

**PIROLISIS SERBUK KAYU ULIN (*Eusideroxylon zwageri*) DENGAN KATALIS Ni/SBA-15
MENGUNAKAN INSTRUMEN PYROLYSIS-GAS CHROMATOGRAPHY-MASS
SPECTROMETRY (PY-GC/MS)**

**PYROLYSIS OF ULIN (*Eusideroxylon zwageri*) SAWDUST IN THE PRESENCE OF
NI/SBA-15 USING A PYROLYSIS-GAS CHROMATOGRAPHY-MASS SPECTROSCOPY
(PY-GC/MS)**

Yuni Marsella, R. R Dirgarini J.N. Subagyo* dan Rahmat Gunawan

Laboratorium Kimia Fisik, Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Mulawarman, Jalan Barong Tongkok No. 4 Kampus Gunung Kelua, Samarinda, Indonesia

*Corresponding Author: dirgarini@fmipa.unmul.ac.id

Diterbitkan: 30 Oktober 2023

ABSTRACT

Pyrolysis study of Ulin (*Eusideroxylon zwageri*) sawdust in the presence of Ni/SBA-15 using a pyrolysis-gas chromatography-mass spectroscopy (Py-GC/MS) instrument has been carried out. This study aims to determine the chemical composition of pyrolysis products of Ulin sawdust after the addition of Ni/SBA-15 catalyst. Pyrolysis was carried out at 350, 450 and 550 °C under helium (He) gas. Based on the percent area of the pyrolysis product identified on the pyrogram, the product of lignin derivatives before the addition of the Ni/SBA-15 catalyst was 58.53-68.14% and after the addition of the Ni/SBA-15 catalyst decreased to 51.08-58.33%. While the cellulose/hemicellulose derivative products before the addition of the Ni/SBA-15 catalyst were 15.62-17.78% and after the addition of the Ni/SBA-15 catalyst increased to 18.91-25.79%. Ulin sawdust catalyzed pyrolysis produced compounds with the highest area percent, namely catechol, isoelemicin, 2-Methoxy-4-vinylphenol, 1,6-anhydro-beta-D-Glucopyranose, and hydroxy-acetaldehyde.

Keywords: pyrolysis, *Eusideroxylon zwageri*, Py-GC/MS, Ni/SBA-15 catalyst

ABSTRAK

Studi Pirolisis serbuk kayu Ulin (*Eusideroxylon zwageri*) dengan penambahan katalis Ni/SBA-15 menggunakan instrumen pyrolysis-gas chromatography-mass spectroscopy (Py-GC/MS) telah dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan komposisi kimia produk pirolisis serbuk kayu ulin setelah penambahan katalis Ni/SBA-15. Pirolisis serbuk kayu Ulin dengan penambahan katalis Ni/SBA-15 dilakukan pada suhu 350, 450 dan 550 °C di bawah aliran gas helium (He). Berdasarkan nilai persen area produk pirolisis yang teridentifikasi pada pirogram dapat diketahui bahwa produk turunan lignin sebelum penambahan katalis Ni/SBA-15 sebesar 58,53-68,14% dan setelah penambahan katalis Ni/SBA-15 mengalami penurunan menjadi 51,08-58,33%. Sedangkan produk turunan selulosa/hemiselulosa sebelum penambahan katalis Ni/SBA-15 sebesar 15,62-17,78% dan setelah penambahan katalis Ni/SBA-15 mengalami kenaikan menjadi 18,91-25,79%. Produk pirolisis serbuk kayu Ulin dengan penambahan Katalis Ni/SBA-15 dengan persen area tertinggi adalah *Catechol*, *Isoelemicin*, *2-Methoxy-4-vinylphenol*, *beta-D-Glucopyranose*, *1,6-anhydro-*, *Acetaldehyde*, *hydroxy-*.

Kata kunci: Pirolisis, *Eusideroxylon zwageri*, Py-GC/MS, Katalis Ni/SBA-15

PENDAHULUAN

Salah satu jenis sumber energi yang

terbarukan dalam jangka panjang karena fitur karakteristiknya yang kaya akan karbon adalah biomassa [1]. Konversi biomassa menjadi energi dapat dilakukan melalui konversi termokimia,

This is an open-access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



konversi biokimia dan konversi kimia. Salah satu metode konversi termokimia adalah metode pirolisis.

