

RANCANG BANGUN DAN UJI KINERJA REAKTOR HIDROLISIS BERPENGADUK DENGAN PENCACAH TERINTEGRASI UNTUK PRODUKSI GLUKOSA DARI KULIT NANAS

Kristanti Oktripani Lubis¹, Hafizah Khairani Jarendi¹, Regna Tri Jayanti¹,
Khairul Akli^{1*}, Ida Hasmita²

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Bioproses Energi Terbarukan, Politeknik ATI Padang, Jl. Bungo Pasang, Tabing, Padang, 25171

²Program Studi Teknik Kimia, Universitas Serambi Mekkah, Jl. Tgk Imuem Lueng Bata, Meuraxa, banda Aceh, 23245

*email correspondence: khairul.akli@poltekatipdg.ac.id

Abstrak

Permintaan energi terbarukan mendorong eksplorasi biomassa lignoselulosa, seperti kulit nanas, sebagai bahan baku bioetanol. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengevaluasi kinerja reaktor hidrolisis berpengaduk dengan sistem pencacah terintegrasi untuk mengoptimalkan konversi kulit nanas menjadi glukosa. Reaktor berkapasitas 5 liter ini menggunakan impeler Pitched Blade Turbine (PBT) yang dimodifikasi dengan pisau pencacah pada ujung bilah untuk memungkinkan pengecilan ukuran partikel secara in situ. Hidrolisis dilakukan menggunakan H₂SO₄ 1% pada suhu 100°C selama 120 menit dengan kecepatan pengadukan 1.400 rpm. Hasil menunjukkan peningkatan signifikan pada kadar glukosa (3,4% menjadi 8,88%), nilai Brix (3,5°Bx menjadi 9°Bx), densitas (0,9998 g/mL menjadi 1,03 g/mL), dan viskositas (1,14 cP menjadi 1,85 cP). Ukuran partikel berkurang drastis dari ±1,03 cm menjadi ±0,02 cm. Integrasi fungsi pencacahan terbukti efektif meningkatkan luas permukaan kontak dan homogenitas reaksi, menjadikannya desain potensial untuk produksi bioetanol berkelanjutan.

Kata kunci: reaktor hidrolisis, sistem pencacah, kulit nanas, glukosa, biomassa lignoselulosa

DESIGN AND PERFORMANCE TESTING OF A STIRRED HYDROLYSIS REACTOR WITH AN INTEGRATED SHREDDER SYSTEM TO PRODUCE GLUCOSE FROM PINEAPPLE PEEL

Abstract

The increasing demand for renewable energy has intensified research into converting lignocellulosic biomass into bioethanol. This study aims to design, construct, and evaluate the performance of a stirred hydrolysis reactor equipped with an integrated shredder system to optimize the conversion of pineapple peel into glucose. The 5-liter stainless steel reactor features a modified Pitched Blade Turbine (PBT) impeller with shredder blades attached to the blade tips to facilitate in situ particle size reduction. Hydrolysis was conducted using 1% sulfuric acid (H₂SO₄) at 100°C for 120 minutes with a stirring speed of 1,400 rpm. The

results demonstrated a significant increase in glucose concentration from 3.4% to approximately 9%, Brix value from 3.5°Bx to 9°Bx, density from 0.9998 g/mL to 1.03 g/mL, and viscosity from 1.14 cP to 1.85 cP. Furthermore, the particle size of the pineapple peel was drastically reduced from ± 1.03 cm to ± 0.02 cm. The integration of the shredding system proved effective in expanding the contact surface area and enhancing mass transfer and reaction homogeneity. The developed reactor performs efficiently and holds significant potential for application in sustainable bioethanol production.

Keywords: *hydrolysis reactor, shredder system, lignocellulosic biomass, pineapple peel, glucose.*

PENDAHULUAN

Krisis energi fosil, fluktuasi harga, serta meningkatnya tuntutan pengurangan emisi gas rumah kaca mendorong pengembangan energi terbarukan yang berkelanjutan. Dalam konteks ini, peningkatan permintaan energi terbarukan telah mendorong penelitian ekstensif mengenai konversi biomassa lignoselulosa menjadi bioetanol, menjadikannya fokus utama dalam upaya keberlanjutan energi (Saini et al., 2022). Bioetanol merupakan salah satu kandidat bahan bakar alternatif karena dapat diproduksi dari sumber daya hayati dan berpotensi menurunkan jejak karbon dibandingkan bahan bakar konvensional.

