

Kinetika Reaksi Pembentukan Furfural Dari Sekam Padi (*Oryza Sativa*) Dengan *Two-Stage Method*

Joshua Theo Anugerah Siahaan*, Achmad Aris Syahrul Ramadhan, Kindriari Nurma Wahyusi

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik & Sains, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: 21031010188@student.upnjatim.ac.id

Diterima:

Disetujui:

Abstract

Furfural is a valuable furan-based organic compound widely used in the chemical and pharmaceutical industries, and as an intermediate in the production of furfuryl alcohol and furanone. However, Indonesia still relies on imports due to the absence of local furfural producers. Rice husk, an abundant agricultural waste rich in pentosan, offers promising potential as an alternative raw material. This study aims to determine the kinetic equation for furfural formation from rice husk (*Oryza sativa*) using a two-stage method with sulfuric acid as a catalyst. The process involves hydrolysis of pentosan into pentose, followed by dehydration into furfural. Temperature (80–100 °C) and reaction time (20–60 minutes) variations were applied to observe their effect on furfural concentration, analyzed using the iodometric titration (Excess Iodine Method). Results show that the reaction follows first-order kinetics, with linear graphs and R^2 values approaching 1. Furfural concentration increased with both temperature and time. The activation energy obtained was 21.62 kJ/mol and the pre-exponential factor (k_0) was 14.26. This study confirms that the two-stage method is more effective in enhancing furfural production from rice husk biomass.

Keywords: *Kinetic, Rice Husk, Furfural*

Abstrak

Furfural merupakan senyawa organik turunan furan yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan digunakan secara luas dalam industri kimia, farmasi, serta sebagai bahan antara dalam pembuatan furfural alkohol dan furanon. Sayangnya, Indonesia belum memiliki produsen furfural lokal sehingga kebutuhan dalam negeri masih dipenuhi melalui impor. Sekam padi sebagai limbah pertanian memiliki kandungan pentosan tinggi dan sangat potensial sebagai bahan baku alternatif. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan persamaan kinetika reaksi pembentukan furfural dari sekam padi (*Oryza sativa*) menggunakan metode two-stage dengan katalis asam sulfat. Proses meliputi hidrolisis pentosan menjadi pentosa, dilanjutkan dehidrasi menjadi furfural. Variasi suhu (80–100 °C) dan waktu reaksi (20–60 menit) digunakan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap konsentrasi furfural, yang dianalisis menggunakan metode titrasi iodometri (Excess Iodine Method). Hasil menunjukkan bahwa reaksi mengikuti orde ke-1 dengan grafik linear dan R^2 mendekati 1. Konsentrasi furfural meningkat seiring kenaikan suhu dan waktu. Energi aktivasi diperoleh sebesar 21,62 kJ/mol dan k_0 sebesar 14,26. Penelitian ini menunjukkan bahwa metode two-stage lebih efektif dalam meningkatkan laju pembentukan furfural dari biomassa sekam padi.

Kata Kunci: *Kinetika, Sekam Padi, Furfural*.

1. Pendahuluan

Furfural merupakan senyawa organik turunan dari furan yang memiliki nilai ekonomi tinggi. Senyawa ini menjadi bahan baku penting dalam berbagai industri, seperti pelarut pada pengolahan minyak bumi, bahan antara dalam produksi furfural alkohol, furanon, tetrahidrofuran, serta digunakan dalam industri farmasi, herbisida, dan bahan tambahan pada parfum. Selain itu, furfural juga digunakan dalam sintesis senyawa intermediet seperti asam- β -(2-furil)akrilat yang berpotensi sebagai bahan aktif tabir surya, serta sebagai pereaksi dalam analisis laboratorium. Produksi global furfural mencapai sekitar 300 kiloton per tahun, dengan furfural alkohol menyumbang sekitar 62% dari pasar furfural dunia [1]. Permintaan dunia terhadap furfural berkisar antara 200.000–250.000 ton per tahun, dan Indonesia diperkirakan membutuhkan hingga 600.000 ton furfural pada tahun 2010. Sayangnya, hingga kini Indonesia belum memiliki produsen furfural dalam negeri, sehingga kebutuhan furfural masih dipenuhi melalui impor, dengan Tiongkok menguasai sekitar 72% pasar furfural dunia [2].

