Eksergi
Jurnal Ilmiah Teknik Kimia
Vol 20, No. 1. 2023

ISSN: 1410-394X
e-ISSN: 2460-8203

Analisis Termogravimetri dan Dekomposisi Termal pada Produksi Bio-Oil dari Daun Tebu Menggunakan Proses Pirolisis Cepat

Thermogravimetric Analysis And Thermal Decomposition Of Bio-Oil Production From Sugarcane Leaves Using Fast Pyrolysis Process

Ilham Mufandi[a*], Ratchaphon Suntivarakorn, Wasakorn Treedet and Piyapong Singbua

[a]*Department of Agro-Industrial Technology, University of Darussalam Gontor, Ponorogo 63471, Indonesia*

[b]*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, 123 Moo 16, Mitrapap Rd, Nai-Muang, Muang District, Khon Kaen 40002, Thailand*

Artikel histori :

Diterima 6 Juni 2023
Diterima dalam revisi 13 Juni 2023
Diterima 15 Juni 2023
Online 3 Juli 2023

ABSTRAK: Daun tebu merupakan salah satu limbah agroindustri yang berasal dari tanaman tebu. Pada penelitian ini daun tebu dimanfaatkan sebagai bahan baku pirolisis yang menghasilkan tiga produk utama yaitu liquid, padat, dan. Fokus penelitian ini adalah mengidentifikasi pengaruh suhu pirolisis, mengidentifikasi perubahan massa, mengidentifikasi dekomposisi, dan mengidentifikasi komposisi kimia bio-oil. Pirolisis dilakukan menggunakan reaktor *Circulating Fluidized Bed* (CFBr) dengan variasi suhu dari 440^{o}C sampai 520^{o}C. Analisis karaktersitik pirolisis daun tebu menggunakan analisis termogravimetri (TGA), DTA, dan analisis GC-MS. Hasil penelitian menunjukan bahwa suhu operasi memiliki pengaruh yang signifikan pada pirolisis. Bio-oil tertinggi terdapat pada suhu 480^{o}C yaitu 34,33%. Hasil TGA diketahui bahwa proses dekomposisi daun tebu dibagi menjadi 3 tahap yaitu: 1) dehidrasi kadar air terjadi pada suhu <200^{o}C, 2) pirolisis secara aktif terjadi pada suhu 200^{o}C sampai 380^{o}C, dan 3) proses pirolisis secara pasif terjadi pada suhu 380^{o}C sampai 500^{o}C. Hasil DTA diketahui bahwa perubahan termal dipengaruhi oleh laju pemanasan pirolisis. Senyawa bio-oil tertinggi adalah β-D-Glucopyranose 1,6-anhydro, acetic acid, dan 2-Propanone 1-hydroxy-. Penelitian ini membuktikan bahwa suhu memiliki peran penting pada proses pirolisis.
Kata Kunci: Daun tebu; Dekomposisi Termal; Pirolisis;

ABSTRACT: Sugarcane leaves are one of the agro-industrial wastes derived from sugarcane plants. In this research, sugarcane leaves are used as raw material for pyrolysis which produces three main products: liquid, solid, and gas. The focus of this research is to identify the effect of temperature on pyrolysis, identify mass changes, identify decomposition, and identify the chemical composition of bio-oil. The pyrolysis was carried out using a Circulating Fluidized Bed (CFBr) reactor with pyrolysis temperature variations from 440^{o}C to 520^{o}C. Analysis of pyrolysis characteristics of sugarcane leaves are used thermogravimetric analysis (TGA), DTA, and GC-MS analysis. The results showed that the operating temperature had a significant effect on the pyrolysis process. The highest bio-oil found at 480^{o}C, namely 34.33%. TGA results show that the decomposition process of sugarcane leaves is divided into 3 stages: 1) dehydration of water content occurs at <200^{o}C, 2) active pyrolysis occurs from 200^{o}C to 380^{o}C, and 3) passive pyrolysis occurs at temperature from 380^{o}C to 500^{o}C. DTA results show that the thermal changes are affected by the pyrolysis heating rate. The highest bio-oil compounds are β-D-Glucopyranose 1,6-anhydro, acetic acid, and 2-Propanone 1-hydroxy-. This research proves that temperature has an important role in the pyrolysis process.
Keywords: Sugarcane leaves; Thermal Decomposition; Pyrolysis; TGA;

1. Pendahuluan

Tebu menjadi salah satu tanaman komoditas di Indonesia yang mendorong perekonomian masyarakat. Total tebu di Indonesia mengalami peningkatan dari tahun 2020 ke tahun 2021 sebesar 2.130,7 ribu ton menjadi 2.418,4 ribu ton (bps.go.id). Secara umum, tebu menjadi bahan baku utama industri gula melalui proses penggilingan, pemurnian, penguapan, kristalisasi, pemisahan dan *sugar handling*. Di lain sisi, tebu juga merupakan bahan agroindustri yang dapat memproduksi limbah seperti molase (tetes), pucuk tebu,

* Corresponding Author: +6285766890141
Email: ilhammufandi@unida.gontor.ac.id

bagasse (ampas tebu), blotong, dan daun tebu (Cavalcanti et al., 2020). Saat ini, kebanyakan limbah dari tebu hanya dimanfaatkan sebagai pakan ternak. Berdasarkan kandungannya, limbah tebu memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai salah energi terbarukan melalui proses pirolisis (de Almeida et al., 2022). Daun tebu merupakan salah satu jenis limbah tebu yang dapat dikonversi menjadi biofuel menggunakan teknologi pirolisis. Daun tebu mengandung selulosa dan hemiselulosa yang tinggi serta dapat dipolimerisasi secara kimia atau bantuan enzim menjadi monomer gula sederhana (Chandel et al., 2012). Selain itu, Selulosa dapat diubah menjadi berbagai produk kimia dan bahan bakar melalui proses pirolisis.