Dalam beberapa tahun terakhir, biomassa lignoselulosa banyak diprioritaskan sebagai bahan baku bioetanol karena ketersediaannya melimpah, berbiaya relatif rendah, dan tidak bersaing langsung dengan bahan pangan (Toor et al., 2020). Karakteristik lignoselulosa sebagai biomassa sangat menjanjikan sebagai sumber energi terbarukan karena ketersediaannya yang melimpah dan sifatnya yang berkelanjutan (Kurniati et al., 2021). Biomassa lignoselulosa umumnya tersusun atas selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Selulosa/hemiselulosa dapat diuraikan menjadi gula fermentable, terutama

glukosa yang menjadi substrat utama dalam fermentasi bioetanol. Namun, lignin membentuk struktur pelindung dan berikatan dengan karbohidrat sehingga menurunkan aksesibilitas selulosa, membatasi perpindahan massa, dan pada akhirnya menghambat hidrolisis (Zoghlami & Paës, 2019). Karena itu, peningkatan efektivitas tahap hidrolisis, baik dari sisi kinetika reaksi maupun kontak katalis–substrat, menjadi kunci untuk meningkatkan rendemen gula dan kelayakan proses.

Salah satu sumber lignoselulosa yang potensial untuk diubah menjadi bioetanol melalui serangkaian proses biokonversi adalah limbah agroindustri kulit nanas (Chatkaew et al., 2021; Kurniati et al., 2021). Kulit nanas dihasilkan dalam jumlah besar, kandungan karbohidratnya relatif tinggi, dan pemanfaatannya masih terbatas sehingga berpotensi menimbulkan beban lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Di Indonesia, produksi nanas yang mencapai 2,89 juta ton pada tahun 2021 menghasilkan limbah kulit nanas dalam jumlah besar yang belum dimanfaatkan secara optimal (Kahar et al., 2025). Pemanfaatan limbah ini penting untuk mengurangi pencemaran lingkungan dan meningkatkan nilai ekonomisnya (Masmur et al., 2022).

Potensi kulit nanas sebagai bahan baku bioetanol ini didukung oleh

kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang signifikan, yang dapat dikonversi menjadi gula reduksi. Kandungan gula non-reduksi sebesar 8,8% dan total gula sebesar 9,75% per 100 gram substrat pada kulit nanas semakin memperkuat potensinya sebagai bahan baku bioetanol (Kurniati et al., 2021). Berdasarkan data Badan Pusat Statistik, produksi nanas di Sumatera Barat mencapai 2.847,58 ton pada tahun 2024 Dengan asumsi fraksi limbah kulit dari total buah, potensi limbah kulit nanas diperkirakan berkisar 854–1.139 ton/tahun (Badan Pusat Statistik, 2024). Ketersediaan bahan baku lokal ini menjadikan kulit nanas menarik untuk dikaji sebagai sumber glukosa hasil hidrolisis, yang selanjutnya dapat diarahkan sebagai bahan baku produksi bioetanol.

Proses konversi lignoselulosa menjadi gula reduksi umumnya diawali dengan tahap *pretreatment* untuk memecah struktur kompleks biomassa, diikuti hidrolisis untuk menguraikan polisakarida menjadi monosakarida terfermentasi (Muharja et al., 2023). Meskipun demikian, struktur kompleks lignoselulosa kulit nanas, yang menyerupai biomassa seperti sabut kelapa dengan kandungan lignin yang tinggi, memerlukan perlakuan awal yang efisien untuk memfasilitasi degradasi menjadi gula sederhana (Wijaya et al., 2025). Pendekatan ini krusial untuk meningkatkan aksesibilitas enzimatik atau kimiawi terhadap polisakarida intrinsik, sehingga memaksimalkan rendemen glukosa yang akan digunakan dalam proses fermentasi menjadi bioetanol (Méndez-Durazno et al., 2025).

Dalam konversi lignoselulosa menjadi gula, hidrolisis asam, khususnya hidrolisis asam encer, masih banyak digunakan karena relatif sederhana, tidak memerlukan enzim, dan dapat dilakukan pada kondisi operasi moderat tertentu. Meskipun demikian, performanya sangat dipengaruhi oleh konsentrasi asam,

temperatur, waktu reaksi, dan karakteristik fisik bahan. (Adeoye et al., 2019) melaporkan rendemen 72,3% dihasilkan dengan menggunakan H_2SO_4 1,5% pada suhu $80^\circ C$, sedangkan (Susanti, 2013) melaporkan hasil 4,26% dihasilkan dengan menggunakan HCl 0,1 N pada $100^\circ C$ selama 180 menit. Perbedaan yang kontras ini mengindikasikan bahwa selain kondisi kimia, faktor rekayasa proses, terutama pencampuran dan ukuran partikel, memegang peran penting dalam menentukan tingkat konversi dan hasil glukosa.