Limbah pertanian seperti jerami atau batang padi merupakan biomassa lignoselulosa yang sangat melimpah dan belum dimanfaatkan secara optimal. Data dari NPS (2011) menunjukkan bahwa dengan luas sawah 13,2 juta ha, Indonesia menghasilkan 65,8 juta ton jerami per tahun, yang sebagian besar belum dimanfaatkan dan berpotensi mencemari lingkungan jika dibakar. Padahal, jerami padi mengandung komponen hemiselulosa yang tinggi, yaitu pentosan sekitar 27–32%, yang dapat diolah menjadi furfural. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah sekam padi sebagai bahan baku pembuatan furfural sangat menjanjikan dari segi ketersediaan maupun kandungan kimianya.

Proses produksi furfural dari sekam padi dalam penelitian ini menggunakan metode *two-stage*, yaitu proses konversi dua tahap. Tahap pertama merupakan hidrolisis pentosan ($C_5H_8O_4$) menjadi pentosa ($C_5H_{10}O_5$) menggunakan katalis asam dan air. Kemudian, pentosa yang terbentuk akan mengalami reaksi dehidrasi pada reaktor yang berbeda untuk membentuk furfural ($C_5H_4O_2$) dan air [3]. Berbeda dengan metode *one-stage*, pendekatan *two-stage* ini memungkinkan kontrol reaksi yang lebih baik dan potensi peningkatan hasil furfural [4]. Dalam reaksi ini, kinetika reaksi sangat berperan penting untuk memahami laju dan efisiensi pembentukan furfural, serta menjadi dasar dalam perancangan dan optimasi reaktor apabila dilakukan *scale-up* pada skala industri [5].

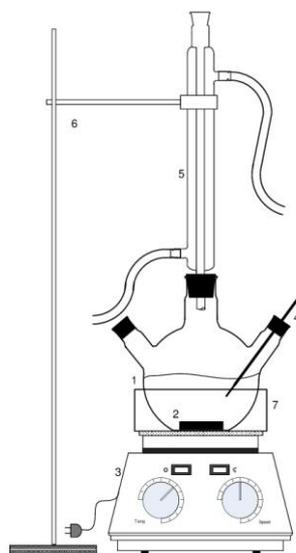
Penelitian tentang kinetika reaksi pembentukan furfural dari biomassa telah dilakukan sebelumnya. Sintha Soraya Santi (2004) meneliti hidrolisis enceng gondok menjadi furfural menggunakan metode *one-stage* dengan katalis HCl. Reaksi dilakukan pada suhu 105 °C, konsentrasi HCl 4 N, dan waktu 4,5 jam, menghasilkan kadar furfural sebesar 0,88% dengan persamaan laju reaksi mengikuti orde nol. Persamaan Arrhenius yang diperoleh adalah $k=11,278 \cdot e^{-1920/T}$ [6]. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa biomassa dengan kandungan pentosan dapat diolah menjadi furfural secara efisien, namun belum mengkaji metode dua tahap.

Penelitian ini dilakukan untuk menentukan persamaan kinetika reaksi dehidrasi furfural dari sekam padi (*Oryza sativa*) menggunakan metode *two-stage* dengan katalisator asam sulfat, serta menentukan orde reaksi dan mengkaji pengaruh waktu serta temperatur terhadap kandungan furfural yang diperoleh. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada pengembangan proses produksi furfural berbasis biomassa lokal sebagai upaya substitusi impor dan pemanfaatan limbah pertanian.

2. Metode Penelitian

Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan untuk penelitian ini antara lain sekam padi yang didapatkan dari CV. Atla Agrikultur, Kota Surabaya, asam sulfat dengan konsentrasi 98% yang didapatkan dari CV. Kimart Sedati, Sidoarjo, dan aquadest yang diperoleh CV. One Lab Surabaya. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain beaker glass 500 ml, batang pengaduk, corong kaca, gelas ukur 200 ml dan 10 ml, erlenmeyer ukuran 250 ml, pipet tetes, dan serangkaian alat hidrolisis.