Pirolisis merupakan proses konversi termokimia tanpa bantuan oksigen yang digunakan untuk mengkonversi biomassa menjadi tiga produk utama yaitu cair (bio-oil), padat (c*har*), dan gas (s*yngas*) (Siti Jamilatun et al., 2022; Suntivarakorn & Treedet, 2016). Berdasarkan prosesnya, pirolisis dapat berlangsung secara cepat (*fast pyrolysis*) dan lambat (*slow pyrolysis*). Faktor yang mempengaruhi kondisi operasi pirolisis adalah suhu, laju pemanasan, kecepatan reaksi, dan karakteristik biomassa (G. Mishra et al., 2015). Proses pirolisis mengubah bahan organik menjadi produk melalui proses dekomposisi yang berlangsung tanpa oksigen dengan suhu dan tekanan tinggi. Metode pirolisis lebih fleksibel dan efisien dibandingkan dengan proses konversi termokimia lainnya. Suhu operasi pirolisis terjadi berkisar dari suhu 300^{o}C sampai suhu optimum 700^{o}C tergantung dengan biomassa yang digunakan. Perubahan massa pada proses pirolisis dapat diketahui dengan cara mengamati laju perpindahan panas dan laju kecepatan reaksi (Jamilatun et al., 2022; Mishra & Mohanty, 2020). Kondisi termal dan perpindahan massa dapat diketahui dengan uji bahan melalui *Thermogravimetric Analysis* (TGA) (Moralı et al., 2016).

Secara umum, TGA digunakan untuk melihat pengaruh termal pada bahan selama proses pirolisis berlangsung. Metode ini dapat menggambarkan keberadaan energi aktivasi pada konversi bahan yang terjadi pada proses pirolisis (Dhyani et al., 2017). Dari data termogravimetri, kinetika reaksi yang terjadi pirolisis dapat diketahui melalui pendekatan matematis yang berbeda (Alves et al., 2022). Dekomposisi termal dan kinetika reaksi selama proses pirolisis penting untuk diketahui sebagai dasar untuk mendesain reaktor pirolisis (Bach & Chen, 2017). Selain itu, laju reaksi yang terjadi pada konversi biomassa diperlukan untuk merumuskan aturan mekanisme reaksi serta perpindahan panas dan massa (Branca & Di Blasi, 2015). Suhu menjadi faktor penting pada perubahan massa (Jamilatun et al., 2020; Ren et al., 2016).

Suhu dapat mempengaruhi produk pirolisis baik bio-oil, char, dan gas. Selain itu, meningkatnya suhu operasi pada pirolisis dapat mempengaruhi komposisi kimia bio-oil. Hal ini dapat diketahui melalui uji kromatografi gas-spektrometri massa (GC-MS). Metode ini digunakan untuk analisa kimia yang mana sample dipanaskan hingga terkomposisi menjadi molekul-molekul yang lebih kecil. Analisis GC/MS dapat memberikan informasi berbagai komponen yang terdapat didalam bio-oil (Sugumaran et al., 2017). Menurut review dari (Akoueson et al., 2021) teknik GC-MS menawarkan keuntungan seperti menekan langkah persiapan yang ekstensif, membatasi kontaminasi karena pelarut dan kemungkinan untuk menganalisis partikel kecil. Karakterisasi GC-MS dilakukan dibawah suhu atmosfer menggunakan gas helium dengan menganalisa produk degradasi termal senyawa setelah memanaskan sampel pada suhu tinggi (Fries et al., 2013).

Penelitian ini mengaplikasikan proses pirolisis dari daun tebu sebagai bahan baku utama. Kondisi suhu pada pirolisis telah diatur bervariasi dari 420^{o}C, 460^{o}C, 480 ^{o}C, 500 ^{o}C, dan 520^{o}C. Tahapan penelitian yang dilakukan adalah persiapan daun tebu, persiapan unit pirolisis menggunakan reaktor Circulating Fluidized Bed (CFBr) dengan kecepatan pembakaran berkisar 7 m/s. Tujuan utama pada penelitian ini adalah menerapkan uji TGA, DTA dan GC-MS untuk mengetahui karakteristik produk pirolisis dari daun tebu. Pengaruh suhu pada produk pirolisis, perubahan massa, dekomposisi termal, dan komposisi kimia dari bio-oil telah dijelaskan secara detail.

