

PRODUKSI BIOETANOL BIOMASSA MIKROALGA SPIRULINA PLATENSIS SECARA HIDROLISA MENGGUNAKAN ASAM

Production of Bioethanol from Spirulina platensis Microalgae Biomass through Acid Hydrolysis

Muyassaroh*, Rini Kartika Dewi, Dwi ana Anggorowati
Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, ITN Malang
Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2 Malang 65145
*Email: muyassaroh@lecturer.itn.ac.id

Abstrak

Menipisnya ketersediaan sumber daya bahan bakar fosil, khususnya minyak bumi dan gas alam, mendorong pengembangan sumber energi yang terbarukan dan berkelanjutan. Bioetanol merupakan salah satu bahan bakar alternatif yang menjanjikan karena bersifat terbarukan dan lebih ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk memproduksi bioetanol dari biomassa *Spirulina platensis* melalui proses hidrolisis asam dan fermentasi. Tahap hidrolisis dilakukan menggunakan asam klorida (HCl), asam sulfat (H_2SO_4), dan asam nitrat (HNO_3) dengan variasi konsentrasi 0,1 N, 1 N, dan 2 N pada suhu 80°C, 90°C, dan 100°C. Glukosa yang dihasilkan kemudian difermentasi menjadi bioetanol dengan penambahan ragi, urea, dan pupuk NPK sebagai sumber nutrisi. Pemurnian bioetanol dilakukan melalui proses distilasi pada suhu 78°C selama 4 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar etanol tertinggi sebelum proses distilasi sebesar 0,3177%, sedangkan kadar etanol tertinggi setelah proses distilasi mencapai 10,36%. Kedua hasil tersebut diperoleh pada perlakuan hidrolisis menggunakan H_2SO_4 2 N pada suhu 100°C. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa jenis asam, konsentrasi asam, dan suhu hidrolisis berpengaruh terhadap produksi bioetanol dari biomassa *Spirulina platensis*, dengan H_2SO_4 2 N pada suhu 100°C menghasilkan kadar etanol tertinggi.

Kata kunci: Bioetanol; *Spirulina platensis*; hidrolisis asam; fermentasi.

Kata kunci Bioetanol, *Spirulina platensis*, hidrolisis asam, fermentasi.

Abstract

The problem faced by the world now is the rarity of fossil fuel resources availability such as oil and natural gas, so if not switching to other renewable resources the fossil resources shall run out soon. Hence, bioethanol becomes a promising alternative in the future. One of the fuel resources becoming a favorite that can be utilized as bioethanol is *spirulina platensis*. Bioethanol production with Algae-based material (*spirulina platensis*.) firstly is the stage of acid hydrolysis process of cellulose into glucose using HCl, H_2SO_4 , and HNO_3 with acid concentration respectively 0.1 N; 1N; 2N under temperature 80 °C, 90 °C, 100 °C. It continued with the stage of glucose fermentation into bioethanol by adding urea, NPK, and yeast. Next, for bioethanol purification is distillation process under temperature 78 for 4 hours. The result showed that the highest ethanol content before distillation is 0.317695% and after distillation is 10,36% occurring in the concentration of 2N H_2SO_4 under temperature 100 °C.

Keywords Bioethanol, *Spirulina platensis*, Hydrolysis, fermentation.

Pendahuluan

Gabungan pertumbuhan populasi, industrialisasi, dan urbanisasi mendorong permintaan energi dunia meningkat. Pada saat yang sama, sumber energi fosil semakin habis, menciptakan ancaman keamanan energi di masa depan. Bersamaan dengan itu, penggunaan bahan bakar fosil secara ekstensif memperburuk situasi dengan meningkatkan emisi gas rumah kaca global yang menyebabkan perubahan iklim global. Oleh karena itu, pengenalan sumber energi terbarukan akan menjadi salah satu strategi terpenting untuk mengimplementasikan sistem energi berkelanjutan [1].

Karena kemampuannya untuk disintesis dari biomassa yang mengandung karbohidrat, bioetanol menunjukkan janji besar sebagai bahan bakar terbarukan alternatif bahan bakar fosil. Dengan produksi bioetanol, ketergantungan pada bahan bakar fosil dapat dikurangi, emisi karbon dapat dikurangi, dan keberlanjutan dapat ditingkatkan, semuanya memberikan alasan kuat untuk mengembangkan bioetanol. Produksi bioetanol generasi pertama secara tradisional menggunakan tanaman pokok makanan untuk sintesis etanol. Hal ini menciptakan

kompetisi yang tidak diinginkan antara bahan bakar dan makanan. Oleh karena itu, ada peningkatan fokus pada produksi bioetanol generasi ketiga, yang menggunakan biomassa mikroalga.