Gambar 1. Rangkaian Alat Hidrolisis

Keterangan :

1. Labu leher tiga
2. *Magnetic stirrer*
3. *Hotplate stirrer*
4. Thermometer
5. Kondensor
6. Statif
7. Penangas Air

Prosedur Penelitian

Persiapan Alat dan Bahan

Alat-alat yang akan digunakan dibersihkan terlebih dahulu menggunakan air mengalir. Setelah itu, sekam padi yang sudah kering akan dilakukan pengecilan ukuran dengan menggunakan *chopper* hingga menjadi halus seperti bubuk. Setelah itu, menyiapkan bahan pendukung berupa asam sulfat (H_2SO_4) 98% dan aquadest

Pembuatan Furfural

Sebanyak 20 gram sekam padi yang telah ditimbang akan dicampurkan dengan 150 ml larutan asam sulfat (H_2SO_4) dengan konsentrasi 10% (m/m) ke dalam labu leher tiga. Campuran kemudian akan dilakukan proses hidrolisis suhu $100^\circ C$ selama 60 menit. Hasil yang didapatkan kemudian akan dilanjutkan dengan proses dehidrasi dengan waktu operasi sebesar 20 menit; 30 menit; 40 menit; 50 menit; dan 60 menit pada suhu operasi $80^\circ C$; $85^\circ C$; $90^\circ C$; $95^\circ C$; dan $100^\circ C$. Larutan hasil hidrolisis kemudian akan didinginkan dan akan dianalisa menggunakan titrasi dengan metode *Excess Iodine Method*.

Analisa Konsentrasi Furfural

Metode yang digunakan dalam menganalisa konsentrasi furfural ini adalah dengan titrasi iodometri yang dikenal dengan nama *Excess Iodine Method* dimana metode ini memanfaatkan iodine yang tersisa dari hasil reaksi antara larutan KIO_3 dengan furfural yang akan dititrasi dengan menggunakan larutan $Na_2S_2O_3$ [12]. Secara detail langkah – langkah dalam menganalisa konsentrasi furfural adalah sebagai berikut :

1. Sebanyak 5 mL distilat dicampurkan dengan 5 mL akuades, kemudian dikocok hingga larutan menjadi homogen.
2. Ditambahkan 10 mL larutan KIO_3 0,1N dan 5 mL larutan H_2SO_4 4N secara bersamaan. Campuran ini kemudian diaduk menggunakan stirrer selama 5 menit.
3. Setelah waktu pengadukan selesai, ke dalam campuran tersebut ditambahkan 5 mL larutan KI 0,1N, dan segera dilakukan titrasi menggunakan larutan $Na_2S_2O_3$ 0,1N dengan indikator amilum.
4. Konsentrasi furfural dalam campuran dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\text{Konsentrasi furfural (M)} = \frac{(b-a) \times N \times 2,5 \times Fp}{V_{\text{sampel}}}$$

Keterangan :

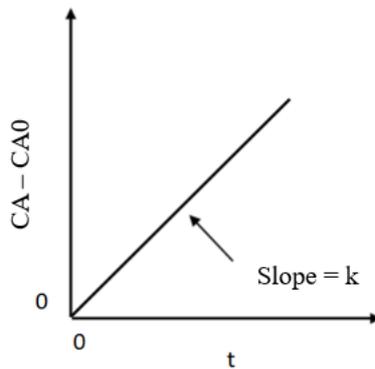
- b = Volume larutan $Na_2S_2O_3$ yang digunakan dalam titrasi blanko (mL)
 a = Volume larutan $Na_2S_2O_3$ yang digunakan dalam titrasi sampel (mL)
 N = Normalitas larutan $Na_2S_2O_3$ (N)
 Fp = Faktor pengenceran

Penentuan Orde Reaksi dan Konstanta Kecepatan Reaksi

Data hasil Analisa yang didapatkan akan berupa konsentrasi furfural pada saat proses hidrolisis dan konsentrasi furfural setelah proses dehidrasi. Konsentrasi furfural dari dua proses tersebut kemudian akan diuji ke dalam dua orde, yaitu [5]:

1. Reaksi Orde Ke-0

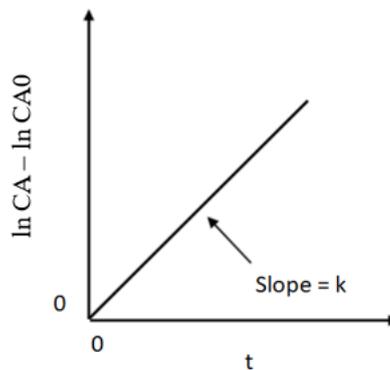
Konsentrasi furfural yang didapatkan setelah proses dehidrasi akan dimasukkan ke dalam grafik selisih antara CA (konsentrasi furfural pada proses dehidrasi) dengan CA0 (konsentrasi furfural pada proses hidrolisis) terhadap t (waktu). Dimana grafik akan diuji apakah garis yang didapatkan mendekati garis linear ($R^2 = 1$). Reaksi akan dinyatakan mengikuti orde ke-0 jika grafik menunjukkan garis linear dan konstanta kecepatan reaksinya (k) dapat dilihat melalui *slope* garis yang didapatkan.



Gambar 2. Grafik Hubungan Antara CA (Konsentrasi Furfural) Terhadap t (Waktu)

2. Reaksi Orde Ke-1

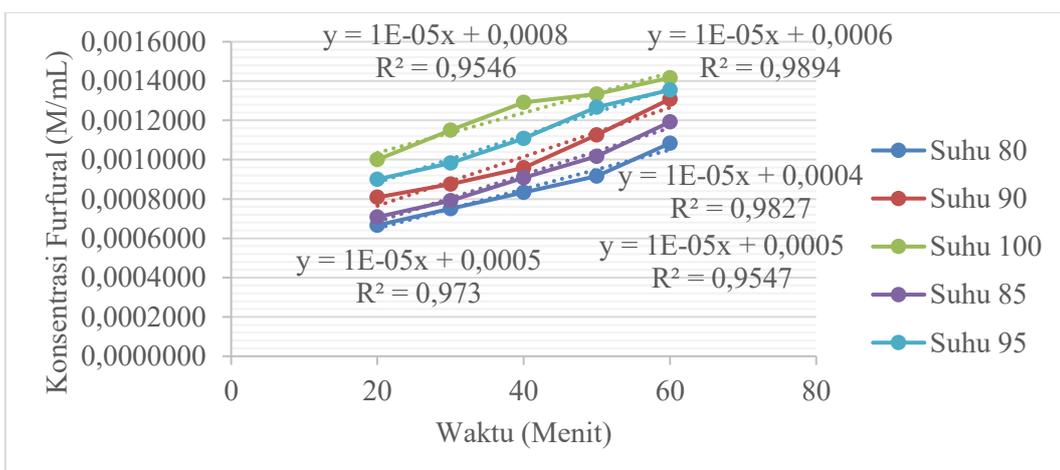
Selisih antara konsentrasi furfural setelah proses dehidrasi dan proses hidrolisis akan dimasukkan ke dalam grafik hubungan antara $\ln CA - \ln CA_0$ terhadap t (waktu) dimana CA adalah konsentrasi furfural setelah proses dehidrasi dan CA_0 adalah konsentrasi furfural setelah proses hidrolisis. Dimana grafik akan diuji apakah garis yang didapatkan mendekati garis linear ($R^2 = 1$). Reaksi akan dinyatakan mengikuti orde ke-1 jika grafik menunjukkan garis linear dan konstanta kecepatan reaksinya (k) dapat dilihat melalui *slope* garis yang didapatkan.



Gambar 3. Grafik Hubungan Antara $\ln CA - \ln CA_0$ Terhadap t (Waktu)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengaruh Suhu dan Waktu Operasi Terhadap Konsentrasi Furfural



