



Pengaruh Konsentrasi Asam Sulfat dan Waktu Hidrolisis Terhadap Yield Bioetanol Eceng Gondok

Bagus Wibowo^{1*}, Sahrul Effendy A², Ida Febriana³

^{1,2,3}Program Studi Sarjana Terapan Teknik Energi, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang, Indonesia

*Email: ida.febriana@polsri.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.52188/jpfs.v9i2.2383>

Accepted: 4 Agustus 2026

Approved: 11 Agustus 2026

Published: 30 September 2026

ABSTRAK

Eceng gondok merupakan biomassa lignoselulosa invasif yang berpotensi dikonversi menjadi bioetanol, tetapi efektivitas konversinya sangat ditentukan oleh kondisi hidrolisis. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh konsentrasi asam sulfat dan waktu hidrolisis terhadap yield bioetanol serta menilai karakteristik produk. Serbuk eceng gondok dipraperlakukan dengan natrium hidroksida 0,5 M berbantuan ultrasonik pada 60 °C selama 30 menit. Biomassa dihidrolisis pada 100 °C menggunakan asam sulfat 1, 3, dan 5% selama 30, 60, 90, dan 120 menit. Hidrolisat dinetralkan hingga pH 4–5, difermentasi menggunakan *Saccharomyces cerevisiae* selama 72 jam, lalu didistilasi. Peningkatan konsentrasi asam dan waktu hingga 90 menit menaikkan nilai derajat Brix, kadar etanol, dan yield; perpanjangan hingga 120 menit menurunkan seluruh parameter tersebut. Kondisi terbaik dalam rentang penelitian diperoleh pada asam sulfat 5% dan 90 menit, dengan 8,5 °Brix, kadar etanol 20% volume, dan yield 15,786%. Analisis kromatografi gas–spektrometri massa menunjukkan etanol sebagai komponen dominan dengan luas area 61,60%. Produk masih belum memenuhi mutu bioetanol bahan bakar sehingga memerlukan rektifikasi dan dehidrasi lanjutan.

Kata kunci: Bioetanol; Eceng Gondok; Hidrolisis Asam; Lignoselulosa; Waktu Hidrolisis

ABSTRACT

Water hyacinth is an invasive lignocellulosic biomass with potential for bioethanol production, although conversion efficiency strongly depends on hydrolysis conditions. This study evaluated the effects of sulfuric acid concentration and hydrolysis time on bioethanol yield and product characteristics. Dried water hyacinth powder was pretreated with 0.5 M sodium hydroxide assisted by ultrasonication at 60 °C for 30 min. The biomass was hydrolyzed at 100 °C using 1, 3, and 5% sulfuric acid for 30, 60, 90, and 120 min. The hydrolysate was neutralized to pH 4–5, fermented with *Saccharomyces cerevisiae* for 72 h, and distilled. Increasing acid concentration and reaction time up to 90 min increased degrees Brix, ethanol concentration, and yield, whereas extending hydrolysis to 120 min reduced all three responses. The best condition within the investigated range was 5% sulfuric acid for 90 min, producing 8.5 °Brix, 20% ethanol by volume, and a 15.786% bioethanol yield. Gas chromatography–mass spectrometry identified ethanol as the dominant component with a total peak area of 61.60%. The product did not satisfy fuel-grade bioethanol requirements, indicating that further rectification and dehydration are required.

Keyword: Acid Hydrolysis; Bioethanol; Hydrolysis Time; Lignocellulose; Water Hyacinth

©2026 Pendidikan Fisika FKIP Universitas Nahdlatul Ulama Cirebon

PENDAHULUAN

Transisi menuju sistem energi rendah karbon menuntut pengembangan bahan bakar terbarukan yang tidak memperbesar kompetisi terhadap bahan pangan. Bioetanol generasi kedua memenuhi arah tersebut karena diproduksi dari biomassa lignoselulosa, termasuk residu pertanian, gulma, dan biomassa akuatik. Keunggulan konseptualnya terletak pada pemanfaatan sumber karbon yang dapat diperbarui sekaligus pengurangan beban limbah. Namun, lignoselulosa tidak dapat langsung difermentasi secara efisien. Selulosa berada dalam matriks kompleks bersama hemiselulosa dan lignin, sehingga rantai polisakaridanya harus dibuka dan diubah menjadi gula fermentabel sebelum mikroorganisme mampu menghasilkan etanol (Broda et al., 2022; Devi et al., 2022; Pendse et al., 2023).

Eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) merupakan salah satu bahan baku yang relevan untuk pendekatan tersebut. Tanaman ini tumbuh cepat di perairan tropis, membentuk hamparan padat, menghambat penetrasi cahaya, menurunkan oksigen terlarut, dan mengganggu fungsi perairan. Di sisi lain, jaringan tanamannya mengandung fraksi selulosa dan hemiselulosa yang dapat dikonversi menjadi gula. Pemanfaatannya sebagai bahan baku bioetanol karena itu menawarkan dua manfaat sekaligus: mengendalikan biomassa invasif dan menghasilkan produk energi bernilai tambah. Studi produksi bioetanol dari eceng gondok telah menggunakan berbagai pendekatan, seperti hidrolisis asam, hidrolisis berbantuan gelombang mikro, steam explosion, sakarifikasi enzimatis, serta fermentasi terpisah maupun simultan (Das et al., 2016; Figueroa-Torres et al., 2020; Sarah et al., 2022; Aragaw et al., 2025).

Karakter eceng gondok sebagai bahan baku juga tidak seragam. Umur tanaman, lokasi tumbuh, tingkat pencemaran perairan, proporsi akar–batang–daun, musim, metode pengeringan, dan ukuran partikel dapat mengubah kandungan karbohidrat maupun mineralnya. Variasi tersebut penting karena mineral dan senyawa ekstraktif dapat mengonsumsi asam, memengaruhi netralisasi, atau menjadi pengotor pada fermentasi. Oleh sebab itu, penelitian berbasis eceng gondok sebaiknya tidak hanya menyebut nama spesies, tetapi juga mendokumentasikan sumber bahan, bagian tanaman, kadar air, dan komposisi awal. Dalam konteks penelitian ini, penggunaan massa biomassa kering yang sama dan prosedur persiapan yang seragam berfungsi mengurangi variasi proses, meskipun analisis komposisi bahan awal belum dilakukan. Kajian terdahulu menunjukkan bahwa pretreatment dan karakter awal biomassa merupakan faktor penentu yang sama pentingnya dengan kondisi hidrolisis (Gundupalli et al., 2023; Jadhav & Dey, 2025).