Pirolisis ialah proses dekomposisi termal dari biomassa menjadi molekul-molekul yang lebih kecil baik dalam bentuk padat, cair, ataupun gas tanpa kehadiran dari oksigen [2]. Biomassa yang dapat digunakan salah satunya yaitu sebagai umpan dalam proses pirolisis adalah serbuk kayu [3]. Dengan menggunakan proses pirolisis ini, komponen utama dari biomassa lignoselulosa yang sebagian terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin [4] akan mengalami degradasi termal pada rentang temperatur yang berbeda-beda.

Pada penelitian ini biomassa lignoselulosa yang akan digunakan adalah serbuk kayu ulin (*Eusideroxylon zwageri*). Tanaman ulin mempunyai manfaat untuk produk kayu ataupun produk non kayu dan nilai ekonomi yang tinggi [5]. Serbuk kayu yang digunakan pada penelitian ini merupakan limbah dari industri pengolahan kayu yang dimanfaatkan untuk proses pirolisis akan menambah nilai tambah dari material tersebut [6].

Proses pirolisis dapat dilakukan dengan menggunakan instrumen gas chromatography-mass spectrometry (GC/MS) yang dapat digabungkan dengan instrumen pirolisis, atau yang dapat dikenal dengan Pyrolysis-GC/MS atau Py-GC/MS. Instrumen Py-GC/MS ini memiliki beberapa kelebihan pada penggunaannya yaitu sampel yang akan dianalisis tidak lagi memerlukan preparasi terlebih dahulu, jumlah sampel yang akan dianalisis sedikit, memiliki waktu analisis yang cepat, dan dapat mengetahui komponen kimia yang ada dalam biomassa dan biopolimer kompleks dengan lebih detail dibandingkan dengan hanya menggunakan GC/MS saja [7].

Pada penelitian sebelumnya oleh Putri [8], telah dilakukan pirolisis serbuk kayu ulin dengan instrumen Py-GC/MS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi kimia yang dihasilkan dari proses pirolisis serbuk kayu ulin berdasarkan persen area produknya mengandung produk turunan lignin sebesar 56-73% dan produk turunan selulosa/hemiselulosa sebesar 17-22%. Pada penelitian ini juga menunjukkan seiring kenaikan temperatur maka semakin meningkat persen area gas karbon dioksida yang terbentuk. Berdasarkan hasil penelitian tersebut maka dilakukan studi lanjut di mana pirolisis serbuk kayu ulin akan dilakukan dengan penambahan katalis.

Katalis ialah suatu zat yang dapat meningkatkan laju reaksi kimia dan dapat dihasilkan kembali pada akhir reaksi tanpa mengalami perubahan [9]. Pada penelitian ini akan digunakan katalis Ni/SBA-15. Nikel memiliki aktivitas dan selektivitas yang baik di dalam suatu reaksi, namun fasa aktif dari katalis nikel ini sendiri tidak memiliki permukaan yang luas, sehingga reaksi ini menjadi tidak efektif dan efisien. Oleh karena itu logam nikel ini perlu didistribusikan pada permukaan padatan pengemban yang memiliki luas permukaan yang besar seperti silika [10]. SBA-15 merupakan silika mesopori dengan luas permukaan yang besar dan dapat digunakan sebagai pengemban logam Ni. Penggunaan katalis Ni/SBA-15 belum diteliti secara detail pada pirolisis serbuk kayu ulin sehingga perlu dipelajari apakah katalis ini dapat memberikan perbedaan komposisi kimia produk pirolisis yang dihasilkan.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pirolisis serbuk kayu ulin dengan katalis Ni/SBA-15 menggunakan instrumen pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry (Py-GC/MS) pada tiga suhu pirolisis, yaitu 350, 450 dan 550 °C. Selanjutnya penelitian ini difokuskan pada studi komposisi kimia produk yang dihasilkan dari pirolisis serbuk kayu ulin dengan katalis Ni/SBA-15.