Secara teknis, hidrolisis biomassa berbentuk *slurry* menghadapi dua kendala utama: (1) ukuran partikel yang relatif besar dan tidak seragam sehingga luas permukaan kontak terbatas, dan (2) pencampuran yang tidak homogen akibat peningkatan viskositas, kecenderungan pengendapan, serta terbentuknya zona mati (*dead zone*). Pengecilan ukuran partikel terbukti meningkatkan luas permukaan dan memperbaiki aksesibilitas selulosa terhadap katalis, sehingga dapat meningkatkan laju dan rendemen hidrolisis (Hoppert & Einfalt, 2021). Di sisi lain, pemilihan impeler menentukan pola aliran dan efisiensi suspensi. Impeler *Pitched Blade Turbine* (PBT) menghasilkan komponen aliran aksial–radial yang efektif untuk menjaga partikel tersuspensi pada sistem *slurry*/viskos sehingga relevan untuk proses hidrolisis biomassa (Taghavi & Moghaddas, 2020). Namun, pada banyak penelitian dan praktik skala laboratorium, pengecilan ukuran partikel dan pengadukan masih dilakukan sebagai tahapan terpisah: biomassa dicacah/digiling terlebih dahulu (*pre-processing*), kemudian baru dihidrolisis di dalam reaktor berpengaduk. Pendekatan ini menambah waktu penanganan, membutuhkan peralatan tambahan, serta berpotensi menimbulkan variasi ukuran partikel selama transfer/penyimpanan. Selain itu, selama reaksi berlangsung partikel dapat

mengalami aglomerasi atau perubahan ukuran efektif akibat *swelling* dan degradasi, yang tidak tertangani bila pengecilan ukuran hanya dilakukan di awal. Dengan demikian, terdapat kebutuhan akan rancangan reaktor yang mampu mempertahankan homogenitas *slurry* sekaligus melakukan pengecilan ukuran partikel secara *in situ* agar kontak katalis–substrat tetap optimal sepanjang proses.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini mengusulkan kebaruan berupa integrasi sistem pencacah mekanis ke dalam impeler *Pitched Blade Turbine* (PBT) pada reaktor hidrolisis. Kebaruan (*novelty*) penelitian ditegaskan pada dua aspek: (i) penggabungan fungsi pengadukan dan pencacahan dalam satu unit impeler untuk menghasilkan pencampuran lebih homogen sekaligus pengecilan ukuran partikel secara simultan selama hidrolisis berlangsung, dan (ii) evaluasi performa reaktor tidak hanya pada parameter kimia (kadar glukosa), tetapi juga pada parameter fisik-proses ($^{\circ}$ Brix, densitas, viskositas, serta distribusi/ukuran partikel) sebagai indikator langsung efektivitas pencampuran dan pencacahan. Integrasi ini diharapkan dapat meningkatkan transfer massa, mengurangi pengendapan, memperkecil variasi ukuran partikel selama operasi, dan pada akhirnya meningkatkan kinerja hidrolisis kulit nanas sebagai bahan baku gula fermentabel untuk produksi bioetanol.

Tujuan penelitian ini adalah untuk: (1) merancang dan membangun reaktor hidrolisis berpengaduk dengan sistem pencacah terintegrasi, dan (2) menguji performa reaktor terhadap kadar glukosa, nilai $^{\circ}$ Brix, densitas, viskositas, serta perubahan ukuran partikel kulit nanas setelah proses hidrolisis.

METODE PENELITIAN

Bagian ini dibagi menjadi tahap persiapan bahan, spesifikasi rancang bangun reaktor, dan prosedur operasional.

Persiapan Bahan

Substrat utama adalah kulit nanas segar yang dikeringkan. Larutan asam sulfat (H_2SO_4) 1% v/v digunakan sebagai katalis hidrolisis, sementara natrium hidroksida (NaOH) 1 N digunakan untuk proses netralisasi filtrat pasca-reaksi dan akuades sebagai pelarut.

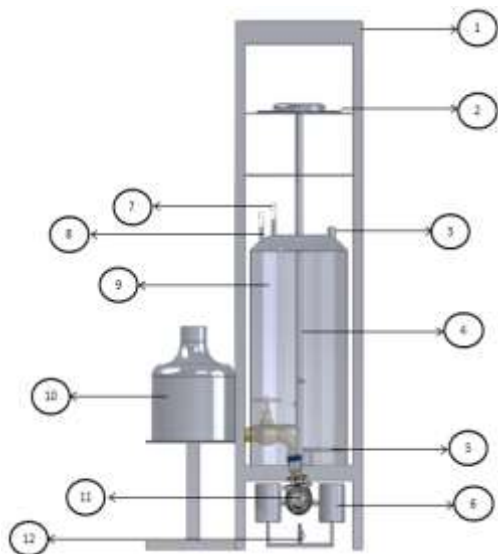
Desain Reaktor Hidrolisis

Reaktor dirancang dengan kapasitas total 5 liter menggunakan material *stainless steel* 304 untuk menjamin ketahanan terhadap korosi asam dan suhu tinggi. Komponen utama reaktor meliputi:

- Dimensi tangki: memiliki diameter 15 cm dan tinggi 30 cm.
- Sistem pengaduk: menggunakan tipe *Pitched Blade Turbine* (PBT) dengan diameter (D_a) 7,36 cm.
- Integrasi pencacah: modifikasi dilakukan dengan menambahkan pisau pencacah pada ujung bilah impeler untuk memungkinkan degradasi fisik secara simultan.
- Sistem pemanas: menggunakan tungku dengan bahan bakar oli bekas yang dilengkapi dengan *blower* untuk distribusi panas.

