

## **Microwave-Assisted Pyrolysis Process of Sengon Sawdust by Using Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst**

### **Proses Pirolisis Berbantuan Gelombang Mikro Serbuk Gergaji Sengon Laut Dengan Katalis Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

Lisa Ayu Wulandari<sup>1</sup>, Muhammad Mufti Azis<sup>2\*</sup>, Joko Wintoko<sup>3</sup>, Jonas Kristanto<sup>4</sup>, Novi Caroko<sup>5</sup>

lisaayu98@mail.ugm.ac.id<sup>1</sup>, muhammad.azis@ugm.ac.id<sup>2</sup>, jwintoko@ugm.ac.id<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada

**Abstract.** Microwave-assisted pyrolysis (MAP) process is one of the alternative biomass pyrolysis processes currently being developed. This process aims to increase the yield of bio-oil and reduce residues during the pyrolysis process. One of the challenges faced in this process is the low thermal conductivity of the biomass which will also affect the quality of the bio-oil produced. The addition of a catalyst is intended to increase the yield of bio-oil and the quality of bio-oil. In addition, this process is also carried out by adding an absorber to increase the thermal conductivity of the biomass. Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst was synthesized by wet impregnation method with variations of 8%, 11% and 12.5% nickel loading. Furthermore, the catalyst was mixed with sawdust of sengon (*Paraserianthes falcataria*) and coconut charcoal as absorber. The microwave is set at a maximum temperature of 500 °C with an operating time of 60 minutes. Pyrolysis results showed that the addition of catalyst and absorbent was able to increase bio-oil production, with the percentage of bio-oil being 25.2%, 27%, and 33% respectively compared to pyrolysis without catalyst which only reached 11%. GC-MS analysis of bio-oil showed various hydrocarbon components in each variation, with the main components being phenol and benzene.

**Keywords:** Absorber, Bio-Oils, Microwave, Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst, Pirolisi.

**Abstrak.** Proses pirolisis berbantuan gelombang mikro merupakan salah satu alternatif proses pirolisis biomassa yang banyak berkembang saat ini. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan yield bio-oil dan mengurangi residu selama proses pirolisis. Salah satu tantangan yang dihadapi pada proses ini adalah rendahnya konduktivitas termal biomassa yang juga akan mempengaruhi kualitas bio-oil yang dihasilkan. Penambahan katalis ditujukan untuk meningkatkan yield bio-oil dan kualitas bio-oil. Selain itu, proses ini juga dilakukan dengan menambahkan absorber untuk meningkatkan konduktivitas termal biomassa. Katalis Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> disintesis melalui metode wet impregnation dengan variasi 8%, 11%, dan 12.5% nickel loading. Selanjutnya, katalis dicampur dengan serbuk gergaji sengon laut (*Paraserianthes falcataria*) dan arang kelapa sebagai absorber. Microwave diatur pada suhu maksimum 500 °C dengan waktu operasi 60 menit. Hasil pirolisis menunjukkan bahwa penambahan katalis dan absorben mampu meningkatkan produksi bio-oil, dengan persentase bio-oil berturut-turut 25.2%, 27%, dan 33% dibandingkan pada pirolisis tanpa katalis yang hanya mencapai 11%. Analisis GC-MS bio-oil menunjukkan komponen hidrokarbon yang beragam pada setiap variasi, dengan komponen utama phenol dan benzene.

**Kata kunci:** absorber; bio-oil; pirolisis; gelombang mikro (microwave); katalis Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

## **I. PENDAHULUAN**

Seiring dengan semakin meningkatnya jumlah penduduk Indonesia, maka usaha pemenuhan kebutuhan energi nasional merupakan salah satu isu krusial yang terus mendapat sorotan masyarakat. Melalui Peraturan Pemerintah No.79 Tahun 2014, pemerintah menargetkan peningkatan penggunaan energi baru dan terbarukan (EBT) dari 4% pada tahun 2014 hingga 23% pada tahun 2025. Salah satu sumber EBT di Indonesia adalah biomassa berbasis limbah pertanian maupun tanaman yang memiliki potensi yang menjanjikan untuk menghasilkan energi. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) mencatat pada tahun 2021 potensi bioenergi di Indonesia mencapai 32,6 Giga Watt (GW). Dari total potensi tersebut, pemanfaatannya saat ini baru sebesar 1,9 GW atau sekitar 5,7%.