METODOLOGI PENELITIAN

Bahan dan alat yang digunakan yaitu Seperangkat alat gelas, desikator, ayakan 100 mesh, neraca analitik, eco-cup SF PY1-EC50F, glass wool, multi-shot pyrolyzer (EGA/PY-3030D), GC/MS QP-2020 NX (Shimadzu, japan), kolom MS SH-Rxi-5Sil (ukuran 30 m × 0,25 mm i.d. ,internal diameter), Vortex V-1 plus, serbuk kayu ulin, katalis Ni/SBA-15, aluminium foil, dan gas helium (He). Serbuk kayu ulin diperoleh dari CV. Enggal Jaya di Jl. Cipto Mangunkusumo, Samarinda. Katalis yang digunakan adalah SBA-15 yang didopping dengan Ni. Sampel katalis disintesis oleh Grup Riset KBK Kimia Fisik, Laboratorium Kimia Fisik, Jurusan Kimia, FMIPA, Universitas Mulawarman. Katalis yang digunakan memiliki luas permukaan 344 m²/g, volume pori 0,86 cm³/g, dan diameter pori 7,72 nm. Persentase Ni pada katalis adalah 10,45 ± 1,49%.

Adapun tahapan pertama yang dilakukan yaitu preparasi sampel serbuk kayu ulin dan katalis dimana serbuk kayu Ulin (*Eusideroxylon zwageri*) dikeringkan kemudian diayak menggunakan ayakan 100 mesh. Sampel tersebut

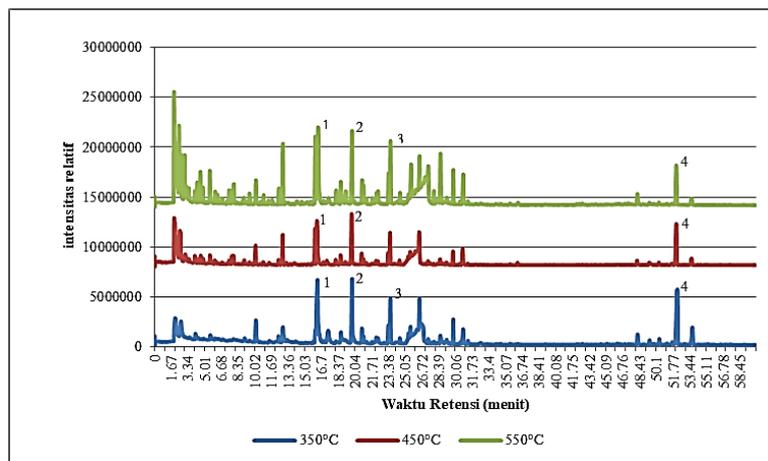
kemudian ditimbang sebanyak 100 mg lalu dicampur dengan 10 mg katalis Ni/SBA-15 (catalyst loading = 10%) dengan menggunakan Vortex V-1 plus. Pemilihan catalyst loading sebesar 10% dilakukan berdasarkan penelitian sebelumnya oleh Subagyono [7]. Sampel campuran tersebut yang selanjutnya digunakan untuk analisis Py-GC/MS.

Tahapan yang kedua yaitu Pirolisis dimana sebanyak 500 µg sampel campuran serbuk kayu ulin dan katalis Ni/SBA-15 dimasukkan ke dalam eco-cup SF PY1-EC50F dan ditutup dengan glass wool. Lalu sampel dalam eco-cup dipirolisis pada suhu 350 °C selama 0,1 menit menggunakan multi-shot pyrolyzer (EGA/PY-3030D dengan suhu interface 280 °C yang sudah terhubung dengan sistem GC/MS QP-2020 NX (Shimadzu, Japan). Kolom yang digunakan untuk analisis yaitu menggunakan kolom MS SH-Rxi-5Sil (ukuran 30 m × 0,25 mm) dengan electron impact sebesar 70 eV. Gas helium ini digunakan sebagai gas pembawa memiliki tekanan sistem sebesar 20,0 kPa (15,9 mL/min, laju alir kolom sebesar 0,61 mL/min). Suhu pada sistem GC, yaitu: suhu awal 50 °C konstan selama 1 menit, kemudian

