

ANALISIS BIOETHANOL BERBAHAN AMPAS SAGU (*Metroxylon SPP*) DENGAN METODE *SEPARATED HYDROLYSIS AND FERMENTATION* (SHF) MENGGUNAKAN KATALIS ASAM SULFAT DAN ENZIM

K. H. Gulo¹, J. H. Sembiring², Z. Nasution¹, E. Ginting^{1*}

¹*Jurusan Kimia, Universitas Negeri Medan, Sumatera Utara 20221 Indonesia*

²*Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia*

*Email: elfridaginting@unimed.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis *yield* dan karakteristik bioetanol yang dihasilkan dari ampas sagu (*Metroxylon spp*) dengan menggunakan metode fermentasi hidrolisis terpisah yang dibantu katalis asam sulfat (H_2SO_4) dan enzim. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode hidrolisis enzimatik menghasilkan *yield* bioetanol tertinggi sebesar 56,6%, sedangkan hidrolisis menggunakan asam sulfat menghasilkan *yield* yang lebih rendah, yaitu 33%. Karakteristik fisik bioetanol yang dihasilkan dari hidrolisis enzimatik memiliki densitas 0,8577 gr/mL dan viskositas 1,09 Cp, sementara bioetanol dari hidrolisis dengan asam sulfat memiliki densitas 0,8955 gr/mL dan viskositas 1,01 Cp. Pengukuran kadar etanol menggunakan spektrofotometri UV-Vis menunjukkan bahwa bioetanol dari hidrolisis enzimatik memiliki kadar etanol sebesar 12,416%, sementara kadar etanol dari hidrolisis dengan asam sulfat sebesar 5,926%. Analisis FT-IR menunjukkan bahwa sampel bioetanol dari hidrolisis dengan asam sulfat dan hidrolisis enzimatik memiliki gugus fungsi OH, CH, CH₃, dan CO. Dari penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa metode hidrolisis enzimatik lebih efektif dalam menghasilkan bioetanol dengan karakteristik yang lebih baik dibandingkan metode hidrolisis menggunakan asam sulfat.

Kata Kunci : Ampas sagu, Bioetanol, Hidrolisis Asam Sulfat, Enzimatik

ABSTRACT

This research aimed to analyze the *yield* and characteristics of bioethanol produced from sago waste (*Metroxylon spp*) using a separate hydrolysis and fermentation method assisted by two different catalysts used of sulfuric acid and enzyme. The results showed that the enzymatic hydrolysis method produced the highest bioethanol *yield* of 56.6%, while hydrolysis with sulfuric acid resulted in a lower *yield* of 33%. The physical characteristics of bioethanol from enzymatic hydrolysis showed a density of 0.8577 g/mL and a viscosity of 1.09 Cp, whereas from sulfuric acid hydrolysis had a density of 0.8955 g/mL and a viscosity of 1.01 Cp. The ethanol content measured by UV-Vis spectrophotometry revealed that bioethanol from enzymatic hydrolysis had an ethanol content of 12.416%, while bioethanol from sulfuric acid hydrolysis had an ethanol content of 5.926%. FT-IR analysis indicated that bioethanol samples both from sulfuric acid and enzymatic hydrolysis exhibited functional groups OH, CH, CH₃, and CO. This study concludes that the enzymatic hydrolysis method is more effective in producing bioethanol with better characteristics than hydrolysis using sulfuric acid.

Keywords: Sago waste, Bioethanol, Sulfuric Acid Hydrolysis, Enzymatic.

PENDAHULUAN

Pada 2020, produksi energi primer Indonesia mencapai 450,6 *Millions Tons of equivalent* (MTOE), terdiri dari gas alam, batu bara, minyak bumi, dan energi terbarukan. Bahan bakar sebesar 260,5 MTOE, diekspor, terutama batu bara dan LNG. Sementara itu, Indonesia mengimpor energi, terutama minyak mentah dan produk bahan bakar sebanyak 40,3 MTOE, serta sedikit batu bara berkalori tinggi

untuk industri baja. Cadangan minyak Indonesia, menurut BP Statistical Review 2020, hanya 0,1% dari cadangan dunia dan turun dari 7,3 miliar barel pada 2015 menjadi 4,2 miliar barel pada 2020. Produksi minyak juga menurun, dari 329,3 juta barel pada 2011 menjadi 259,2 juta barel pada 2020 (Wahyuni et al., 2023; Nisak Yamnoun, Nawansari, 2021).

Seiring meningkatnya populasi, penggunaan bahan bakar fosil turut meningkat, menyebabkan kelangkaan (Dirgantara et al.,

2021; Warsa et al., 2013). Peningkatan konsumsi BBM dan penurunan cadangan minyak mendorong pengembangan bahan bakar nabati (BBN) sebagai alternatif, termasuk bioetanol (Adam et al., 2019; Agustini et al., 2019).

Bioetanol adalah bahan bakar alternatif yang dihasilkan melalui fermentasi biomassa, seperti pati, gula, dan selulosa (Irvan et al., 2016). Sebagai bioenergi terbarukan, bioetanol tidak menimbulkan polusi dan dapat diproduksi dari bahan-bahan yang mengandung gula dan pati, seperti tebu, molase, jagung, kentang, gandum, dan tepung sugu (Ahmad et al., 2020).

