

Kinetika Hidrolisis Selulosa Menjadi Glukosa Pada Limbah Kulit Nanas (*Ananas comosus*) Menggunakan Enzim Selulase

*Kinetics of Cellulose Hydrolysis into Glucose in Pineapple (*Ananas comosus*) Peel Waste Using Cellulase Enzyme*

Putri Azmi Annidya, Tuhu Agung Rachmanto*, & Rizka Novembrianto

Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Indonesia

Diterima: 01 November 2025; Direview: 03 November 2025; Disetujui: 19 November 2025

*Corresponding Email: tuhu.tl@upnatiim.ac.id

Abstrak

Limbah kulit nanas (*Ananas comosus*) merupakan salah satu sumber sampah organik dengan kandungan lignoselulosa tinggi yang berpotensi dimanfaatkan melalui proses biokonversi menjadi glukosa. Penelitian ini bertujuan menentukan persamaan kinetika *Michaelis-Menten* hidrolisis selulosa menjadi glukosa menggunakan enzim selulase serta menganalisis pengaruh konsentrasi substrat (1–5% w/v) dan waktu hidrolisis (60–180 menit) terhadap laju reaksi. Tahapan penelitian meliputi delignifikasi menggunakan NaOH 5% pada suhu 80°C dan hidrolisis enzimatis dengan selulase 10% pada pH 5 dan suhu 50°C. Kadar glukosa diukur dengan refraktometer Brix melalui metode kalibrasi larutan standar glukosa. Hasil menunjukkan peningkatan konsentrasi glukosa seiring waktu dan konsentrasi substrat, dengan konversi tertinggi 91,5% pada substrat 5%. Analisis kinetika dengan persamaan *Michaelis-Menten* menghasilkan nilai rata-rata konstanta laju reaksi (k) sebesar 0,3328 min⁻¹, dengan k tertinggi 0,3828 min⁻¹ dan konstanta *Michaelis-Menten* (C_M) tertinggi 2,357 mg·L⁻¹ pada konsentrasi substrat 5%. Peningkatan signifikan C_M dari 0,2403 (1%) menjadi 2,357 (5%) menandakan penurunan afinitas enzim akibat kejenuhan substrat. Oleh karena itu, konsentrasi 5% dianggap sebagai kondisi optimal untuk proses hidrolisis selulosa, menegaskan potensi limbah kulit nanas sebagai sumber substrat yang efisien.

Kata Kunci: Kulit Nanas; Selulosa; Enzim Selulase; Kinetika *Michaelis-Menten*

Abstract

Pineapple peel waste (*Ananas comosus*) is a source of organic waste with high lignocellulose content that has the potential to be utilized through a bioconversion process into glucose. This study aims to determine the *Michaelis-Menten* kinetic equation of cellulose hydrolysis into glucose using cellulase enzymes and analyze the effect of substrate concentration (1–5% w/v) and hydrolysis time (60–180 minutes) on the reaction rate. The research stages include delignification using 5% NaOH at 80°C and enzymatic hydrolysis with 10% cellulase at pH 5 and 50°C. Glucose levels were measured using a Brix refractometer through a standard glucose solution calibration method. The results showed an increase in glucose concentration over time and substrate concentration, with the highest conversion of 91.5% at 5% substrate. Kinetic analysis using the *Michaelis-Menten* equation yielded an average reaction rate constant (k) of 0.3328 min⁻¹, with the highest k of 0.3828 min⁻¹ and the highest *Michaelis-Menten* constant (C_M) of 2.357 mg·L⁻¹ at a substrate concentration of 5%. A significant increase in C_M from 0.2403 (1%) to 2.357 (5%) indicates a decrease in enzyme affinity due to substrate saturation. Therefore, a concentration of 5% is considered the optimal condition for the cellulose hydrolysis process, confirming the potential of pineapple peel waste as an efficient substrate source.

Keywords: Pineapple Peel; Cellulose; Cellulase Enzyme; *Michaelis-Menten* Kinetics

How to Cite: Annidya, P. A., Rachmanto, T. A. & Novembrianto, R. (2025). Kinetika Hidrolisis Selulosa Menjadi Glukosa Pada Limbah Kulit Nanas (*Ananas comosus*) Menggunakan Enzim Selulase. *Journal of Natural Sciences*. 6 (3): 301-312