2. Metode Penelitian

2.1. Bahan

Bahan baku utama pada penelitian ini adalah daun tebu (sugarcane leave) sekitar 45 kg/h untuk umpan pada sistem pirolisis. Sebelum masuk ke tahap pirolisis, daun tebu terlebih dahulu dipotong dengan ukuran 1-3 mm. Pemotongan daun tebu bertujuan untuk memudahkan proses pirolisis. Selain itu, daun tebu dengan ukuran yang sama dapat menghasilkan dekomposisi termal yang sama dan hasil pirolisis yang maksimal. Sifat fisik dan sifat kimia daun tebu telah dianalisa berdasarkan ASTM D240 yang dapat dilihat pada Supplementary 1. Bahan baku pada penelitian ini juga telah dianalisa berdasarkan analisis proksimat yang terdiri dari kadar air, volatile matter, fixed carbon dan kadar ash. Daun tebu juga telah dianalisis kandungan kimia yang terdiri karbon, hydrogen, nitrogen, sulfur, dan O berdasarkan perkin Elmer PE 2400 series II.

2.2. Alat

Penelitian ini merupakan penelitian pengembangan dari alat yang digunakan pada penelitian sebelumnya (Mufandi et al., 2020; Treedet et al., 2020) yang diaplikasikan pada rumput gajah (napier grass). Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah unit pirolisis cepat (fast pyrolysis) yang menggunakan reaktor circulating fluidized bed yang menggunakan media pasir untuk proses perpindahan panas melalui preheater burner LPG yang disirkulasikan dalam ruang pembakaran. Pasir yang digunakan berukuran 0,249 mm. Alat lain yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut: Hopper yang digunakan untuk menampung bahan baku daun tebu, Siklon digunakan untuk memisahkan partikel setelah proses pembakaran daun tebu di reaktor. Unit condenser digunakan untuk mendinginkan gas panas hasil pembakaran daun tebu menjadi bio-oil (produk cair dari pirolisis), dan satu set alat termokopel untuk memantau dan mengontrol sistem pirolisis. Konfigurasi reaktor CFB yang digunakan terdiri dari ketinggian sekitar 4,5 m dan

ISSN: 1410-394X
e-ISSN: 2460-8203

diameter 10 cm. Alat pirolisis yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1. Sistem pirolisis ini merupakan pengembangan dari penelitian sebelumnya (Mufandi et al., 2020; Treedet & Suntivarakorn, 2017).

Tabel 1. Sifat fisik dan kimia daun tebu sebagai bahan baku *oksigen dan fixed karbon dihitung secara manual

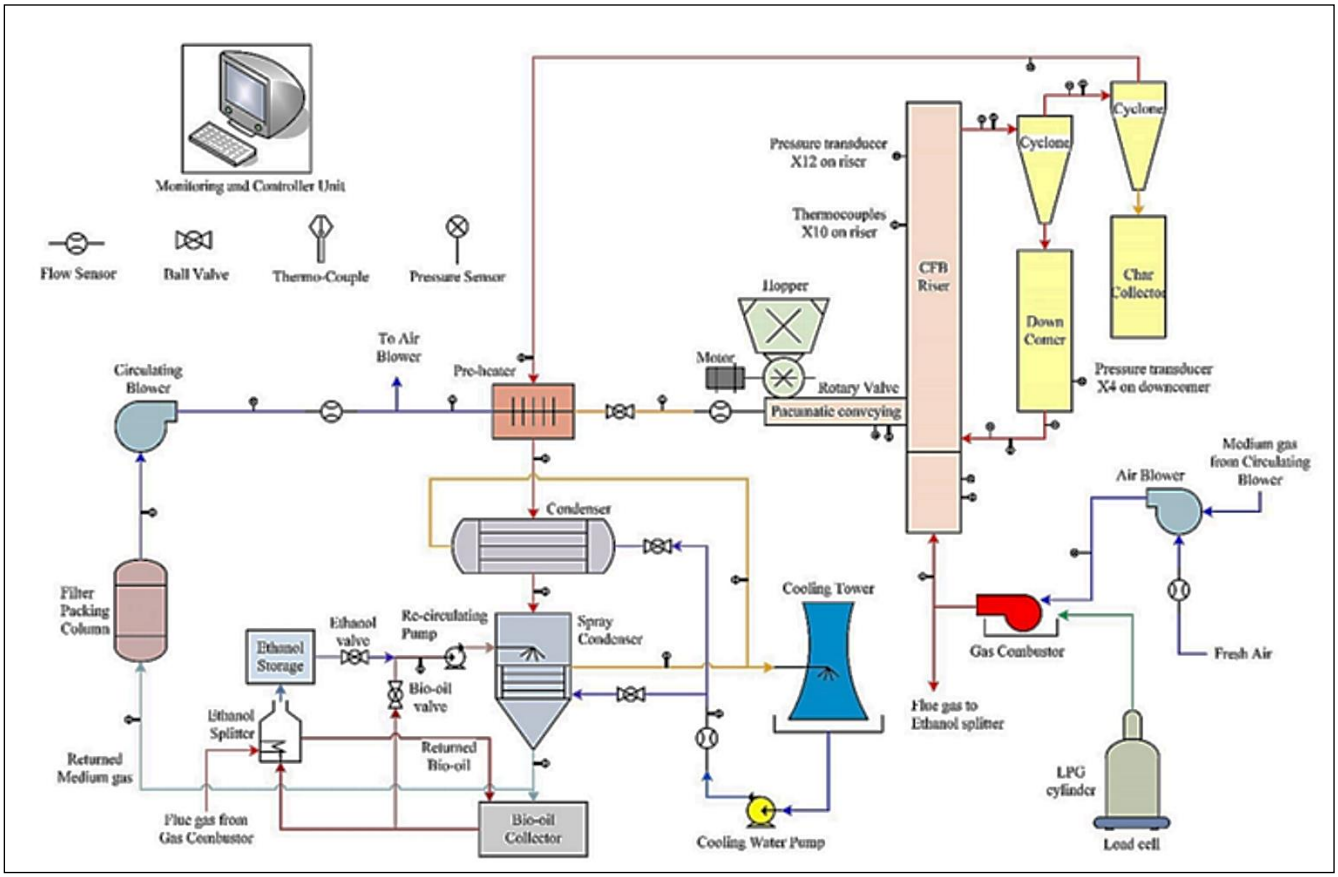
Komponen	Daun Tebu	Unit
Rata-Rata diameter	1-3	mm
Kepadatan massa	220,6	Kg/m^3
Nilai Pembakaran (*heating value*)	16.33	Mj/kg
Analisis Proksimat:		
Kadar air	8,0	wt%
Bahan mudah menguap	70,5	wt%
*Fixed Carbon**	15,0	wt%
Kadar abu	6,5	wt%
Analisis Unsur;		
C	40,12	%
H	6,09	%
N	0,25	%
S	-	%
O*	53,54	%