Ampas sugu adalah limbah yang dihasilkan selama pengolahan sugu dan kaya akan karbohidrat serta zat organik. Meskipun residu sugu masih dimanfaatkan secara terbatas, sebagian besar dibuang dan dapat mencemari lingkungan (Alwi, 2021). Setelah diolah, perbandingan bubuk tepung sugu terhadap sedimen adalah sekitar 1:6, di mana daging buah sugu menghasilkan 18,5% pati dan 81,5% ampas. Ampas sugu terdiri dari serat empulur yang terbentuk setelah batang sugu diparut atau diperas, serta merupakan bahan lignoselulosa yang sebagian besar terdiri dari lignin, selulosa, dan hemiselulosa. Ampas sugu dapat dimanfaatkan untuk pakan ternak dan sebagai bahan baku bioetanol (Noviardi et al., 2020). Sumber utama ampas sugu dalam penelitian ini berasal dari Kecamatan Pandan, Kabupaten Tapanuli Tengah, Provinsi Sumatera Utara.

Pada penelitian ini, bioetanol dihasilkan dari ampas sugu melalui metode hidrolisis dan fermentasi. Hidrolisis adalah proses pemecahan molekul selulosa, hemiselulosa, dan karbohidrat menjadi gula sederhana. Sebelum fermentasi, hidrolisis banyak digunakan dalam skala industri untuk menghasilkan bioetanol. Dua metode hidrolisis yang digunakan adalah hidrolisis asam, yang mengubah gula kompleks menjadi monosakarida, dan hidrolisis enzimatik, yang mengubah polisakarida menjadi monosakarida (Ginting et al., 2024).

Pada hidrolisis enzimatik, proses liquifikasi menggunakan enzim untuk mempercepat pengikatan. Enzim memiliki sifat katalitik yang mengaktifkan senyawa lain dan mempercepat reaksi. Enzim α -amilase digunakan untuk menghidrolisis ikatan α -1,4-glukosidik, memecah amilosa menjadi gula garam dan maltotriosa. Untuk menghasilkan glukosa dalam jumlah besar, enzim glukoamilase ditambahkan, yang dapat memutus

ikatan pada pati yang tidak terhidrolisis oleh α -amilase (Arifiyanti et al., 2020). Fermentasi merujuk pada proses pengubahan glukosa menjadi etanol (Ramadhanty, 2019).

MATERI DAN METODE

Bahan

Bahan-bahan yang digunakan ialah ampas sugu, asam sulfat (H_2SO_4) (Merck), enzim α -amilase (Fonde) dan glico-amilase (Fonde), ragi roti (Fermipan), $K_2Cr_2O_7$ (ROFA), CH_3COOH (ROFA), $NaCH_3COO$ (Merck), Na-Alginat, (SIGMA), $CaCl_2$ (Merck), Glukosa (Merck), KH_2PO_4 (Merck), Na_2PO_4 (Merck), Urea (Merck), Aquadest (Logistik), Fehling A (ROFA), Fehling B (ROFA), Larutan Benedict (ROFA), Indikator Metil biru (ROFA), larutan NaOH (Merck), absorben CaO (Merck), dan HCl (Merck).

Alat

Alat-alat yang digunakan adalah corong buchner (IWAKI), Grinder (Taff), erlenmeyer (Pyrex), hot plate (Thermo Scientific tipe Cimarec II), neraca analitik (Newtech), corong, labu ukur (Pyrex), pipet volum (Pyrex), tabung reaksi (Pyrex), kertas saring (Whatman), cawan petri (Pyrex), indikator universal (Merck), spatula (Merck), incubator shaker (B-ONE), magnetic stirer (VITLAB), peralatan titrasi (Pyrex), oven (Mettler), beaker glass (Pyrex), thermometer (Pyrex), pH meter (rumix), picnometer (Pyrex), viskometer (Pyrex), spektrofotometer UV-Vis (LaMotte SMART Spectro) dan FT-IR (Perkin Elmer Spectrum Two), alkoholmeter (Aventru), sepasang alat distilasi (Pyrex).

Cara Kerja

Persiapan Bahan Baku

Pada tahap awal, ampas sugu dikeringkan untuk menghilangkan kadar air yang ada di dalamnya. Setelah itu dilakukan penggilingan untuk mendapatkan kehalusan bahan baku yang optimal, sehingga kandungan karbohidrat dan gula yang dihasilkan dapat maksimal. Proses penjemuran dilakukan selama 4-5 hari, kemudian ampas sugu digiling menggunakan *grinder* hingga mencapai tingkat kehalusan 60 mesh. Kehalusan ini penting untuk memastikan proses pengolahan selanjutnya berjalan efektif dan efisien (Dirgantara et al., 2021).

Pembuatan Bioetanol dengan Metode Hidrolisis Fermentasi Terpisah

A. Hidrolisis Menggunakan Asam Sulfat (H₂SO₄) sebagai Katalis

Sebanyak 40 gram ampas sagu yang telah dihaluskan ditimbang lalu masukkan ke dalam 100 ml larutan asam sulfat 3,5% dalam labu Erlenmeyer 500 ml yang berisi aquades sebanyak 300 mL. Panaskan endapan sagu yang mengandung asam sulfat pada suhu 100°C selama 1 jam untuk proses hidrolisis. Setelah itu, saring hasil hidrolisis dan tambahkan larutan NaOH 80% ke dalam filtrat hingga pH mencapai 4-5 (Ahmad et al., 2020).