Mikroalga mengacu pada mikroorganisme yang melakukan fotosintesis yang memiliki potensi menjadi sumber biomassa yang kaya untuk biofuel. Mikroalga memiliki keunggulan kompetitif dibandingkan flora darat karena kemampuannya untuk sangat produktif dengan penggunaan lahan yang kecil serta pertumbuhan yang cepat dan efisiensi tinggi dalam fotosintesis. Budidaya mikroalga tidak memerlukan air tawar dan dapat dilakukan di laut atau air asin atau air limbah lainnya, menjadikan mikroalga sebagai pilihan yang aman dan produktif untuk budidaya yang tidak akan berdampak pada tanah pertanian.

Yu et al. (2024) berpendapat bahwa mikroalga adalah sumber energi terbarukan yang layak serta pemain kunci dalam ketahanan pangan dan pengelolaan lingkungan. Karena mikroalga menyerap karbon dioksida selama fotosintesis, mereka menyediakan solusi cerdas dan mungkin untuk emisi gas rumah kaca yang dikombinasikan dengan konsep ekonomi sirkular. Ada banyak produk bioetanol, biodiesel, biohidrogen, pakan, dan produk bernilai tambah bioaktif yang dapat dihasilkan dari biomassa mikroalga[2].

Menangkap bioetanol dari mikroalga belakangan ini merupakan bidang penelitian yang populer dengan keberhasilan yang cukup mencolok. Keberhasilan ini disebabkan oleh mikroalga yang mengandung cadangan karbohidrat yang dapat menjalani hidrolisis sederhana untuk menghasilkan gula sederhana yang fermentabel menjadi etanol. Selain itu, dibandingkan dengan tanaman pangan atau biomassa lignocelulosa, sumber bioetanol dari mikroalga melestarikan pasokan pangan global dan tidak menimbulkan ancaman bagi ketahanan pangan global.

Salah satu spesies mikroalga yang menjanjikan sebagai bahan baku bioetanol adalah *Spirulina platensis* (*Arthrospira platensis*). Spesies mikroalga ini menunjukkan pertumbuhan biomassa yang cepat dan mudah dibudidayakan. Selain itu, mengandung karbohidrat yang dapat difermentasi. *Spirulina platensis* juga memiliki tingkat plastisitas yang tinggi, memungkinkan untuk mengkolonisasi berbagai lingkungan secara efektif. Hal ini memungkinkan untuk membudidayakannya sebagai bahan baku bioetanol generasi ketiga yang berkelanjutan. Oleh karena itu, penting untuk menyelidiki produksi bioetanol dari biomassa *Spirulina platensis* melalui proses hidrolisis asam dan fermentasi untuk menentukan kondisi operasi terbaik dan meningkatkan hasil bioethanol.

Teori

Bioetanol sebagai Bahan Bakar Terbarukan

Bioetanol, alkohol dengan struktur molekul C_2H_5OH , adalah alternatif bahan bakar yang bercampur dengan bensin. Saat ini, bioetanol merupakan biofuel penting yang sedang berkembang yang mengurangi kebutuhan akan penggunaan bahan bakar fosil dan menurunkan emisi gas rumah kaca dalam transportasi [3]. Bioetanol memiliki angka oktan yang lebih tinggi dibandingkan bensin. Bioetanol juga menghasilkan pembakaran yang lebih bersih dengan emisi karbon monoksida, hidrokarbon dan partikulat yang lebih kecil. Bioetanol dapat dipisahkan menjadi bioetanol generasi pertama, kedua dan ketiga. Bioetanol generasi pertama dibuat dari tanaman pangan yang tersedia seperti jagung, singkong, dan gandum di antara lainnya. Produksi bioetanol generasi pertama dikritik karena membuat makanan menjadi kurang tersedia karena keseimbangan antara makanan dan bahan bakar.

Untuk keberlanjutan, bioetanol generasi kedua dibuat dari batang tanaman tersebut dan limbah organik pertanian dan industri lainnya. Biomassa meliputi selulosa dan hemiselulosa, yang dapat dihidrolisis menjadi gula sederhana untuk fermentasi menghasilkan ethanol[5]. Namun, lignin dapat menghambat proses hidrolisis dan fermentasi. Perkembangan penelitian terkini menunjukkan bahwa bioetanol generasi ketiga yang berasal dari mikroalga memiliki prospek yang sangat menjanjikan. Mikroalga memiliki laju pertumbuhan yang lebih cepat dibandingkan tanaman darat, tidak memerlukan lahan pertanian yang luas, serta mampu memanfaatkan karbon dioksida secara efisien selama proses fotosintesis [1]. Selain itu, mikroalga dapat dibudidayakan pada air laut, air payau, maupun air limbah sehingga tidak bersaing dengan kebutuhan air tawar untuk pertanian dan konsumsi manusia [2].