suhu ditingkatkan hingga 280 °C (5 °C/min) dalam 13 menit. Hasil dari produk pirolisis ini kemudian dianalisis melalui identifikasi dengan membandingkan data waktu retensi dan massa spektrum dari NIST Library 201.14. Nilai similarity index dengan library yang telah digunakan pada penelitian ini yaitu sebesar >85%. Prosedur yang sama ini juga dilakukan untuk pirolisis pada suhu 450 dan 550 °C. Komposisi kimia produk yang telah dihasilkan dianalisis berdasarkan nilai persen area.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pirolisis terhadap sampel serbuk kayu Ulin (*Eusideroxylon zwageri*) dengan katalis Ni/SBA-15 sebanyak 10% dilakukan pada tiga variasi suhu, yaitu 350 °C, 450 °C, dan 550 °C menggunakan instrumen Py-GC/MS. Gambar 1 berikut ini menampilkan pirogram dari hasil pirolisis serbuk kayu Ulin dengan katalis Ni/SBA-15 menggunakan instrumen Py-GC/MS. Ketiga pirogram ini dihasilkan dari pirolisis serbuk kayu ulin dengan penambahan katalis Ni/SBA-15 pada tiga temperatur yang berbeda.



Gambar 1. Pirogram Hasil Pirolisis Serbuk Kayu Ulin dengan Katalis Ni/SBA-15 (1:Catechol, 2:2-Methoxy-4-vinylphenol, 3:trans-Isoeugenol, 4:Isoelemicin)

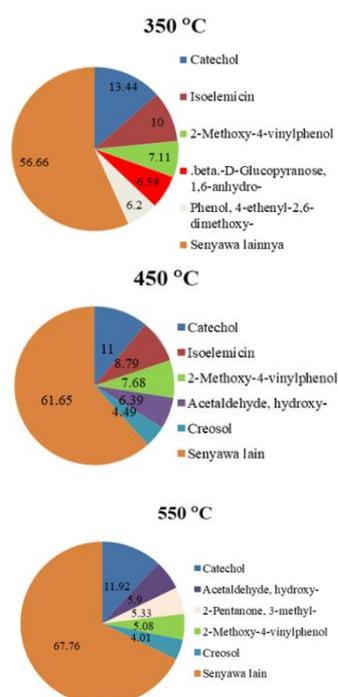
Ketiga pirogram yang dihasilkan pada tiga suhu berbeda memiliki pola yang serupa, namun semakin tinggi suhu pirolisis maka intensitas relatif dari puncak-puncak senyawa pada pirogram semakin tinggi. Produk pirolisis yang diidentifikasi dalam pirogram ini terutama berasal dari dekomposisi termal lignin dan selulosa/hemiselulosa. Pirolisis lignin ini menghasilkan vanillin, fenol, dan senyawa aromatik lainnya. Senyawa fenolik yang teridentifikasi adalah produk pirolisis dari berbagai blok bangunan lignin, alkohol p-

coumaryl, alcohol coniferyl, dan alkohol sinapil [11, 12]. Senyawa dari selulosa/hemiselulosa juga dapat diamati dalam pirogram yaitu senyawa furan, furfural, hidroksiasetaldehida, asam asetat, keton, dan aldehida adalah produk yang berasal dari selulosa dan hemiselulosa [13-16].

Senyawa-senyawa yang teridentifikasi pada pirolisis serbuk kayu ulin menggunakan katalis Ni/SBA-15 sebanyak 35 senyawa pada suhu 350 °C, 40 senyawa pada suhu 450 °C, dan 39 senyawa pada suhu 550 °C. Sedangkan pada pirolisis serbuk kayu ulin tanpa katalis, pada suhu

350 °C, 450 °C, dan 550 °C, senyawa yang teridentifikasi secara berturut-turut sebanyak 26 senyawa, 30 senyawa, dan 26 senyawa. Jumlah produk pirolisis yang dihasilkan pada pirolisis serbuk kayu ulin terkatalis lebih banyak daripada pirolisis non-katalisis, hal ini mengindikasikan bahwa katalis Ni/SBA-15 ini dapat memfasilitasi tumbukan efektif sehingga terjadi lebih banyak reaksi yang menghasilkan produk. Tanpa adanya katalis Ni/SBA-15, reaksi yang dominan adalah thermal cracking pada senyawa dengan berat molekul yang lebih tinggi sedangkan dengan adanya katalis terjadi dua proses yang terjadi yaitu thermal cracking dan catalytic cracking [17].

Dari hasil analisis pirogram, selanjutnya dipilih 5 jenis senyawa yang memiliki persen area tertinggi (persen area lebih dari 4%) dan ditampilkan pada **Gambar 2**.