Untuk memastikan pola aliran yang optimal, rancangan reaktor mengikuti rasio standar sebagai berikut:

- Rasio diameter tangki terhadap diameter impeler (D_i/D_a) = 2.
- Rasio lebar bilah terhadap diameter impeler (W/D_a) = 1/5.
- Rasio panjang bilah terhadap diameter impeler (L/D_a) = 1/4.
- Rasio jarak impeler dari dasar tangki terhadap diameter tangki (C/D_i) = 1/3.



Gambar 1. Desain Reaktor Hidrolisis Berpengaduk dengan Sistem Pencacah

Keterangan gambar:

1. Penyangga reaktor
2. Dinamo/motor pengaduk
3. *Inlet* umpan
4. Batang pengaduk
5. *Impeller Pitched Blade Turbine*
6. Pemanas (Kompur oli bekas)
7. *Pressure gauge*
8. *Temperature gauge*
9. Reaktor
10. Wadah oli bekas
11. *Outlet* produk
12. *Blower*

Prosedur Hidrolisis

Proses hidrolisis dilakukan dengan mencampurkan 1.250 gram kulit nenas kering ke dalam 2.500 gram akuades yang mengandung 2 gram H_2SO_4 (1%). Tahapan operasionalnya sebagai berikut:

1. Campuran dipanaskan hingga mencapai suhu konstan $100^\circ C$.
2. Pengadukan dilakukan secara kontinu menggunakan motor penggerak pada kecepatan 1.400 rpm.
3. Pengambilan sampel dilakukan pada interval waktu 0, 30, 60, 90, dan 120 menit untuk memantau progres reaksi.
4. Filtrat hasil hidrolisis dinetralisasi menggunakan NaOH (1 N) hingga mencapai rentang pH 6–7 sebelum dilakukan analisis lanjutan.

Metode Analisis

Kinerja reaktor dievaluasi berdasarkan parameter kimia dan fisik sebagai berikut:

1. Kadar glukosa dan nilai Brix: diukur menggunakan refraktometer.
2. Densitas: ditentukan menggunakan metode piknometer.
3. Viskositas: dianalisis dengan viskometer Ostwald berdasarkan metode aliran waktu.
4. Ukuran partikel: diukur menggunakan jangka sorong pada sampel padatan yang telah dikeringkan untuk mengetahui efektivitas sistem pencacah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaluasi Kinerja Mekanis Reaktor Hidrolisis

Reaktor yang dirancang berhasil mengintegrasikan dua fungsi utama, yaitu pencampuran dan penghancuran biomassa secara simultan dalam satu unit operasi. Penggunaan material *stainless steel* 304 terbukti tepat karena memiliki ketahanan tinggi terhadap korosi lingkungan asam serta kekuatan mekanik yang memadai. Dengan kapasitas 5 liter, reaktor menunjukkan stabilitas operasional yang baik sepanjang percobaan tanpa adanya kegagalan mekanis.



Gambar 2. Hasil Rancang Bangun Reaktor Hidrolisis

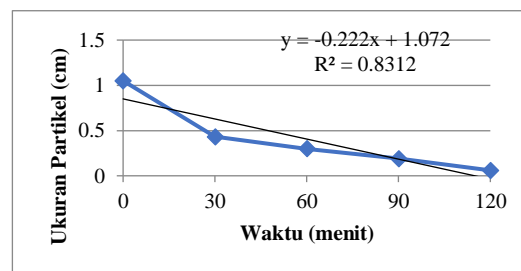
Inovasi utama terletak pada penggunaan impeler *Pitched Blade Turbine* (PBT) berdiameter 7,36 cm yang dimodifikasi dengan pisau pencacah pada ujung bilahnya. Beroperasi pada kecepatan 1.400 rpm, sistem ini menghasilkan pola aliran campuran aksial dan radial yang sangat efektif untuk pengaturan *slurry* dengan viskositas sedang hingga tinggi. Dibandingkan dengan sistem konvensional, integrasi ini meningkatkan efisiensi hidrolisis karena partikel biomassa dihancurkan secara kontinu, sehingga memperluas area kontak antara asam dan substrat.