PENDAHULUAN

Limbah organik rumah tangga merupakan salah satu penyumbang terbesar dalam timbulan sampah di Indonesia. Limbah organik rumah tangga, yang didominasi oleh sampah organik seperti kulit buah, merupakan salah satu komponen terbesar dari sampah rumah tangga. Jika tidak dikelola dengan baik dapat menimbulkan bau, menarik serangga, dan mencemari lingkungan (Sulianti *et al.*, 2022). Kulit nanas (*Ananas comosus*) merupakan salah satu jenis limbah organik yang banyak dihasilkan namun jarang dimanfaatkan secara optimal, padahal mengandung komponen lignoselulosa yang berpotensi sebagai bahan baku biokonversi. Secara kimiawi, kulit nanas tersusun atas selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang membentuk struktur kompleks dan resisten terhadap degradasi alami. Menurut Ayu & Pramushinta (2018) kulit nanas mengandung selulosa 20-30% dan mengandung lignin sebesar 5% serta mengandung 17% karbohidrat. Selulosa dapat dihidrolisis menjadi glukosa, namun keberadaan lignin menghambat akses enzim, sehingga diperlukan proses delignifikasi (Muley & Boldor, 2017). Perlakuan alkali menggunakan NaOH diketahui efektif memutus ikatan antara lignin dan selulosa, meningkatkan porositas, serta memperbesar luas permukaan reaksi (Catulisti *et al.*, 2025)

Selulosa memiliki potensi besar sebagai bahan baku produksi glukosa. Penelitian (Nulhakim *et al.*, 2024) menunjukkan bahwa hidrolisis kulit nanas menghasilkan laju hidrolisis terbaik selama 72 jam dengan konsentrasi glukosa mencapai 10,42 ppm/jam. Kulit nanas yang mengandung lignoselulosa (lignin, selulosa, dan hemiselulosa) dapat dihidrolisis menjadi glukosa menggunakan enzim selulase. Hidrolisis enzimatis lebih efisien dibandingkan hidrolisis asam, sebagaimana dilaporkan Fuadi & Harismah (2017) bahwa hidrolisis enzimatis kertas bekas menghasilkan 35,06 mg glukosa dalam 4 jam, sedangkan metode asam hanya 0,097 mg pada waktu yang sama. Meskipun kandungan selulosa kulit nanas cukup tinggi, pemanfaatannya sebagai sumber glukosa masih belum optimal. Pemahaman kinetika reaksi menjadi kunci dalam optimalisasi proses hidrolisis enzimatis, karena dapat menjelaskan laju reaksi dan efisiensi konversi selulosa menjadi glukosa. Widya Fibni Sina *et al.* (2020) melaporkan bahwa fermentasi selulosa dari tongkol jagung menggunakan enzim selulase 10% (w/w) pada suhu 50°C menghasilkan glukosa 7% setelah 150 menit, dengan konstanta *Michaelis-Menten* (C_M) sebesar 0,2392.

Adrian *et al.* (2020) menyatakan bahwa beberapa faktor dapat memengaruhi proses hidrolisis enzimatis, antara lain konsentrasi enzim, ukuran partikel, suhu, pH, durasi hidrolisis, konsentrasi substrat, dan intensitas pengadukan. Faktor-faktor tersebut juga berperan penting dalam menentukan kinetika reaksi hidrolisis selulosa. Selain itu, Aprilyanti *et al.* (2019) melaporkan bahwa peningkatan waktu hidrolisis, disertai penambahan volume enzim, dapat meningkatkan produksi glukosa. Hal ini terjadi karena semakin banyak situs aktif enzim selulase yang tersedia untuk bereaksi dengan substrat. Penelitian (Ferdinda *et al.*, 2025) menganalisis kinetika hidrolisis enzimatis selulosa dari kulit durian menjadi glukosa menggunakan enzim selulase pada kondisi pH 5 dan suhu 50°C. Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi substrat dan waktu hidrolisis memiliki hubungan berbanding lurus terhadap konsentrasi produk glukosa, dengan konsentrasi glukosa tertinggi sebesar 1,7% diperoleh pada konsentrasi substrat 5% dan waktu 180 menit. Dengan demikian, durasi hidrolisis dan konsentrasi substrat merupakan parameter penting yang memengaruhi efisiensi konversi selulosa menjadi glukosa melalui hidrolisis enzimatis.

Studi tentang kinetika hidrolisis enzimatis selulosa dari kulit nanas menggunakan enzim selulase masih tergolong sedikit. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan persamaan kinetika hidrolisis selulosa menjadi glukosa pada kulit nanas dengan enzim selulase, sekaligus mengetahui pengaruh variasi konsentrasi substrat dan durasi hidrolisis terhadap laju reaksi. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan teknologi pengolahan limbah organik rumah tangga secara berkelanjutan dan ramah lingkungan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan pada bulan September 2025 di Laboratorium Air Teknik Lingkungan Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur.