Hambatan utama pemanfaatan eceng gondok terletak pada sifat rekalsitran biomassa. Lignin membatasi akses katalis terhadap selulosa, sedangkan kristalinitas dan ikatan hidrogen antarrantai selulosa mengurangi laju pemecahan. Praperlakuan alkali dapat memutus sebagian ikatan lignin–karbohidrat, mengembangkan serat, dan meningkatkan porositas. Efek tersebut dapat diperkuat dengan ultrasonikasi melalui pembentukan dan kolaps gelembung kavitasi, yang memperbesar perpindahan massa antara larutan alkali dan permukaan biomassa. Penelitian mutakhir menunjukkan bahwa praperlakuan alkali berbantuan ultrasonik dapat meningkatkan delignifikasi dan aksesibilitas karbohidrat, meskipun efektivitasnya bergantung pada konsentrasi alkali, suhu, rasio padat–cair, dan intensitas ultrasonik (Nawawi et al., 2023; Gavrilu et al., 2024; Jadhav & Dey, 2025).

Setelah praperlakuan, tahap hidrolisis menentukan jumlah gula yang tersedia untuk fermentasi. Asam sulfat menyediakan ion hidrogen yang mengatalisis pemutusan ikatan glikosidik. Peningkatan konsentrasi asam atau waktu kontak pada awalnya meningkatkan penetrasi katalis dan mempercepat depolimerisasi. Akan tetapi, proses tersebut tidak dapat dinaikkan tanpa batas. Gula yang telah terbentuk dapat mengalami dehidrasi dan reaksi lanjutan menjadi furfural, 5-hidroksimetilfurfural, asam organik, dan produk kondensasi. Senyawa-senyawa itu tidak hanya mengurangi jumlah gula yang dapat difermentasi, tetapi juga dapat mengganggu metabolisme *Saccharomyces cerevisiae*. Dengan demikian, kondisi hidrolisis harus menyeimbangkan dua tujuan yang berlawanan: memaksimalkan pelepasan gula dan meminimalkan degradasi gula serta pembentukan inhibitor (Kłosowski & Mikulski, 2021; Johannes & Xuan, 2024; Ren et al., 2024).

Literatur memperlihatkan bahwa kondisi optimum hidrolisis eceng gondok sangat bervariasi. Sarah et al. (2022) memperoleh kondisi terbaik pada asam sulfat 1 N dan daya gelombang mikro 600 W, sedangkan Priatna et al. (2021) melaporkan glukosa tertinggi pada asam sulfat 12% dan 100 °C untuk bagian batang. Wulandari et al. (2023) menemukan kadar bioetanol tertinggi pada konsentrasi asam sulfat 6% dengan fermentasi 72 jam. Gundupalli et al. (2023) juga menunjukkan bahwa jenis asam dan pencucian pascaprapertlakuan mengubah konversi biomassa secara bermakna. Perbedaan

hasil tersebut logis karena tingkat keparahan hidrolisis tidak berdiri sendiri; responsnya dipengaruhi komposisi bahan baku, ukuran partikel, jenis praperlakuan, rasio padat-cair, suhu, metode pemanasan, pencucian, fermentasi, dan sistem pemisahan. Oleh sebab itu, nilai optimum dari satu proses tidak dapat langsung dipindahkan ke proses lain.

Kesenjangan penelitian bukan sekadar belum adanya satu angka konsentrasi atau waktu yang universal, melainkan perlunya hubungan proses-produk yang ditelusuri secara utuh. Banyak penelitian berhenti pada kadar gula setelah hidrolisis atau kadar etanol setelah fermentasi. Penilaian yang lebih informatif perlu menghubungkan kondisi hidrolisis dengan kadar padatan terlarut, volume distilat, densitas, kadar etanol, yield berbasis biomassa, karakteristik organoleptik, identifikasi senyawa, dan kesesuaiannya dengan standar mutu. Pendekatan tersebut penting karena nilai gula tinggi belum tentu menghasilkan etanol yang tinggi apabila terdapat inhibitor, fermentasi tidak optimal, atau pemisahan tidak efektif. Sebaliknya, volume distilat tinggi juga tidak identik dengan massa etanol tinggi jika sebagian besar distilat masih berupa air.

Penelitian ini menerapkan praperlakuan natrium hidroksida berbantuan ultrasonik, kemudian memvariasikan konsentrasi asam sulfat 1–5% dan waktu hidrolisis 30–120 menit pada suhu tetap. Produk difermentasi dengan *Saccharomyces cerevisiae*, didistilasi, lalu dikarakterisasi. Tujuan penelitian adalah menentukan pola perubahan yield bioetanol akibat konsentrasi asam sulfat dan waktu hidrolisis, mengidentifikasi kondisi terbaik dalam rentang perlakuan, menilai komposisi distilat menggunakan kromatografi gas-spektrometri massa, serta mengevaluasi mutu produk terhadap SNI 7390:2012. Kebaruan praktis penelitian terletak pada integrasi evaluasi hidrolisis, fermentasi, distilasi, identifikasi instrumental, dan penyaringan mutu dalam satu alur eksperimen.

METODE

Penelitian eksperimental dilaksanakan di Laboratorium Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya, pada 11 Mei–26 Juni 2026. Bahan utama berupa eceng gondok yang dicuci untuk menghilangkan tanah dan pengotor, kemudian dipotong, dikeringkan, dan digiling menjadi serbuk. Reagen yang digunakan meliputi natrium hidroksida, asam sulfat, akuades, serta ragi komersial yang mengandung *Saccharomyces cerevisiae*. Peralatan utama terdiri atas ultrasonic bath, oven, hot plate, perangkat distilasi sederhana, refraktometer, piknometer, alkoholmeter, dan instrumen kromatografi gas-spektrometri massa.

Rancangan perlakuan berupa kombinasi faktorial deskriptif antara tiga konsentrasi asam sulfat, yaitu 1, 3, dan 5% (b/v), serta empat waktu hidrolisis, yaitu 30, 60, 90, dan 120 menit. Kombinasi tersebut menghasilkan 12 kondisi proses. Suhu hidrolisis dipertahankan pada 100 °C, sedangkan kondisi praperlakuan, fermentasi, dan distilasi dibuat sama untuk seluruh perlakuan. Penelitian ini menggunakan satu rangkaian pengamatan untuk setiap kombinasi; oleh karena itu, analisis difokuskan pada kecenderungan data dan tidak menggunakan pengujian signifikansi inferensial.

Praperlakuan dilakukan dengan mencampurkan 50 g serbuk eceng gondok kering dan 500 mL larutan natrium hidroksida 0,5 M. Campuran diproses dalam ultrasonic bath pada 60 °C selama 30 menit. Biomassa kemudian disaring dan dicuci menggunakan air hingga filtrat mendekati pH netral. Padatan hasil pencucian dikeringkan dalam oven pada 80 °C selama empat jam. Tahap ini dimaksudkan untuk mengurangi penghalang lignin dan meningkatkan kontak antara fase cair dan fraksi karbohidrat. Prinsip penggunaan alkali dan ultrasonik mengikuti pendekatan delignifikasi dan intensifikasi perpindahan massa yang dilaporkan pada biomassa lignoselulosa (Nawawi et al., 2023; Gavrilu et al., 2024).