Hidrolisis

Hidrolisis dilakukan untuk memperoleh gula sederhana, lebih terutama untuk aktivitas ragi dalam proses fermentasi. Hidrolisis adalah reaksi antara air dan pereaksi yang mengakibatkan terpecahnya atau terurainya suatu senyawa. Reaksi ini diklasifikasikan sebagai reaksi orde pertama karena pereaksi air yang digunakan melebihi batas, sehingga perubahan pada pereaksi diabaikan [7]. Reaksi hidrolisis membutuhkan waktu lebih lama, sehingga diperlukan katalis untuk mempercepat proses. Asam berperan sebagai aktivator air, artinya asam membantu mengkatalisis reaksi. Asam memutus ikatan glikosidik pada molekul karbohidrat secara acak, menghasilkan gula bebas yang merupakan gula pereduksi. Hidrolisis polisakarida dapat dibagi menjadi dua proses—hidrolisis asam dan hidrolisis enzimatis. Proses hidrolisis enzimatis masih terlalu mahal dibandingkan metode hidrolisis asam. Oleh karena itu, hidrolisis asam masih menjadi pilihan utama. Ada dua proses hidrolisis asam yang umum, yaitu asam encer dan asam kuat. Asam pekat dikenal untuk hidrolisis yang membutuhkan waktu lama. Selain itu, metode ini dapat dilakukan pada suhu rendah, yang merupakan keuntungan dibandingkan

proses asam encer. Namun, jika konsentrasi asam terlalu tinggi, hal ini menyebabkan korosi yang memerlukan kebutuhan akan bahan yang lebih mahal dan lebih unggul. Selanjutnya, penghilangan residu asam yang tersisa dari proses hidrolisis menghasilkan tahapan yang menghabiskan energi. Selain itu, selama proses netralisasi, diperlukan sejumlah besar gips. Seperti yang ditunjukkan, proses ini merupakan yang paling tidak disukai karena biaya investasi dan pemeliharaan yang relatif tinggi [8]. Dari semua metode hidrolisis, hidrolisis asam encer merupakan salah satu yang paling sering digunakan. Hal yang sama dapat digunakan sebagai perlakuan pendahuluan yang memungkinkan untuk hidrolisis enzimatis. Umumnya komponen hidrolisis asam encer adalah H_2SO_4 , HNO_3 , dan HCl [9].

Fermentasi

Fermentasi alkohol merupakan proses metabolisme yang dilakukan oleh ragi *Saccharomyces cerevisiae*, di mana gula sederhana seperti glukosa dikonversi menjadi etanol (alkohol) dan karbon dioksida (CO_2) melalui jalur glikolisis dan fermentasi anaerob. Kemudian, karbohidrat dihidrolisis menjadi gula yang lebih sederhana. Pati, misalnya, dihidrolisis menjadi glukosa yang kemudian difermentasi oleh ragi *Saccharomyces cerevisiae* menjadi etanol (alkohol) dan karbon dioksida (CO_2) [10]. Invertase – enzim kompleks yang ditemukan pada ragi, bertanggung jawab untuk mengubah gula pereduksi menjadi etanol. Reaksinya adalah sebagai berikut:



(Glukosa) (etanol) (karbondioksida)

Saccharomyces cerevisiae membutuhkan nutrisi dari salah satu dari dua pupuk yang umum digunakan, seperti pupuk urea dan NPK. Pupuk urea adalah pupuk nitrogen yang mengandung kandungan nutrisi tertinggi sebesar 46% NPK adalah pupuk majemuk karena mengandung lebih dari satu unsur pupuk tunggal [11].

Fermentasi dapat diklasifikasikan menjadi dua berdasarkan kebutuhan oksigen. Fermentasi aerob (proses respirasi), yaitu disimilasi utama materi terjadi dengan penyerapan oksigen. Ketika glukosa dicerna oleh mikroorganisme dalam keberadaan oksigen, glukosa menghasilkan air, karbon dioksida, dan banyak energi. Fermentasi tanpa oksigen, a.k.a. fermentasi anaerob Sehingga hanya sebagian kecil dari bahan baku petroleum yang mereka hancurkan; produk sampingannya merupakan bagian dari energi tersebut, karbon dioksida dan air termasuk beberapa laktik, asetat, etanolik, alkohol asam lemak volatil dan ester. Fermentasi ini umumnya menggunakan ragi, jamur, dan bakteri.