Salah satu proses yang dapat diaplikasikan untuk mengkonversi biomassa menjadi energi adalah pirolisis. Pirolisis adalah proses dekomposisi biomassa oleh panas tanpa adanya oksigen, yang menghasilkan produk berupa char, produk cair, dan gas. *Bio-oil* adalah produk fase cair dari proses pirolisis yang apabila diproses lebih lanjut dapat dimanfaatkan sebagai biofuel. Ada beberapa jenis pirolisis, yang saat ini cukup menjadi tren adalah pirolisis berbantuan gelombang mikro (MAP). Dalam proses MAP, karakteristik umpan biomassa menjadi kunci utama pirolisis.

Dalam praktiknya, absorber seringkali ditambahkan dalam MAP untuk meningkatkan kemampuan penyerapan panas biomassa sehingga biomassa dapat dengan mudah terpirolisis [1] dan terkonversi menjadi produk gas, *bio-oil*

dan biochar. Selain konversi, yield menjadi parameter penting dalam menentukan suatu pirolisis berjalan dengan baik atau tidak. Salah satu upaya untuk meningkatkan yield *bio-oil* adalah dengan penambahan katalis. Katalis nikel diketahui memiliki aktivitas katalitik yang baik [2] dan potensial untuk dikomersialkan. Penelitian ini dilakukan untuk menjawab tantangan dari studi-studi terdahulu, dengan menganalisis pengaruh penambahan absorber arang tempurung kelapa atau coconut shell charcoal (CSC) dan katalis Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> terhadap parameter-parameter proses pirolisis seperti waktu tinggal, suhu, yield *bio-oil*, dan kualitas *bio-oil*.

## II. METODE PENELITIAN

### A. Tempat dan waktu penelitian

Penelitian ini dimulai pada bulan Juli 2022 hingga Maret 2023. Pembuatan katalis dilakukan di laboratorium Teknik Pengolahan Minyak Bumi Gas dan Batubara (TMBGB), Departemen Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada sedangkan proses pirolisis dilakukan di laboratorium Biomassa Departemen Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

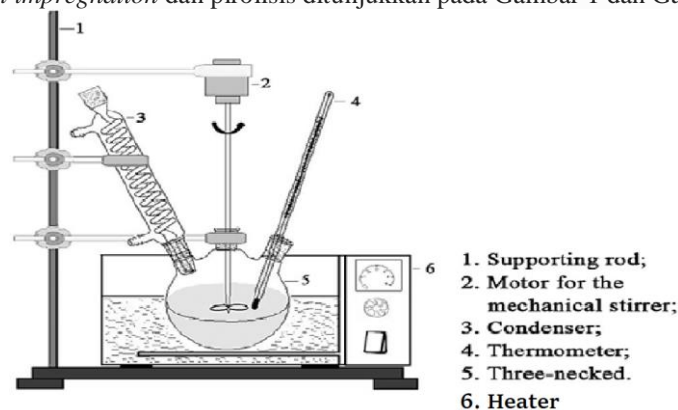
### B. Prosedur penelitian

Proses pembuatan katalis diawali dengan preparasi support katalis. Support gamma alumina ( $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dibilas menggunakan aquades kemudian dikeringkan pada suhu 70 °C dan dikalsinasi pada suhu 700 °C selama 3 jam. Sejumlah Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O dilarutkan dalam aquades kemudian diimpregnasi dengan  $\gamma$ -alumina pada suhu 90 °C selama 4 jam. Setelah didiamkan selama semalam, campuran katalis dikeringkan dalam suhu 60-80 °C pada vacuum oven hingga kering, kemudian dikalsinasi pada suhu 700 °C selama 3 jam. Katalis Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kemudian dianalisis menggunakan XRF (*X-ray fluorescence*) untuk mengetahui data nickel loading pada katalis. Langkah diatas diulangi untuk memperoleh katalis Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan variasi 8%, 11%, dan 12.5% *nickel loading*.