2.3. Prosedur Penelitian

Daun tebu sebagai bahan baku dimasukan ke dalam reaktor dengan laju 45 kg/h. kecepatan *velocity* reaktor terjadi sekitar 7 m/s. Kondisi suhu pirolisis diatur pada kisaran 420ºC, 460ºC, 480 ºC, 500 ºC, dan 520ºC didalam reaktor *Circulating Fluidized Bed Ractor* (CRBr). Setelah dari reaktor, proses selanjutnya adalah unit *cyclone*, dimana unit ini digunakan untuk memisahkan partikel-partikel padat yang disebut sebagai produk char. Hasil uap panas kemudian didinginkan melalui kondenser untuk memperoleh bio-oil. Selanjutnya produk gas yang tidak terkondensasi dikirim balik ke tungku pemanas reaktor.

2.4. Analisis

Analisis yang dilakukan pada penelitian ini berupa analisis suhu menggunakan termometer yang dipasang pada sistem untuk mengetahui kondisi suhu pada sistem karena suhu sangat mempengaruhi produk pirolisis. Selain itu, analisis GC/MS digunakan untuk menguji komposisi kimia hasil bio-oil. Analisis kromatografi gas/spektrometri massa bio-oil pirolisis dilakukan dengan menggunakan Agilent 7890A untuk kromatografi gas dan I 7000 A untuk spektrometri massa dengan DB-wax kolom kapiler, 60 m × 0,25 mm,



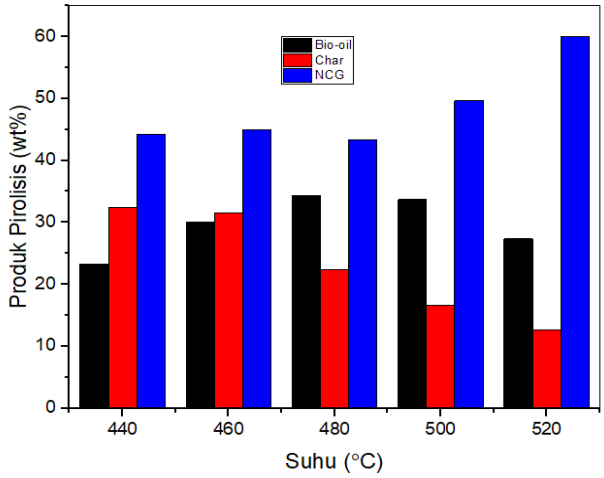
Gambar 1. Diagram proses pirolisis

ketebalan film 0,25 µm. 200 µl bio-oil diencerkan dalam 1 ml Metil Alkohol, dan sampel disaring melalui membran dengan ukuran pori 0,45 µm. Kondisi pengujian adalah sebagai berikut: volume injeksi 1 µl,suhu 250°C, gas pembawa Helium, laju aliran gas 1,0 ml/menit, identifikasi perpustakaan spektral massa NIST 2008. Analisis TGA merupakan salah satu metode analisis termal berdasarkan penurunan massa selama sampel (daun tebu) diberi panas. TGA dapat memberikan nilai pada perubahan massa dan dekomposisi pada material.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengaruh Variasi Suhu Pada Pirolisis