Faktor-faktor yang memengaruhi proses fermentasi: 1) pH (tingkat keasaman). Asam tartarat, asam malat, atau asam sitrat dapat ditambahkan untuk menaikkan nilai pH hingga tingkat yang dapat diterima. Secara umum, pH menurun selama fermentasi. 2) Suhu. *Saccharomyces cerevisiae* yang terpapar pada suhu optimum 25–30°C dan suhu maksimum 35–47°C. 3) Jenis mikroba. Setelah itu, Anda juga harus memikirkan mikroorganisme yang akan digunakan dalam fermentasi; mikroorganisme yang baik adalah mikroorganisme yang dapat berkembang biak dengan baik dan menghasilkan enzim-enzim penting yang akan membantu fermentasi. 4) Oksigen. Mikroorganisme aerob membutuhkan oksigen. Akibatnya, jumlah oksigen yang cukup akan menentukan banyaknya etanol yang dihasilkan. 5) Nutrisi. Nutrisi yang baik memungkinkan hasil fermentasi menjadi baik dari mikroorganisme. 1) Zat nutrisi makro: Nitrogen, yang disuplai oleh NH_3 , garam amonium, pepton, asam amino, dan urea. Dan Fosfat [12].

Distilasi

Distilasi, atau penyulingan, adalah proses pemisahan berdasarkan perbedaan titik didih. Etanol murni memiliki titik didih 78 °C, sehingga melalui proses pemanasan, hasilnya dapat mencapai hingga 95% etanol. Setelah itu, air sisa dihilangkan melalui tahap dehidrasi sampai kandungan etanol mencapai 99,5%. Bioetanol juga dapat digunakan sebagai Octane Booster, yaitu alkohol meningkatkan nilai peningkatan dengan efek yang menguntungkan pada performa dan penghematan konsumsi bahan bakar untuk mesin Anda. Peran lain adalah sebagai agen pengoksidasi, yang berarti kandungan oksigen yang berguna untuk meningkatkan pembakaran sehingga bermanfaat dalam mengurangi pencemaran udara; ia juga berfungsi sebagai penghemat bahan bakar—menghemat bahan bakar fosil. Emisi karbon monoksida diturunkan hingga 1,35%, bahkan dengan campuran bioetanol hanya 3%.

Metode penelitian

Prosedur Percobaan

Produksi bioetanol dengan bahan baku Alga (*Spirogyra* sp.) pertama adalah tahap proses hidrolisa asam dari selulosa menjadi glukosa. Dilanjutkan tahap fermentasi glukosa menjadi bioetanol dengan menambahkan urea, NPK dan yeast. Selanjutnya untuk pemurnian bioetanol dilakukan proses distilasi. Dan tahap terakhir adalah Analisa produk yaitu bioetanol.

Tahap Proses Pembuatan Produk

Produksi bioetanol menggunakan alga (*Spirulina* sp.) yang merupakan tahap hidrolisis asam dari selulosa menjadi glukosa sebagai bahan baku. Selanjutnya adalah tahap fermentasi, yaitu glukosa dipecah menjadi

bioetanol dengan penambahan urea, NPK, dan ragi. Kemudian dilakukan distilasi untuk pemurnian bioetanol. Tahap terakhir adalah analisis produk, dalam hal ini bioetanol.

Tahapan Proses Pembuatan Produk

1. Proses Hidrolisis Asam

Tepung alga (*Spirulina* sp.) 75 Gram. Timbangan elektrik menimbang bahan baku. Selanjutnya disiapkan 750 ml dari masing-masing 0,1 N; 1 N dan 2 N larutan asam klorida, asam sulfat, dan asam nitrat sebagai pelarut untuk tepung alga (*Spirulina* sp.). Timbang tepung alga (*Spirulina* sp.) dengan masing-masing larutan asam klorida, asam sulfat, dan asam nitrat yang telah disiapkan sebelumnya. Setelah itu, pasang alat hidrolisis dan masukkan campuran tepung alga dengan asam klorida ke dalam labu leher tiga untuk diinkubasi pada 80°C, 90°C, dan 100°C selama 4 jam. Lalu dilakukan penggantian HCl dengan asam sulfat dan asam nitrat.

2. Peningkatan pH

Produk akhir dari tahap hidrolisis didinginkan selama 1 jam dan pH larutan glukosa terhidrolisis yang disesuaikan dengan NaOH 2 N dari pH 1,5... (teks berikut tidak terbaca dengan jelas).

3. Fermentasi

Proses fermentasi melibatkan konversi glukosa menjadi bioetanol dengan urea 0,5%; NPK 0,1% dan ragi 0,2% berdasarkan volume dari larutan glukosa. Kemudian dilakukan fermentasi selama 3 hari untuk meningkatkan hasil bioetanol. Setelah itu, kandungan alkohol harus dianalisis dengan cukup. Untuk mencapai konsentrasi alkohol yang lebih tinggi dalam bioetanol, diperlukan distilasi.