B. Hidrolisis Menggunakan Enzim Alfa-Amilase dan Gluko-Amilase sebagai Katalis

Proses Liquefikasi

Sebanyak 50 gram tepung sagu dimasukkan ke dalam beaker glass, lalu tambahkan 250 ml aquadest. Sesuaikan pH campuran menjadi 4-7 dengan buffer asetat. Tambahkan 3 ml enzim alfa-amilase dan aduk hingga merata. Panaskan campuran tepung sagu di atas hot plate sambil diaduk pada suhu 80-90 °C selama 60 menit. Setelah itu, dinginkan hingga suhu 55 °C untuk melanjutkan proses sakarifikasi (Wahyuningsih, 2019).

Proses Sakarifikasi

Sebanyak 3 mL enzim glukosa-amilase diambahkan ke sampel hasil proses liquefikasi. Panaskan campuran pada suhu 50-60 °C sambil diaduk selama 60 menit, kemudian dinginkan hingga mencapai suhu 30 °C (Adrian et al., 2020).

Immobilisasi sel

Sel *Saccharomyces cerevisiae* diimmobilisasi menggunakan larutan Na-alginat. Larutan alginat dibuat dengan melarutkan 0,4 gram alginat dalam 10 mL aquades, dan larutan CaCl₂ dibuat dengan 1,4 gram CaCl₂ dalam 20 mL aquades, lalu diautoklaf. Selanjutnya, 2 gram ragi kering dicampur dengan 10 mL aquades, diaduk pada suhu 35 °C, dan dibiarkan mengendap. Larutan ragi dicampur dengan larutan alginat hingga homogen, kemudian diteteskan ke larutan CaCl₂ untuk membentuk *beads*. *Beads* adalah partikel kecil yang berbentuk bulat dan terdiri dari sel ragi yang diimmobilisasi dalam matriks alginat. Pembentukan *beads* ini memungkinkan sel ragi untuk tetap aktif dan melakukan fermentasi dalam kondisi yang terkendali. Setelah 24 jam

pendinginan dan pencucian, larutan nutrisi disiapkan dari 10 gram glukosa, 3 gram KH₂PO₄, dan 4,5 gram Na₂PO₄, lalu diautoklaf. Setelah dingin, ditambahkan 1 gram ragi kering dan 1 gram urea. *Beads* diberi larutan nutrisi dan diinkubasi selama 24 jam pada 36 °C sebelum disimpan dalam lemari es untuk fermentasi (Ririn Uli Riwu & Agustini, 2022).

Proses Fermentasi

A. Menggunakan Asam Sulfat (H₂SO₄) sebagai Katalis

Setelah 24 jam, *beads* dimasukkan ke dalam larutan hidrolisis yang telah disterilkan, ditambahkan nutrisi (10 g glukosa, 3 g KH₂PO₄, dan 4,5 g Na₂PO₄) serta 1 gram/L pupuk urea. Campuran dituangkan ke dalam 400 mL larutan dan diaduk pada suhu 10 °C dengan kecepatan 200 rpm. Proses fermentasi dilakukan selama 96 jam pada suhu 37 °C (Ahmad et al., 2020).

B. Menggunakan Enzim Alfa-Amilase dan Gluko-Amilase sebagai Katalis

Sampel hasil proses sakarifikasi dimasukkan ke dalam *beads*, lalu ditambahkan larutan nutrisi (10 gram glukosa, 3 gram KH₂PO₄, 4,5 gram Na₂PO₄) dan pupuk urea 0,5 g/L yang telah disterilisasi. Campuran diaduk dengan kecepatan 200 rpm selama 144 jam, dengan suhu maksimum dijaga di 37 °C, dan wadah fermentasi ditutup (Arifiyanti et al., 2020; Wusnah et al., 2019).

Pemurnian Hasil Fermentasi

Pada tahap ini, destilasi berulang dilakukan untuk memisahkan etanol dari substrat fermentasi pada suhu 78-79 °C. CaO (kalsium oksida) digunakan sebagai adsorben untuk menghilangkan kandungan air dalam bioetanol. Dalam proses dehidrasi, CaO berfungsi sebagai pengering yang dapat menyerap kandungan air dalam bioetanol, sehingga meningkatkan kemurnian dan kualitas bioetanol. Dalam proses dehidrasi, Bioetanol direndam dengan CaO dengan perbandingan volume 1:2 terhadap berat adsorben. Tambahkan 50 ml bioetanol ke labu Erlenmeyer 100 ml, masukkan adsorben, dan aduk setiap 24 jam. Hasil bioetanol dianalisis sesuai parameter yang ditentukan (Arnata et al., 2014).