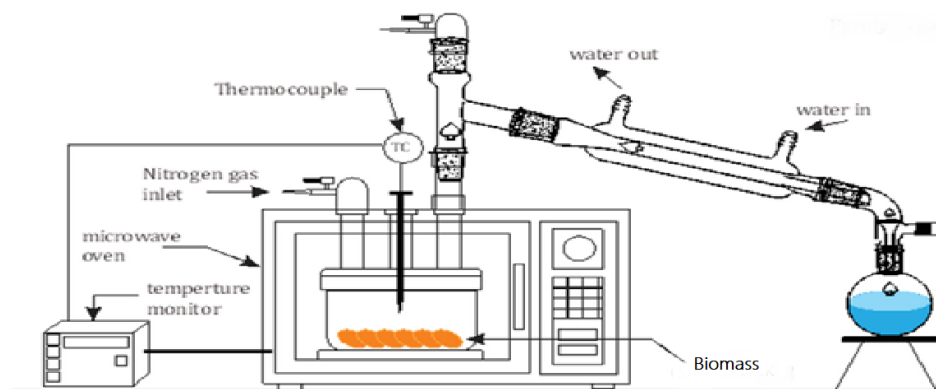
Serbuk kayu sengon laut dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C selama 4 jam hingga kering kemudian diayak kasar. Sejumlah 50 gr serbuk kayu sengon laut, 5 gram CSC, dan 5 gram katalis dicampurkan homogen kemudian dimasukkan ke dalam reaktor labu destilasi dan dipirolisis selama 60 menit pada suhu 500 °C. *Bio-oil* yang diproduksi dan suhu pirolisis dicatat setiap 5 menit. *Bio-oil* yang terkondensasi ditampung dan dianalisis GC-MS untuk mengetahui.

### C. Rangkaian alat

Gambar rangkaian alat *wet impregnation* dan pirolisis ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 1. Rangkaian alat *wet impregnation* [3]

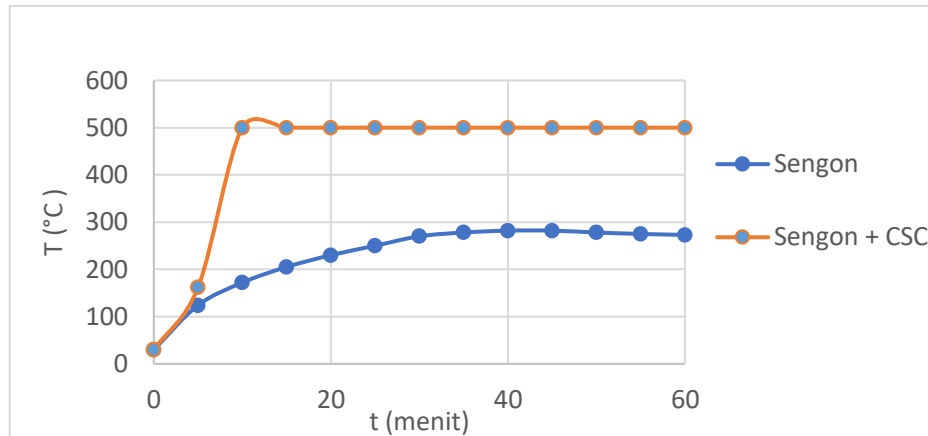


Gambar 2. Rangkaian alat pirolisis berbantuan gelombang mikro [4]

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Pengaruh Absorber terhadap Suhu Pirolisis

Proses pemanasan dalam MAP sangat tergantung pada kemampuan material dalam mengabsorpsi gelombang mikro. Penambahan absorber sebagai reseptor gelombang mikro dilakukan untuk mencapai suhu pirolisis karena biomassa sendiri memiliki kemampuan absorpsi yang buruk [1]. Profil suhu pada proses pirolisis dengan penambahan absorber dapat dilihat pada Gambar 3. berikut.