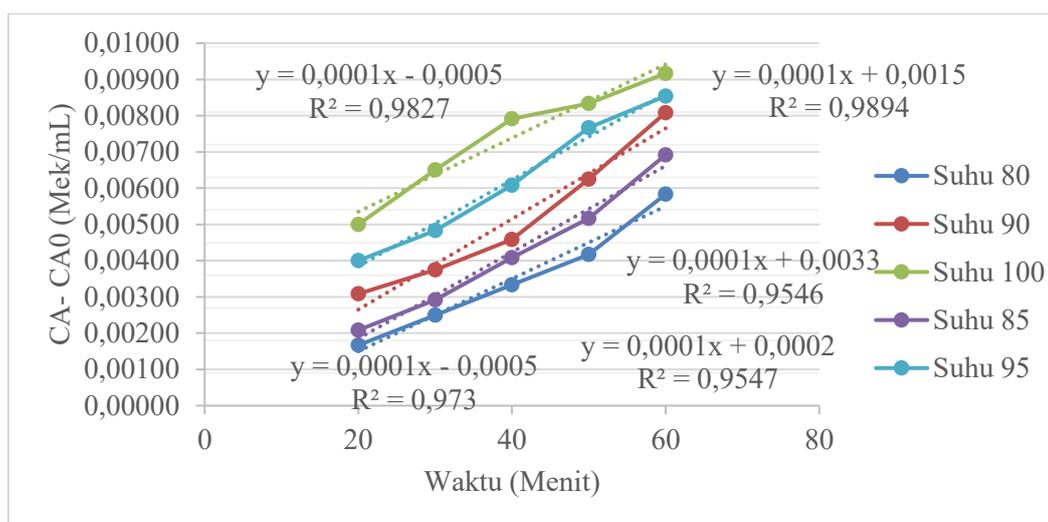
Gambar 4. Pengaruh Waktu Dehidrasi (Menit) Terhadap Konsentrasi Furfural Yang Didapatkan Pada Variasi Suhu Operasi Yang Berbeda

Berdasarkan **Gambar 4.** terlihat bahwa semakin lama waktu yang digunakan bahwa semakin lama waktu dehidrasi yang dijalankan maka konsentrasi furfural yang didapatkan juga akan semakin tinggi. Konsentrasi furfural tertinggi tercapai pada waktu operasi 60 menit yang dimana kondisi operasi ini merupakan kondisi terlama dibandingkan semua variable yang dijalankan pada percobaan ini. Menurut

Bahri pada tahun 2022, peningkatan waktu operasi pada proses dehidrasi akan menyebabkan kontak antara pentosa dan katalis asam akan semakin lama [13]. Dikarenakan proses operasi 60 menit merupakan proses operasi terlama pada penelitian ini, menyebabkan terbentuknya konsentrasi furfural yang lebih banyak lagi sehingga semakin lama waktu operasi yang dijalankan menyebabkan adanya peningkatan konsentrasi furfural.

Selain waktu, peningkatan konsentrasi furfural juga terpengaruh oleh suhu operasi. Terlihat pada **Gambar 4**, konsentrasi furfural tertinggi tercapai pada suhu operasi 100°C. Menurut Amborowati pada tahun 2016, reaksi akan berjalan lebih cepat apabila suhu dinaikkan. Hal ini dikarenakan Gerakan molekul yang direaksikan akan menjadi lebih cepat dengan meningkatnya suhu reaksi [14]. Suhu operasi 100°C merupakan suhu operasi tertinggi yang dijalankan pada penelitian ini menyebabkan kecepatan reaksinya berjalan lebih cepat dibandingkan variabel suhu lainnya. Hal ini menyebabkan terbentuknya furfural yang lebih banyak dibandingkan variabel suhu dibawahnya sehingga terlihat bahwa ada peningkatan konsentrasi furfural seiring meningkatnya suhu operasi.

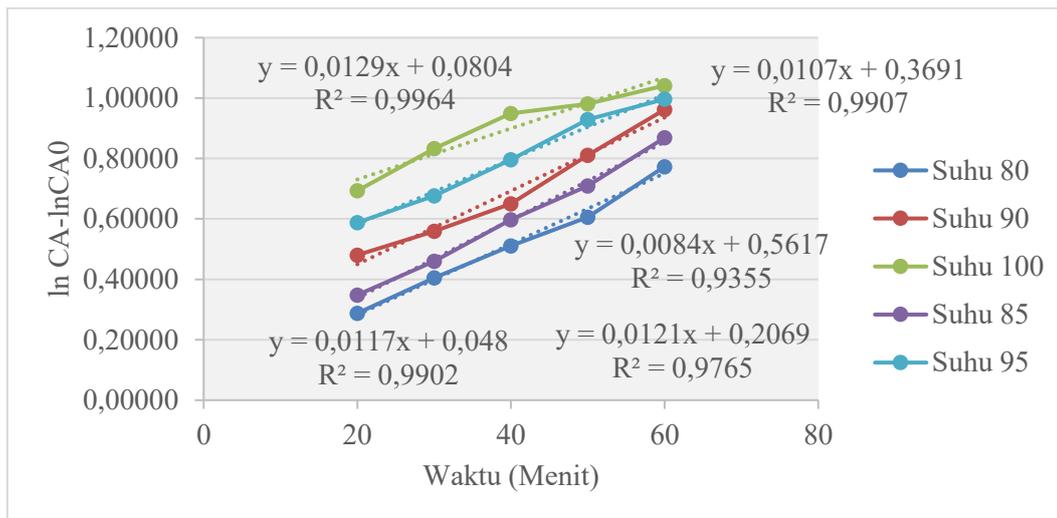
3.2 Analisa Data Penelitian Terhadap Reaksi Orde 0