Pada tahap hidrolisis, biomassa hasil praperlakuan dikontakkan dengan 500 mL larutan asam sulfat sesuai konsentrasi perlakuan. Campuran dipanaskan pada 100 °C selama 30, 60, 90, atau 120 menit. Setelah reaksi selesai, hidrolisat didinginkan dan dinetralkan menggunakan natrium hidroksida sampai pH 4–5. Nilai pH tersebut dipilih agar mendukung aktivitas ragi pada tahap fermentasi. Kadar padatan terlarut hidrolisat dibaca sebagai derajat Brix menggunakan refraktometer. Derajat Brix digunakan sebagai indikator praktis perubahan zat terlarut, bukan sebagai pengukuran selektif glukosa, karena asam, garam hasil netralisasi, dan senyawa terlarut lain juga dapat memengaruhi indeks bias.

Setiap hidrolisat yang telah disesuaikan pH-nya ditambahkan 10 g ragi, lalu difermentasi secara anaerob pada suhu ruang selama 72 jam. Setelah fermentasi, cairan dipisahkan dari padatan dan didistilasi pada kisaran 78–85 °C selama dua jam. Rentang suhu tersebut dipakai untuk memperkaya fraksi volatil yang mengandung etanol, tetapi perangkat yang digunakan merupakan

distilasi sederhana sehingga produk diperkirakan masih mengandung air dan senyawa volatil lain. Distilat ditampung, diukur volumenya, diamati warna dan aromanya, serta ditentukan pH, densitas, dan kadar etanolnya.

Rendemen distilat dihitung sebagai perbandingan volume distilat terhadap volume awal cairan proses sebesar 500 mL. Yield bioetanol dihitung berdasarkan estimasi massa etanol dalam distilat terhadap massa awal biomassa kering. Massa etanol ditentukan dari volume distilat, fraksi volume etanol hasil pengukuran, dan densitas etanol sebesar 0,7893 g/mL. Persamaan yang digunakan adalah: $\text{yield bioetanol (\%)} = [\text{volume distilat} \times \text{fraksi etanol} \times \text{densitas etanol} / \text{massa biomassa}] \times 100$. Definisi ini membedakan yield bioetanol dari rendemen distilat; rendemen hanya menunjukkan jumlah cairan terkondensasi, sedangkan yield memasukkan fraksi etanol dalam cairan tersebut.

Konsistensi prosedur dijaga dengan menggunakan massa biomassa, volume larutan, jenis ragi, waktu fermentasi, rentang suhu distilasi, dan alat ukur yang sama pada seluruh kombinasi. Refraktometer dibersihkan dan dikondisikan sebelum pembacaan, sedangkan densitas ditentukan pada distilat yang telah mencapai suhu ruang untuk mengurangi bias akibat perubahan volume termal. Pengukuran volume dilakukan setelah kondensat terkumpul dan tidak lagi panas. Walaupun langkah-langkah tersebut meningkatkan keterbandingan internal, penelitian belum melaporkan kalibrasi alat, pengukuran blanko, duplo, atau ketidakpastian pengukuran. Karena itu, angka desimal pada hasil harus dipahami sebagai keluaran perhitungan, bukan sebagai jaminan presisi biologis yang setara. Dalam artikel ini, istilah “kondisi terbaik” digunakan untuk perlakuan dengan nilai tertinggi di antara 12 kombinasi, bukan optimum matematis yang telah divalidasi secara statistik.

Sampel dengan yield tertinggi dianalisis menggunakan kromatografi gas–spektrometri massa untuk mengidentifikasi komponen volatil. Persentase yang dilaporkan dari pengujian ini merupakan persentase luas area puncak kromatogram, sehingga tidak diperlakukan sebagai nilai yang identik dengan kadar etanol volumetrik dari alkoholmeter. Kesesuaian mutu produk dinilai secara penyaringan terhadap SNI 7390:2012, terutama karakteristik penampakan, densitas, dan kadar etanol. Data disajikan dalam tabel dan grafik, kemudian dianalisis melalui perbandingan antarperlakuan, hubungan antara derajat Brix dan yield, perubahan setelah waktu 90 menit, serta konsistensi hasil dengan mekanisme hidrolisis lignoselulosa.

HASIL

Seluruh kombinasi perlakuan menghasilkan distilat bening dan tidak berwarna, tetapi nilai derajat Brix, volume distilat, densitas, kadar etanol, dan yield menunjukkan rentang yang lebar. Data kuantitatif utama disajikan pada Tabel 1. Secara umum, peningkatan konsentrasi asam sulfat dari 1 menjadi 5% menaikkan respons proses pada waktu hidrolisis yang sama. Pada setiap konsentrasi, nilai maksimum dicapai pada 90 menit, kemudian menurun ketika reaksi diperpanjang hingga 120 menit.

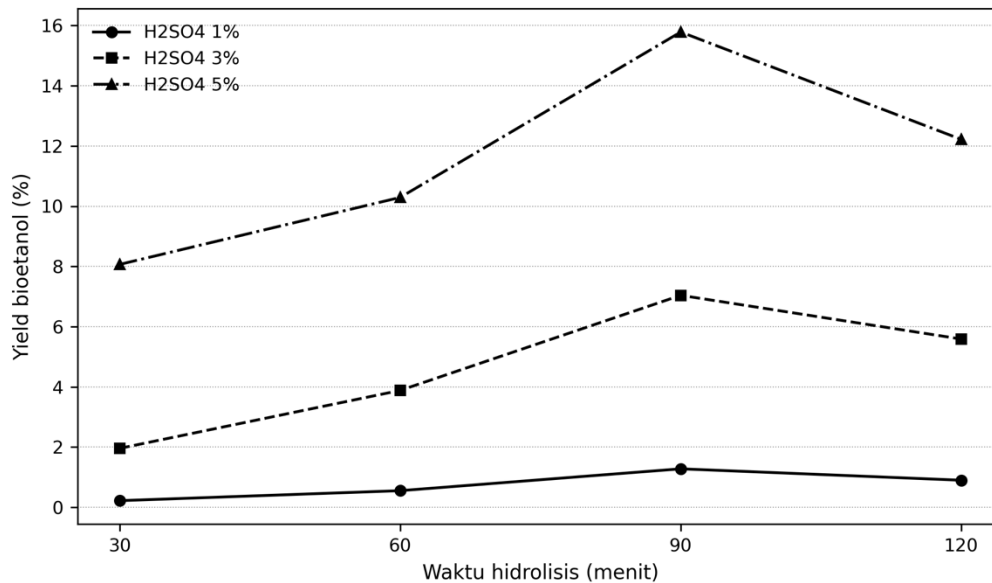
Tabel 1. Hasil analisis kuantitatif bioetanol dari eceng gondok

No .	H ₂ SO ₄ (%)	Waktu (menit)	°Brix (°Bx)	Distilat (mL)	Densitas (g/mL)	Rendemen (%)	Etanol (% v/v)	Yield (%)
1	1	30	2,1	8	0,9978	1,6	1,8	0,221
2	1	60	2,8	12	0,9964	2,4	2,9	0,553
3	1	90	3,5	18	0,9946	3,6	4,5	1,279
4	1	120	3,1	15	0,9954	3,0	3,8	0,900
5	3	30	4,2	20	0,9927	4,0	6,2	1,957
6	3	60	5,6	27	0,9894	5,4	9,1	3,883
7	3	90	7,1	33	0,9844	6,6	13,5	7,041
8	3	120	6,4	30	0,9863	6,0	11,8	5,588
9	5	30	6,8	36	0,9836	7,2	14,2	8,067
10	5	60	7,5	40	0,9812	8,0	16,3	10,292
11	5	90	8,5	50	0,9766	10,0	20,0	15,786
12	5	120	7,9	44	0,9798	8,8	17,6	12,218

Sumber: data hasil penelitian (2026).

