, R. A., Migo, V. P., Acda, M. N., Calderon, M. M., Florece, L. M., & Peralta, E. K. (2020). Production of nanocellulose and biocomposites from kawayan kiling (*Bambusa vulgaris* Schrader ex Wendland) shoots. *Ecosystems and Development Journal*, 10(1 & 2), 10–17.
- Kurasz, A., Lip, G. Y. H., Dobrzycki, S., & Ku, Ł. (2024). A breath of trouble: Unraveling the impact of air pollution on atrial fibrillation. *Journal of Clinical Medicine*, 13, 7400.
- Liu, Z., Zhang, M., Hou, Q., & Shi, Z. (2024). Sulfomethylation reactivity enhanced the Fenton oxidation pretreatment of bamboo residues for enzymatic digestibility and ethanol production. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 12, 1344964. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1344964>
- Malmir, N., Zamani, M., Motallebi, M., Fard, N. A., & Mekuto, L. (2022). Cyanide biodegradation by *Trichoderma harzianum* and cyanide hydratase network analysis. *Molecules*, 27, 3336. <https://doi.org/10.3390/molecules27103336>
- Maulana, M. I., Marwanto, M., Nawawi, D. S., Nikmatin, S., Febrianto, F., & Kim, N. H. (2020). Chemical components content of seven Indonesian bamboo species. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 935(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/935/1/012028>
- Mohammed, M. K., Balla, H. H., Al-Dulaimi, Z. M. H., Kareem, Z. S., & Al-Zuhairy, M. S. (2021). Effect of ethanol-gasoline blends on SI engine performance and emissions. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 100891. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100891>
- Mori, M., Ponce-de-León, M., Peretó, J., & Montero, F. (2016). Metabolic complementation in bacterial communities: Necessary conditions and optimality. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1553. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01553>
- Naim, A., Tan, C. S. Y., & Liew, F. K. (2022). Thermal properties of bamboo cellulose isolated from bamboo culms and shoots. *BioResources*, 17(3), 4806–4815. <https://doi.org/10.15376/biores.17.3.4806-4815>
- Peteghem, L. Van, Sakarika, M., & Matassa, S. (2022). The role of microorganisms and carbon-to-nitrogen ratios for microbial protein production from bioethanol. *Applied and Environmental Microbiology*, 88, 22. <https://doi.org/10.1128/aem.01188-22>

- Petrásek, Z., & Nidetzky, B. (2025). The effect of accessibility of insoluble substrate on the overall kinetics of enzymatic degradation. *Biotechnology and Bioengineering*, 122, 895–907. <https://doi.org/10.1002/bit.28921>
- Qian, Y., Jia, J., Chen, Z., Wang, K., Li, P., Gao, P., Ying, Y., & Shi, W. (2025). Environmental drivers and transcriptomic variations shaping Lei bamboo shoots across cultivation regions. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1565665. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1565665>
- Rahayuningsih, M., Febrianti, F., & Syamsu, K. (2022). Enhancement of bioethanol production from tofu waste by engineered simultaneous saccharification and fermentation (SSF) using co-culture of mold and yeast. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1063, 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1063/1/012004>
- Ramadhani, G. H., Syamsu, K., Kartika, I. A., & Kartawiria, I. S. (2024). Aplikasi sakarifikasi dan fermentasi simultan dalam produksi bioetanol dari rebung bambu. *Agrointek*, 18(2), 312–319. <https://doi.org/10.21107/agrointek.v18i2.17294>
- Rana, K. R., Chongtham, N., & Bisht, M. S. (2022). Evaluation of proximate composition, vitamins, amino acids, antioxidant activities with minerals and bioactive compounds of young edible bamboo (*Phyllostachys mannii* Gamble). *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*, 10(1), 321–333. <https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.10.1.27>
- Rohadi, Sampurno, A., Wicaksono, M. F., & Saputri, N. I. (2020). The effect of fermentation period of yellow bamboo shoots (*B. vulgaris* Striata) using *L. plantarum* starter on physical and chemical properties of its flour as dietary fiber source. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 443, 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/443/1/012019>
- Shen, T., Wu, Q., & Xu, Y. (2021). Biodegradation of cyanide with *Saccharomyces cerevisiae* in Baijiu fermentation. *Food Control*, 127, 108107. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108107>
- Singh, B., Korstad, J., Guldhe, A., & Kothari, R. (2022). Editorial: Emerging feedstocks & clean technologies for lignocellulosic biofuel. *Frontiers in Energy Research*, 10, 917081. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.917081>
- Singhal, P., Satya, S., & Naik, S. . (2021). Fermented bamboo shoots: A complete nutritional, anti-nutritional and antioxidant profile of the sustainable and functional food to food security. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 3, 100041. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2021.100041>
- Sulaiman, M. S., Ramle, S. F. M., Geng, B. J., Hashim, R., Sulaiman, O., Ibrahim, N. I., & Zaudin, N. A. C. (2016). *Bambusa vulgaris*: Chemical composition and cell wall structure. *European International Journal of Science and Technology*, 5, 27–39.
- Syadiah, E. A., Haditjaroko, L., & Syamsu, K. (2018). Bioprocess engineering of bioethanol production based on sweet sorghum bagasse by co-culture technique using *Trichoderma reesei* and *Saccharomyces cerevisiae*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 209(1), 012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/209/1/012018>
- Syamsu, K., Haditjaroko, L., & Syadiah, E. A. (2020). Bio-ethanol production from sweet sorghum bagasse by engineered simultaneous saccharification and fermentation technology using *Trichoderma reesei* and *Saccharomyces cerevisiae*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 472, 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/472/1/012025>
- Tanwar, M. D., Torres, F. A., Alqahtani, A. M., Tanwar, P. K., Bhand, Y., & Doustdar, O. (2023). Promising bioalcohols for low-emission vehicles. *Energies*, 16, 597. <https://doi.org/10.3390/en16020597>
- Ummalyma, S. B., Herojit, N., & Sukumaran, R. K. (2024). Alkaline hydrogen peroxide pretreatment of bamboo residues and its influence on physiochemical properties and enzymatic digestibility for bioethanol production. *Frontiers in Energy Research*, 12, 1444813. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1444813>

- Venagaya, C. A., Anam, S., & Yuyun, Y. (2017). Variasi waktu dan cara pengolahan sebelum dikonsumsi terhadap penurunan kandungan asam sianida pada varietas rebung bambu ampel (*Bambusa vulgaris* schrad. Ex wendl.). *KOVALEN*, 3(2), 189. <https://doi.org/10.22487/j24775398.2017.v3.i2.8726>
- Wu, W., Li, P., Huang, L., Wei, Y., Li, J., Zhang, L., & Jin, Y. (2023). The role of lignin structure on cellulase adsorption and enzymatic hydrolysis. *Biomass*, 3, 96–107. <https://doi.org/10.3390/biomass3010007>
- Wu, Z., Peng, K., Zhang, Y., Wang, M., Yong, C., Chen, L., Qu, P., Huang, H., Sun, E., & Pan, M. (2022). Lignocellulose dissociation with biological pretreatment towards the biochemical platform: A review. *Materials Today Bio*, 16, 100445. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2022.100445>
- Zakaria, M. H. Z., & Che Pa, N. F. (2023). Production of bioethanol from bamboo powder via dilute sulphuric acid-sodium hydroxide pre-treatment and simultaneous saccharification and fermentation (SSF). *Journal of Advanced Industrial Technology and Application*, 4(2), 1–9. <https://doi.org/10.30880/jaita.2023.04.02.001>