Analisis Data

Bioetanol dikarakterisasi berdasarkan sifat fisik (uji positif etanol, densitas, viskositas, yield, spektroskopi uv-vi dan spektrometer FT-IR)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Bioetanol

Karakterisasi bioetanol dari ampas sagu dilakukan melalui hidrolisis dengan asam sulfat (H_2SO_4) dan enzim. Analisis gugus fungsi menggunakan spektroskopi FT-IR, sedangkan kadar bioetanol diukur dengan spektrofotometri UV-Vis. Hasil analisis ditampilkan dalam tabel, diikuti dengan pembahasan mendalam mengenai hasil tersebut

Tabel 1. karakteristik hasil bioetanol

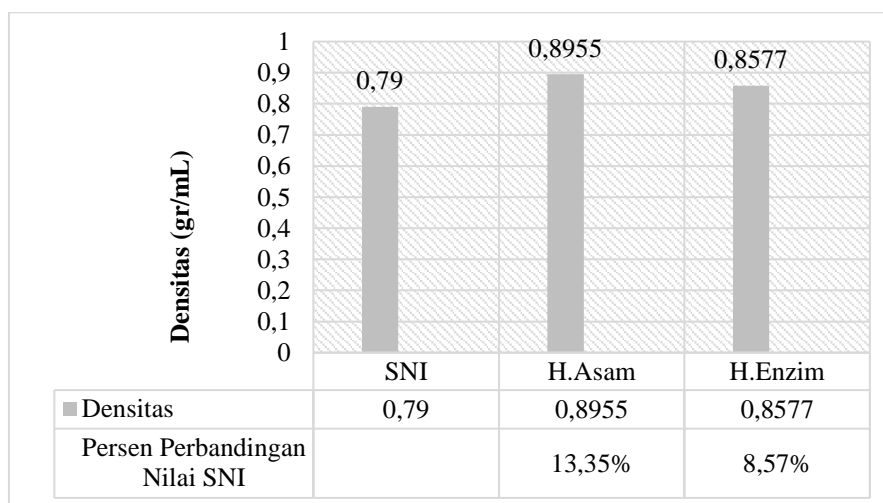
Karakteritik	Bioetanol	
	Hidrolisis (H_2SO_4)	Hidrolisis (Enzim)
Densitas	0,8955 gr/mL	0,8577 gr/mL
Viskositas	1,01 cp	1,09 cp
Kadar	5,926 %	12,416 %
Yield	36 %	56%
Wujud padat suhu kamar	Cairan	Cairan
Warna	Bening	Bening

Perbandingan karakteristik bioetanol dengan etanol murni standar

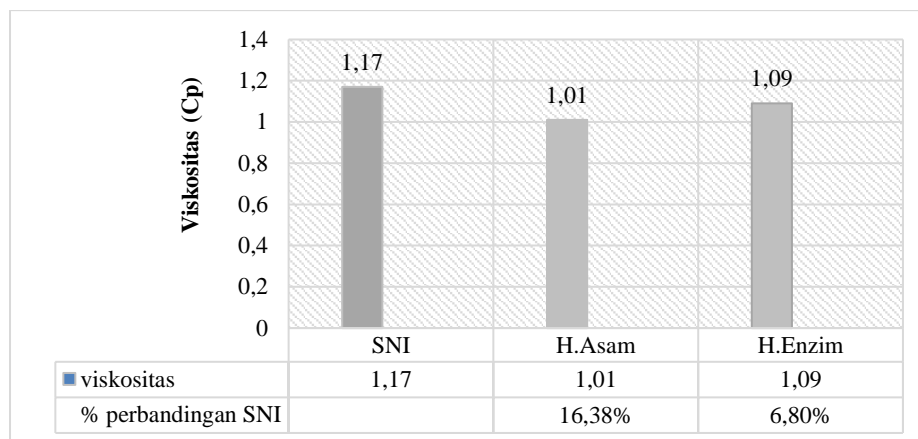
Penelitian ini membandingkan densitas bioetanol dari ampas sagu yang diolah melalui hidrolisis asam sulfat (H_2SO_4) dan hidrolisis enzimatik. Bioetanol dari hidrolisis asam sulfat memiliki densitas 0,8955 gram/mL, sementara

dari hidrolisis enzimatik densitasnya adalah 0,8577 gram/mL. Selisih densitas bioetanol dari hidrolisis enzimatik dengan standar SNI adalah 8,57%, sedangkan hidrolisis asam sulfat memiliki selisih 13,35%. Nilai densitas bioetanol yang dihasilkan dengan bantuan enzim mempunyai densitas yang lebih mendekati nilai SNI dari bioetanol ($0,79 \frac{g}{mL}$). Hidrolisis enzimatik menghasilkan bioetanol yang lebih baik dibandingkan hidrolisis asam sulfat, namun jumlah bioetanol yang rendah dalam penelitian ini menyebabkan densitasnya tidak sesuai dengan standar. Faktor lain, seperti waktu fermentasi, ragi, dan metode penyulingan, juga memengaruhi densitas.