Gambar 5. Hubungan Antara CA-CA0 Terhadap Waktu Pada Rentang Suhu Yang Bervariasi

Berdasarkan **Gambar 5**, dapat dilihat bahwa grafik menunjukkan bahwa semakin lama waktu operasi menyebabkan selisih nilai antara CA dan CA0 semakin besar. Hal ini mengindikasikan peningkatan furfural yang semakin tinggi seiring bertambahnya waktu. Hal yang sama juga terjadi ketika suhu operasi yang digunakan semakin tinggi, menyebabkan adanya selisih nilai CA dan CA0 yang semakin besar. Garis tren yang dihasilkan pada grafik juga sudah mendekati garis linear yang ditunjukkan dengan nilai R² melebihi 0,9 yang mengindikasikan bahwa reaksi berjalan pada orde ke-0. Namun jika melihat dari nilai slope yang didapatkan terindikasi bahwa nilai konstanta kecepatan reaksi yang didapatkan cenderung konstan. Hal ini menunjukkan bahwa suhu tidak memiliki pengaruh terhadap konstanta kecepatan reaksinya. Menurut Nugroho pada tahun 2022, pada umumnya perubahan temperatur akan mempengaruhi harga tetapan laju reaksi (k), dimana semakin tinggi temperatur maka nilai konstanta laju reaksi akan semakin besar seiring dengan berkurangnya energi aktivasi (Ea) [15]. Ketidaksesuaian hasil dengan teori ini menunjukkan bahwa reaksi tidak berjalan pada orde ke-0 sehingga perlu dilakukan pengujian pada orde lain.

3.3 Analisa Data Penelitian Terhadap Reaksi Orde 1

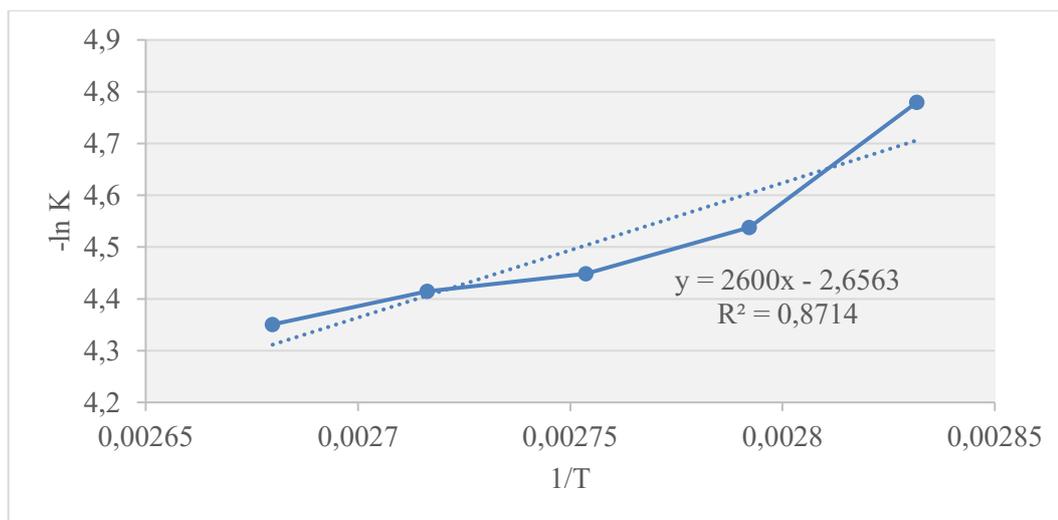


Gambar 6. Hubungan Antara Selisih ln CA dan ln CA0 dengan Waktu Pada Rentang Suhu Yang Bervariasi

