

Kinetika Hidrolisis Limbah Kertas Secara *Fed Batch* Menggunakan Katalis Asam Sulfat

Kinetic of Paper Waste Fed Batch Hydrolysis using Sulfuric Acid Catalyst

Jabosar Ronggur Hamonangan Panjaitan^{1*}, Daniel Tumpal Sinurat²,
Mai Melsi Sihombing³, Andri Sanjaya⁴, Rifqi Sufra⁵

^{1,2,3,4,5}Program Studi Teknik Kimia, Institut Teknologi Sumatera, Indonesia
Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kec. Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan,
Lampung 35365, Indonesia

*Corresponding author: jabosar.panjaitan@tk.itera.ac.id

ABSTRAK

DOI:
[10.30595/jrst.v10i1.28652](https://doi.org/10.30595/jrst.v10i1.28652)

Article information:

Received:
04/11/2025

Revised:
06/02/2026

Accepted:
01/03/2026

Limbah kertas merupakan limbah padat potensial yang cukup banyak mencemari lingkungan. Selulosa yang merupakan komponen terbesar limbah kertas terdiri dari monomer glukosa yang dapat diperoleh melalui proses hidrolisis. Pada penelitian ini akan diteliti proses hidrolisis dan evaluasi kinetika limbah kertas secara fed batch menggunakan katalis asam sulfat. Tahapan penelitian ini terdiri dari preparasi bahan baku, proses hidrolisis dan pengolahan data kinetika. Proses hidrolisis dilakukan secara fed batch pada berbagai variasi suhu (70, 80 dan 90 °C) dan variasi waktu reaksi (30, 60 dan 90 menit). Hasil penelitian menunjukkan bahwa konversi tertinggi hidrolisis limbah kertas diperoleh pada pengumpanan reaktan limbah kertas secara fed batch sebesar 2 gram dengan total waktu reaksi 90 menit. Semakin tinggi suhu dan waktu hidrolisis akan menghasilkan konversi yang semakin tinggi dimana konversi tertinggi diperoleh sebesar 19,083% pada suhu reaksi 90°C dan 90 menit reaksi. Energi aktivasi yang dihasilkan pada proses hidrolisis fed batch limbah kertas menggunakan asam sulfat yaitu 422.526 kJ/mol. Aplikasi metode fed batch hidrolisis pada penelitian ini mempengaruhi nilai konversi dan kinetika reaksi hidrolisis limbah kertas menggunakan katalis asam sulfat. Penambahan reaktan secara fed batch meningkatkan jumlah partikel reaktan dan potensi terjadinya tumbukan efektif sehingga mengakibatkan laju reaksi semakin meningkat.

Kata Kunci: limbah kertas, hidrolisis, fed batch.

ABSTRACT

Paper waste is a potential solid waste. Cellulose, which is the largest component of paper waste, consists of glucose monomers that can be obtained through the hydrolysis process. In this study, hydrolysis process and kinetic evaluation of paper waste in a fed batch method using sulfuric acid catalyst was investigated. The results showed that the highest conversion of paper waste hydrolysis was obtained when feeding the paper waste reactant in a fed batch of 2 grams with 90 minutes reaction time. Higher hydrolysis temperature and time produced higher conversion which the highest conversion was 19.083% at 90°C reaction temperature and 90 minutes of reaction. The activation energy produced in the fed batch hydrolysis process of paper waste using sulfuric acid was 422.526 kJ/mol. The application of fed batch hydrolysis method in this study affects the

conversion and kinetics value of paper waste acid hydrolysis using sulfuric acid catalyst. The addition of reactants in a fed batch can increase the number of reactant particles and the potential for effective collisions, resulting in faster reaction rate.

Keywords: paper waste, hydrolysis, fed batch.

1. PENDAHULUAN

Limbah kertas merupakan salah satu limbah yang banyak mencemari lingkungan. Limbah kertas dapat diperoleh dari office printing paper, newspaper, cardboards dan lainnya (Li et al., 2024). Komponen utama kertas yaitu selulosa merupakan biopolymer yang terdiri dari monomer glukosa (Jerome et al., 2025). Oleh sebab itu, limbah kertas sangat potensial untuk memproduksi gula fermentasi melalui proses hidrolisis (Yu et al., 2018).

Limbah kertas dapat dihidrolisis menggunakan senyawa kimia seperti asam dan basa. Hidrolisis menggunakan asam lebih dipilih karena waktu hidrolisis yang lebih singkat, sederhana dan menghasilkan glukosa yang lebih banyak. Hidrolisis menggunakan asam sulfat merupakan metode yang paling standar dan efektif untuk digunakan (Dyah et al., 2024).