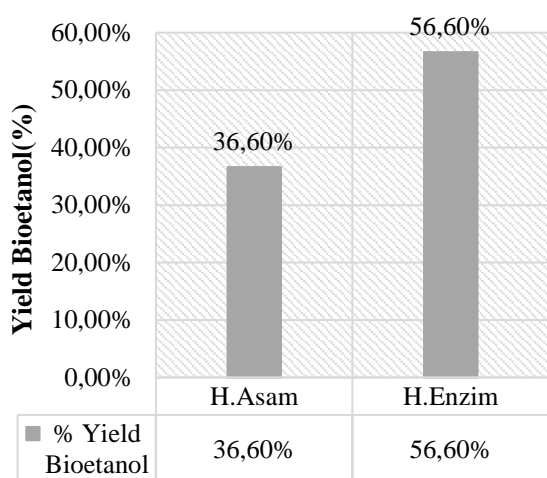
Penelitian ini menunjukkan bahwa viskositas tertinggi, 1,09 Cp, diperoleh dari bioetanol ampas sagu melalui hidrolisis enzim, sedangkan viskositas terendah, 1,01 Cp, dari hidrolisis asam sulfat. Standar viskositas etanol ideal menurut SNI adalah 1,17 Cp, sehingga viskositas bioetanol yang dihasilkan belum memenuhi standar tersebut. Selisih viskositas antara sampel dari hidrolisis enzim dan standar SNI adalah 6,8%, sementara hidrolisis asam memiliki selisih 16,38%. Viskositas yang lebih rendah ini mungkin disebabkan oleh faktor durasi fermentasi dan interaksi mikroba yang tidak optimal, sehingga bioetanol yang dihasilkan masih belum sesuai dengan standar kualitas yang ditetapkan.



Gambar 1. Perbandingan Densitas Bioetanol



Gambar 2. Perbandingan Viskositas Bioetanol

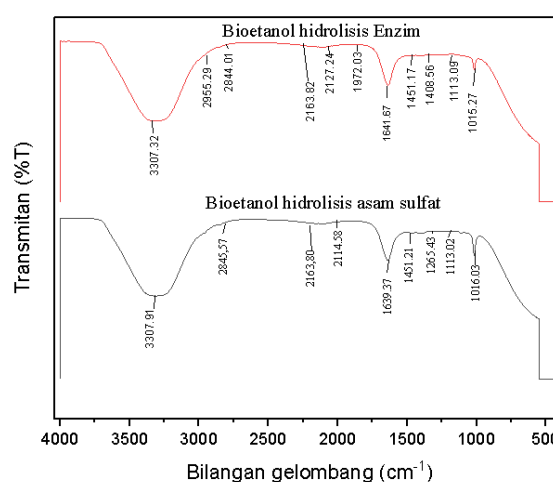


Gambar 4. Perbandingan persen yield etanol

Penelitian ini menunjukkan bahwa yield bioetanol dari ampas sagu yang diolah dengan hidrolisis enzim lebih tinggi (56,6%) dibandingkan hidrolisis asam sulfat (36,6%). Keunggulan hidrolisis enzim disebabkan oleh proses liquifikasi dan sakarifikasi yang terjadi bersamaan dengan fermentasi, yang meningkatkan konsumsi gula oleh ragi dan mempercepat pertumbuhan ragi. Meskipun penelitian ini menunjukkan yield tertinggi sebesar 32,45% setelah enam hari fermentasi, hasil yang lebih efisien dengan yield lebih tinggi dicapai dalam empat hari fermentasi. Hal ini membuktikan bahwa metode tersebut lebih efektif dalam mengonversi ampas sagu menjadi bioetanol (Saragih, H. T. M., et al., 2023).

Analisis Data FT-IR ((Fourier Transform Infrared) Bioetanol

Dapat dilihat dari Gambar 4 absorbansi gugus fungsi -OH pada bioetanol yang dihasilkan dari ampas sagu melalui hidrolisis



Gambar 3. Spektrum FT-IR bioetanol

asam sulfat (H_2SO_4) dan enzim tercatat masing-masing pada $3307,91\text{ cm}^{-1}$ dan $3307,32\text{ cm}^{-1}$, yang termasuk dalam rentang serapan gugus alkohol O-H ($3000-3700\text{ cm}^{-1}$). Selain itu, pita regangan C-O terdeteksi pada panjang gelombang antara 1000 dan 1300 cm^{-1} , sesuai dengan karakteristik gugus fungsi C-O dalam bioetanol.

Hasil analisis spektrum FT-IR menunjukkan bahwa pada bioetanol hasil hidrolisis enzimatik dengan alfa-amilase dan glico-amilase, bilangan gelombang untuk gugus fungsi C-O terdeteksi pada $1408,56\text{ cm}^{-1}$, sedangkan pada hidrolisis asam sulfat (H_2SO_4), serapan C-O tercatat pada $1407,72\text{ cm}^{-1}$. Untuk gugus fungsi -CH, pada hidrolisis enzimatik bilangan gelombang terdeteksi pada $2955,29\text{ cm}^{-1}$, sementara hidrolisis asam sulfat menunjukkan bilangan $2845,57\text{ cm}^{-1}$.

Pita regangan alkana sederhana, termasuk CH_2 dan CH_3 , menunjukkan frekuensi lebih rendah. Gugus fungsi - CH_3 pada hidrolisis

enzimatik tercatat pada $1408,56 \text{ cm}^{-1}$, sedangkan pada hidrolisis asam sulfat bilangan gelombangnya adalah $1407,72 \text{ cm}^{-1}$. Ini menunjukkan sedikit perbedaan dalam interaksi molekul yang dapat memengaruhi kualitas bioetanol yang dihasilkan.