Pada konsentrasi asam sulfat 1%, peningkatan waktu hidrolisis dari 30 menjadi 90 menit menaikkan derajat Brix dari 2,1 menjadi 3,5 °Bx dan yield dari 0,221 menjadi 1,279%. Pada 120 menit, derajat Brix turun menjadi 3,1 °Bx dan yield menjadi 0,900%. Pola serupa terlihat pada konsentrasi 3%: yield meningkat dari 1,957% pada 30 menit menjadi 7,041% pada 90 menit, kemudian turun menjadi 5,588% pada 120 menit. Pada konsentrasi 5%, yield meningkat dari 8,067 menjadi 15,786% antara 30 dan 90 menit, lalu turun menjadi 12,218% pada 120 menit.

Kondisi terbaik dalam rentang perlakuan adalah asam sulfat 5% selama 90 menit. Kondisi ini menghasilkan 8,5 °Bx, volume distilat 50 mL, rendemen distilat 10,0%, kadar etanol 20,0% (v/v), densitas 0,9766 g/mL, dan yield bioetanol 15,786%. Dibandingkan perlakuan 1% selama 90 menit, yield pada kondisi tersebut sekitar 12,34 kali lebih tinggi. Kenaikan konsentrasi asam pada waktu 90 menit juga diikuti penurunan densitas distilat dari 0,9946 menjadi 0,9766 g/mL, konsisten dengan bertambahnya fraksi etanol yang densitasnya lebih rendah daripada air.



Gambar 1. Pengaruh konsentrasi H₂SO₄ dan waktu hidrolisis terhadap yield bioetanol

Gambar 1 memperlihatkan bahwa ketiga kurva memiliki bentuk yang sama: meningkat sampai 90 menit, lalu berbalik menurun. Penurunan yield dari 90 ke 120 menit sebesar 29,63% pada asam 1%, 20,64% pada asam 3%, dan 22,61% pada asam 5%. Keseragaman arah perubahan ini menunjukkan bahwa 120 menit telah melewati waktu yang paling produktif untuk seluruh konsentrasi yang diuji.

Bila dibandingkan berdasarkan konsentrasi pada waktu 90 menit, peningkatan asam dari 1 menjadi 3% menaikkan yield dari 1,279 menjadi 7,041%, sedangkan peningkatan dari 3 menjadi 5% menaikannya menjadi 15,786%. Dengan basis perlakuan 1%, kenaikan total mencapai lebih dari dua belas kali. Pada sisi waktu, asam 5% menunjukkan kenaikan yield sekitar 27,6% dari 30 ke 60 menit dan 53,4% dari 60 ke 90 menit. Kenaikan yang lebih besar pada interval kedua mengindikasikan bahwa pembukaan struktur dan pelepasan gula masih berlangsung aktif sebelum 90 menit. Setelah itu, penurunan 22,6% pada 120 menit menunjukkan perubahan rezim proses. Perhitungan turunan ini tidak menggantikan analisis statistik, tetapi membantu mengidentifikasi bagian kurva yang paling responsif untuk rancangan eksperimen berikutnya.

Pengamatan kualitatif menunjukkan pH distilat berada pada rentang 4–6. Sampel terbaik memiliki pH 5 dan aroma alkohol yang khas, tajam, serta menyengat. Pada perlakuan 5% selama 120 menit, pH turun menjadi 4 dan aroma menyerupai asam cuka. Analisis kromatografi gas–spektrometri massa terhadap sampel terbaik mengidentifikasi etanol sebagai komponen dominan dengan total luas area 61,60%. Sisa luas area 38,40% berasal dari komponen lain yang tidak dirinci dalam data ringkas penelitian.

Perbandingan terhadap SNI 7390:2012 disajikan pada Tabel 2. Secara visual, distilat memenuhi karakteristik cairan jernih dan tidak berwarna. Akan tetapi, densitas 0,9766 g/mL berada jauh di atas kisaran bioetanol berkadar tinggi, sedangkan kadar etanol 20,0% (v/v) masih jauh di bawah persyaratan minimum 99,5% (v/v). Oleh karena itu, produk dapat dikategorikan sebagai distilat

fermentasi yang mengandung etanol, tetapi belum layak disebut bioetanol bahan bakar sesuai standar tersebut.

Tabel 2. Penyaringan mutu sampel terbaik terhadap SNI 7390:2012

Parameter	Hasil penelitian	Persyaratan/acuan	Evaluasi
Warna	Bening, tidak berwarna	Jernih, tidak berwarna	Sesuai
Aroma	Khas alkohol, tajam	Khas etanol	Mendekati
Densitas	0,9766 g/mL	Sekitar 0,7850–0,7950 g/mL	Tidak sesuai
Kadar etanol	20,0% (v/v)	Minimum 99,5% (v/v)	Tidak sesuai
Komponen dominan	Etanol, luas area 61,60%	Etanol sebagai komponen utama	Terkonfirmasi

PEMBAHASAN

Pengaruh Konsentrasi Asam Sulfat dan Waktu Hidrolisis terhadap Yield Bioetanol

Pengaruh konsentrasi asam sulfat dan waktu hidrolisis terhadap yield bioetanol tidak dapat dipisahkan dari keberhasilan tahap praperlakuan. Pada penelitian ini, biomassa eceng gondok diperlakukan menggunakan NaOH 0,5 M berbantuan ultrasonik pada suhu 60 °C selama 30 menit. Larutan alkali berperan melarutkan sebagian lignin, memutus ikatan ester antara lignin dan hemiselulosa, serta mengembangkan serat, sedangkan kavitas ultrasonik membantu penetrasi larutan dan memperbesar kontak antara reagen dengan biomassa. Kombinasi tersebut secara teoritis membuka struktur lignoselulosa sehingga fraksi selulosa lebih mudah dijangkau oleh asam pada tahap hidrolisis. Gavrilu et al. (2024) melaporkan bahwa bantuan ultrasonik dapat meningkatkan efektivitas praperlakuan alkali, sedangkan Nawawi et al. (2023) menekankan bahwa konsentrasi alkali dan waktu perlakuan menentukan keberhasilan delignifikasi eceng gondok. Namun, kontribusi praperlakuan dalam penelitian ini belum dapat dinyatakan secara kuantitatif karena tidak digunakan kontrol tanpa NaOH atau tanpa ultrasonik dan tidak dilakukan analisis komposisi lignin, selulosa, serta hemiselulosa sebelum dan sesudah perlakuan.