Proses hidrolisis limbah kertas dapat dilakukan melalui metode fed batch. Metode *fed batch* merupakan metode pengumpanan substrat yang dilakukan secara bertahap dan terus menerus. Metode ini merupakan solusi untuk mengurangi pembebanan substrat yang berlebih pada awal proses karena konsentrasi substrat yang tinggi membutuhkan waktu yang lama serta biaya produksi yang tinggi.

Evaluasi kinetika hidrolisis limbah kertas dengan asam tidak banyak dilakukan. Fagan et al (1971) telah meneliti evaluasi kinetika hidrolisis limbah kertas menggunakan pseudo-first-order model dengan berbagai konsentrasi asam pada suhu 240°C (Fagan et al., 1971). Di sisi lain, penelitian mengenai kinetika hidrolisis menggunakan asam sulfat pada berbagai bahan baku telah banyak dilakukan. Latinwo and Agarry (2015) meneliti kinetika hidrolisis banyan wood sawdust (Latinwo and Agarry, 2015). Kanchanalai et al (2016) meneliti kinetika hidrolisis xylan dan cellulose (Kanchanalai et al., 2016). Emelyanov et al (2016) meneliti kinetika hidrolisis wheat straw dan sugar beet pulp (Emelyanov et al., 2016). Adeoye et al (2019) meneliti kinetika dan termodinamika hidrolisis pineapple and pawpaw peels (Adeoye et al.,

2019). Gonzalez et al (2023) meneliti kinetika hidrolisis banana plant (Abril-González et al., 2023). Okechi et al (2024) meneliti kinetika dan termodinamika hidrolisis pineapple peel (Okechi et al., 2024). Mathew et al (2024) meneliti kinetika hidrolisis sawdust (Mathew et al., 2024).

Pada penelitian ini limbah kertas akan dihidrolisis secara fed-batch menggunakan katalis asam sulfat. Evaluasi kinetika dilakukan untuk mengetahui parameter kinetika pada proses fed-batch hidrolisis limbah kertas menggunakan katalis asam sulfat. Penelitian ini diharapkan menjadi dasar dalam perancangan reaktor untuk proses fed-batch hidrolisis limbah kertas menggunakan katalis asam.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah limbah kertas HVS A4 yang diperoleh dari toko percetakan di sekitar Institut Teknologi Sumatera. Bahan kimia antara lain asam sulfat (H₂SO₄) (Merck), NaOH (Merck) dan akuades. Alat yang digunakan pada penelitian ini antara lain hot plate, magnetic stirrer, labu leher tiga, thermometer dan kondensor.

2.2. Prosedur Penelitian

2.2.1 Preparasi Limbah Kertas dan Uji Kadar Air

Limbah kertas dipotong menjadi bagian-bagian kecil hingga ukuran 2x2 cm dan ditimbang sebanyak 200-gram untuk selanjutnya dilakukan uji kadar air. Uji kadar air limbah kertas dilakukan sebelum dan sesudah proses penghilangan tinta (*deinking*). Uji kadar air merujuk pada uji kadar air SNI 03-6850-2002 dengan kadar air maksimum sebesar 6% (SNI, n.d.). Uji kadar air dilakukan dengan terlebih dahulu menimbang limbah kertas. Limbah kertas dikeringkan di dalam oven selama tiga jam dengan temperatur 105°C. Setelah limbah kertas dikeringkan, selanjutnya limbah kertas didinginkan selama ±10 menit kemudian ditimbang untuk dihitung kadar airnya dengan

menggunakan rumus pada persamaan 1 (SNI, n.d.).

$$\text{Kadar air}(\%) = \frac{m_{\text{awal}}(g) - m_{\text{akhir}}(g)}{m_{\text{awal}}(g)} \times 100\% \quad (1)$$

2.2.2 Penghilangan Tinta (Deinking) Limbah Kertas

Limbah kertas yang sudah dikeringkan dilakukan proses *deinking* dengan ditambahkan 4000 ml pelarut akuades dan 40 ml larutan NaOH. Campuran limbah kertas dan NaOH direndam dengan pengadukan 300 rpm selama satu jam pada suhu ruang. Hasil *deinking* berupa *pulp* kertas dicuci dengan akuades, kemudian dilakukan uji pH sampai pH *pulp* kertas netral. Selanjutnya *pulp* kertas dikeringkan di oven dan dilakukan kembali uji kadar air.

2.2.3 Hidrolisis Limbah Kertas

Hidrolisis limbah kertas dilakukan dengan penambahan limbah kertas secara fed-batch. Variasi penambahan limbah kertas secara fed-batch dapat dilihat pada **Tabel 1**. Proses hidrolisis dimulai dengan membuat larutan asam sulfat 1% sebanyak 360 ml. Larutan asam dipanaskan hingga temperatur operasi (70, 80, 90°C) dan dijaga konstan. Larutan asam kemudian diaduk dengan kecepatan 300 rpm dan pengumpanan limbah kertas secara fed-batch dilakukan sesuai dengan waktu total hidrolisis sesuai **Tabel 1**. Total limbah kertas yang digunakan untuk proses hidrolisis yaitu sebanyak 18 gram. Setelah waktu total hidrolisis telah tercapai, reaktor hidrolisis dimatikan untuk mengambil limbah kertas yang tidak terhidrolisis. Produk padat hasil hidrolisis yaitu limbah kertas yang tidak terhidrolisis kemudian dikeringkan dan dilakukan uji kadar air dengan kadar air maksimal 6%. Limbah kertas yang tidak terhidrolisis kemudian ditimbang untuk mendapatkan massa kertas tidak terhidrolisis.