Berdasarkan analisis FT-IR, sampel bioetanol dari ampas sagu yang dihidrolisis dengan asam sulfat (H_2SO_4) dan enzim menunjukkan perbedaan yang signifikan pada panjang gelombang untuk gugus fungsi -OH, -CH, -C-C, -CH₃, -C-O, dan -C-C-OH. Panjang gelombang -OH yang lebih rendah pada bioetanol hasil hidrolisis enzimatik menunjukkan interaksi hidrogen yang lebih kuat dibandingkan dengan hidrolisis asam sulfat. Hal ini menunjukkan peningkatan konsentrasi bioetanol dan intensitas puncak gugus -CH yang lebih tinggi pada hidrolisis enzimatik. Konsentrasi tinggi gugus -CH₃ dalam sampel dari hidrolisis enzimatik juga mencerminkan tingginya kandungan komponen terkait, sesuai dengan studi Bobomurodova & Smanova (2021).

Analisa Spektrofotometri UV-Vis

Penentuan kadar bioetanol menggunakan metode spektrofotometri UV-Vis pada panjang gelombang 280 nm menghasilkan persamaan regresi linier $y = 0,3446x + 0,0989$. Persamaan ini menunjukkan hubungan linier yang kuat antara konsentrasi bioetanol dan absorbansi yang terukur. Dalam persamaan tersebut, nilai 0,3446 merupakan kemiringan (slope) yang menunjukkan seberapa besar perubahan absorbansi sebanding dengan perubahan konsentrasi, sementara 0,0989 adalah intersep. Persamaan ini digunakan untuk menghitung konsentrasi bioetanol pada sampel yang diuji berdasarkan absorbansi yang diperoleh.

Tabel 2. Spektroskopi UV-VIS

Sampel (metode)	Absorbansi	Rata-rata absorbansi	Konsentrasi (%)
Hidrolisis asam sulfat	0,225 0,225	0,225	5,926%
Hidrolisis enzim	0,365 0,366	0,366	12,416%

Penelitian ini membandingkan dua variasi proses hidrolisis dalam pembuatan bioetanol dari ampas sagu, yaitu hidrolisis

dengan enzim alfa-amilase dan glukoamilase, serta hidrolisis dengan asam sulfat (H_2SO_4). Hasil menunjukkan bahwa hidrolisis enzimatik menghasilkan kadar bioetanol tertinggi sebesar 0,77%, sementara hidrolisis asam sulfat menghasilkan kadar bioetanol sebesar 0,367%. Volume distilat yang dihasilkan dari hidrolisis enzimatik lebih tinggi (170 mL) dibandingkan hidrolisis asam sulfat (110 mL), menunjukkan efisiensi yang lebih besar pada metode enzimatik.

Faktor-faktor seperti tingkat asam yang terlalu tinggi atau rendah, serta konsentrasi dan aktivitas enzim yang tidak optimal, dapat mempengaruhi hasil bioetanol. Penelitian juga menunjukkan bahwa kadar urea yang optimal untuk mendukung fermentasi bioetanol berada dalam rentang 0,2 – 0,6 gram. Konsentrasi urea yang lebih tinggi dapat menghasilkan amonia yang menghambat pertumbuhan mikroorganisme, sehingga mengurangi hasil bioetanol (Suryani et al., 2017).

SIMPULAN

Pada pembuatan bioetanol dari ampas sagu dengan metode hidrolisis asam sulfat dan enzim, dapat disimpulkan bahwa hidrolisis enzim lebih efisien dibandingkan hidrolisis asam sulfat. Proses hidrolisis asam sulfat melibatkan sakarifikasi dan fermentasi terpisah, sedangkan hidrolisis enzim menggabungkan liquifikasi, sakarifikasi, dan fermentasi dalam satu langkah setelah penetralan pH. Yield bioetanol dari hidrolisis enzim mencapai 56,6%, jauh lebih tinggi daripada 36,6% dari hidrolisis asam sulfat, yang menunjukkan efisiensi konversi gula yang lebih baik. Dalam hal karakteristik bioetanol, densitas dari hidrolisis asam sulfat adalah 0,8955 g/mL, sementara dari hidrolisis enzim 0,8577 g/mL, keduanya lebih tinggi dari densitas etanol murni. Viskositas bioetanol dari hidrolisis enzim (1,09 Cp) juga lebih tinggi dibandingkan dengan hidrolisis asam sulfat (1,01 Cp), meskipun keduanya belum memenuhi standar SNI (1,17 Cp). Analisis FT-IR dan UV-Vis mengkonfirmasi keberadaan gugus fungsi bioetanol dan kadar yang lebih tinggi pada hidrolisis enzim. Dengan demikian, penggunaan hidrolisis enzim lebih disarankan untuk meningkatkan yield dan kualitas bioetanol dari ampas sagu.