Berdasarkan **Gambar 6.** dapat dilihat bahwa grafik menunjukkan bahwa semakin lama waktu operasi menyebabkan selisih nilai antara ln CA dan ln CA0 semakin besar. Hal ini mengindikasikan peningkatan furfural yang semakin tinggi seiring bertambahnya waktu. Hal yang sama juga terjadi ketika suhu operasi yang digunakan semakin tinggi, menyebabkan adanya selisih nilai ln CA dan ln CA0 yang semakin besar. Garis tren yang dihasilkan pada grafik juga sudah mendekati garis linear yang ditunjukkan dengan nilai R² melebihi 0,9 yang mengindikasikan bahwa reaksi berjalan pada orde ke-1. Pengaruh suhu terhadap konstanta reaksi juga ditunjukkan dengan perubahan nilai slope yang dihasilkan pada masing-masing garis. Kesesuaian teori ini menunjukkan bahwa reaksi yang dijalankan berada pada reaksi orde ke-1.

3.4 Pengaruh Suhu Terhadap Konstanta Kecepatan Reaksi Pembentukan Furfural

Menurut Nugroho (2022), pada umumnya perubahan temperatur akan mempengaruhi harga tetapan laju reaksi (k), dimana semakin tinggi temperatur maka nilai konstanta laju reaksi akan semakin besar seiring dengan berkurangnya energi aktivasi (E_a), sehingga reaksi akan semakin mudah berlangsung. Berdasarkan persamaan Arrhenius $k = A \cdot e^{-E_a/RT}$, energi aktivasi yang kecil akan mengakibatkan meningkatnya nilai konstanta laju reaksi, sehingga reaksi akan berjalan lebih cepat. Sebaliknya, apabila energi aktivasi meningkat, maka konstanta laju reaksi akan menurun, sehingga reaksi akan berjalan semakin lambat.



Gambar 7. Grafik Hubungan Antara ln K dengan 1/T

Berdasarkan grafik di atas terlihat bahwa semakin besar nilai 1/T maka nilai -ln K akan semakin besar. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar suhu hidrolisis yang digunakan maka konstanta reaksi hidrolisis juga akan meningkat. Hal ini sesuai dengan pernyataan Amborowati pada tahun 2016 yang menyatakan bahwa peningkatan suhu hidrolisis dapat mempengaruhi kecepatan reaksi sehingga dapat

mempengaruhi jumlah furfural yang didapatkan [14]. Pada grafik ini terdapat slope yang menyatakan bahwa energi aktivasi yang didapatkan adalah sebesar 21,62 kJ/mol dengan k0 sebesar 14,26 sehingga dapat disimpulkan bahwa persamaan kinetika reaksi dari sintesis furfural adalah sebagai berikut :

$$k=14,24e^{\frac{21,62}{RT}}$$

Berdasarkan penelitian tentang kinetika reaksi pembentukan furfural dari biomassa telah dilakukan Sintha Soraya Santi pada tahun 2004 dengan metode *one-stage*, disimpulkan bahwa persamaan laju reaksi mengikuti orde nol dengan persamaan Arrhenius yang diperoleh adalah $k=11,278 \cdot e^{-1920/RT}$ [6]. Menunjukkan bahwa pada metode *two-stage* dapat memberikan konstanta kecepatan reaksi yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode *one-stage*.

4. Kesimpulan

Berdasarkan data-data hasil percobaan yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut. Proses reaksi sintesis furfural berjalan pada reaksi orde ke-1, yang ditunjukkan dengan hasil analisa grafik yang linear serta nilai R² yang mendekati 1. Hubungan antara konsentrasi furfural terhadap waktu bersifat berbanding lurus, di mana semakin lama waktu hidrolisis yang digunakan, maka jumlah furfural yang didapatkan juga akan semakin besar. Selain itu, hubungan antara konsentrasi furfural terhadap suhu juga berbanding lurus, di mana semakin tinggi suhu hidrolisis yang digunakan, maka jumlah furfural yang didapatkan juga akan semakin besar. Nilai energi aktivasi yang didapatkan adalah sebesar 21,62 kJ/mol dengan nilai k0 sebesar 14,26.