Gambar 3. Bilah Pengaduk dengan Sistem Pencacah

Efektivitas Pengecilan Ukuran Partikel secara *In Situ*

Hasil pengukuran menunjukkan pengurangan ukuran partikel yang signifikan seiring bertambahnya waktu reaksi seperti yang ditampilkan pada Gambar 4. Ukuran partikel kulit nanas menurun drastis dari $\pm 1,05$ cm menjadi $\pm 0,07$ cm setelah 120 menit. Penurunan ukuran paling cepat terjadi pada interval 0–60 menit pertama karena struktur serat awal masih kasar dan mudah terurai oleh gaya potong. Laju pengecilan melambat setelah struktur serat menjadi lebih halus.



Gambar 4. Pengaruh waktu hidrolisis terhadap ukuran partikel kulit nanas

Pisau pencacah pada daun impeler menghasilkan gaya geser dan tumbukan yang efektif untuk mendisintegrasi biomassa. Ukuran partikel yang lebih halus membuat larutan asam lebih mudah berkontak dengan lignoselulosa, mempercepat proses pemutusan ikatan kimia, dan meningkatkan jumlah glukosa yang terbentuk. Hal ini sejalan dengan prinsip yang dijelaskan oleh (Li et al., 2016), bahwa pengecilan ukuran partikel lignoselulosa meningkatkan luas permukaan reaksi dan memperbesar *yield* glukosa. Keunggulan sistem ini adalah tidak memerlukan tahap *pretreatment* terpisah karena pencacahan langsung dilakukan di dalam reaktor.

Integrasi sistem pencacah ke dalam reaktor hidrolisis bertujuan mengatasi kendala hambatan perpindahan massa pada biomassa berbentuk *slurry*. Untuk memvalidasi keunggulan sistem pencacah terintegrasi, dilakukan perbandingan dengan hasil penelitian hidrolisis kulit nanas tanpa sistem penghancur internal yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Kinerja Reaktor Hidrolisis Terintegrasi Pencacah vs Konvensional

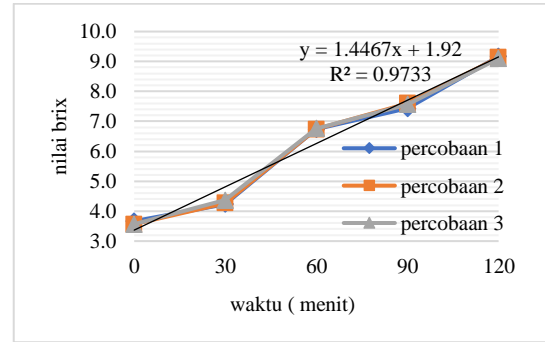
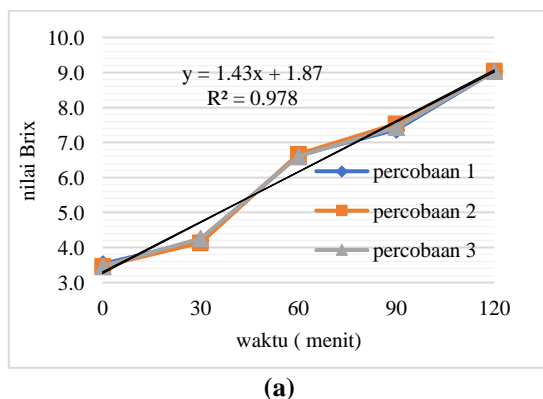
Parameter	Reaktor Terintegrasi Pencacah	Reaktor Konvensional (Susanti, 2013)
Sistem Pengadukan	<i>Pitch Blade Turbine</i> + Pisau Pencacah	Pengadukan standar (tanpa pencacah)
Katalis	H ₂ SO ₄ 1%	HCl 0,1 N

Waktu Reaksi	120 menit	180 menit
Kadar Glukosa Maksimum	±9,0%	4,26%
Pengecilan Ukuran Partikel	Signifikan (1,05 cm ke 0,07 cm)	Terbatas (hanya di awal proses)

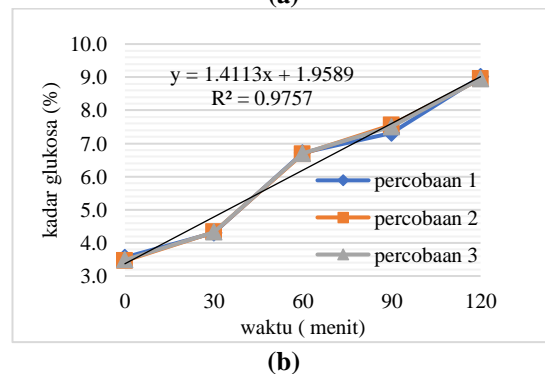
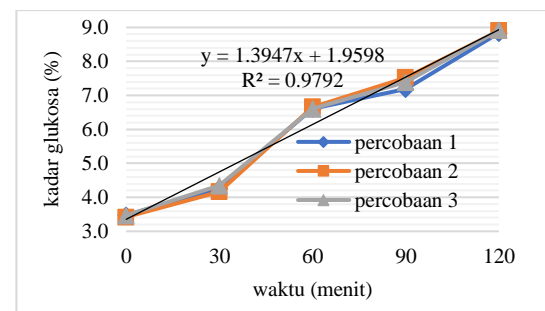
Analisis Kadar Glukosa dan Nilai Brix