2.2.4 Pengolahan data kinetika

Data eksperimen berupa massa kertas sisa hidrolisis akan digunakan untuk menghitung berbagai parameter kinetika seperti persamaan laju reaksi, konstanta laju reaksi, orde reaksi dan energi aktivasi. Orde reaksi merupakan tingkat reaksi. Konstanta laju reaksi merupakan nilai tetapan pada laju reaksi. Sedangkan energi aktivasi adalah energi minimum yang dibutuhkan agar suatu reaksi dapat berlangsung. Penentuan konversi proses

hidrolisis dan konsentrasi massa kertas sisa dihitung sesuai persamaan (2) dan (3).

$$\%X = \frac{m_{A0} - m_A}{m_{A0}} \times 100\% \quad (2)$$

$$C_A = \frac{m_A}{M_r} \times \frac{1}{V} \quad (3)$$

Dimana X adalah konversi hidrolisis, m_{A0} adalah massa kertas mula-mula (gr), m_A adalah massa kertas sisa hidrolisis (gr), C_A adalah konsentrasi kertas sisa hidrolisis (mol/L), M_r adalah berat molekul kertas (gr/mol), dan V adalah volume pelarut (L).

Pada penelitian ini parameter data kinetika dihitung menggunakan dua metode yaitu metode integral orde satu dan metode differensial. Metode integral orde 1 digunakan pada penelitian ini dikarenakan air yang merupakan pelarut pada penelitian ini merupakan reaktan berlebih. Persamaan metode integral orde 1 sesuai Fogler (2016) (Fogler, 2016) sebagai berikut

$$\ln \frac{C_{A0}}{C_A} = kt \quad (4)$$

Sedangkan penentuan parameter kinetika reaksi menggunakan metode differensial sebagai berikut

$$\ln \left(-\frac{dC_A}{dt} \right) = \ln k + \alpha \ln C_A \quad (5)$$

Nilai $\ln (-dC_A/dt)$ dihitung menggunakan metode numerik sesuai Fogler (2016) (Fogler, 2016). Konstanta reaksi dan orde reaksi diperoleh menggunakan kurva linearisasi antara $\ln (-dC_A/dt)$ dan $\ln C_A$.

Setelah ditentukan nilai konstanta reaksi menggunakan metode integral orde satu dan metode differensial maka dapat dihitung nilai pre-eksponensial faktor dan energi aktivasi pada berbagai suhu menggunakan persamaan Arrhenius.

$$k = A \exp \left(-\frac{E_a}{RT} \right) \quad (6)$$

Energi aktivasi dihitung dengan persamaan Arrhenius melalui persamaan (7). Energi aktivasi diperoleh menggunakan kurva linearisasi antara $(1/T)$ dan $\ln k$.

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (7)$$

Tabel 1. Hidrolisis variasi penambahan limbah kertas secara fed-batch

Temperatur reaksi hidrolisis (°C)	Waktu total (menit)	Interval waktu (menit ke-)	Penambahan massa limbah kertas (gram)	
70, 80, 90	30	0	6	
		10	6	
		20	6	
	60	30	0	3
			10	3
			20	3
			30	3
			40	3
			50	3
90	90	0	2	
		10	2	
		20	2	
		30	2	
		40	2	
		50	2	
		60	2	
		70	2	
		80	2	

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengaruh Penambahan Umpan secara Fed Batch

Pengaruh temperatur dan waktu reaksi terhadap konversi pada reaksi hidrolisis limbah kertas, dapat dilihat pada **Gambar 1**. Berdasarkan **Gambar 1**, konversi pada masing-masing temperatur reaksi dengan pengumpanan substrat sebanyak 6 gram selama 30 menit diperoleh 16,25%, 17,333%, dan 17,056% dengan konversi rata-rata 16,879%. Konversi pada masing-masing temperatur reaksi dengan pengumpanan substrat sebanyak 3 gram selama 60 menit diperoleh 17,111%, 17,611%, dan 18,528% dengan konversi rata-rata 17,75%. Konversi pada masing-masing temperatur reaksi dengan pengumpanan substrat sebanyak 2 gram selama 90 menit diperoleh 19%, 17,917%, dan 19,083% dengan konversi rata-rata 18,667%.