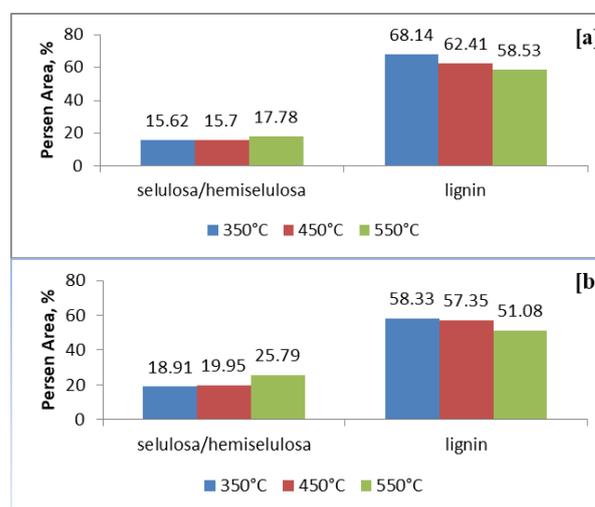


Gambar 2. Hasil Pirolisis Serbuk Kayu Ulin dengan katalis Ni/SBA-15 dengan Persen Area Tertinggi (*tidak termasuk CO₂).

Senyawa 2-Pentanone, 3-methyl-; Acetaldehyde hydroxyl; .beta.-D-Glucopyranose, 1,6-anhydro berasal dari dekomposisi selulosa/hemiselulosa [18]. Senyawa 2-Phenol, 4-ethenyl-2,6-dimethoxy; Methoxy-4-vinylphenol, merupakan senyawa fenol yang berasal dari dekomposisi lignin [19]. Senyawa Catechol; Creosol merupakan senyawa turunan fenol yang dapat berasal dari dekomposisi lignin [20].

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa pirolisis serbuk kayu ulin dengan dan tanpa adanya katalis menghasilkan senyawa turunan selulosa/hemiselulosa dan lignin. Berdasarkan **Gambar 3**, semakin tinggi suhu pirolisis, maka persen area senyawa hasil dekomposisi lignin semakin rendah, sebaliknya, persen area produk dekomposisi termal selulosa/hemiselulosa semakin tinggi. Hal ini disebabkan karena perbedaan suhu dekomposisi termal dari selulosa dan lignin, yaitu 150-420 °C untuk lignin [21] dan 430-730 °C untuk selulosa [22].

Aktifitas katalitik Ni/SBA-15 pada pirolisis serbuk kayu ulin menyebabkan adanya perbedaan komposisi kimia dari produk hasil pirolisis berdasarkan pengelompokkan prekursoranya (**Gambar 3**).



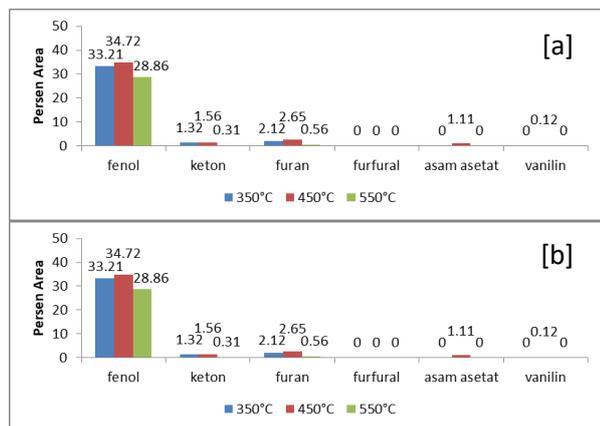
Gambar 3. Persen area relatif produk pirolisis Serbuk Kayu Ulin yang berasal dari selulosa/hemiselulosa dan lignin (a) tanpa adanya katalis (Putri, 2022) dan (b) dengan adanya katalis Ni/SBA-15.