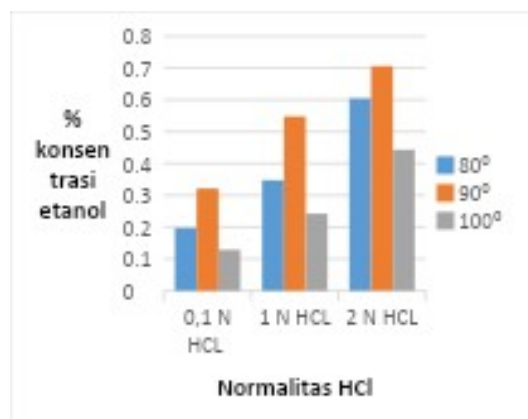
4. Distilasi

Distilasi dilakukan untuk memisahkan bioetanol dari air berlebih. Proses ini melibatkan penguapan campuran. Karena titik didih etanol adalah 78°C, dan air pada 100°C—artinya ketika Anda memanaskan campuran cair yang kaya etanol, pertama-tama etanol akan menguap keluar dari larutan. Uap ini kemudian ditangkap dan dikondensasikan kembali ke fase cair, kemudian diikuti oleh analisis alkohol.

Hasil dan pembahasan

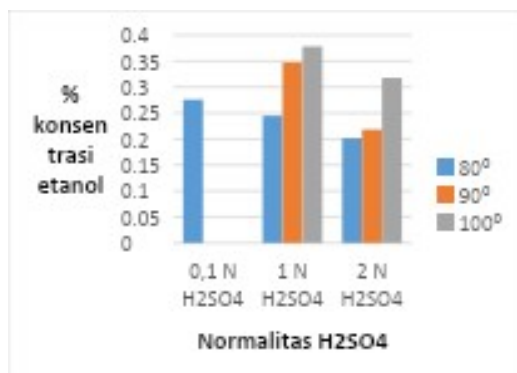
Pada proses pembuatan bioetanol dari *spirulina platensis* ini menggunakan asam khlorida, asam sulfat, asam nitrat dengan berbagai konsentrasi yaitu 0,1 N; 1 N; 2 N. dan berbagai macam suhu 80 °C, 90 °C, 100 °C.

1. Untuk tahap sesudah hidrolisa diperoleh hasil sebagai berikut :



Gambar 1. Hubungan antara normalitas HCl dengan persentase etanol pada berbagai macam suhu

Pada gambar 1, Semakin tinggi konsentrasi asam yang dimilikinya, semakin tinggi hasil distilat etanol. Hal ini mendukung hipotesis bahwa untuk hidrolisis asam (HCl), peningkatan konsentrasi akan menghasilkan kadar etanol yang lebih tinggi. dan dari penelitian ini dihasilkan kadar etanol 0,706152 % pada konsentrasi HCl 2 N, suhu 90 °C. Perbedaan suhu mempengaruhi nilai persentase etanol dan pada suhu 90 diperoleh nilai persentase etanol tertinggi.



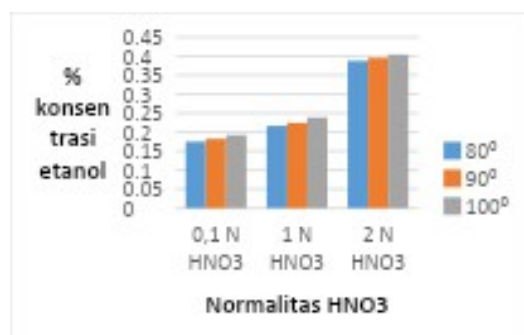
Gambar 2. Hubungan normalitas H₂SO₄ dengan persentase etanol pada berbagai macam suhu

Dari gambar 2. Berdasarkan grafik, terlihat bahwa kadar etanol yang dihasilkan dari biomassa *Spirulina platensis* dipengaruhi oleh normalitas H₂SO₄ dan suhu hidrolisis. Pada konsentrasi H₂SO₄ 0,1 N dan suhu 80°C diperoleh kadar etanol sekitar 0,28%. Ketika konsentrasi asam ditingkatkan menjadi 1 N, kadar etanol meningkat menjadi sekitar 0,25% pada suhu 80°C, 0,35% pada suhu 90°C, dan mencapai nilai tertinggi sekitar 0,38% pada suhu 100°C. Namun, pada konsentrasi H₂SO₄ 2 N terjadi penurunan kadar etanol menjadi sekitar 0,20%, 0,22%, dan 0,38% masing-masing pada suhu 80°C, 90°C, dan 100°C.