Proses pirolisis merupakan proses dekomposisi kimia dari bahan baku biomassa melalui proses pemanasan tanpa udara. Keberadaan suhu dan waktu pirolisis menjadi faktor penting yang harus diketahui. Tiga produk pirolisis (bio-oil, char, dan *syngas*) akan mengalami dekomposisi massa sejalan dengan meningkatnya suhu pirolisis. Pada penelitian ini, suhu pirolisis dioperasikan pada suhu 440°C, 460°C. 480°C, 500°C, dan 520°C. Sedangkan kecepatan velocity yang digunakan adalah 7 m/s. Hasil penelitian menunjukan bahwa produk bio-oil tertinggi dari pirolisis daun tebu terdapat pada suhu 480°C yaitu 34,33%. Hasil penelitian ini relevan dengan hasil penelitian (Saif et al., 2020) yang telah melakukan penelitian pirolisis dari limbah tebu. bio-oil mengalami kenaikan ketika suhu mengalami kenaikan, namun pada suhu 500°C bio-oil mengalami penurunan. Pengaruh kondisi suhu ini relevan dengan hasil penelitian (Jamilatun et al., 2022) yang menyatakan bahwa bio-oil meningkat sejalan dengan meningkatnya suhu operasi. Hal ini dikarenakan suhu tinggi pirolisis menyebabkan reaksi perengkahan sekunder yang dapat memutuskan atau memecahkan rantai hidrokarbon. Pada kondisi ini, reaksi perengkahan sekunder mempengaruhi produk cair. Semakin banyak ikatan hidrokarbon yang terputus, maka produk bio-oil akan mengalami penurunan.

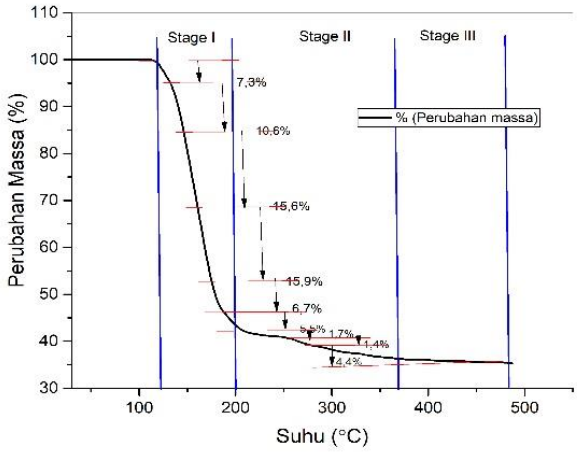


Gambar 2. Pengaruh suhu pada proses pirolisis daun tebu

Sedangkan produk arang (char) mengalami penurunan ketika suhu mengalami kenaikan dikarenakan proses pirolisis merupakan dekomposisi termal melalui proses pemanasan tanpa oksigen. Kehadiran oksigen menyebabkan terjadinya reaksi oksidasi dan bahan biomassa akan terbakar sempurna menjadi abu. Selain itu, reaksi perengkahan sekunder tidak berlangsung pada proses pembentukan arang. Pada produk *non-condensable* gas selalu mengalami kenaikan sebanding dengan meningkatnya suhu operasi. Dalam hal ini, diperlukan sistem pendingin yang bagus untuk menghilangkan reaksi perekahan sekunder. Secara detail, hasil penelitian pengaruh suhu pada produk pirolisis dapat dilihat pada Gambar 2.

3.2 Analisis Termogravimetri (TGA) dan Analisis Diferensial Termal (DTA)

Terdapat dua jenis teknik analisa termal yang diaplikasikan pada penelitian ini yaitu analisis termogravimetri dan analisis diferensial termal. Analisis TGA digunakan untuk mengetahui perubahan massa berdasarkan perubahan suhu dan waktu. Sedangkan analisa DTA digunakan untuk mengukur perbedaan suhu antara sampel. Kecepatan pemanasan yang digunakan pada penelitian ini adalah 7 m/s



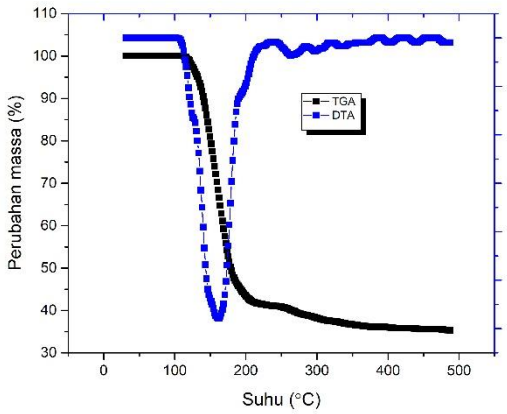
Gambar 3. Perubahan massa pada pirolisis daun tebu

Berdasarkan hasil penelitian, perubahan massa daun tebu selama proses pirolisis mulai terjadi pada suhu > 120°C. Perubahan massa pertama sebesar 7,3% pada suhu 120°C sampai suhu 140°C. Selanjutnya, perubahan massa mengalami penurunan secara kontinyu sampai suhu maksimal. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya dekomposisi termal pada daun tebu. Sehingga komponen yang terkandung pada daun tebu juga akan terdekomposisi secara kontinyu. Proses dekomposisi termal yang terjadi pada pirolisis daun tebu dapat dilihat pada Gambar 3. Proses dekomposisi daun tebu dibagi menjadi 3 tahap yaitu: 1) dehidrasi kadar air pada daun tebu terjadi pada suhu <200°C, 2) proses pirolisis secara aktif terjadi antara suhu 200°C sampai suhu 380°C, dan 3) proses pirolisis secara pasif terjadi pada suhu 380°C sampai suhu 500°C. Proses dehidrasi kadar air berfungsi menguapkan komponen volatile ringan. Pada tahap II yaitu proses pirolisis aktif terjadi pembentukan senyawa kimia. Pada tahap III yaitu proses pirolisis pasif terjadi dekomposisi yang cukup kecil

ISSN: 1410-394X
e-ISSN: 2460-8203

dan penurunan berat massa yang tidak signifikan. Hasil penelitian ini sebanding dengan penelitian yang dilakukan oleh (Kan et al., 2016; Naqvi et al., 2021; Strezov et al., 2008).