5. Referensi

- [1] D. Arziyah, A. Kasim, A. Asben, and M. Busniah, "Tinjauan Literatur : Analisis Hubungan Kandungan Hemiselulosa dan Rendemen Furfural," *Penelitian dan Kajian Ilmiah*, vol. 18, no. 1, pp. 103–3, Jul. 2014.
- [2] Mitarlis, Ismono, and Tukiran, "PENGEMBANGAN METODE SINTESIS FURFURAL BERBAHAN DASAR CAMPURAN LIMBAH PERTANIAN DALAM RANGKA MEWUJUDKAN PRINSIP GREEN CHEMISTRY (Development Of Synthesis Method Of Furfural From Compost Heap Mixture To Reach Out Green Chemistry Principles)," Nov. 2011.
- [3] P. Mardina, H. A. Prathama, and D. M. Hayati, "PENGARUH WAKTU HIDROLISIS DAN KONSENTRASI KATALISATOR ASAM SULFAT TERHADAP SINTESIS FURFURAL DARI JERAMI PADI," *Konversi*, vol. 3, no. 2, pp. 37–44, Oct. 2014.
- [4] F. López *et al.*, "Optimization of furfural production by acid hydrolysis of eucalyptus globulus in two stages," *Chemical Engineering Journal*, vol. 240, pp. 195–201, Mar. 2014.
- [5] O. Levenspiel, *Chemical Reaction Engineering*, 3rd ed. New York: Wiley, 1999.
- [6] S. S. Santi, "PROSIDING SEMINAR HASONAL TEKNIK KIMIA S~BARDJO BROTOHARDJOHO KINETIKA REAKSI HIDROLISIS ~NCENG GONDOK MENJADI FURFURAL DENGAN KATALISATOR HCL," Surabaya, Aug. 2004.
- [7] R. Juwita, L. R. Syarif, and A. Tuhuloula, "PENGARUH JENIS DAN KONSENTRASI KATALISATOR ASAM TERHADAP SINTESIS FURFURAL DARI SEKAM PADI," *Konversi*, vol. 1, no. 1, p. 34, Oct. 2012.
- [8] R. Ramadhan, S. Bahri, A. Muarif, and R. Nurlaila, "PEMBUATAN FURFURAL DARI AMPAS TEBU DENGAN METODE HIDROLISIS MENGGUNAKAN KATALISATOR ASAM SULFAT," Aug. 2022.
- [9] C. Amborowati *et al.*, "PENGARUH WAKTU DAN TEMPERATUR HIDROLISIS DALAM PROSES SINTESIS FURFURAL DARI SEKAM PADI DENGAN MENGGUNAKAN METODE HIDROLISIS DAN DEHIDRASI Mahasiswa Prodi Teknologi Kimia Industri, Teknik Kimia, Politeknik Negeri Samarinda 2)," *Journal of Research and Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 72–77, Dec. 2016.
- [10] D. E. Nugroho, *Laju Reaksi & Mekanisme Reaksi*. Semarang: PPSM, 2022.

- [11] J. Ronggur Hamonangan Panjaitan, G. Bangun Persada, and D. Supriyadi, "Kinetic Parameters Evaluation of Furfural Degradation Reaction Using Numerical and Integral Methods," *Teknik Kimia dan Lingkungan*, vol. 2019, no. 2, pp. 71–76, May 2019
- [12] D. G. Blackmond, "Reaction progress kinetic analysis: A powerful methodology for mechanistic studies of complex catalytic reactions," Jul. 11, 2005, *Wiley-VCH, New York*
- [13] B. Danon, G. Marcotullio, and W. De Jong, "Mechanistic and kinetic aspects of pentose dehydration towards furfural in aqueous media employing homogeneous catalysis," 2014, *Royal Society of Chemistry*
- [14] E. R. Garrett and B. H. Dvorchik, "Kinetics and Mechanisms of the Acid Degradation of the Aldopentoses to Furfural," Jul. 1969
- [15] O. He *et al.*, "Experimental and kinetic study on the production of furfural and HMF from glucose," *Catalysts*, vol. 11, no. 1, pp. 1–13, Jan. 2021