Data penelitian menunjukkan pola bahwa peningkatan konsentrasi H₂SO₄ dari 1% menjadi 3% dan 5% diikuti oleh peningkatan °Brix, volume distilat, kadar etanol, dan yield bioetanol pada waktu hidrolisis yang sama. Pada waktu 90 menit, H₂SO₄ 1% menghasilkan °Brix 3,5 dan yield 1,279%, H₂SO₄ 3% menghasilkan °Brix 7,1 dan yield 7,041%, sedangkan H₂SO₄ 5% menghasilkan °Brix 8,5 dan yield 15,786%. Kecenderungan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan jumlah ion hidrogen mempercepat protonasi oksigen pada ikatan glikosidik sehingga rantai polisakarida lebih mudah terputus menjadi komponen gula terlarut. Setelah struktur lignoselulosa menjadi lebih terbuka akibat praperlakuan, larutan asam dapat menjangkau fraksi karbohidrat dengan lebih efektif. Arah hasil ini sejalan dengan Priatna et al. (2021), Wulandari et al. (2023), dan Gundupalli et al. (2023), walaupun kondisi optimum setiap penelitian berbeda karena perbedaan karakter biomassa, metode praperlakuan, rasio bahan dan larutan, suhu, serta tingkat keparahan hidrolisis.

Nilai °Brix dalam penelitian ini perlu ditafsirkan sebagai indikator jumlah zat terlarut, bukan sebagai pengukuran glukosa secara selektif. Refraktometer mengukur indeks bias total larutan sehingga pembacaannya dapat dipengaruhi oleh gula, garam hasil netralisasi, asam organik, dan produk degradasi lain. Meskipun demikian, kesamaan pola antara °Brix, kadar etanol, dan yield menunjukkan bahwa peningkatan komponen terlarut pada kondisi tertentu berkaitan dengan tersedianya substrat yang dapat difermentasi. Untuk memperkuat interpretasi, penelitian lanjutan perlu mengukur gula pereduksi atau komposisi glukosa, xilosa, dan arabinosa menggunakan metode yang lebih selektif, seperti metode asam dinitrosalisilat atau kromatografi cair. Data tersebut diperlukan untuk menghitung efisiensi sakarifikasi dan konversi etanol terhadap jumlah gula yang benar-benar tersedia.

Selain konsentrasi asam, waktu hidrolisis membentuk pola optimum yang konsisten. Pada seluruh konsentrasi H₂SO₄, peningkatan waktu dari 30 menjadi 60 dan 90 menit meningkatkan yield, tetapi perpanjangan menjadi 120 menit justru menurunkannya. Pada H₂SO₄ 5%, yield meningkat dari 8,067% pada 30 menit menjadi 10,292% pada 60 menit dan mencapai 15,786% pada 90 menit, kemudian menurun menjadi 12,218% pada 120 menit. Pola yang sama juga terlihat pada konsentrasi 1% dan 3%. Peningkatan hingga 90 menit menunjukkan bahwa tambahan waktu kontak memungkinkan asam memutus lebih banyak rantai polisakarida. Sebaliknya, penurunan pada 120

menit mengindikasikan bahwa proses telah melewati kondisi yang paling produktif dalam rentang pengamatan. Secara konseptual, konsentrasi, suhu, dan waktu membentuk tingkat keparahan reaksi; apabila perlakuan berlangsung terlalu berat, laju degradasi gula dapat melampaui laju pembentukannya (Pendse et al., 2023; Johannes & Xuan, 2024).

Penurunan °Brix, volume distilat, kadar etanol, dan yield pada 120 menit dapat dijelaskan oleh kemungkinan terbentuknya produk degradasi, seperti furfural dari pentosa dan 5-hidroksimetilfurfural dari heksosa. Senyawa tersebut dapat memperpanjang fase adaptasi *Saccharomyces cerevisiae*, mengganggu metabolisme sel, dan menurunkan laju pembentukan etanol. Asam asetat serta senyawa fenolik yang terlepas dari biomassa juga berpotensi menambah hambatan fermentasi. Kłosowski dan Mikulski (2021), Yao et al. (2024), serta Ren et al. (2024) menunjukkan bahwa keberadaan inhibitor dan tingkat toleransi ragi merupakan faktor penting dalam fermentasi hidrolisat lignoselulosa. Walaupun inhibitor tidak dianalisis secara langsung pada penelitian ini, penurunan seluruh parameter proses setelah 90 menit dan munculnya aroma yang lebih asam pada perlakuan 120 menit mendukung penjelasan mekanistik tersebut. Oleh karena itu, pembentukan inhibitor diposisikan sebagai dugaan ilmiah yang masuk akal, bukan sebagai bukti analitik langsung.

Hubungan antarparameter memperlihatkan konsistensi internal. Perlakuan dengan °Brix yang lebih tinggi cenderung menghasilkan volume distilat, kadar etanol, dan yield yang lebih tinggi, sedangkan densitas distilat cenderung menurun. Densitas tertinggi, yaitu 0,9978 g/mL, diperoleh pada H₂SO₄ 1% selama 30 menit dengan kadar etanol 1,8% (v/v), sementara densitas terendah, yaitu 0,9766 g/mL, diperoleh pada H₂SO₄ 5% selama 90 menit dengan kadar etanol 20% (v/v). Kecenderungan ini logis karena densitas etanol lebih rendah daripada densitas air, sehingga peningkatan fraksi etanol menurunkan densitas campuran. Dengan demikian, hasil pengukuran densitas mendukung kecenderungan kadar etanol, walaupun densitas saja tidak dapat digunakan untuk menentukan kemurnian tanpa mempertimbangkan komponen lain dalam distilat.

Nilai yield tertinggi sebesar 15,786% dihitung dari estimasi massa etanol terhadap 50 g biomassa awal dan berbeda secara konsep dari rendemen distilat sebesar 10%. Distilat sebanyak 50 mL tidak seluruhnya berupa etanol karena kadar etanolnya hanya 20% (v/v). Pemisahan kedua istilah tersebut penting agar volume cairan hasil distilasi tidak dianggap sebagai jumlah etanol murni. Perbandingan dengan penelitian lain juga harus dilakukan secara hati-hati karena sebagian studi melaporkan kadar etanol dalam persen volume, gram per liter, atau yield terhadap gula yang dikonsumsi. Hasil penelitian ini lebih tepat digunakan untuk membandingkan dua belas perlakuan dalam sistem eksperimen yang sama. Meskipun kadar etanol terbaik lebih tinggi daripada beberapa kondisi yang dilaporkan Firmansyah et al. (2022) dan Wulandari et al. (2023), perbedaan metode praperlakuan, dosis ragi, waktu fermentasi, metode pengukuran, dan basis perhitungan tidak memungkinkan klaim keunggulan proses secara universal.