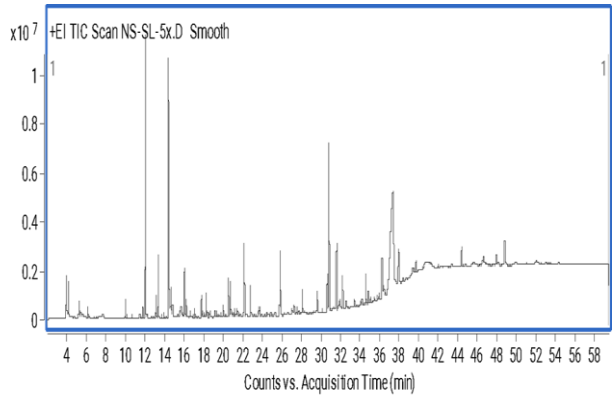
Hasil Analisis Diferensial Termal (DTA) pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4. Perubahan termal menunjukan Garis biru merupakan kurva DTA menggambarkan kondisi termal yang terjadi pada proses pirolisis. Termal mengalami perubahan yang konstan. Perubahan termal dipengaruhi oleh laju pemanasan pirolisis. Kondisi termal yang positif menggambarkan terjadinya proses endoterm sedangkan kurva negatif menggambarkan terjadinya proses eksoterm. Pada penelitian ini terjadi proses eksoterm.



Gambar 4. Perubahan termal pada pirolisis daun tebu

3.3 Komposisi Kimia pada Bio-Oil

Pada penelitian ini bio-oil telah diuji menggunakan Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) untuk mengidentifikasi komponen yang terbentuk pada bio-oil. Proses pengujian GC-MS dilakukan dengan menggunakan Agilent 7890A untuk kromatografi gas dan Agilent 7000A untuk spektrometri massa dengan DB-wax kolom kapiler, 60 m × 0,25 mm, ketebalan film 0,25 µm. 200 µl bio-oil diencerkan dalam 1 ml Metil Alkohol, dan sampel disaring melalui membran dengan ukuran pori 0,45 µm. Kurva hasil analisis GC-MS dapat dilihat pada Gambar 5. Sedangkan komposisi kimia dari bio-oil yang dioperasikan pada suhu 480°C dan laju umpan 45 kg/h dapat dilihat pada Table 2 (*supplementary data*). Komposisi tertinggi dalam bio-oil terdiri dari β-D-Glucopyranose, 1,6-anhydro- sebesar 22.20%, acetic acid sebesar 14,96%, 2-Propanone, 1-hydroxy- sebesar 9,97%, 1-Hydroxy-2-butanone sebesar 1,89%, Propanoic acid sebesar 1,58%, 2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl- sebesar 2,69%, 1H-Imidazole, 4-methyl- sebesar 7,91% dan senyawa lain dibawah 0% yang dapat dilihat pada Tabel 2 (*supplementary data*). Senyawa Levoglucosan (1,6-Anhydro-β-D-glucopyranose) merupakan senyawa tertinggi dalam bio-oil yang dihasilkan dalam penelitian ini. Senyawa Levoglucosan (1,6-Anhydro-β-D-glucopyranose) adalah anhydrosugar yang diproduksi melalui pirolisis dan banyak ditemukan di alam. Levoglucosan (1,6-Anhydro-β-D-glucopyranose) dapat digunakan sebagai antibiotik makrolida dan modifikasi gula.



Gambar 5. Spectra GC-MS bio-oil dari pirolisis daun tebu

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini telah diaplikasikan proses pirolisis dari daun tebu yang menghasilkan tiga produk utama yaitu bio-oil, char, dan syngas. Hasil penelitian menunjukan bahwa kondisi suhu pirolisis dapat mempengaruhi produksi bio-oil, char, dan gas. Hasil pirolisis tertinggi terdapat pada suhu 480°C dengan umpan daun tebu 45 kg/h yaitu 34.44%. Perubahan massa daun tebu pada saat pembakaran terjadi secara konstan dalam tiga tahap yaitu dehidrasi kadar air, pirolisis aktif, dan pirolisis pasif. Hasil analisis GC-MS diketahui bahwa komponen penyusun senyawa kimia yang terdapat pada bio-oil terdiri dari: Aromatic, acetic acid, phenol, metil, propane, alcohol, ketone, dan lain-lain. senyawa tertinggi adalah β-D-Glucopyranose, 1,6-anhydro- sebesar 22.20% dan acetic acid sebesar 14,96%.

Ucapan Terima kasih

Terimakasih kami ucapakan kepada Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Technology, Khon Kaen University yang telah membiayai penelitian ini dan ucapan terimakasih kepada Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Universitas Darussalam Gontor.