Pada Gambar 5 dan 6 menunjukkan peningkatan kadar glukosa dan nilai Brix yang linear selama proses hidrolisis ($R^2 > 0,97$). Pada menit ke-0, kadar glukosa tercatat 3,47% dengan nilai Brix 3,5°Bx. Setelah 120 menit, kadar glukosa meningkat menjadi 8,88% dan nilai Brix mencapai 9,0°Bx. Peningkatan ini bersifat linier dengan nilai koefisien determinasi (R^2) di atas 0,97, yang menandakan adanya korelasi kuat antara waktu reaksi dan jumlah glukosa yang terbentuk.

Hasil tersebut membuktikan bahwa reaktor dengan sistem pencacah pada impeler mampu meningkatkan efisiensi konversi biomassa menjadi glukosa dibandingkan sistem tanpa pencacah. Mekanisme utama peningkatan ini terjadi karena proses pengecilan ukuran partikel secara simultan selama reaksi hidrolisis, yang memperluas area kontak antara substrat dan larutan asam, sehingga transfer massa menjadi lebih cepat dan efektif.



Gambar 5. Pengaruh waktu hidrolisis terhadap nilai Brix (a) sebelum ditambahkan NaOH; dan (b) setelah ditambahkan NaOH



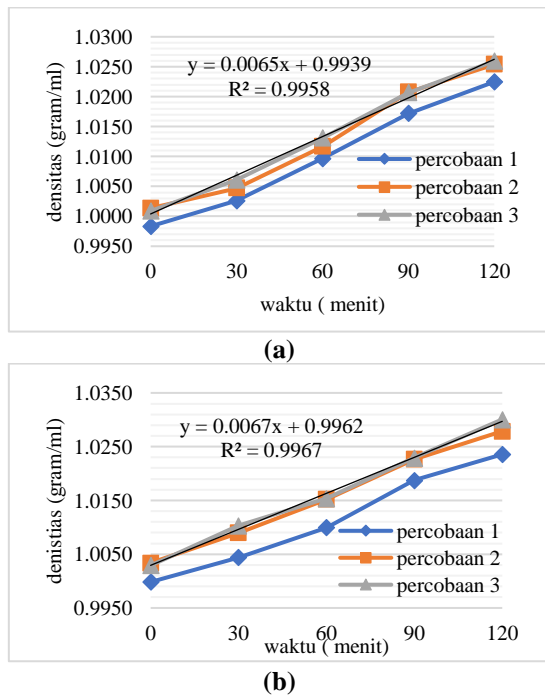
Gambar 6. Pengaruh waktu hidrolisis terhadap kadar glukosa (a) sebelum ditambahkan NaOH; dan (b) setelah ditambahkan NaOH

Sementara itu, penelitian (Susanti, 2013) menggunakan larutan HCl dengan variasi konsentrasi (0,1 N; 0,2 N; 0,3 N) pada suhu 100 °C untuk proses hidrolisis kulit nanas tanpa sistem pencacah. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pada kondisi optimum (HCl 0,1 N; 100 °C; 180 menit), kadar glukosa maksimum yang diperoleh hanya mencapai 4,26%. Perbandingan ini memperlihatkan bahwa sistem reaktor dengan pencacah yang dikembangkan pada penelitian ini mampu menggandakan kadar glukosa hingga

sekitar 9%, sehingga menunjukkan peningkatan efisiensi konversi lebih dari dua kali lipat dibandingkan proses tanpa sistem penghancur internal.

Karakteristik Fisik Proses (Densitas dan Viskositas)

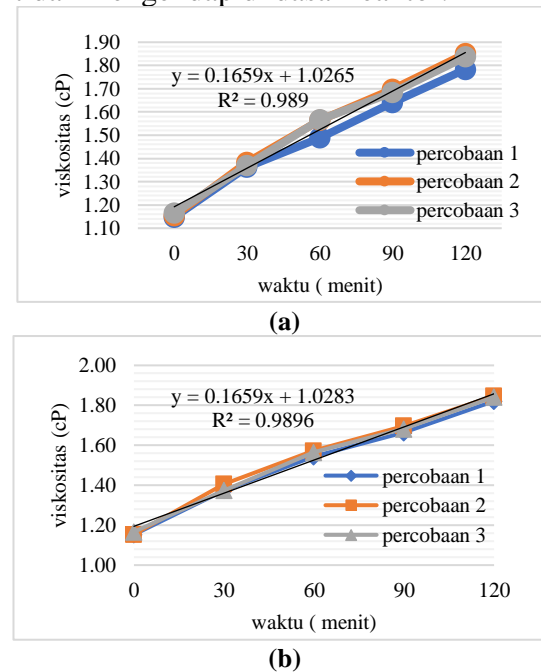
Perubahan parameter fisik larutan mengonfirmasi akumulasi senyawa terlarut hasil pemecahan selulosa. Pada Gambar 7, perubahan nilai densitas dapat dilihat terjadi peningkatan dari 0,9983 g/mL menjadi 1,0225 g/mL ($R^2 = 0,9958$). Hal ini menunjukkan penambahan zat terlarut (terutama glukosa) yang stabil seiring waktu.