Konversi tertinggi dihasilkan dari pengumpanan substrat sebanyak 2 gram yang diikuti dengan pengumpanan 3 gram dan 6 gram. Penambahan substrat 2 gram merupakan penambahan beban substrat yang paling kecil.

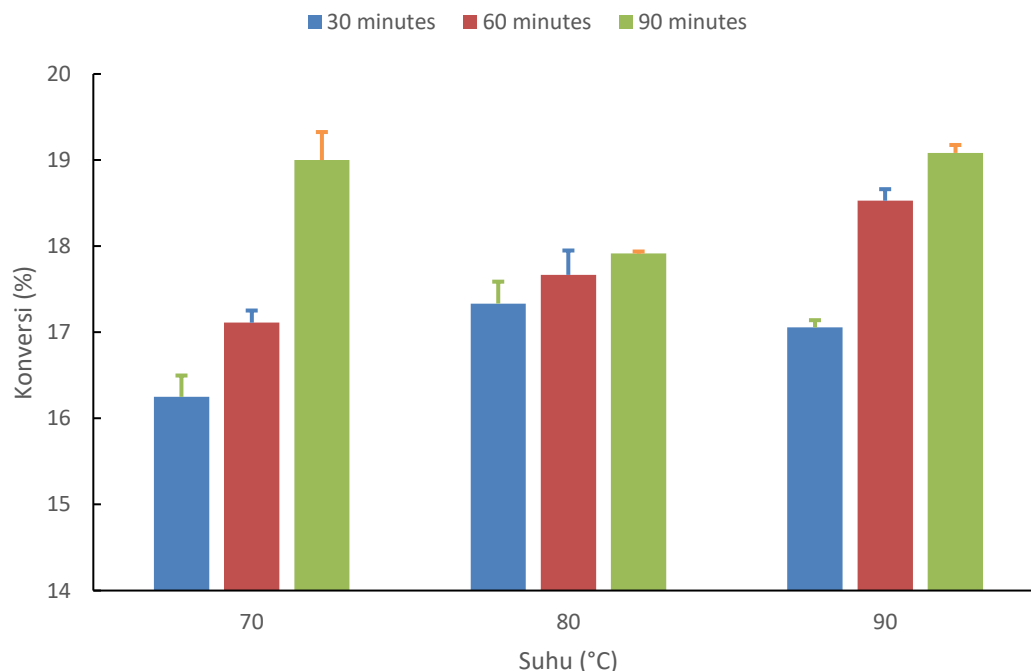
Hal ini membuktikan bahwa penambahan substrat secara *fed batch* meningkatkan konversi pada semua variasi temperatur reaksi. Oleh sebab itu, metode pengumpanan substrat secara *fed batch* berpotensi meningkatkan jumlah produk yang dihasilkan. Semakin kecilnya massa umpan substrat yang digunakan pada proses hidrolisis akan mengurangi pembebanan substrat yang berlebih sehingga konversi yang diperoleh akan semakin tinggi.

Konversi hidrolisis limbah kertas yang dihasilkan berbanding lurus dengan temperature dan waktu hidrolisisnya. Nilai konversi terbesar diperoleh pada waktu hidrolisis 90 menit dan suhu 90°C dengan nilai konversi sebesar 19,083%. Sedangkan nilai konversi terkecil diperoleh pada waktu hidrolisis 30 menit dan suhu 70°C dengan nilai konversi sebesar 16,250%. Konversi proses hidrolisis yang semakin besar dengan semakin lamanya waktu reaksi dapat disebabkan karena lebih lama waktu selulosa untuk melakukan dekomposisi menjadi glukosa (Flores-Alamo et al., 2024; Okechi et al., 2024; Zulfazri et al., 2019).

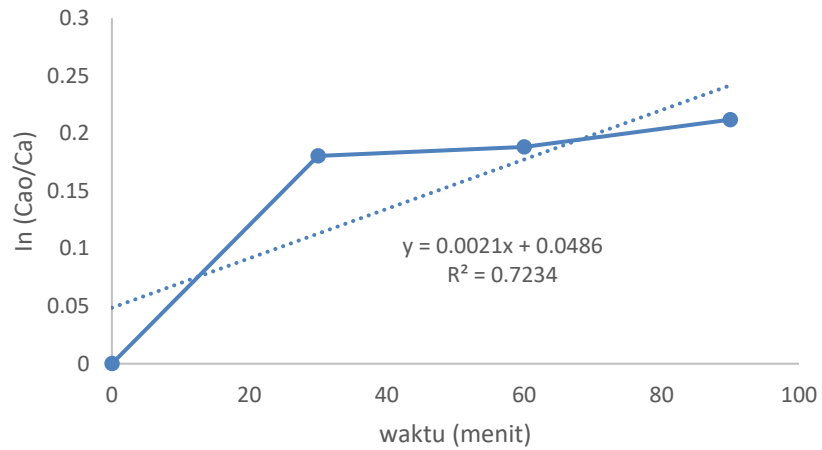
Suhu mempengaruhi hasil hidrolisis. Semakin tinggi suhu hidrolisis maka akan menghasilkan glukosa yang semakin tinggi (Adeoye et al., 2019; Flores-Alamo et al., 2024; Kanchanalai et al., 2016; Latinwo and Agarry, 2015; Okechi et al., 2024). Akan tetapi, suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan degradasi glukosa (Mathew et al., 2024). Proses degradasi gula ditandai dengan larutan hidrolisis yang menjadi kuning dan coklat kehitaman. Hal ini menunjukkan bahwa terbentuknya partikel humin sebagai hasil degradasi glukosa (Kanchanalai et al., 2016). Pada kondisi konsentrasi asam yang tinggi dan suhu yang tinggi dapat membuat glukosa terkonversi menjadi asam organik (Adeoye et al., 2019; Latinwo and Agarry, 2015).