Fermentasi dibuat konstan selama 72 jam agar variasi hasil terutama mencerminkan perubahan kondisi hidrolisis. *Saccharomyces cerevisiae* efektif mengonversi glukosa menjadi etanol, tetapi memiliki kemampuan terbatas dalam memanfaatkan gula pentosa. Eceng gondok mengandung hemiselulosa yang dapat menghasilkan xilosa dan arabinosa, sehingga sebagian gula hasil hidrolisis kemungkinan tidak terfermentasi oleh ragi roti. Yield yang diperoleh dengan demikian merupakan hasil gabungan dari pelepasan gula, jenis gula yang terbentuk, toleransi mikroorganisme terhadap inhibitor, dan efisiensi distilasi. Madian et al. (2019) dan Zhang et al. (2016) menunjukkan bahwa pemilihan mikroorganisme dan konfigurasi fermentasi dapat mengubah hasil konversi eceng gondok secara nyata. Standardisasi inokulum berdasarkan jumlah sel hidup, pengukuran gula sebelum dan sesudah fermentasi, serta pemantauan kadar etanol secara berkala diperlukan agar efisiensi fermentasi dapat dievaluasi secara lebih kuat.

Berdasarkan seluruh parameter, kombinasi H₂SO₄ 5% dan waktu hidrolisis 90 menit merupakan kondisi terbaik dalam rentang penelitian. Kondisi tersebut tidak serta-merta menunjukkan bahwa konsentrasi lebih tinggi atau waktu lebih panjang akan menghasilkan etanol lebih banyak, karena peningkatan tingkat keparahan reaksi dapat memperbesar degradasi gula, kebutuhan bahan penetral, pembentukan garam, dan risiko korosi. Optimasi lanjutan sebaiknya difokuskan di sekitar kondisi terbaik, misalnya konsentrasi 4–6% dan waktu 75–105 menit, dengan memasukkan suhu sebagai variabel dan menggunakan pengulangan. Desain faktorial atau response surface methodology dapat digunakan untuk menguji pengaruh utama, interaksi konsentrasi–waktu, serta menentukan optimum prediktif (Aragaw et al., 2025). Karena penelitian ini belum melaporkan replikasi dan

analisis statistik, hasil yang diperoleh menunjukkan kecenderungan pengaruh dan kondisi terbaik secara deskriptif, bukan bukti signifikansi statistik.

Komposisi Senyawa Bioetanol Berdasarkan Analisis GC-MS

Analisis Gas Chromatography–Mass Spectrometry pada sampel terbaik, yaitu perlakuan H₂SO₄ 5% selama 90 menit, menunjukkan etanol sebagai senyawa volatil dominan dengan luas area relatif 61,60%. Temuan ini mengonfirmasi bahwa rangkaian praperlakuan, hidrolisis, fermentasi, dan distilasi telah menghasilkan etanol. Beberapa puncak etanol teridentifikasi pada waktu retensi 1,363; 1,419; 1,806; 1,869; 1,978; dan 2,577 menit. Dominasi area etanol memberikan bukti instrumental yang lebih kuat daripada pengamatan aroma atau pengukuran fisik semata karena identifikasi didasarkan pada pemisahan kromatografi dan pola spektrum massa.

Meskipun demikian, luas area relatif 61,60% tidak dapat langsung disamakan dengan kadar etanol 61,60% (v/v). Respons detektor terhadap setiap senyawa dipengaruhi oleh karakter ionisasi, pemisahan kolom, kondisi instrumen, dan faktor respons masing-masing komponen. Tanpa kurva kalibrasi, standar internal, dan faktor respons, data luas area bersifat semikuantitatif. Kadar etanol 20% (v/v) berasal dari pengukuran fisik distilat, sedangkan angka 61,60% menggambarkan proporsi area puncak pada kromatogram; kedua hasil tersebut memiliki dasar pengukuran yang berbeda sehingga tidak harus identik.

Komponen selain etanol menyumbang 38,40% dari luas area total, tetapi identitas serta konsentrasinya tidak dapat ditegaskan hanya dari data ringkas yang tersedia. Klaim mengenai keberadaan metanol atau senyawa minor tertentu memerlukan tabel puncak lengkap, waktu retensi, spektrum massa, nilai kecocokan pustaka, dan idealnya konfirmasi menggunakan standar autentik. Hal ini penting karena keberadaan metanol berkaitan dengan keamanan dan menentukan kelayakan penggunaan produk. Pada penelitian berikutnya, GC–MS perlu dilengkapi dengan kalibrasi kuantitatif untuk etanol dan metanol, penggunaan standar internal, serta pelaporan kromatogram dan spektrum puncak utama. Dengan perbaikan tersebut, analisis tidak hanya mengonfirmasi senyawa dominan, tetapi juga dapat menentukan kadar komponen volatil secara lebih akurat dan mendukung evaluasi keamanan produk.

Karakteristik Bioetanol dan Kesesuaiannya dengan SNI 7390:2012

Secara kualitatif, seluruh distilat yang diperoleh tampak bening dan tidak berwarna. Perbedaan utama teramati pada intensitas aroma. Perlakuan dengan konsentrasi asam dan waktu hidrolisis yang lebih rendah menghasilkan aroma alkohol yang lemah, sedangkan perlakuan H₂SO₄ 5% selama 90 menit menghasilkan aroma alkohol khas, tajam, dan menyengat. Pada waktu hidrolisis 120 menit, aroma cenderung bercampur asam atau menyerupai asam cuka, terutama pada konsentrasi 3% dan 5%. Perubahan aroma tersebut sejalan dengan penurunan kadar etanol dan yield serta dapat mengindikasikan bertambahnya senyawa asam atau produk samping, walaupun pengamatan organoleptik tidak dapat digunakan sebagai bukti identifikasi senyawa. pH sampel berada pada kisaran 4–6, dengan nilai yang lebih rendah pada beberapa perlakuan 120 menit.

Karakteristik kuantitatif terbaik diperoleh pada H₂SO₄ 5% selama 90 menit, yaitu °Brix hidrolisat 8,5, volume distilat 50 mL, rendemen distilat 10%, kadar etanol 20% (v/v), densitas 0,9766 g/mL, dan yield bioetanol 15,786%. Nilai tersebut menunjukkan keberhasilan konversi eceng gondok menjadi distilat yang mengandung etanol. Namun, densitas yang masih mendekati air dan kadar etanol 20% (v/v) memperlihatkan bahwa air tetap menjadi komponen utama produk. Kondisi tersebut wajar karena pemisahan dilakukan menggunakan satu tahap distilasi sederhana, yang kemampuannya terbatas dalam memperkaya etanol dari campuran hasil fermentasi.