Gambar 7. Pengaruh waktu hidrolisis terhadap densitas produk (a) sebelum ditambahkan NaOH; dan (b) setelah ditambahkan NaOH

Hasil ini sejalan dengan penelitian (Hoppert & Einfalt, 2021) yang menjelaskan bahwa pengecilan ukuran partikel dapat meningkatkan jumlah padatan terlarut karena proses tersebut mempercepat pembentukan gula hasil hidrolisis. Dalam penelitian ini, peningkatan densitas terlihat lebih cepat karena adanya sistem pencacah yang

bekerja terus-menerus, membantu mempercepat penghancuran biomassa sehingga glukosa lebih mudah terbentuk dan terlarut dalam larutan. Selain itu, perubahan densitas yang stabil selama proses menunjukkan bahwa campuran dalam reaktor tetap homogen. Artinya, sistem pencacah tidak hanya berperan dalam mempercepat reaksi, tetapi juga membantu menjaga agar partikel biomassa tidak mengendap di dasar reaktor.



Gambar 8. Pengaruh waktu hidrolisis terhadap viskositas produk (a) sebelum ditambahkan NaOH; dan (b) setelah ditambahkan NaOH

Nilai viskositas larutan kulit nanas meningkat dari 1,14 cP menjadi 1,78 cP selama proses hidrolisis berlangsung (Gambar 8). Kenaikan ini menunjukkan bahwa jumlah zat terlarut dalam larutan semakin banyak seiring waktu reaksi, yang sebagian besar berasal dari hasil pemecahan molekul selulosa menjadi gula sederhana. Nilai koefisien determinasi yang tinggi ($R^2 = 0,9921$) menunjukkan bahwa peningkatan viskositas berhubungan dengan lamanya waktu reaksi.

Hal ini terjadi karena sistem pencacah pada *impeller* membantu memperkecil ukuran partikel biomassa secara terus-

menerus, sehingga permukaan partikel yang bereaksi dengan larutan asam menjadi lebih luas. Akibatnya, proses hidrolisis berlangsung lebih merata dan jumlah padatan terlarut dalam cairan meningkat, yang memengaruhi nilai viskositas.

Hasil ini menunjukkan bahwa sistem pencacah tidak hanya berperan dalam mempercepat reaksi kimia, tetapi juga menjaga agar campuran tetap homogen tanpa ada endapan padatan di dasar reaktor. Kondisi ini membuat pergerakan fluida tetap stabil dan efisien selama proses berlangsung. Dengan demikian, rancangan reaktor berpengaduk dengan pencacah terintegrasi mampu menciptakan kondisi hidrolisis yang lebih optimal.

KESIMPULAN

Adapun kesimpulan dari penelitian ini yaitu.

1. Reaktor hidrolisis berpengaduk tipe *pitched blade turbine* yang terintegrasi dengan sistem pencacah berhasil dirancang dan diuji sesuai perhitungan. Reaktor ini efektif mengonversi biomassa lignoselulosa dari kulit nanas menjadi glukosa, dengan hasil yang konsisten dan koefisien determinasi (R^2) di atas 0,97 antara waktu hidrolisis dengan kadar glukosa serta nilai Brix.
2. Variasi waktu hidrolisis (0–120 menit) berpengaruh signifikan terhadap kinerja reaktor. Peningkatan waktu proses menyebabkan kadar glukosa naik dari 3,4% menjadi sekitar 9,0%, nilai Brix dari 3,5 menjadi $\pm 9,0$, densitas dari 0,9998 g/mL menjadi 1,03 g/mL, dan viskositas dari 1,14 cP menjadi 1,85 cP. Hal ini menunjukkan peningkatan efisiensi konversi biomassa terhadap glukosa.
3. Sistem pencacah yang terintegrasi dengan pengaduk terbukti efektif memperkecil ukuran partikel kulit nanas dari $\pm 1,05$ cm menjadi $\pm 0,07$ cm dalam waktu 120 menit. Mekanisme gaya potong dan geser pada sistem pencacah mempercepat keterbukaan