Nilai konversi reaksi hidrolisis yang diperoleh pada penelitian ini tergolong kecil. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti sifat limbah kertas, temperatur reaksi, pengadukan serta *pretreatment* limbah kertas. Konversi hidrolisis limbah kertas menjadi glukosa yang rendah dapat disebabkan oleh struktur kristalin yang ada pada selulosa

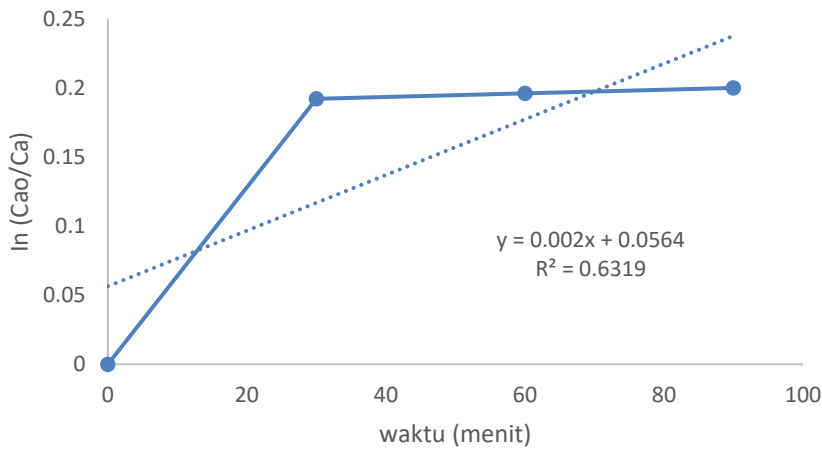
(Kanchanalai et al., 2016). *Pretreatment* limbah kertas digunakan untuk menghilangkan pengotor tinta dan sisa lignin yang ada pada kertas. Selain itu, proses *pretreatment* juga berpengaruh terhadap banyak selulosa yang dapat diperoleh dari limbah kertas. Lignin perlu dihilangkan karena dapat menghambat proses hidrolisis (Flores-Alamo et al., 2024). Proses *pretreatment* limbah kertas pada penelitian ini dilakukan menggunakan larutan NaOH 1% pada suhu ruang. Beberapa faktor yang dapat dilakukan untuk mengoptimalkan proses delignifikasi yaitu mengevaluasi konsentrasi NaOH dan menambahkan pemanasan pada proses delignifikasi. Temperatur yang digunakan pada penelitian ini termasuk rendah, dimana pada skala *pilot plant* dapat dilakukan hingga temperatur 300°C – 400°C (Cantero et al., 2015). Pengadukan pada penelitian ini bertujuan untuk mencampurkan substrat kertas agar semua permukaan substrat dapat berkontak dengan pelarut. Penambahan substrat kertas secara *fed batch* menyebabkan substrat kertas akan mengendap di dasar wadah reaktor dan mempersempit area pengadukan sehingga kertas di bagian atas tidak teraduk sempurna.



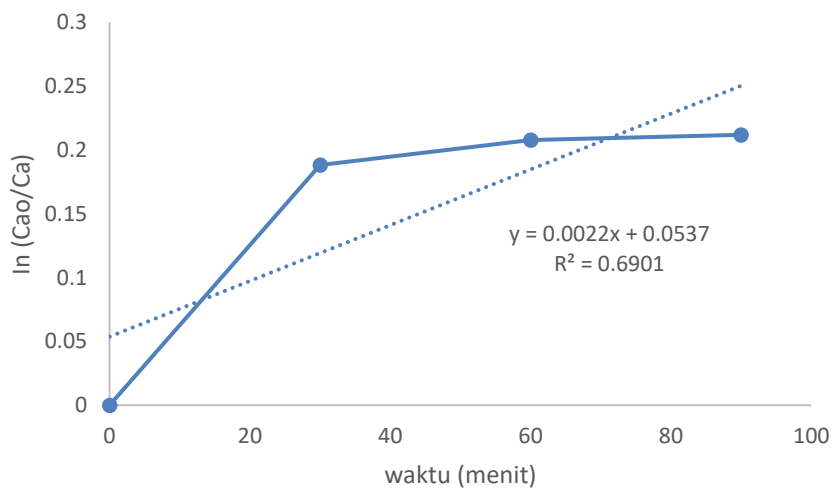
Gambar 1. Pengaruh suhu terhadap konversi