Penelitian ini menggunakan bahan-bahan berikut limbah kulit nanas (*Ananas comosus*) dari limbah rumah tangga di Surabaya, Natrium Hidroksida 98%, dan Aquadest yang didapatkan dari toko Mitra Water, Pucang Anom, Surabaya. Enzim Selulase diperoleh secara online melalui platform online. Peralatan yang digunakan mencakup berbagai instrument yang mendukung proses delignifikasi dan hidrolisis enzimatis selulosa. Rangkaian peralatan yang digunakan untuk proses delignifikasi dan proses

hidrolisis antara lain *statif*, *thermometer*, motor pengaduk, pengaduk, *aluminium foil*, *beaker glass*, dan *heater*.

Preparasi Sampel

Tahap preparasi sampel limbah kulit nanas pada penelitian ini dimulai dengan proses preparasi, yaitu pencucian untuk menghilangkan kotoran pada kulit nanas, kemudian pengeringan kulit buah dengan sinar matahari untuk menurunkan kadar air, serta penghalusan menggunakan blender dan pengayakan 200 mesh agar diperoleh serbuk dengan ukuran partikel seragam.

Delignifikasi

Proses delignifikasi bertujuan untuk menentukan kondisi optimum yang mendukung proses hidrolisis selulosa menjadi glukosa dengan enzim selulase pada limbah kulit nanas. Padatan kulit nanas sebanyak 100gram ditambahkan 1000 ml NaOH dengan konsentrasi 5% dipanaskan dengan heater/hot plate pada suhu 80°C selama 90 menit dengan kecepatan pengadukan 150 rpm. Setelah dilakukan proses delignifikasi, padatan/ampas dipisahkan dari filtrat dengan cara disaring menggunakan kain penyaring. Sebelum disaring, sampel didinginkan terlebih dahulu hingga mencapai suhu 30°C. Padatan/ampas yang diperoleh kemudian dicuci dengan aquadest hingga pH netral (pH 7) dan dikeringkan menggunakan oven pada suhu 60°C untuk menghilangkan kadar air pada padatan. Padatan kemudian dilakukan uji kadar selulosa dengan menggunakan metode *Chesson-Data*.

Hidrolisis Enzimatis Selulosa

Substrat (serbuk kulit nanas setelah delignifikasi) dilarutkan dalam aquadest 150 mL dengan konsentrasi substrat/selulosa terhadap aquadest sebesar 1%, 2%, 3%, 4%, 5% (%w/v). Menghitung massa selulosa yang dibutuhkan adalah dengan persamaan %w/v yaitu massa selulosa dibagi dengan volume larutan (150 mL) kemudian dikali 100%. Setelah mendapatkan nilai massa selulosa kemudian mencari kebutuhan padatan kulit nanas/massa kulit nanas dengan cara massa selulosa dibagi dengan kadar selulosa pada kulit nanas (sesuai hasil uji). Massa kulit nanas yang didapatkan kemudian dilarutkan dalam aquadest 150 mL. Kemudian mengukur pH larutan optimum hidrolisis enzimatis dengan enzim selulase yaitu 5 menggunakan kertas pH. Apabila terlalu basa,

larutan dapat ditambahkan larutan Asam Sitrat ($C_6H_8O_7$). Apabila terlalu asam, larutan dapat ditambahkan larutan Natrium Hidroksida (NaOH). Selanjutnya ditambahkan enzim selulase sebanyak 10 ml dengan konsentrasi 10%. Hidrolisis dilakukan selama variabel waktu 60, 90, 120, 150, dan 180 menit dengan suhu dijaga konstan menggunakan termometer sebesar $50^\circ C$ dan kecepatan pengadukan 150 rpm. Kemudian hasil hidrolisis berupa filtrat disaring menggunakan kertas saring dan dilakukan uji kadar glukosa filtrat dengan alat refractrometer brix.