Setelah katalis Ni/SBA-15 ditambahkan pada pirolisis serbuk kayu ulin, persen area senyawa turunan selulosa/hemiselulosa mengalami kecenderungan untuk meningkat sedangkan senyawa turunan lignin menurun. Adanya kecenderungan peningkatan persen area produk turunan selulosa/hemiselulosa mengindikasikan bahwa katalis Ni/SBA-15 memiliki selektifitas lebih tinggi untuk pirolisis selulosa/hemiselulosa jika dibandingkan dengan pirolisis lignin. Namun, hal ini perlu dipelajari lebih lanjut, misalkan dengan melakukan studi pirolisis secara eksperimen maupun komputasi senyawa model selulosa, hemiselulosa dan lignin.

Selektifitas katalis berbasis Ni pada pirolisis/gasifikasi selulosa dan lignin juga telah dipelajari sebelumnya oleh Wu et al [23], hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa yield gas pada pirolisis/gasifikasi selulosa lebih tinggi daripada lignin.

Senyawa fenolik pada proses pirolisis adalah turunan lignin seperti, creosol, p-Cresol, Phenol, 2-methoxy-, 2-Methoxy-5-methylphenol. Vanillin merupakan senyawa yang dapat digunakan sebagai bahan pewarna, dimana senyawa vanillin memiliki cincin aromatik dan tertrisubstitusi dengan aldehida, alkohol dan eter [24]. Senyawa aromatik pada produk pirolisis merupakan senyawa yang memiliki cincin benzene dengan 1 atom hidrogen dan 6 atom karbon, senyawa ini ditemukan sebagai produk pembakaran senyawa organik [25].

Senyawa seperti furan, furfural, hidroksiasetaldehida, asam asetat, keton, dan aldehida adalah produk yang berasal dari selulosa dan hemiselulosa [13-16]. Furfural adalah produk degradasi termal xilosa [26]. Senyawa yang sama juga merupakan produk pirolisis dari hemiselulosa [27]. Beberapa keton, aldehida dan senyawa terkait asam asetat juga merupakan produk pirolisis dari selulosa/hemiselulosa [28,29]. Lignin juga menghasilkan asam asetat dalam jumlah kecil [30], namun sebagian besar asam asetat berasal dari selulosa dan hemiselulosa [18].



Gambar 4. Persen Area Senyawa Pirolisis Serbuk Kayu Ulin (a) tanpa adanya katalis dan (b) dengan adanya katalis Ni/SBA-15.

Sebelumnya telah disebutkan bahwa penambahan katalis Ni/SBA-15 meningkatkan produksi senyawa turunan selulosa/hemiselulosa.

Gambar 4 menunjukkan bahwa penggunaan katalis Ni/SBA-15 pada pirolisis serbuk kayu

ulin, meningkatkan produksi dari furan, furfural dan asam asetat yang merupakan hasil degradasi termal selulosa/hemiselulosa.

Berdasarkan pada **Gambar 4** disimpulkan bahwa adanya penambahan katalis Ni/SBA-15 ke dalam serbuk kayu ulin ini dapat meningkatkan produksi dari senyawa fenol, furan, asam asetat dan vanillin, dan juga muncul senyawa yang baru yaitu furfural. Produk yang diinginkan pada penelitian ini adalah senyawa aromatik, furan, dan furfural, dan persen area ketiga golongan ini meningkat dengan penambahan katalis pada pirolisis. Perlu dicatat bahwa, penambahan katalis meningkatkan produksi asam asetat, dimana asam asetat akan bersifat korosif dan juga dapat menurunkan laju pemanasan pada proses pirolisis [18], sehingga perlu dilakukan studi lebih lanjut untuk menekan produksi asam asetat.

KESIMPULAN

Berdasarkan nilai persen area produk pirolisis yang teridentifikasi pada program dapat diketahui komposisi kimia produk yang dihasilkan dari proses pirolisis serbuk kayu Ulin (*Eusideroxylon zwageri*) dengan katalis Ni/SBA-15 menggunakan instrument Py-GC/MS, yaitu pada suhu 350 °C didapatkan produk turunan lignin sebesar 58,33% dan produk turunan selulosa/hemiselulosa sebesar 18,91%, pada suhu 450 °C produk turunan lignin sebesar 57,35% dan produk turunan selulosa/hemiselulosa sebesar 19,95%, dan pada suhu 550 °C produk turunan lignin sebesar 51,08% dan produk turunan selulosa/hemiselulosa sebesar 25,79%.