Apabila dibandingkan dengan SNI 7390:2012, karakteristik warna telah sesuai karena produk bening dan tidak berwarna, sedangkan aroma khas alkohol mendekati karakter etanol. Senyawa dominan yang teridentifikasi melalui GC–MS juga sesuai dengan tujuan pembentukan bioetanol. Akan tetapi, densitas 0,9766 g/mL belum berada pada rentang acuan sekitar 0,7850–0,7950 g/mL dan kadar etanol 20% (v/v) masih jauh di bawah persyaratan minimum 99,5% (v/v) untuk bioetanol terdenaturasi sebagai bahan bakar (Badan Standardisasi Nasional, 2012). Oleh karena itu, produk penelitian ini belum dapat dikategorikan sebagai fuel-grade ethanol. Istilah yang lebih tepat adalah bioetanol kasar atau distilat hasil fermentasi.

Ketidaksesuaian terhadap SNI tidak berarti proses biokonversi gagal. Penelitian telah membuktikan pembentukan etanol dan memperoleh kondisi hidrolisis yang memberikan yield tertinggi dalam rentang uji. Kekurangan utama terletak pada tahap pemurnian. Distilasi sederhana

meningkatkan fraksi etanol karena titik didihnya lebih rendah daripada air, tetapi satu tahap pemisahan tidak cukup untuk menghasilkan etanol berkadar bahan bakar. Peningkatan mutu dapat dilakukan melalui distilasi fraksionasi atau rektifikasi, kemudian dilanjutkan dengan dehidrasi menggunakan molecular sieve, adsorben selektif, pervaporasi, atau teknologi lain yang sesuai. Abey Suriya et al. (2024) menunjukkan bahwa pencapaian bioetanol kadar tinggi dari eceng gondok memerlukan integrasi proses dari pengolahan awal hingga pemurnian akhir, bukan hanya optimasi hidrolisis.

Pengembangan proses juga perlu mempertimbangkan efisiensi dan keberlanjutan. Eceng gondok memiliki kadar air tinggi sehingga tahap pengeringan membutuhkan energi. Penggunaan NaOH dan H₂SO₄ menambah konsumsi bahan kimia, sementara netralisasi menghasilkan garam dan limbah cair. Distilasi pun merupakan tahap yang intensif panas. Dengan demikian, kondisi H₂SO₄ 5% selama 90 menit perlu dibandingkan secara teknis dan ekonomis dengan kondisi yang lebih ringan yang mungkin menghasilkan yield sedikit lebih rendah, tetapi membutuhkan bahan kimia dan energi lebih sedikit. Pendekatan biorefinery dapat meningkatkan nilai proses melalui pemanfaatan padatan kaya lignin sebagai biochar, adsorben, atau bahan bakar padat, serta daur ulang air proses setelah pengolahan (Devi et al., 2022).

Interpretasi mutu produk dibatasi oleh beberapa hal, yaitu tidak adanya pengulangan, penggunaan °Brix sebagai indikator tidak selektif, tidak dilakukannya analisis inhibitor, GC–MS yang hanya diterapkan pada sampel terbaik, dan pemurnian yang terbatas pada distilasi sederhana. Penelitian lanjutan perlu menggunakan sedikitnya tiga pengulangan, analisis varians, pengukuran komposisi gula dan inhibitor, serta neraca massa dan energi. Karakterisasi GC–MS kuantitatif dan pengujian kadar air juga diperlukan sebelum evaluasi standar dilakukan secara menyeluruh. Dengan perbaikan tersebut, hasil penelitian dapat dikembangkan dari bukti awal konversi eceng gondok menjadi etanol menuju proses yang lebih terukur, aman, efisien, dan berpotensi memenuhi spesifikasi bahan bakar.

KESIMPULAN

Konsentrasi asam sulfat dan waktu hidrolisis menunjukkan pola pengaruh yang konsisten terhadap pembentukan bioetanol dari eceng gondok. Peningkatan konsentrasi asam dari 1 menjadi 5% dan perpanjangan hidrolisis dari 30 menjadi 90 menit meningkatkan derajat Brix, volume distilat, kadar etanol, dan yield. Hidrolisis selama 120 menit menurunkan respons pada seluruh konsentrasi, yang menunjukkan bahwa reaksi telah melewati kondisi paling produktif dan diduga mulai memperbesar degradasi gula atau pembentukan inhibitor. Kondisi terbaik dalam rentang penelitian diperoleh pada asam sulfat 5% dan 90 menit, menghasilkan 8,5 °Bx, kadar etanol 20% (v/v), densitas 0,9766 g/mL, dan yield 15,786%. Analisis kromatografi gas–spektrometri massa mengonfirmasi etanol sebagai komponen dominan dengan luas area 61,60%. Walaupun konversi berhasil, produk belum memenuhi SNI 7390:2012 sebagai bioetanol bahan bakar. Pengembangan selanjutnya perlu menggunakan replikasi dan analisis statistik, mengukur gula serta inhibitor secara selektif, melengkapi identifikasi komponen volatil, dan menerapkan rektifikasi serta dehidrasi untuk meningkatkan kemurnian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Jurusan Teknik Kimia dan Program Studi Sarjana Terapan Teknik Energi, Politeknik Negeri Sriwijaya, atas dukungan fasilitas laboratorium dan pendampingan selama penelitian.

REFERENSI

- Abey Suriya, D. I., Sethunga, G. S. M. D. P., & Rathnayake, M. (2024). Process simulation–based scenario analysis of scaled-up bioethanol production from water hyacinth. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 17677–17692. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-03891-w>
- Aragaw, S. A., Yemata, T. A., Ayalew, A. A., Tadesse, A. A., Fekad, A. Y., Shibesh, A. K., Getie, F. A., Tessema, T. D., & Wubieneh, T. A. (2025). Improvement of bioethanol production from water hyacinth biomass by optimization of fermentation process conditions using response surface methodology. *Discover Applied Sciences*, 7, 266. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06635-9>