(a)



(b)



(c)

Gambar 2. Plot antara $\ln(C_{ao}/C_a)$ dan waktu pada berbagai suhu reaksi (a) 70°C, (b) 80°C, (c) 90°C

3.2 Penentuan Parameter Kinetika Reaksi Metode Integral Orde 1

Plot antara $\ln(C_0/C_a)$ dan waktu dapat dilihat sesuai **Gambar 2**. Berdasarkan **Gambar 2** dapat diketahui bahwa penentuan konstanta reaksi pada metode integral menghasilkan grafik dengan nilai R^2 yang masih rendah. Nilai R^2 yang mencapai 1 menandakan kesesuaian model dengan data (Okechi et al., 2024). Nilai R^2 pada penelitian ini memiliki nilai antara 0.6 hingga 0.7 menandakan metode ini belum sesuai dalam menentukan nilai konstanta reaksi dan parameter kinetika lainnya. Penelitian Okechi et al (2024), Alamo et al (2024) dan Latinwo dan Agarry (2015) menunjukkan semakin tinggi suhu hidrolisis maka nilai R^2 semakin besar yang menandakan model semakin sesuai dengan naiknya suhu hidrolisis (Flores-Alamo et al., 2024; Latinwo and Agarry, 2015; Okechi et al., 2024). Namun, nilai R^2 pada penelitian ini tidak terpengaruh dengan adanya perubahan suhu. Selain itu, perhitungan nilai energi aktivasi menggunakan metode ini menghasilkan nilai energi aktivasi yang negatif.

Beberapa penelitian telah menyatakan bahwa model hidrolisis selulosa yang menghasilkan glukosa merupakan model pseudo-homogeneous irreversible first-order reaction (Latinwo and Agarry, 2015; Mathew et al., 2024). Reaksi hidrolisis yang merupakan orde satu diperkuat dengan proses eksperimen yang menggunakan air berlebih sebagai reaktan pada proses hidrolisis. Akan tetapi, proses fed batch yang dilakukan pada penelitian ini dapat mempengaruhi hasil hidrolisis yang dihasilkan. Oleh sebab itu, penentuan parameter kinetika menggunakan metode integral orde satu tidak sesuai digunakan untuk penelitian ini.

3.3 Penentuan Parameter Kinetika Reaksi Metode Differensial

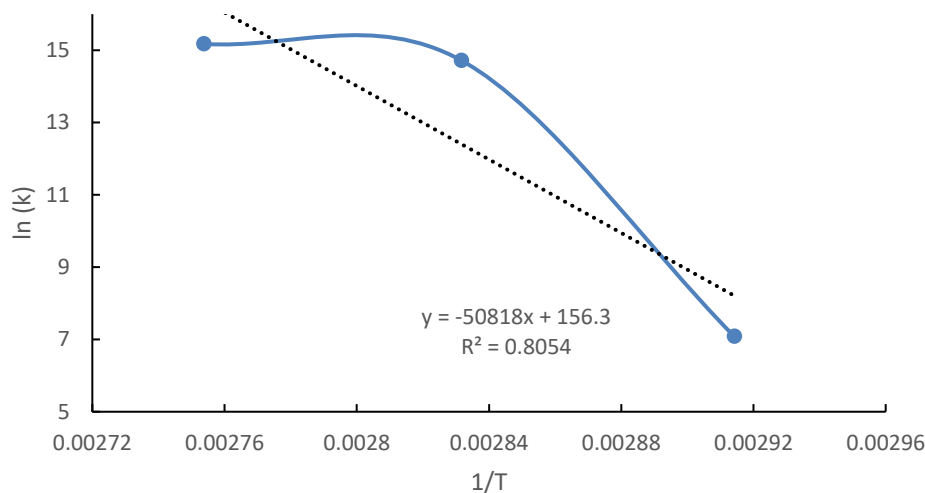
Tabel 2. Hasil perhitungan kinetika reaksi tiap variabel temperatur

T (°C)	k	n
70	$1,19 \times 10^3$	11,094
80	$2,46 \times 10^6$	17,515
90	$3,89 \times 10^6$	17,775