Daftar Pustaka

Badan Pusat Statistik Indonesia. Statistika Tebu Indonesia 2021 [Internet]. Badan Pusat Statistik; 2021 [cited Jun 14]. Available from: https://www.bps.go.id/publication/2022/11/30/6392bf8e4265949485d85e72/statistik-tebu-indonesia-2021.html

Chandel, A. K., da Silva, S. S., Carvalho, W., & Singh, O. V. (2012). Sugarcane bagasse and leaves: Foreseeable biomass of biofuel and bio-products. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, *87*(1), 11–20. https://doi.org/10.1002/jctb.2742

Jamilatun, S., Pitoyo, J., Amelia, S., Ma, A., Hakika, D. C.,

& Mufandi, I. (2022). Experimental Study on The Characterization of Pyrolysis Products from Bagasse (Saccharum Officinarum L .) : Bio-oil , Biochar , and Gas Products. *Indonesia Journal of Science and Technology*, *7*(3), 565–582.

Mufandi, I., Treedet, W., Singbua, P., & Suntivarakorn, R. (2020). Efficiency of Bio - oil Production from Napier Grass Using Circulating Fluidized Bed Reactor with Bio - oil Scrubber. *KKU Research Journal*, *20*(December), 94–107.

Saif, A. G. H., Wahid, S. S., & Ali, M. R. O. (2020). Pyrolysis of sugarcane bagasse: The effects of process parameters on the product yields. *Materials Science Forum*, *1008 MSF*(August), 159–167. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1008.159

Treedet, W., & Suntivarakorn, R. (2017). Fast Pyrolysis of Sugarcane Bagasse in Circulating Fluidized Bed Reactor - Part A: Effect of Hydrodynamics Performance to Bio-Oil Production. *Energy Procedia*, *138*, 801–805. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.072

Akoueson, F., Chbib, C., Monchy, S., Paul-Pont, I., Doyen, P., Dehaut, A., & Duflos, G. (2021). Identification and quantification of plastic additives using pyrolysis-GC/MS: A review. Science of the Total Environment, 773. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145073.

Alves, J. L. F., da Silva, J. C. G., Mumbach, G. D., Domenico, M. Di, Bolzan, A., Machado, R. A. F., & Marangoni, C. (2022). Evaluating the bioenergy potential of cupuassu shell through pyrolysis kinetics, thermodynamic parameters of activation, and evolved gas analysis with TG/FTIR technique. Thermochimica Acta, 711, 723–739. https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179187

Bach, Q. V., & Chen, W. H. (2017). Pyrolysis characteristics and kinetics of microalgae via thermogravimetric analysis (TGA): A state-of-the-art review. Bioresource Technology, 246, 88–100. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.087

Branca, C., & Di Blasi, C. (2015). Thermogravimetric analysis of the combustion of dry distiller's grains with solubles (DDGS) and pyrolysis char under kinetic control. Fuel Processing Technology, 129, 67–74. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.08.019

Cavalcanti, E. J. C., Carvalho, M., & da Silva, D. R. S. (2020). Energy, exergy and exergoenvironmental analyses of a sugarcane bagasse power cogeneration system. Energy Conversion and Management, 222. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113232

de Almeida, S. G. C., Tarelho, L. A. C., Hauschild, T., Costa, M. A. M., & Dussán, K. J. (2022). Biochar production from sugarcane biomass using slow pyrolysis: Characterization of the solid fraction. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 179(February). https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109054

Dhyani, V., Kumar, J., & Bhaskar, T. (2017). Thermal decomposition kinetics of sorghum straw via thermogravimetric analysis. Bioresource Technology, 245(September), 1122–1129. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.189

Fries, E., Dekiff, J. H., Willmeyer, J., Nuelle, M. T., Ebert, M., & Remy, D. (2013). Identification of polymer types and additives in marine microplastic particles using pyrolysis-GC/MS and scanning electron microscopy. Environmental Sciences: Processes and Impacts, 15(10), 1949–1956. https://doi.org/10.1039/c3em00214d.

Jamilatun, S., Aktawan, A., Budiman, A., & Mufandi, I. (2022). Thermogravimetric analysis kinetic study of Spirulina platensis residue pyrolysis. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 963(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/963/1/012010.

Jamilatun, Siti, Mufandi, I., Evitasari, R. T., & Budiman, A. (2020). Effects of temperature and catalysts on the yield of bio-oil during the pyrolysis of Spirulina platensis residue. International Journal of Renewable Energy Research, 10(2), 678–686.

Jamilatun, Siti, Pitoyo, J., Amelia, S., Ma'arif, A., Hakika, D. C., & Mufandi, I. (2022). Experimental Study on The Characterization of Pyrolysis Products from Bagasse (Saccharum Officinarum L.): Bio-oil, Biochar, and Gas Products. Indonesian Journal of Science and Technology, 7(3), 565–582. https://doi.org/10.17509/ijost.v7i3.51566.

Kan, T., Strezov, V., & Evans, T. (2016). Effect of the Heating Rate on the Thermochemical Behavior and Biofuel Properties of Sewage Sludge Pyrolysis. Energy and Fuels, 30(3), 1564–1570. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02232.

Mishra, G., Kumar, J., & Bhaskar, T. (2015). Kinetic studies on the pyrolysis of pinewood. Bioresource Technology, 182, 282–288. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.087.