Berdasarkan nilai persen area produk pirolisis yang teridentifikasi pada pirogram dapat diketahui bahwa pada proses pirolisis serbuk kayu Ulin (*Eusideroxylon zwageri*) menggunakan instrument Py-GC/MS, penambahan katalis Ni/SBA-15 menurunkan persen area produk turunan lignin dari 58,53-68,14% menjadi 51,08-58,33%, dan meningkatkan produk turunan selulosa/ dari 15,62-17,78% menjadi 18,91-25,79%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia atas dukungan finansial dalam proyek melalui World Class Research Program (nomor kontrak: 298/UN17.L1/HK/2022).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mei J., Dongmei Bi, Tianyu Wang, Zixiang Gao, Jing Liu. (2021). Co-pirolisis Campuran Selulosa dan Urea: Konversi Nitrogen dan Efek Parameter Pada Distribusi Senyawa Nitrogen dalam Bio-oil. *Jurnal Pirolisis Analitik dan Terapan*, 157 (2021) 10517.
- [2] Azri, R., Bahri, S., & Aman, A. (2014). *Pirolisis Biomassa Pelepah Sawit Menjadi Bio-Oil dengan Katalis Natural Zeolit Dealuminated (NZA)*. (Doctoral dissertation, Riau University).
- [3] Wibowo, S. (2013). Karakteristik Bio-Oil Serbuk Gergaji Sengon (*Paraserianthes falcataria* L. Nielsen) Menggunakan Proses Pirolisis Lambat . *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 13 (4) , 258-270.
- [4] Ridhuan, K., Irawan, D., Zanaria, Y., & Firmansyah, F. (2019). Pengaruh jenis biomassa pada pembakaran pirolisis terhadap karakteristik dan efisiensi bioarang-asap cair yang dihasilkan. *Media Mesin: Majalah Teknik Mesin*, 20(1), 18-27.
- [5] Nirmala, R. (2019). Metode mengatasi browning pada eksplan ulin (*Eusideroxylon zwageri*) untuk inisiasi regenerasi secara in vitro. *Jurnal Agroekoteknologi Tropika Lembab*, 1(2), 106-113.
- [6] Danarto, Y. C., & Sasmita, F. (2010). Pirolisis Limbah Serbuk Kayu dengan Katalisator Zeolit. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan"*.
- [7] Subagyono , R. , Ying , Q. , W. Roy , J. , & Alan , L. (2016) . Pyrolysis-GC/MS Analysis of Biomass and the Bio - Oils Produced from CO / H₂O Reactions . *Jurnal Pirolisis Analitik dan Terapan*, 154-164.
- [8] Putri, A.S. 2022. Studi Co-pirolisis Mikroalga Hijau (*Botryococcus braunii*) dan Serbuk Kayu Ulin (*Eusideroxylon zwageri*) Dengan Instrumen Pirolisis-Gas Chromatography-Mass Spectroscopy (Py-GC/MS). *Prosiding Seminar Nasional Kimia* (pp . 22-49) . Samarinda : Jurusan Kimia FMIPA Unmul.
- [9] Trisunaryanti, W. (2018). *Material Katalis dan Karakternya*. Yogyakarta: UGM PRESS.
- [10] Bakri, R., Utari, T., & Sari, I. P. (2008). Kaolin sebagai sumber SiO₂ untuk pembuatan katalis Ni/SiO₂: karakterisasi dan uji katalis pada hidrogenasi benzena menjadi sikloheksana. *Makara Journal of Science*.
- [11] Kleinert, M., and Barth, T. (2008). Phenols from lignin. *Chemical Engineering and Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology*, 31(5), 736-745.
- [12] Wagner, A., Tobimatsu, Y., Phillips, L., Flint, H., Torr, K., Donaldson, L., dan Ralph, J. (2011). Penekanann CCoAOMT memodifikasi komposisi lignin dalam Pinus radiata. *Jurnal Tumbuhan*, 67(1), 119-129.
- [13] Aho, A., Kumar, N., Eränen, K., Holmbom, B., Hupa, M., Salmi, T., and Murzin, D. Y. (2008). Pyrolysis of softwood carbohydrates in a fluidized bed reactor. *International Journal of Molecular Sciences*, 9(9), 1665-1675
- [14] Jackson, M. A. (2013). Ketonization of model pyrolysis bio-oil solutions in a plug-flow reactor over a mixed oxide of Fe, Ce, and Al. *Energy and fuels*, 27(7), 3936-3943.
- [15] Lu, Q., Tian, H.-y., Hu, B., Jiang, X.-y., Dong, C.-q., and Yang, Y.P. (2016). Pyrolysis mechanism of holocellulose-based monosaccharides: The formation of hydroxyacetaldehyde. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 120, 15-26.
- [16] Shi, J., Xing, D., and Lia, J. (2012). FTIR studies of the changes in wood chemistry from wood forming tissue under inclined treatment. *Energy Procedia*, 16, 758-762.
- [17] Subagyono, R. D. J., Putri, S. A., Manawan, M., Mollah, M., Nugroho, R. A., & Gunawan, R. (2023). Catalytic Pyrolysis of the Green Microalgae *Botryococcus braunii* over Ni/SBA-15 Prepared by the Ultrasonic-Assisted Sol-Gel Method. *ACS omega*
- [18] Subagyono, R., Ying, Q., Alan, L., Rudianto, A., & Marc, M. (2021). Pyrolysis GC / MS Analysis of Fast Growing Wood. *Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia*, 6(1), 141-158.
- [19] Nang, H. L., May, C. Y., Ngan, M. A., & Hock, C. C. (2007). Extraction and Identification of Water-Soluble Compound in Palm-Pressed Fiber by SCCO₂ and GC-MS. *American Journal of Environmental Sciences* 3, 3(2), 54-59