Peningkatan kadar etanol seiring kenaikan suhu hidrolisis dapat dijelaskan melalui mekanisme hidrolisis asam. Menurut Wang et al. (2024), suhu yang lebih tinggi dapat mempercepat hidrolisis ikatan glikosidik dalam polisakarida, serta menghasilkan lebih banyak gula yang dapat difermentasi [1]. Ragi menggunakan gula sederhana ini selama proses fermentasi untuk menghasilkan etanol. Dengan demikian, perlakuan pada 100 °C menghasilkan kandungan etanol yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan pada 80 dan 90 °C.

Selain suhu, konsentrasi asam juga berperan penting dalam proses hidrolisis. Pada konsentrasi H₂SO₄ 1N, proses hidrolisis berlangsung lebih efektif sehingga menghasilkan jumlah gula yang cukup tinggi untuk difermentasi menjadi etanol. Kadar etanol tertinggi diperoleh pada perlakuan H₂SO₄ 1 N pada suhu 100°C sebagaimana ditunjukkan oleh Kumari et al. (2024) yang mengonversi karbohidrat mikroalga menjadi gula fermentabel telah menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi asam hingga kondisi optimal dapat meningkatkan proses konversi ini [3]. Sebaliknya, konsentrasi asam yang tinggi memberikan kontribusi lebih besar terhadap kegagalan produksi etanol. Sebaliknya, kandungan etanol pada perlakuan dengan 2 N H₂SO₄ lebih rendah dibandingkan dengan kontrol setelah prehidrolisis pada 80°C dan 90°C; hal ini dianggap bahwa beberapa gula yang dihasilkan dari hidrolisis terdegradasi menjadi zat-zat yang menghambat fermentasi, seperti furfural dan hidroksimetilfurfural (HMF). Senyawa-senyawa ini mampu menghambat pertumbuhan ragi dan menurunkan efisiensi fermentasi, sehingga menghasilkan kadar etanol yang rendah [4].

Temuan ini menunjukkan kondisi yang hampir ideal terkait suhu dan konsentrasi asam pada biomassa *Spirulina platensis* yang dihidrolisis. Perlakuan dengan 1 N H₂SO₄ pada 100°C menghasilkan prekursor etanol paling tinggi, sebelum distilasi, yang menunjukkan bahwa kombinasi ini dapat menghasilkan gula fermentabel dalam jumlah terbesar sekaligus meminimalkan degradasi gula. Hasil seperti ini mendukung konsep bioetanol generasi ketiga bahwa efisiensi produksi bioetanol dari mikroalga sebagian besar ditentukan oleh efektivitas tahap pretreatment dan hidrolisis dalam menghasilkan gula fermentabel dari karbohidrat [1, 2].



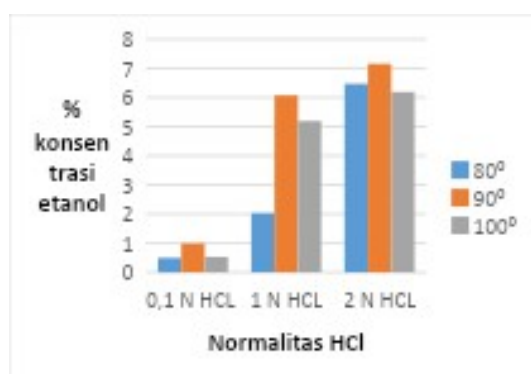
Gambar 3. Hubungan antara Normalitas HNO₃ dengan konsentrasi etanol.

Dari gambar 3. Terlihat bahwa peningkatan normalitas HNO_3 dan suhu hidrolisis cenderung meningkatkan kadar etanol yang dihasilkan dari biomassa *Spirulina platensis*. Pada konsentrasi HNO_3 0,1 N, kadar etanol yang diperoleh berkisar antara 0,18–0,19%. Ketika konsentrasi asam ditingkatkan menjadi 1 N, kadar etanol meningkat menjadi sekitar 0,22–0,24%. Peningkatan yang paling signifikan terjadi pada konsentrasi HNO_3 2 N, di mana kadar etanol mencapai sekitar 0,39–0,40%.

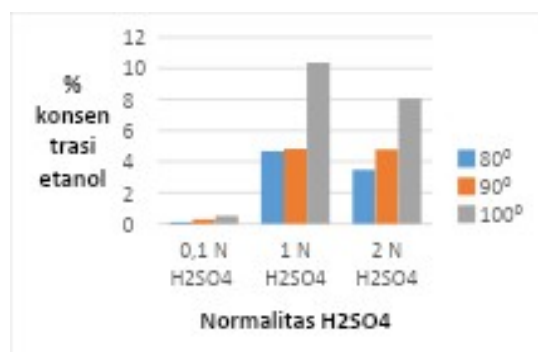
Hasil ini menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi HNO_3 , proses hidrolisis karbohidrat dalam biomassa *Spirulina platensis* semakin efektif sehingga menghasilkan lebih banyak gula fermentabel yang dapat dikonversi menjadi etanol selama fermentasi. Selain itu, peningkatan suhu dari 80°C menjadi 100°C juga memberikan pengaruh positif karena mempercepat reaksi hidrolisis dan meningkatkan pelepasan gula sederhana.