Pada metode differensial nilai orde dan konstanta reaksi dapat dilihat pada **Tabel 2**. Berdasarkan **Tabel 2** dapat diketahui bahwa nilai orde reaksi pada setiap suhu berbeda – beda. Dari nilai konstanta laju reaksi yang diperoleh, diketahui bahwa semakin tinggi suhu reaksi hidrolisis maka nilai konstanta laju reaksi akan semakin tinggi, sehingga laju reaksi juga semakin cepat. Semakin besarnya konstanta reaksi dengan suhu yang semakin tinggi juga dihasilkan oleh penelitian – penelitian lainnya (Flores-Alamo et al., 2024; Latinwo and Agarry, 2015; Okechi et al., 2024). Suhu suatu sistem mempengaruhi thermal motion dari partikel – partikel yang ada dalam suatu sistem. Jika suhu naik, maka thermal motion juga meningkat, sehingga memperbesar potensi terjadinya tumbukan antar partikel (Zhang et al., 2023). Kurva linearisasi persamaan Arrhenius tersaji pada **Gambar 3**.

Berdasarkan **Gambar 3** diperoleh persamaan regresi linear dengan nilai R^2 sebesar 0,8054. Energi aktivasi diperoleh sebesar 422,526 kJ/mol. Nilai energi aktivasi ini merupakan energi minimum agar reaksi hidrolisis dapat berlangsung. Sumber energi yang diperlukan agar reaksi dapat berlangsung lebih cepat berasal dari energi kinetik yang dihasilkan dari molekul-molekul reaktan yang bergerak. Dalam teori collision, thermal motion meningkat ketika terjadi kenaikan temperatur sehingga molekul memiliki energi yang lebih besar dari energi aktivasi dan meningkatkan potensi terjadinya tumbukan (Sodiqovna and Qizi, 2020).

Selain suhu, faktor lain yang mempengaruhi laju reaksi pada penelitian ini adalah konsentrasi reaktan dan katalis. Pengaruh konsentrasi reaktan terhadap laju reaksi berhubungan erat dengan jumlah partikel yang bertumbukan. Pada penelitian ini dilakukan penambahan reaktan limbah kertas secara fed batch sehingga semakin banyak reaktan yang ada di reactor setiap waktunya. Oleh sebab itu, semakin banyak jumlah partikel reaktan, maka semakin besar potensi terjadinya tumbukan efektif dikarenakan jarak partikel antar reaktannya semakin dekat yang mengakibatkan laju reaksi semakin meningkat. Katalis juga mempengaruhi laju reaksi dengan meningkatkan frekuensi dan efisiensi tumbukan antar partikel reaktan, change the direction of reactants, and reduce the intermolecular bonding in reactant molecules (Sodiqovna and Qizi, 2020).



Gambar 3. Grafik ln k vs 1/T pada penentuan energi aktivasi

4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini limbah kertas akan dihidrolisis secara fed batch menggunakan katalis asam sulfat dan dievaluasi kinetiknya. Berdasarkan penelitian yang dilakukan diperoleh bahwa konversi tertinggi hidrolisis limbah kertas diperoleh pada pengumpanan fed batch reaktan limbah kertas terkecil yaitu 2 gram dengan total waktu reaksi 90 menit. Semakin tinggi suhu dan waktu hidrolisis akan menghasilkan konversi yang semakin tinggi dimana konversi tertinggi diperoleh sebesar 19,083% pada suhu reaksi 90°C dan 90 menit reaksi. Evaluasi kinetika reaksi menunjukkan nilai energi aktivasi yang dihasilkan pada proses hidrolisis fed batch limbah kertas menggunakan asam sulfat sebesar 422.526 kJ/mol. Proses fed batch mempengaruhi konversi dan kinetika reaksi pada proses hidrolisis limbah kertas menggunakan katalis asam sulfat. Penambahan reaktan secara fed batch meningkatkan jumlah partikel reaktan dan potensi terjadinya tumbukan efektif sehingga mengakibatkan laju reaksi semakin meningkat.

DAFTAR PUSTAKA

Abril-González, M., Vele-Salto, A., & Pinos-Vélez, V. (2023). Kinetic Study of Acid Hydrolysis of the Glucose Obtained from Banana Plant, *Chemengineering*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/chemengineering7020039>

Adeoye, M. D., Abdulsalami, I. O., Tijani, K. O., Adeniji, M. R., dan Adeyemo, J. A. (2019). Kinetics and Thermodynamics Properties of Glucose Production from Pineapple and Pawpaw Peels by Acid Hydrolysis, *Journal of Chemical Society of Nigeria*, 44(3).

Cantero, D. A., Sánchez Tapia, Á., Bermejo, M. D., dan Cocero, M. J. (2015). Pressure and temperature effect on cellulose hydrolysis in pressurized water, *Chemical Engineering Journal*, 276, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.076>

Dyah Kencana Wulan, P. P., Ismojo, Khumaeroh, Syabila, A. N., Handayani, A. S., dan Ratnawati. (2024). Sustainable extraction of cellulose nanocrystals from empty palm oil bunches via low-acid hydrolysis. *Results in Engineering*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103012>

Emelyanov, V., Loginova, I., Kharina, M., Kleshchevnikov, L., dan Shulaev, M. (2016). Identification of kinetics parameters of wheat straw and sugar beet pulp hydrolysis with sulphurous acid, *Agronomy Research*, 14(5).