- [20] Kawamoto, H. (2017). Lignin Pyrolysis Reaction. *J Wood Sci*, 63, 117-132. doi:DOI 10.1007/s10086-016-1606-z
- [21] Jablonsky, M., Surina, I., & Haz, A. (2013). *Determination of Temperature Regions In Thermal Degradation of Lignin*. Renewable Energy Source.
- [22] Shen, S. (2009). The Mechanism for Thermal Decomposition of Cellulosa and It's Main Products. *Bioresource Technology*, 100,6496-6504.
- [23] Wu, C., Wang, Z., Huang, J., & Williams, P. T. (2013). Pyrolysis/gasification of cellulose, hemicellulose and lignin for hydrogen production in the presence of various nickel-based catalysts. *Fuel*, 106, 697-706.
- [24] Fatoni, A., Hariani, P. L., Hermansyah, H., & Lesbani, A. (2018). Synthesis and characterization of chitosan linked by methylene bridge and schiff base of 4, 4-diaminodiphenyl ether-vanillin. *Indonesian Journal of Chemistry*, 18(1), 92-101.
- [25] Rachmawani, D., Yulianda, F., Kusmana, C., Boer, M., & Parwati, E. (2016). Dampak Hidrokarbon Aromatik Terhadap Ekosistem Mangrove Di Kawasan Binalatung Kota Tarakan Kalimantan Utara (Impact of Aromatic Hydrocarbon on Mangrove Ecosystem in Binalatung Area Tarakan City North Kalimantan). *Jurnal manusia dan Lingkungan*, 23(3), 295-303.
- [26] Xing, R., Qi, W., and Huber, G. W. (2011). Production of furfural and carboxylic acids from waste aqueous hemicellulose solutions from the pulp and paper and cellulosic ethanol industries. *Energy and Environmental Science*, 4(6), 2193-2205.
- [27] Shen, D., Jin, W., Hu, J., Xiao, R., and Luo, K. (2015). An overview on fast pyrolysis of the main constituents in lignocellulosic biomass to valued-added chemicals: Structures, pathways and interactions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 761-774.
- [28] Jones, R. W., Reinot, T., and McClelland, J. F. (2010). Molecular analysis of primary vapor and char products during stepwise pyrolysis of poplar biomass. *Energy and fuels*, 24(9), 5199-5209.
- [29] Mullen, C. A., and Boateng, A. A. (2008). Chemical composition of bio-oils produced by fast pyrolysis of two energy crops. *Energy and fuels*, 22(3), 2104-2109.
- [30] Carrier, M., Windt, M., Ziegler, B., Appelt, J., Saake, B., Meier, D., and Bridgwater, A. (2017). Quantitative insights into the fast pyrolysis of extracted cellulose, hemicelluloses, and lignin. *ChemSusChem*, 10(16), 3212