DAFTAR PUSTAKA

- Adam, M., Harahap, P., & Nasution, M. R. 2019. Analisa pengaruh perubahan kecepatan angin pada pembangkit listrik tenaga angin (PLTA) terhadap daya yang dihasilkan generator DC. RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi): *Jurnal Teknik Elektro*. 2(1): 30-36.
- Afriza, R., & Nilda, I. 2019. Analisis perbedaan kadar gula pereduksi dengan metode Lane Eynon dan Luff Schoorl pada buah naga merah (*Hylocereus polyrhizus*). *Jurnal Temapela*. 2(2): 90-96. <https://doi.org/10.25077/temapela.2.2.90-96.2019>
- Agustini, N. W. S., Hidayati, N., & Wibisono, S. A. 2019. Effect of hydrolysis time and acid concentration on bioethanol production of microalga *Scenedesmus* sp. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*. 308(1): <https://doi.org/10.1088/1755-1315/308/1/012029>
- Ahmad, A., Muria, S. R., & Rahani. 2020. Pengaruh konsentrasi asam klorida (HCl) pada hidrolisis dan waktu fermentasi terhadap limbah padat sago menjadi bioetanol. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia. Kejuangan Pengembangan Teknologi Kimia Untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia*. J10-1-J10-7. Yogyakarta.
- Alwi, M. 2021. Bioetanol dari empulur dan ampas sago (*Metroxylon spp.*) dengan hidrolisis asam sulfat (Doctoral dissertation, Universitas Hasanuddin).
- Ananda, P. D., & Daulay, A. H. 2023. Pemanfaatan tongkol jagung dan ampas tebu dalam pembuatan bioetanol sebagai bahan bakar alternatif. 8: 135-140.
- Ariyani, S. B. 2019. Karakteristik bioadsorben dari limbah kulit durian untuk penyerapan logam berat Fe dan Zn pada air sumur. *Jurnal Teknologi Proses Dan Inovasi Industri*, 4(1): 23. <https://doi.org/10.36048/jtpii.v4i1.5229>
- Aziz, M. A. (2023). *Tkks*, 28(2), 107-114.
- Engineering, C., & Storage, J. 2023. 1(2): 236-246. <https://doi.org/10.29103/cejs.v3i2.9891>
- Harihastuti, N., Rame, R., & Djayanti, S. 2018. High performance of enzymatic bioprocess for production of biomassed-based bioethanol of sago palm fiber waste. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*. 9(2): 37-45. <https://doi.org/10.21771/jrtpi.2018.v9.no2.p37-45>
- Ishizaki, H., & Hasumi, K. 2013. Ethanol production from biomass. In *Research Approaches to Sustainable Biomass Systems*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404609-2.00010-6>
- Khazalina, T. 2020. *Saccharomyces cerevisiae* in making halal products based on conventional biotechnology and genetic engineering. *Journal of Halal Product and Research*. 3(2): 88. <https://doi.org/10.20473/jhpr.vol.3-issue.2.88-94>
- Lee, S. C., Oh, H. W., Woo, H. C., & Kim, Y. H. 2021. Energy-efficient bioethanol recovery process using deep eutectic solvent as entrainer. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02213-2>
- Loupatty, V. D. 2014. Pemanfaatan bioetanol sebagai sumber energi alternatif pengganti minyak tanah. *Majalah Biam*. 10(Desember): 50-59.
- Mittal, N., Bai, P., Siepmann, J. I., Daoutidis, P., & Tsapatsis, M. 2017. Bioethanol enrichment using zeolite membranes: Molecular modeling, conceptual process design and techno-economic analysis. *Journal of Membrane Science*. 540: 464-476. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.06.075>
- Muhammad Luqman Hakim, Erma Prihastanti, & Endah Dwi Hastuti. 2017. Effect of glycerol concentration and heating treatment on delignification and bioethanol production of sago dregs. *Journal of Energy and Power Engineering*. 11(11): 679-686. <https://doi.org/10.17265/1934-8975/2017.11.001>
- Wismanto, W., Saputra, M. R., Sabila, T. A., Hakim, A. L., & Sukma, I. P. (2024). Membentuk kepribadian Muslim peserta didik melalui pendidikan berbasis akhlak. *Jurnal Riset Rumpun Agama dan Filsafat*. 3(1): 37-50.
- Noviardi, H., Yuningtyas, S., & Yuniar, V. 2020. Optimasi waktu inkubasi produksi bahan minuman probiotik dari umbi garut (*Maranta arundinacea*) oleh *Lactobacillus*