Secara umum, hasil kinerja terbaik untuk HNO_3 dicapai dengan konsentrasi 2 N dan suhu 100°C, karena pada kondisi ini etanol maksimum diproduksi. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi konsentrasi asam yang lebih tinggi dengan suhu yang lebih tinggi dapat menghasilkan efisiensi yang lebih besar dalam mengubah gula dari mikroalga menjadi bioetanol. Namun demikian, peningkatan jumlah asam perlu dioptimalkan lebih lanjut agar peningkatan konsentrasi asam tidak menyebabkan degradasi gula atau pembentukan senyawa yang menghambat fermentasi.

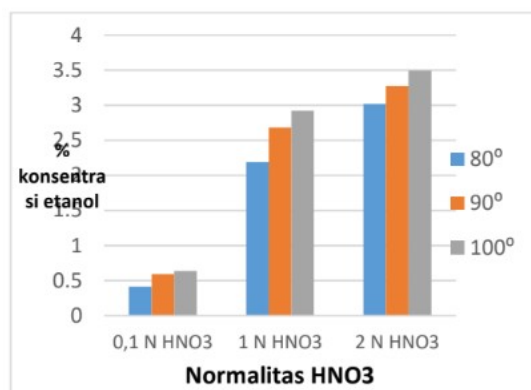
2. Untuk tahap sesudah distilasi, diperoleh hasil sebagai berikut :



Gambar 4. Hubungan antara Normalitas HCl dengan konsentrasi etanol pada berbagai suhu



Gambar 5. Hubungan antara Normalitas H2SO4 dengan konsentrasi etanol pada berbagai suhu



Gambar 6. Hubungan antara Normalitas HNO₃ dengan konsentrasi etanol pada berbagai suhu

Berdasarkan gambar 4, 5 dan 6 menunjukkan kadar etanol setelah proses distilasi, terlihat bahwa jenis asam, konsentrasi asam, dan suhu hidrolisis memberikan pengaruh yang berbeda terhadap konsentrasi etanol yang diperoleh. Secara umum, proses distilasi berhasil meningkatkan kadar etanol dibandingkan sebelum distilasi karena etanol dipisahkan dari air dan komponen lain berdasarkan perbedaan titik didihnya. Menurut Kumari et al. (2024), distilasi merupakan metode pemurnian bioetanol yang paling umum digunakan untuk meningkatkan konsentrasi etanol hasil fermentasi sehingga diperoleh produk dengan kadar yang lebih tinggi. Pada hidrolisis menggunakan HCl, kadar etanol tertinggi diperoleh pada konsentrasi 2 N dan suhu 90°C, yaitu sekitar 7,2%. Peningkatan konsentrasi HCl dari 0,1 N menjadi 2 N meningkatkan kemampuan hidrolisis dalam memecah polisakarida menjadi gula fermentabel yang kemudian dikonversi menjadi etanol selama fermentasi. Namun, pada suhu 100°C terjadi sedikit penurunan kadar etanol, yang diduga akibat degradasi sebagian gula menjadi senyawa samping yang kurang dapat difermentasi [3].

Pada hidrolisis menggunakan H₂SO₄, kadar etanol tertinggi diperoleh pada konsentrasi 1 N dan suhu 100°C, yaitu sekitar 10,3%. Hasil ini menunjukkan bahwa H₂SO₄ merupakan katalis hidrolisis yang paling efektif dibandingkan HCl dan HNO₃. Menurut Ma'mun et al. (2024), asam sulfat memiliki kemampuan yang baik dalam menghidrolisis karbohidrat mikroalga menjadi gula sederhana sehingga meningkatkan ketersediaan substrat untuk fermentasi. Akan tetapi, peningkatan konsentrasi H₂SO₄ menjadi 2 N justru menurunkan kadar etanol, yang kemungkinan disebabkan oleh pembentukan senyawa inhibitor seperti furfural dan hidroksimetilfurfural (HMF) akibat degradasi gula pada kondisi asam yang terlalu kuat [4].