Model Kinetika

Model kinetika yang digunakan yaitu persamaan Model *Michaelis-Menten* yang berdasarkan data konsentrasi glukosa dari hasil pengukuran $^\circ Brix$ pada lima konsentrasi substrat awal (1–5% w/v) untuk reaksi enzimatik yang ditunjukkan pada persamaan:

$$-r_A = r_R = k \frac{C_{E0} C_A}{C_M + C_A}$$

Keterangan:

$-r_A$ = kecepatan reaksi substrat A (selulosa)

r_R = kecepatan reaksi Produk R (glukosa)

C_A = konsentrasi akhir substrat (mol/m^3)

C_{E0} = total kebutuhan enzim (mol/L)

C_M = konstanta Michaelis

k = konstanta kecepatan reaksi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Konsentrasi Glukosa yang dihasilkan dari Proses Hidrolisis Selulosa

Proses ini dimulai dengan mempersiapkan substrat hasil delignifikasi, kemudian ditimbang sesuai konsentrasi yang ditentukan, yaitu 1%, 2%, 3%, 4% dan 5% (%w/v). Menghitung massa selulosa yang dibutuhkan adalah dengan persamaan %w/v yaitu massa selulosa dibagi dengan volume larutan (150 mL) kemudian dikali 100% (Mandasari *et al.*, 2023). Setelah mendapat nilai massa selulosa kemudian mencari kebutuhan padatan kulit nanas/massa kulit nanas dengan cara massa selulosa dibagi dengan kadar selulosa pada kulit nanas (sesuai hasil uji selulosa). Massa kulit nanas yang didapatkan kemudian di larutkan dalam 150 mL air suling.

pH larutan diatur pada kondisi optimal untuk enzim selulase, yaitu pH 4,5-5,5, menggunakan larutan HCl atau NaOH 0,1 N bila diperlukan. Wadah reaksi kemudian dipanaskan dengan bantuan hot-plate hingga mencapai suhu optimal, yaitu sekitar 50°C dan dijaga agar tetap stabil selama proses hidrolisis (Maryam *et al.*, 2018). Setelah kondisi pH dan suhu tercapai, larutan enzim selulase ditambahkan ke wadah reaksi secara perlahan. Penambahan enzim dilakukan sambil diaduk dengan kecepatan 150rpm untuk memastikan pencampuran substrat dan enzim merata, sehingga hidrolisis berlangsung optimal. Waktu hidrolisis disesuaikan dengan perlakuan penelitian, yaitu 60, 90, 120, 150 dan 180 menit. Variasi waktu ini digunakan untuk mengamati perubahan konsentrasi glukosa dari waktu ke waktu dan menentukan kondisi optimum hidrolisis (Ferdinda *et al.*, 2025). Percobaan hidrolisis selulosa pada limbah kulit nanas menjadi glukosa menggunakan enzim selulase dengan variabel waktu dan konsentrasi substrat, didapatkan hasil penelitian pada tabel 4.2 sebagai berikut:

Tabel 1. Konsentrasi produk (glukosa) yang terbentuk dalam satuan persen (%)

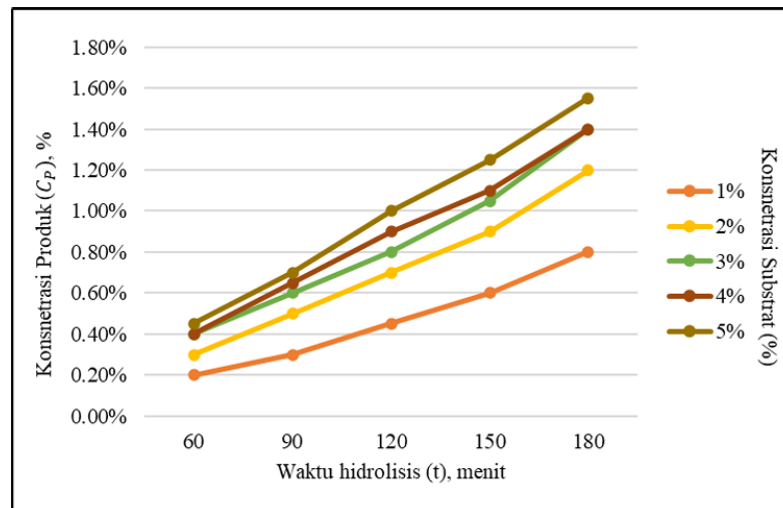
Waktu (t), menit	Konsentrasi Substrat Awal (C_{A0})				
	1%	2%	3%	4%	5%
60	0,2%	0,3%	0,4%	0,4%	0,45%
90	0,3%	0,5%	0,6%	0,65%	0,7%
120	0,45%	0,7%	0,8%	0,9%	1%
150	0,6%	0,9%	1,2%	1,1%	1,25%
180	0,8%	1,2%	1,4%	1,4%	1,55%

Sumber : Analisa, 2025

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa konsentrasi glukosa meningkat seiring waktu hidrolisis. Peningkatan ini lebih cepat pada awal reaksi (60-90 menit) karena substrat masih melimpah dan enzim bekerja secara optimal. Setelah 120 menit, laju peningkatan glukosa mulai melambat karena sebagian besar selulosa telah terhidrolisis, enzim mulai jenuh, dan akumulasi glukosa menghambat laju reaksi lebih lanjut. Selain itu semakin tinggi konsentrasi substrat, semakin besar konsentrasi glukosa yang dihasilkan pada waktu yang sama (Sina *et al.*, 2020).