- fermentum sebagai antihiperkoletsterolemia. *Biopropal Industri*, 11(1): 59. <https://doi.org/10.36974/jbi.v11i1.5846>
- Numberi, J. J. 2022. Analisis limbah ampas sagu sebagai sumber bahan bakar bioetanol. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*. 6(1): 98–103. <https://doi.org/10.33379/gtech.v6i1.2603>
- Pratiwi, N., Fatia, I., Yani, W. P., & Irdawati. 2021. Tinjauan literatur: Industri alkohol menggunakan imobilisasi sel. *Jurnal Inovasi Riset Biologi Dalam Pendidikan Dan Pengembangan Sumber Daya Lokal*, 1300–1311.
- Ramadhanty, D. A. 2019. Bacem (Bahan Bakar Cempedak): Inovasi kulit cempedak menjadi bioetanol sebagai bahan bakar alternatif. *Biotenologi*. 1(1): 1–6.
- Adrian, Syaiful, A. Z., Ridwan, & Hermawati. 2020. Sakarifikasi pati ubi jalar putih menjadi gula dekstrosa. *Saintis*. 1(1): 1–12.
- Arifiyanti, N. A., Aqliyah, D. N., & Billah, M. (2020). Bioetanol dari biji nangka dengan proses likuifikasi dan fermentasi menggunakan *Saccharomyces cerevisiae* *ChemPro*. 1(01): 51–55. <https://doi.org/10.33005/chempro.v1i01.47>
- Bobomurodova, M. S., & Smanova, Z. A. 2021. Application of immobilized arsenazo III for sorption-spectroscopic determination of mercury. *01(05)*: 91–96.
- Ginting, E., Saragih, H. T. M., Nasution, Z., Siregar, E., Siregar, E., & Nasution, N. 2024. Conversion of Durian (*Durio zibethinus*) Seed Waste into Bioethanol. *The 10th Annual International Seminar on Trends in Science and Science Education (AISTSSE) 2023*: 217–222. <https://doi.org/10.2478/9788367405782-026>
- Elfiyani, E., Santosa, B., & Wirawan. 2023. Pembuatan dan analisa usaha minuman sinbiotik dari ubi jalar kuning (*Ipomoea batatas* L.): Kajian konsentrasi starter dan lama fermentasi. *Journal of Industrial Engineering & Technology Innovation*, 1(1): 43–53. <https://doi.org/10.61105/jieti.v1i1.18>
- Febrianti, D., Prastowo, S. H. B., & S. 2019. Pengaruh suhu dan waktu terhadap fermentasi biji kopi. *Seminar Nasional Pendidikan Fisika 2019*. 4(1): 107–110.
- Gusti Agung Ayu Kusuma Wardani. 2020. Efektivitas pemberian gel ekstrak etanol bunga kecombrang (*Etingera elatior*) terhadap penyembuhan luka bakar derajat IIA pada mencit putih (*Mus musculus* L.). *Jurnal Ilmiah Medicamento*. 6(2): 72–78.
- Saragih, H. T. M., Sembiring, J. H., & Ginting, E. 2023. Conversion Of Pineapple Peel Glucose Into Bioethanol Using Simultaneous Saccharification And Fermentation (Ssf) Method And Separate Hydrolysis And Fermentation (Shf) Method. *Jurnal Kimia Riset*. 8(2).
- Heldt, H. 2019. *Biochemistry*.
- Heriyadi, A. T. 2023. Sintesis biodiesel dari minyak jelantah menggunakan katalis bentonit teraktivasi NaOH. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 7(3): 21949–21958.
- Hitijahubessy, H., & Huwae, L. M. 2021. Pemanfaatan limbah batang pisang untuk menghasilkan bioetanol dan pakan ternak. *Jurnal Pangan Dan Agroindustri*. 4(1): 12–17.
- Khairunnisa, A., Apriyanto, D. W., & Nugraha, A. 2022. Pembuatan dan karakterisasi bioetanol dari limbah padat kelapa sawit. *Jurnal AgriTech*. 12(2): 146–155.
- Kumar, S., & Kaur, K. 2021. Bioethanol production from sweet potato starch and its characterization. *Journal of Food Science and Technology*. 58(3): 1221–1229. <https://doi.org/10.1007/s11483-020-02023-8>
- Mahlia, T. M. I., & Rijal, N. 2019. Thermochemical conversion of biomass to biofuels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 99: 69–84. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.050>
- Nana, I. R., & Sutaryo. 2018. Karakterisasi bioetanol dari limbah ampas tahu. *Jurnal Ilmiah Sains Dan Teknologi*. 8(2): 182–191. <https://doi.org/10.31629/jist.v8i2.1099>
- Purnamasari, E., & Firman. 2020. Pemanfaatan limbah ketela pohon (*Manihot esculenta*) untuk pembuatan bioetanol. *International Journal of Research and Innovation in Applied Science*. 5(4): 96–101.
- Riyanto, A. 2022. Penentuan sifat mekanik dan termal dari biokomposit paduan gelatin dan selulosa dari limbah pisang. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Fakultas Teknik*. 7(1): 175–181.
- Sahari, R., & Amrillah, A. 2023. Karakterisasi

- bioetanol dari limbah sagu. *Jurnal Sains dan Teknologi Terapan*. 2(1): 12–17. <https://doi.org/10.37687/jstt.v2i1.1891>
- Setiyono, A., Susilowati, S., & Arifin, B. 2020. Pembuatan bioetanol dari ampas sagu (*Metroxylon sagu* Rottb) dengan variasi konsentrasi asam sulfat. *Jurnal Agrosains*, 22(2): 23-30.
- Sujatmiko, A., & Amani, A. M. 2023. The utilization of seaweed as a substrate for bioethanol production. *E3S Web of Conferences*. 217: 1-6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202321703003>
- Surya, H., & Hermawati. 2021. Pembuatan bioetanol dari limbah kelapa sawit. *Jurnal Bioindustri*. 2(1): 1–10.
- Syafira, S., & Indra, A. 2022. Pembuatan bioetanol dari ampas tahu. *Journal of Food Science and Nutrition*. 8(3): 55-61.
- Wahid, F. A. 2021. Optimization of bioethanol production from banana peel using response surface methodology. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*. 9(5): 90-95. <https://doi.org/10.7324/JABB.2021.90506>
- Wahyu, M. 2019. Pengaruh variasi konsentrasi substrat terhadap produksi bioetanol dari limbah ketela. *Jurnal Bioremediasi*. 3(1): 12-18.
- Zainuddin, A. 2021. Pembuatan bioetanol dari limbah sayur dan buah. *Jurnal Agroindustri*. 7(1): 45–51.