Fagan, R. D., Grethlein, H. E., Converse, A. O, dan Porteous, A. (1971). Kinetics of the Acid Hydrolysis of Cellulose Found in Paper

- Refuse. *Environmental Science and Technology*, 5(6), 545–547.
- Flores-Alamo, N., Gutiérrez-López, D., Solache-Ríos, M. J., Cuellar-Robles, F., dan Carreño-De-león, M. C. (2024). Production of reducing sugars from leaves crown of pineapple, corn stalk and rose stalk using phosphoric acid: Kinetics and thermodynamics, *Revista Mexicana de Ingeniera Química*, 23(1), <https://doi.org/10.24275/rmiq/IA24159>
- Fogler, H. S. (2016). *Elements of Chemical Reaction Engineering Fifth Edition*. Pearson Education.
- Jerome, M. P., Mathai Varghese, A., Kuppireddy, S., Karanikolos, G. N., dan Alamoodi, N. (2025). Upcycling paper waste into aminosilane-functionalized cellulose-graphene oxide composite aerogel adsorbents for low-pressure CO₂ capture, *Separation and Purification Technology*, 360. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.131089>
- Kanchanalai, P., Temani, G., Kawajiri, Y., dan Realf, M. J. (2016). Reaction kinetics of concentrated-acid hydrolysis for cellulose and hemicellulose and effect of crystallinity, *BioResources*, 11(1).
- Latinwo, G. K., dan Agarry, S. E. (2015). Experimental and Kinetic Modelling Studies on the Acid-Hydrolysis of Banyan Wood Cellulose to Glucose, *Journal of Natural Sciences Research*, 5(14).
- Li, L., Bu, Y., Feng, W., Kubota, K., Pan, Y., Huang, Y., Li, Y. Y., dan Qin, Y. (2024). Biomethane recovery and prokaryotic shifts in anaerobic co-digestion of food waste and paper waste in organic fraction of municipal solid waste: Effect of paper content. *Bioresource Technology*, 406. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130964>.
- Mathew, I. ., Otaraku, I. ., dan Oji, A. (2024). Kinetics Study of Hydrolysis Reaction of Sawdust of Hardwood, Softwood and Mixed Sawdust using Mild Sulfuric Acid. *Global Scientific Journals*, 12(2), 215–222.
- Okechi Ifeanyi-Nze, F., Ismail, U., Ebubechi Obasi, D., Kaycee Amamba, K., Abigail Udoh, E., Joseph Akubude, A., Awhobiwom Aboh, J., Marcus, E., Ubanioshave Aiso, S., Chukwudi Onwumelu, D., Joseph Edun, O., Achaab, P., Bethany Wokoma, P.-T., Samson Afolabi, O., Kenneth Didigwu, O., Ugochukwu Okonkwo, I., Fon Alain, Z., dan Kasim Ismail, A. (2024). Valorisation of Pineapple Peel Feedstock as a Source of Glucose for Bioethanol and Biochemical Production: Kinetic and Thermodynamic Insights into Cellulose Hydrolysis, *Progress in Chemical and Biochemical Research*, 3, 256–270. <https://doi.org/10.48309/PCBR.2024.435556.1333>
- SNI. (2002). Metode Pengujian Pengukuran Kadar Air, Kayu dan Bahan Berkayu. *Standar Nasional Indonesia 03-6850-2002*.
- Sodiqovna, O. M., & Qizi, I. . (2020). The Rate of a Chemical Reaction and Factors Affecting It. *EPR International Journal of Research and Development*. <https://doi.org/10.36713/epra2016>.
- Yu, H., Xu, Y., Ni, Y., Wu, Q., Liu, S., Li, L., Yu, S., & Ji, Z. (2018). Enhanced enzymatic hydrolysis of cellulose from waste paper fibers by cationic polymers addition, *Carbohydrate Polymers*, 200, 248–254. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.07.079>
- Zhang, J., Qie, J., Wang, L., & Liu, H. (2023). Design and Implementation of Temperature-sensitive Particle Temperature Measuring Structure in Microchannel, *Journal of Physics: Conference Series*, 2562(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2562/1/012041>
- Zulnazri, Z., Dewi, R., Sulhatun, S., & Nasrun, N. (2019). Kinetics study the decomposition of the cellulose into cellulose nanocrystals by hydrothermal with hydrochloric acid catalyst, *International Journal of Plant Biology*, 10(1). <https://doi.org/10.4081/pb.2019.7440>
-