Pengaruh Waktu Hidrolisis dengan Konsentrasi Produk pada berbagai Konsentrasi Substrat

Konsentrasi substrat memiliki hubungan dengan waktu hidrolisis. Pengaruh waktu hidrolisis dengan konsentrasi produk pada berbagai konsentrasi substrat dapat dilihat pada gambar 1 di bawah:



Gambar 1. Hubungan antara waktu hidrolisis (menit) dengan konsentrasi produk (%) pada berbagai konsentrasi substrat (%). (Sumber : Analisa, 2025)

Hasil analisis hidrolisis pada gambar 1 menunjukkan bahwa konsentrasi glukosa meningkat seiring dengan bertambahnya waktu reaksi dan konsentrasi substrat hingga mencapai titik optimum pada substrat 5% dan waktu 180 menit. Peningkatan kadar glukosa ini mencerminkan aktivitas katalitik enzim selulase dalam memecah ikatan β -1,4-glikosidik pada rantai selulosa, yang merupakan langkah kunci dalam konversi selulosa menjadi gula sederhana. Aktivitas enzim yang berlangsung secara bertahap ini menunjukkan bahwa laju reaksi awal cenderung lebih tinggi ketika substrat relatif rendah, karena sebagian besar situs aktif enzim masih tersedia untuk berikatan dengan molekul selulosa. Namun, pada konsentrasi substrat lebih tinggi, peningkatan kadar glukosa cenderung melambat, menunjukkan adanya kondisi jenuh enzim di mana seluruh situs aktif enzim telah berikatan dengan substrat (Levenspiel, 1999). Fenomena ini konsisten dengan model kinetika *Michaelis-Menten*, yang menjelaskan hubungan antara laju reaksi enzimatik dan konsentrasi substrat, termasuk kondisi saturasi enzim. Hal ini sejalan dengan temuan Ferdinda *et al.* (2025) pada hidrolisis kulit durian, di mana laju pembentukan glukosa menurun setelah konsentrasi substrat mencapai 5% akibat terbatasnya ketersediaan enzim aktif.

Dari grafik terlihat bahwa peningkatan waktu reaksi dari 60 hingga 180 menit berpengaruh terhadap pembentukan glukosa, terutama pada awal reaksi (fase eksponensial). Setelah 150 menit, laju pembentukan glukosa mulai melambat dan mendekati kondisi konstan, menunjukkan keseimbangan antara pembentukan dan konsumsi substrat. Secara umum, peningkatan konsentrasi substrat mempercepat

pembentukan glukosa hingga mencapai kondisi kejenuhan enzim pada konsentrasi 5%, sesuai dengan prinsip bahwa laju reaksi meningkat proporsional terhadap konsentrasi substrat hingga seluruh enzim terikat (Robinson, 2015).

Penentuan Persamaan *Michaelis-Menten*

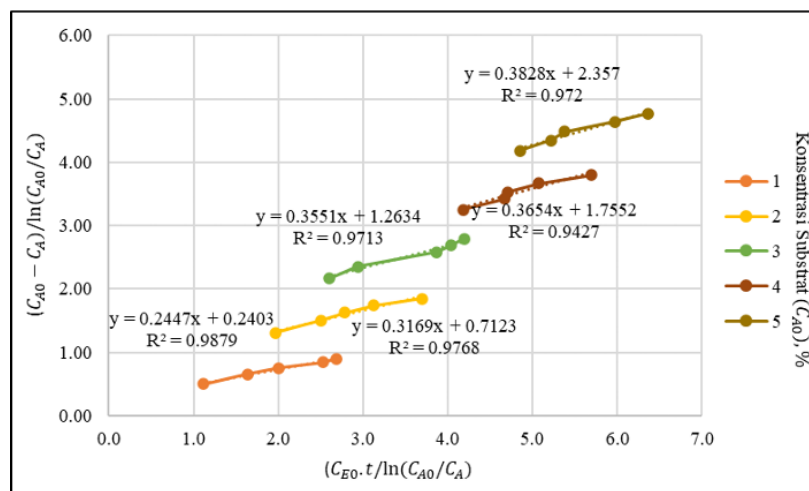
Berdasarkan persamaan model *Michaelis-Menten* (Levenspiel, 1999) menunjukkan bahwa laju reaksi awal meningkat dengan naiknya konsentrasi substrat, namun akan mencapai batas maksimum ketika enzim jenuh. Reaksi ini dapat ditunjukkan dengan persamaan:

$$-r_A = r_R = k \frac{C_{E0} C_A}{C_M + C_A} \quad (1)$$

Pada sistem batch persamaan 1 disubstitusikan menjadi persamaan 2 sebagai berikut:

$$\frac{C_{A0} - C_A}{\ln \frac{C_{A0}}{C_A}} = -C_M + k_3 C_{E0} \frac{t}{\ln \frac{C_{A0}}{C_A}} \quad (2)$$

Dari persamaan 3 pada Levenspiel Chapter 27, sehingga diperoleh grafik hubungan antara konsentrasi substrat dan waktu hidrolisis dianalisis menggunakan linearisasi *Michaelis-Menten* dengan variabel transformasi konsentrasi substrat sebagai sumbu Y dan waktu hidrolisis sebagai sumbu X untuk variabel waktu 60, 90, 120, 150 dan 180 menit dan variabel konsentrasi substrat awal 1%, 2%, 3%, 4%, dan 5% (%w/v). Grafik tersebut digunakan untuk mencari nilai konstanta kecepatan reaksi (k) dan konstanta *Michaelis-Menten* (C_M) (Sina *et al.*, 2020) Berikut grafik hubungan antara konsentrasi substrat dan waktu hidrolisis.



Gambar 2. Hubungan Konsentrasi Substrat dan Waktu Hidrolisis. (Sumber: Analisa, 2025)



Berdasarkan data pada Gambar 2, terlihat bahwa hubungan antara variabel yang diamati membentuk pola grafik dengan garis linear. Secara matematis, persamaan garis linier secara umum adalah $y = ax + b$, di mana nilai a merupakan kemiringan atau slope dan b merupakan intercept yang menunjukkan titik potong garis terhadap sumbu y . Nilai slope (a) pada grafik di atas merupakan nilai konstanta reaksi (k), yaitu parameter yang menggambarkan kecepatan reaksi hidrolisis selulosa dengan enzim selulase dalam kondisi tertentu. Sedangkan nilai intercept (b) merupakan nilai konstanta *Michaelis-Menten* (C_M), yang menunjukkan hubungan antara konsentrasi substrat dan kecepatan reaksi.

Tabel 2. Hubungan konsentrasi substrat dan waktu hidrolisis tiap satuan waktu

C_{A0} , %	t , menit	Nilai k	Nilai C_M
1%	60, 90, 120, 150, dan 180 menit	0,2447	0,2493
2%		0,3169	0,7123
3%		0,3551	1,2630
4%		0,3654	1,7552
5%		0,3828	2,3570

Gambar 2 diperoleh nilai konstanta kecepatan reaksi (k) dan konstanta *Michaelis-Menten* (C_M) untuk variasi waktu hidrolisis 60, 90, 120, 150 dan 180 menit. Berdasarkan perbandingan nilai konstanta laju hidrolisis (k) pada berbagai konsentrasi substrat kulit buah, nilai rata – rata k yang diperoleh sebesar 0,3328. Nilai k tertinggi diperoleh pada konsentrasi substrat awal 5% sebesar 0,3828. Peningkatan konsentrasi substrat (C_{A0}) dari 1% menjadi 5% meningkatkan nilai k dari 0,2447 menjadi 0,3828. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi substrat, semakin banyak molekul yang tersedia untuk berinteraksi dengan enzim selulase, sehingga peluang terbentuknya kompleks enzim-substrat juga meningkat (Subhedar *et al.*, 2015).

Nilai konstanta *Michaelis-Menten* (C_M) pada tabel menunjukkan bahwa nilai (C_M) meningkat secara signifikan seiring bertambahnya konsentrasi substrat dari 0,2403 pada konsentrasi 1% menjadi 2,357 pada konsentrasi 5%. Peningkatan nilai (C_M) menunjukkan bahwa afinitas enzim selulase terhadap substrat menurun seiring dengan bertambahnya konsentrasi substrat awal. Penurunan afinitas ini mengindikasikan bahwa pada konsentrasi substrat yang tinggi, enzim menjadi kurang efisien dalam mengikat substrat karena kejenuhan. Hasil penelitian ini sejalan dengan teori, menurut McDonald & Tipton (2022), semakin tinggi konsentrasi substrat, semakin banyak kompleks enzim-substrat yang terbentuk sehingga jumlah produk juga meningkat. Namun, jika substrat

terlalu tinggi, enzim bisa mencapai titik jenuh (saturasi), yaitu kondisi ketika hampir semua situs enzim sudah terisi. Nilai konstanta kecepatan reaksi (k) dan konstanta *Michaelis-Menten* (C_M) dapat dibuat persamaan laju reaksi hidrolisis enzimatis (persamaan *Michaelis-Menten*) (Levenspiel, 1999) sebagai berikut:

Tabel 3. Persamaan Kinetika *Michaelis-Menten* tiap satuan waktu

$C_{A0}, \%$	t, menit	Persamaan <i>Michaelis-Menten</i>
1	60, 90, 120, 150 dan 180 menit	$-r_A = r_R = 0,2447 \frac{C_{E0}C_A}{0,2403 + C_A}$
2		$-r_A = r_R = 0,3169 \frac{C_{E0}C_A}{0,7123 + C_A}$
3		$-r_A = r_R = 0,3551 \frac{C_{E0}C_A}{1,2630 + C_A}$
4		$-r_A = r_R = 0,3654 \frac{C_{E0}C_A}{1,7552 + C_A}$
5		$-r_A = r_R = 0,3828 \frac{C_{E0}C_A}{2,357 + C_A}$

Tabel 3 diperoleh persamaan *Michaelis-Menten* pada konsentrasi substrat awal 1%, 2%, 3%, 4%, dan 5% dan waktu hidrolisis 60, 90, 120, 150 dan 180 menit. Persamaan ditentukan berdasarkan persamaan (1) dan data C_M serta k pada kondisi konsentrasi substrat paling optimal berdasarkan nilai konversi. Konversi reaksi hidrolisis enzimatis selulosa menjadi glukosa tertinggi diperoleh pada konsentrasi 5% yaitu sebesar 91,5% dengan persamaan laju reaksi sebagai berikut.

$$-r_A = r_R = 0,3828 \frac{C_{E0}C_A}{2,357 + C_A}$$

Secara fisik, hal ini menggambarkan bahwa pada konsentrasi substrat rendah (1%-3%), ketersediaan substrat menjadi faktor pembatas sehingga laju reaksi meningkat seiring kenaikan konsentrasi substrat. Namun, setelah melewati titik optimum (4%-5%), enzim selulase mulai mengalami saturasi, reaksi yang tidak lagi meningkat secara signifikan. Dengan demikian, konsentrasi substrat 5% dapat dianggap sebagai kondisi optimal bagi proses hidrolisis selulosa.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pengukuran kadar glukosa menggunakan refraktometer dapat memberikan deviasi karena adanya gula terlarut lain (fruktosa dan sukrosa) dari kulit buah yang dapat memengaruhi akurasi hasil. Selain itu, percobaan dilakukan pada skala batch laboratorium dengan volume kecil (150 mL), sehingga fenomena perpindahan massa dan kondisi pengadukan mungkin berbeda jika diaplikasikan pada skala industri. Optimalisasi lanjutan menggunakan metode analisis

HPLC dan sistem *continuous stirred-tank reactor* (CSTR) direkomendasikan untuk memperoleh data kinetika yang lebih presisi.

SIMPULAN

Hidrolisis enzimatis selulosa dari kulit nanas menggunakan enzim selulase menghasilkan konversi glukosa tertinggi sebesar 91,5% pada konsentrasi substrat 5% dan waktu 180 menit, dengan konstanta laju reaksi (k) sebesar $0,3828 \text{ min}^{-1}$ dan konstanta *Michaelis-Menten* (C_M) sebesar $2,357 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Hasil ini menunjukkan bahwa laju reaksi meningkat seiring kenaikan konsentrasi substrat hingga titik kejenuhan enzim. Secara praktis, kondisi operasi tersebut dapat direkomendasikan sebagai parameter optimum untuk pemanfaatan limbah kulit nanas sebagai bahan baku biokonversi glukosa. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan metode analisis berbasis HPLC untuk kuantifikasi glukosa yang lebih akurat dan menerapkan sistem reaktor CSTR guna memperoleh parameter kinetika pada skala proses yang lebih representatif.