- Badan Standardisasi Nasional. (2012). SNI 7390:2012: Bioetanol terdenaturasi untuk gasohol. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Broda, M., Yelle, D. J., & Serwańska, K. (2022). Bioethanol production from lignocellulosic biomass—Challenges and solutions. *Molecules*, 27(24), 8717. <https://doi.org/10.3390/molecules27248717>
- Das, A., Ghosh, P., Paul, T., Ghosh, U., Pati, B. R., & Mondal, K. C. (2016). Production of bioethanol as useful biofuel through the bioconversion of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *3 Biotech*, 6, 70. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0385-y>
- Das, S., Bhattacharya, A., Haldar, S., Ganguly, A., Gu, S., Ting, Y. P., & Chatterjee, P. K. (2015). Optimization of enzymatic saccharification of water hyacinth biomass for bio-ethanol: Comparison between artificial neural network and response surface methodology. *Sustainable Materials and Technologies*, 3, 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.01.001>
- Devi, A., Bajar, S., Kour, H., Kothari, R., Pant, D., & Singh, A. (2022). Lignocellulosic biomass valorization for bioethanol production: A circular bioeconomy approach. *BioEnergy Research*, 15(4), 1820–1841. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10401-9>
- Figuerola-Torres, L. A., Lizardi-Jiménez, M. A., López-Ramírez, N., Varela-Santos, E. C., Hernández-Rosas, F., Favela-Torres, E., & Hernández-Martínez, R. (2020). Saccharification of water hyacinth biomass by a combination of steam explosion with enzymatic technologies for bioethanol production. *3 Biotech*, 10, 432. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02426-8>
- Firmansyah, M. Y., Wahyudi, D. D., & Widodo, L. U. (2022). Pemanfaatan eceng gondok menjadi bioetanol dengan proses fermentasi. *Envirotek: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 14(1), 74–79. <https://doi.org/10.33005/envirotek.v14i1.191>
- Gavrila, A. I., Vartolomei, A., Calinescu, I., Vinatoru, M., Parvulescu, O. C., Psenovschi, G., Chipurici, P., & Trifan, A. (2024). Ultrasound-assisted alkaline pretreatment of biomass to enhance the extraction yield of valuable chemicals. *Agronomy*, 14(5), 903. <https://doi.org/10.3390/agronomy14050903>
- Gong, L., Wu, X., Wang, Y., Zhu, J., Wang, S., Xiu, Y., Dong, J., Xu, G., & Ni, Y. (2024). A novel deep eutectic solvent-mediated Fenton-like system for pretreatment of water hyacinth and biobutanol production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(7), 8341–8351. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02940-0>
- Gundupalli, M. P., Tantayotai, P., Chueter, S., Cheenkachorn, K., Joshi, S., Bhattacharyya, D., & Sriariyanun, M. (2023). Improvement of water hyacinth bioconversion by different organic and mineral acid pretreatment and the effect of post-pretreatment washing. *BioEnergy Research*, 16(3), 1718–1732. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10528-9>
- Jadhav, R. H., & Dey, A. (2025). Pre-treatment and characterization of water hyacinth biomass for enhanced xylose production using dilute alkali treatment method. *Water*, 17(3), 301. <https://doi.org/10.3390/w17030301>
- Johannes, L. P., & Xuan, T. D. (2024). Comparative analysis of acidic and alkaline pretreatment techniques for bioethanol production from perennial grasses. *Energies*, 17(5), 1048. <https://doi.org/10.3390/en17051048>
- Kłosowski, G., & Mikulski, D. (2021). Impact of lignocellulose pretreatment by-products on *Saccharomyces cerevisiae* strain Ethanol Red metabolism during aerobic and anaerobic growth. *Molecules*, 26(4), 806. <https://doi.org/10.3390/molecules26040806>
- Lin, Y. C., Shangdiar, S., Chen, S. C., Chou, F. C., Lin, Y. C., & Cho, C. A. (2018). Microwave irradiation with dilute acid hydrolysis applied to enhance the saccharification rate of water hyacinth. *Renewable Energy*, 125, 511–517. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.111>
- Madian, H. R., Sidkey, N. M., Abo Elsoud, M. M., Hamouda, H. I., & Elazzazy, A. M. (2019). Bioethanol production from water hyacinth hydrolysate by *Candida tropicalis* Y-26. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44, 33–41. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3247-6>
- Nawawi, E., Fanani, Z., & Gulo, F. (2023). Optimization of pretreatment in delignification of hyacinth biomass for ethanol production. *Jurnal Pendidikan Kimia*, 15(1), 46–52. <https://doi.org/10.24114/jpkim.v15i1.43652>

- Pendse, D. S., Deshmukh, M., & Pande, A. (2023). Different pre-treatments and kinetic models for bioethanol production from lignocellulosic biomass: A review. *Heliyon*, 9(6), e16604. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16604>
- Priatna, M. R., Palit, W. H., & Kurniawan, R. (2021). Pengaruh temperatur hidrolisis dan konsentrasi larutan asam pada hidrolisis eceng gondok. *e-Proceeding FTI*, 1(1), 1–10.
- Puglia, D., Fortunati, E., Kenny, J. M., & Torre, L. (2024). Acid hydrolysis of bleached and ionic liquid-treated water hyacinth fibers. *Polymers*, 16(10), 1395. <https://doi.org/10.3390/polym16101395>
- Ren, J., Zhang, M., Guo, X., Zhou, X., Ding, N., Lei, C., Jia, C., Wang, Y., Zhao, J., & Dong, Z. (2024). Furfural tolerance of mutant *Saccharomyces cerevisiae* selected via ionizing radiation combined with adaptive laboratory evolution. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 17, 117. <https://doi.org/10.1186/s13068-024-02562-w>
- Sarah, M., Pratiwi, I., & Hasibuan, I. M. (2022). Hidrolisis eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) menjadi glukosa menggunakan rotating microwave reactor. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 11(1), 1–7. <https://doi.org/10.32734/jtk.v11i1.6760>
- Tirva, D., Tiwari, D., Chalotra, A., & Rawat, M. (2022). Bio ethanol production from water hyacinth. *Materials Today: Proceedings*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.054>
- Wulandari, P. A., Fatimura, M., & Fitriyanti, R. (2023). Pengaruh konsentrasi H₂SO₄ dan waktu fermentasi terhadap proses pembuatan bioetanol berbahan eceng gondok (*Eichhornia crassipes*). *Jurnal Teknologi dan Inovasi Industri*, 4(2), 9–15. <https://doi.org/10.23960/jtii.v4i2.75>
- Xia, A., Cheng, J., Song, W., Yu, C., Zhou, J., & Cen, K. (2013). Enhancing enzymatic saccharification of water hyacinth through microwave heating with dilute acid pretreatment for biomass energy utilization. *Energy*, 61, 158–166. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.019>
- Yan, J., Wei, Z., Wang, Q., He, M., Li, S., & Irbis, C. (2015). Bioethanol production from sodium hydroxide/hydrogen peroxide-pretreated water hyacinth via simultaneous saccharification and fermentation with a newly isolated thermotolerant *Kluyveromyces marxianus* strain. *Bioresource Technology*, 193, 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.069>
- Yao, L., Xu, J., Zhang, X., Li, Y., & Liu, C. (2024). Adaptive laboratory evolution to obtain furfural-tolerant *Saccharomyces cerevisiae* and reveal the ADR1 mutation mechanism. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1333777. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1333777>
- Zhang, Q., Weng, C., Huang, H., Achal, V., & Wang, D. (2016). Optimization of bioethanol production using whole plant of water hyacinth as substrate in simultaneous saccharification and fermentation process. *Frontiers in Microbiology*, 6, 1411. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01411>
- Ziaei-Rad, Z., Pazouki, M., Fooladi, J., & Azin, M. (2021). Lignocellulosic biomass pre-treatment using low-cost ionic liquid for bioethanol production: An economically viable method for wheat straw fractionation. *Biomass and Bioenergy*, 151, 106140. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106140>