Sementara itu, pada hidrolisis menggunakan HNO₃, kadar etanol meningkat secara konsisten seiring peningkatan konsentrasi asam dan suhu. Kadar etanol tertinggi diperoleh pada konsentrasi 2 N dan suhu 100°C, yaitu sekitar 3,5%. Meskipun demikian, nilai ini masih lebih rendah dibandingkan HCl dan H₂SO₄. Hasil tersebut menunjukkan bahwa HNO₃ mampu menghidrolisis biomassa *Spirulina platensis*, tetapi efektivitasnya dalam menghasilkan gula fermentabel lebih rendah dibandingkan H₂SO₄ pada kondisi penelitian ini. Secara keseluruhan, hasil setelah distilasi menunjukkan bahwa perlakuan H₂SO₄ 1 N pada suhu 100°C menghasilkan kadar etanol tertinggi sebesar sekitar 10,3%, sehingga dapat dianggap sebagai kondisi optimum dalam penelitian ini. Temuan tersebut sejalan dengan laporan Wang et al. (2024) yang menyatakan bahwa keberhasilan produksi bioetanol dari mikroalga sangat dipengaruhi oleh efektivitas proses hidrolisis dalam menghasilkan gula fermentabel serta kemampuan proses pemurnian dalam meningkatkan konsentrasi etanol [1].

Kesimpulan

Berdasarkan temuan, baik suhu maupun konsentrasi asam berpengaruh terhadap pertumbuhan biomassa *Spirulina* sp. Etanol. Penerapan katalis H₂SO₄ dan HNO₃ saat menggunakan suhu hidrolisis yang lebih tinggi cenderung menghasilkan rendemen etanol yang lebih tinggi. Sebaliknya, untuk penggunaan HCl dan HNO₃, ketika konsentrasi asam meningkat dari 0,1 N menjadi 2N, tingkat etanol yang lebih tinggi tercatat. Kandungan etanol tertinggi selama proses fermentasi dicapai dengan menggunakan 2N H₂SO₄ pada suhu 100°C, yang menentukan kondisi optimum untuk menghasilkan etanol sebelum proses distilasi dengan nilai rata-rata sebesar 0,317695%. Etanol tertinggi saat didistilasi sebesar 8,0613% terjadi dengan (2N H₂SO₄) sebagai katalis dan suhu 100°C.

Daftar Pustaka

- [1] Wang, M., Ye, X., Bi, H., & Shen, Z. (2024). "Microalgae biofuels: illuminating the path to a sustainable future amidst challenges and opportunities". *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 17(10), 1–32. Springer Nature. DOI: 10.1186/s13068-024-02461-0.

- [2] Yu, B.S., Pyo, S., Lee, J., et al. (2024). "Microalgae: a multifaceted catalyst for sustainable solutions in renewable energy, food security, and environmental management". *Microbial Cell Factories*, 23(308), 1–35. Springer Nature. DOI: 10.1186/s12934-024-02588-7.
- [3] Kumari, A., Chakraborty, S., Sirotiya, V., et al. (2024). "A Review on Economical and Impact of Bioethanol Production from Microalgae: Current Scenario and Future Prospect". *Industrial Crops and Products*, 222, 119927. Elsevier.
- [4] Rony, Z.I., Mofijur, M., Hasan, M.M., et al. (2023). "Conversion of Algal Biomass into Renewable Fuel: A Mini Review of Chemical and Biochemical Processes". *Frontiers in Energy Research*, 11, 1124302.
- [5] Sarkar, N., Ghosh, S.K., Bannerjee, S., & Aikat, K. (2023). *Bioethanol Production from Agricultural Wastes: An Overview*. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- [6] Ma'mun, S., Prasetyo, M.W., & Anugrah, A.R. (2024). "Bioethanol Production from *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) by Microwave-Assisted Acid Hydrolysis Pretreatment". *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 13(1), 1–9.
- [7] Susanti, et.al., (2011), "Pembuatan bioetanol Dari Kulit Nanas Melalui hidrolisis Dengan asam, Ekuilibrium". Vol.10(2), 81-86.
- [8] Taherzadeh, M.J. and Karimi, K.,(2007), "Acid-Based Hydrolysis Processes for Ethanol from Lignocelulosic Materials ; A Review", *Bioresources* 2(3),pp. 476
- [9] A.M.Sari & H.H. Santosa,(2013). "Pembuatan Bioetanol dari Limbah Buah Stroberi (Buah Afkir), Konversi". Vol 2(2), 9-19.
- [10] Idris, D. D., Salim, M., & Mardiah, E. (2012). "Pembuatan bioetanol dari ampas sagu dengan proses hidrolisis asam dan menggunakan *saccharomyces cerevisiae*". *Jurnal Kimia Unand*, 1(1), 34-39.
- [11] Lingga, P. dan Marsono. (2007). "Petunjuk Penggunaan Pupuk. Penebar Swadaya". Jakarta. hal. 8 – 38. Utrecht Universiteit Copernicus Institute Department of Science, Technology and Society.
- [12] International Energy Agency (IEA). (2024). "Renewables 2024: Analysis and Forecast to 2030 ". Paris: International Energy Agency.