DAFTAR PUSTAKA

- Adrian, Syaiful, A. Z., Ridwan, & Hermawati. (2020). Sakarifikasi Pati Ubi Jalar Putih Menjadi Gula Dekstrosa Secara Enzimatis. In *Saintis* (Vol. 1, Issue 1).
- Aprilyanti, S., Suryani, F., & Pratiwi, I. (N.D.). Selvia Aprilyanti, Faizah Suryani Irnanda Pratiwi Optimasi Waktu Hidrolisis Dan Volume Enzim Pada Proses Hidrolisis Enzimatis Selulosa Jerami Padi.
- Ayu, I., & Pramushinta, K. (2018). Pembuatan Pupuk Organik Cair Limbah Kulit Nanas Dengan Enceng Gondok Pada Tanaman Tomat (*Lycopersicon Esculentum L.*) Dan Tanaman Cabai (*Capsicum Annuum L.*) Aureus. *Journal Of Pharmacy And Science*, 3(2).
- Catulisti, R., Ramadani, P., Hadi Pratama, M., Daniar, R., Trisnaliani, L., & Kholidah, N. (2025). Alkimia : Jurnal Ilmu Kimia Dan Terapan Articles Microwave-Assisted Alkaline (Naoh) Pretreatment Of Empty Palm Fruit Bunches (Epfb) In The Production Of Second-Generation Bioethanol Open Access Articles Alkimia Jurnal Ilmu Kimia Dan Terapan. 9(2), 96–104. <https://doi.org/10.19109/Zw8f0b77>
- Ferdinda, E., Maharani, P. A., Agustina, M., Redjeki, S., Muljani, S., & Pujiastuti, C. (2025). Kinetika Reaksi Hidrolisis Enzimatis Selulosa Menjadi Glukosa Dari Kulit Durian (*Durio Zibethinus Rumph*) Menggunakan Enzim Selulase. In *Jurnal Teknik Kimia* (Vol. 19, Issue 2).
- Fuadi, A. M., & Harismah, K. (2017). Perbandingan Efektifitas Pembuatan Glukosa Dari Kertas Bekas Secara Hidrolisis Asam Dan Enzim. *Jurnal Teknologi Bahan Alam*, 1(1).
- Levenspiel, Octave. (1999). *Chemical Reaction Engineering*. Wiley.
- Mandasari, W., Sitorus, B., & Kimia, J. (2023). Adsorpsi Logam Cd Menggunakan A-Selulosa Dari Kulit Buah Nanas. In *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah* (Vol. 11, Issue 2).
- Maryam, B., Qadir, A., Zameer, M., Ahmad, S. R., Nelofer, R., Jamil, N., Arzoo, S., & Afzaal, R. (2018). Production Of Cellulases By *Bacillus Cellulosilyticus* Using Lignocellulosic Material. *Polish Journal Of Environmental Studies*, 27(6), 2659–2668. <https://doi.org/10.15244/Pjoes/80867>
- Mcdonald, A. G., & Tipton, K. F. (2022). Parameter Reliability And Understanding Enzyme Function. In *Molecules* (Vol. 27, Issue 1). Mdpi. <https://doi.org/10.3390/Molecules27010263>
- Muley, P. D., & Boldor, D. (2017). *Advances In Biomass Pretreatment And Cellulosic Bioethanol Production Using Microwave Heating*.
- Nulhakim, L., Pratiwi, A. D., Azizah, N., Guntama, D., Dewi, N., Mochamad, D., & Qurrohman, T. (2024). Kinetika Hidrolisis Limbah Kulit Nanas (*Ananas comosus L.*) Oleh Enzim A-Amilase Dan Enzim Gluko Amilase.



- Robinson, P. K. (2015). Enzymes: Principles And Biotechnological Applications. Essays In Biochemistry, 59, 1–41. <https://doi.org/10.1042/Bse0590001>
- Sina, N. W. F., Sukmaria, A. A., & Redjeki, S. (2020). Studi Kinetika Reaksi Fermentasi Selulosa Tongkol Jagung Menggunakan Enzim Selulase Pada Reaktor Batch. In Journal Of Chemical And Process Engineering Chempro Journal (Vol. 1, Issue 02). www.chempro.upnjatim.ac.id
- Subhedar, P. B., Babu, N. R., & Gogate, P. R. (2015). Intensification Of Enzymatic Hydrolysis Of Waste Newspaper Using Ultrasound For Fermentable Sugar Production. Ultrasonics Sonochemistry, 22, 326–332. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.07.005>
- Sulartini, N. W. S., Isnaini, I., Khaifa, L., Aini, U. I., Firdaus, M. R., Solehah, S. S. B., & Hafizah, G. T. R. (2022). Pengolahan Sampah Rumah Tangga Yang Mudah Dan Murah Sebagai Pupuk Organik Untuk Pelestarian Lingkungan Melalui Metode Takakura. Jurnal Gema Ngabdi, 4(1), 77–84. <https://doi.org/10.29303/jgn.v4i1.174>