struktur lignoselulosa, memperluas area kontak dengan larutan asam, serta menjaga homogenitas *slurry* selama reaksi berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Adeoye, M., Abdulsalami, I., Tijani, O., Adeniji, R., & Adeyemo, J. (2019). Kinetics and Thermodynamics Properties of Glucose Production from Pineapple and Pawpaw Peels by Acid Hydrolysis. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 44, 479–488.
- Chatkaew, C., Panakkal, E. J., Rodiahwati, W., Kirdponpattara, S., Chuetor, S., Sriariyanun, M., & Cheenkachorn, K. (2021). Effect of sodium hydroxide pretreatment on released sugar yields from pomelo peels for biofuel production. *E3S Web of Conferences*, 302, 02015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130202015>
- Hoppert, L., & Einfalt, D. (2021). Impact of particle size reduction on high gravity enzymatic hydrolysis of steam-exploded wheat straw. *SN Applied Sciences*, 3(12), 878. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04870-4>
- Kahar, S. T., M. Si., Dr., A., Fathoni, R., Ardiah, R., & Mulyani, N. (2025). Proses Pembuatan dan uji Karakteristik Bioetanol dari Kulit Nanas (*Ananas comosus*). *Jurnal Chemurgy*, 9(1), 58. <https://doi.org/10.30872/cmng.v9i1.16350>
- Kurniati, Y., Khasanah, I. E., & Firdaus, K. (2021). Kajian Pembuatan Bioetanol dari Limbah Kulit Nanas (*Ananas comosus*. L). *Jurnal Teknik Kimia USU*, 10(2), 95–101.
- Li, J., Zhou, P., Lv, X., Xiao, W., Gong, Y., Lin, J., & Liu, Z. (2016). Use of sugarcane bagasse with different particle sizes to determine the

- relationship between physical properties and enzymatic hydrolysis. *BioResources*, 11(2), 4745–4757. <https://doi.org/10.15376/biores.11.2.4745-4757>
- Masmur, I., Clairine, Rajagukguk, M. E., Sari, T. P., & Sitinjak, E. M. (2022). Ethanol Production Comparison from Agricultural Waste of Cellulose Enzyme Source within Hydrolysis HCl and Cellulose Enzyme. *Indonesian Journal of Chemical Science and Technology*, 5(2), 102–105.
- Méndez-Durazno, C., Robles Carrillo, N. M., Ramírez, V., Rodriguez-Narváez, O. M., Cisneros-Pérez, P. A., Chulde, D., Debut, A., & Espinoza-Montero, P. J. (2025). Effect of Pretreatment on the Structure and Enzymatic Hydrolysis of Pineapple Waste Biomass in Hydrothermal Deconstruction. *Recycling*, 10(6), 198. <https://doi.org/10.3390/recycling10060198>
- Muharja, M., Fadilah, S. N., Fadhilah, N., Darmayanti, R. F., Widjaja, A., & Khamil, A. I. (2023). Analisis Tekno-Ekonomi Produksi Gula Reduksi dari Biomassa Ampas Tebu Melalui Hidrolisis Air Subkritis. *Rekayasa*, 16(2), 107–116. <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v16i2.17243>
- Saini, R., Chen, C.-W., Patel, A. K., Saini, J. K., Dong, C.-D., & Singhania, R. R. (2022). Valorization of Pineapple Leaves Waste for the Production of Bioethanol. *Bioengineering*, 9(10), 557. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9100557>
- Susanti, A. D. (2013). Pembuatan Bioetanol dari Kulit Nanas Melalui Hidrolisis dengan Asam. *EKUILIBRIUM*, 12(1), 11–16. <https://doi.org/10.20961/ekuilibrium.v12i1.2170>
- Badan Pusat Statistik. (2024). *Tabel Produksi Tanaman Buah-Buahan*. <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/NjIjMg%3D%3D/produksi-tanaman-buah-buahan.html>
- Taghavi, M., & Moghaddas, J. (2020). Flow characteristics of the Rushton and pitched blade turbines in turbulent and laminar mixing. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 0(0). <https://doi.org/10.1515/ijcre-2019-0215>
- Toor, M., Kumar, S. S., Malyan, S. K., Bishnoi, N. R., Mathimani, T., Rajendran, K., & Pugazhendhi, A. (2020). An overview on bioethanol production from lignocellulosic feedstocks. *Chemosphere*, 242, 125080. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125080>
- Wijaya, C., Sangadji, N. L., Muharja, M., Widjaja, T., Riadi, L., & Widjaja, A. (2025). An integrated green fractionation of coconut husk: Hydrothermal and deep eutectic solvent pretreatment for enhanced sugar and lignin production. *Bioresource Technology Reports*, 29, 102078. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102078>
- Zoghalmi, A., & Paës, G. (2019). Lignocellulosic Biomass: Understanding Recalcitrance and Predicting Hydrolysis. *Frontiers in Chemistry*, 7. <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00874>