Mishra, R. K., & Mohanty, K. (2020). Kinetic analysis and pyrolysis behaviour of waste biomass towards its bioenergy potential. Bioresource Technology, 311(May), 123480. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123480.

Moralı, U., Yavuzel, N., & Şensöz, S. (2016). Pyrolysis of hornbeam (Carpinus betulus L.) sawdust: Characterization of bio-oil and bio-char. Bioresource

ISSN: 1410-394X
e-ISSN: 2460-8203

Technology, 221, 682–685. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.081.

Mufandi, I., Treedet, W., Singbua, P., & Suntivarakorn, R. (2020). Efficiency of Bio - oil Production from Napier Grass Using Circulating Fluidized Bed Reactor with Bio - oil Scrubber. KKU Research Journal, 20(December), 94–107.

Naqvi, S. R., Tariq, R., Shahbaz, M., Naqvi, M., Aslam, M., Khan, Z., Mackey, H., Mckay, G., & Al-Ansari, T. (2021). Recent developments on sewage sludge pyrolysis and its kinetics: Resources recovery, thermogravimetric platforms, and innovative prospects. Computers and Chemical Engineering, 150, 107325. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107325.

Ren, S., Ye, X. P., Borole, A. P., Kim, P., & Labbé, N. (2016). Analysis of switchgrass-derived bio-oil and associated aqueous phase generated in a semi-pilot scale auger pyrolyzer. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 119, 97–103. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.03.013.

Strezov, V., Evans, T. J., & Hayman, C. (2008). Thermal conversion of elephant grass (Pennisetum Purpureum Schum) to bio-gas, bio-oil and charcoal. Bioresource Technology, 99(17), 8394–8399. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.039.

Sugumaran, V., Prakash, S., Ramu, E., Arora, A. K., Bansal, V., Kagdiyal, V., & Saxena, D. (2017). Detailed characterization of bio-oil from pyrolysis of non-edible seed-cakes by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and gas chromatography mass spectrometry (GC–MS) techniques. Journal of Chromatography B: Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences, 1058(January), 47–56. https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2017.05.014.

Suntivarakorn, R., & Treedet, W. (2016). Improvement of Boiler's Efficiency Using Heat Recovery and Automatic Combustion Control System. Energy Procedia, 100(September), 193–197. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.164.

Treedet, W., Suntivarakorn, R., Mufandi, I., & Singbua, P. (2020). Bio-oil production from Napier grass using a pyrolysis process: Comparison of energy conversion and production cost between bio-oil and other biofuels. International Energy Journal, 20(2), 155–168.

Supplementary data:

Tabel S1. Komposisi kimia produk bio-oil dari pirolisis daun tebu

Komponen	Area %
Methylamine, N,N-dimethyl-	1.01
2-Propanol, 1-methoxy-	0.66
Acetic acid ethenyl ester	0.35
Pyridine	0.55
Methane, (methylsulfinyl)(methylthio)-	0.08
Pyridine, 2-methyl-	0.12
Acetohydrazide	0.15
Acetoin	0.30
2-Propanone, 1-hydroxy-	9.97
2-Cyclopenten-1-one	0.66
1-Hydroxy-2-butanone	1.89
2(5H)-Furanone, 5-methyl-	0.14
Acetic acid	14.96
2-Propanone, 1-(acetyloxy)-	0.63
Furfural	0.26
Formic acid	0.35
2,5-Hexanedione	0.24
Propanoic acid	1.58
2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	0.56
2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-	0.17
Propylene Glycol	0.27
dl-Glyceraldehyde dimer	0.89
1,2-Ethanediol, monoacetate	0.21
Butanoic acid, 4-hydroxy-	0.86
3-Furanmethanol	0.17
2-Furanone, 2,5-dihydro-3,5-dimethyl	0.15
1,2,3-Cyclopentanetriol	0.23
2(5H)-Furanone, 5-methyl-	0.22
4-Hexen-3-one	0.43
Acetamide	1.47
2(5H)-Furanone	1.30
2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	2.84
Phenol, 2-methoxy-	1.03
2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	0.36
4-Methyl-5H-furan-2-one	0.32
Phenol, 3-methyl-	0.39
Phenol	2.69
2-Vinyl-9-[3-deoxy-β-d-ribofuranosyl]hypoxanthine	0.43
Phenol, 4-methyl-	0.35
Cyclopentanol	1.14
2-Hydroxy-gamma-butyrolactone	0.85
1H-Imidazole	1.87
1H-Imidazole, 4-methyl-	7.91
Phenol, 2,6-dimethoxy-	2.66
Melezitose	0.54
2,3-Anhydro-d-mannosan	0.45
1H-Imidazole, 2-ethyl-	1.53

Phenol, 4-methoxy-3-(methoxymethyl)-	0.32
1,4:3,6-Dianhydro-α-d-glucopyranose	1.43
3-Pyridinol	0.56
5-Hydroxymethyl Dihydrofuran-2-one	1.99
β-D-Glucopyranose, 1,6-anhydro-	22.20
Vanillin	0.93
d-Mannose	1.47
2-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	0.45
Sucrose	1.05
Propanoic acid, 3-chloro-, 4-formylphenyl ester	0.69
Orcinol	0.79
Hydroquinone	1.94
Total	**100.00**