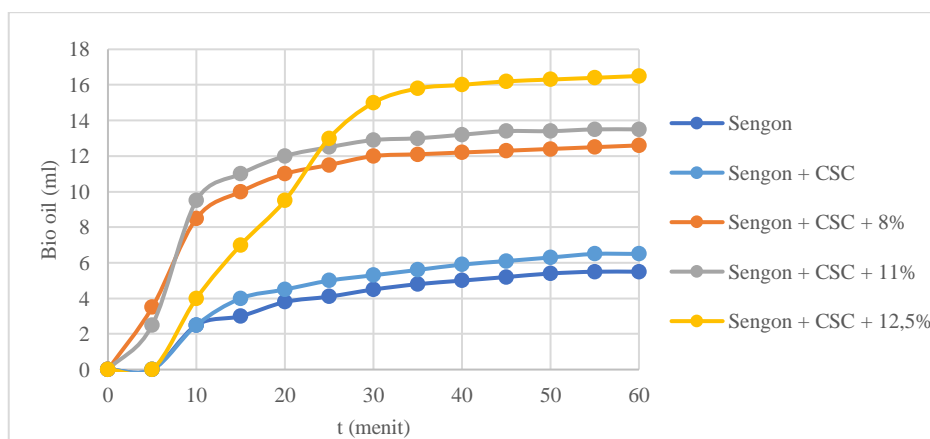


Gambar 3. Pengaruh absorber terhadap suhu pirolisis

Berdasarkan Gambar 3. dapat diamati bahwa tanpa adanya penambahan absorber, suhu akhir biomassa hanya mencapai 273 °C sehingga belum terjadi proses pirolisis. Penambahan absorber arang tempurung kelapa (CSC) menyebabkan kenaikan suhu yang signifikan, sehingga proses pirolisis dapat terjadi. Absorber berbahan dasar tempurung kelapa memang diketahui memiliki nilai konstanta dielektrik yang tinggi sehingga mampu menyerap gelombang mikro dengan baik [5].

#### B. Pengaruh waktu pirolisis terhadap yield *bio-oil*

*Bio-oil* didefinisikan sebagai fraksi cair yang dihasilkan dari proses pirolisis. Waktu pirolisis berbanding lurus dengan konversi dan jumlah *bio-oil* yang dihasilkan. Gambar 4 menunjukkan penambahan volume *bio-oil* tiap waktu pada proses pirolisis berbantuan gelombang mikro yang dijalankan selama 60 menit.

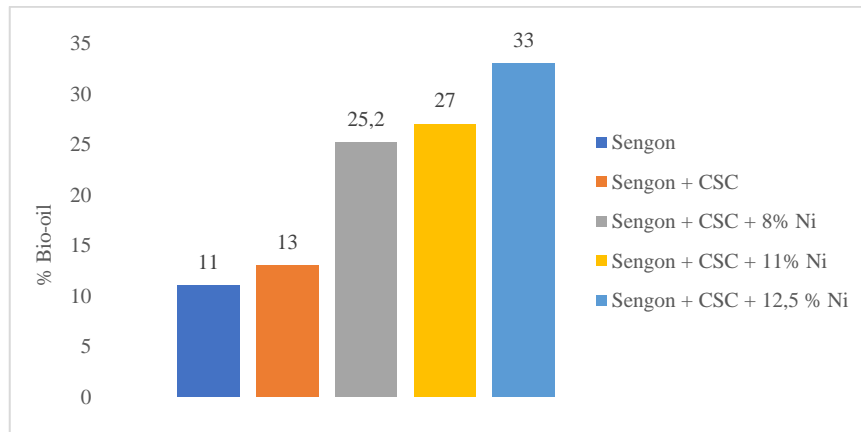


Gambar 4. Pengaruh waktu tinggal terhadap Yield *bio-oil*

Berdasarkan Gambar 4. dapat diamati volume *bio-oil* yang dihasilkan pada semua variasi meningkat tiap satuan waktu. Produksi *bio-oil* optimum terjadi pada 30 menit pertama dan relatif konstan pada 30 menit selanjutnya. Selama proses pirolisis dapat diamati terjadi pembentukan uap air dan tar yang tidak diinginkan. Tar adalah senyawa karbon yang terbentuk dari selulosa, hemiselulosa dan lignin pada suhu 400-600 °C [6]. Tar dapat menutupi pori-pori katalis (*clogging*) menyebabkan penurunan aktivitas katalitik [7] sehingga pembentukan *bio-oil* terhambat.

### C. Pengaruh penambahan absorber dan katalis terhadap yield *bio-oil*

Katalis ditambahkan dalam proses pirolisis dengan tujuan untuk mengarahkan distribusi produk yang diinginkan [8]. Dalam pirolisis berbantuan gelombang mikro, katalis Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diharapkan mampu meningkatkan yield *bio-oil* yang dihasilkan dari kayu sengon laut. Gambar 5. Menunjukkan pengaruh penambahan absorber CSC dan katalis Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> terhadap yield *bio-oil*.



Gambar 5. Pengaruh penambahan absorber katalis terhadap yield *bio-oil*

Berdasarkan Gambar 5, dapat diketahui bahwa penambahan katalis dapat meningkatkan yield *bio-oil* secara signifikan. Selain itu, diketahui juga katalis dengan nickel loading yang semakin tinggi, menghasilkan yield *bio-oil* yang semakin tinggi pula. Kenaikan yield *bio-oil* ini merupakan akibat dari sifat katalis nikel yang memiliki aktivitas katalitik yang tinggi serta mampu menghambat terbentuknya tar selama proses pirolisis [6].

### D. Pengaruh katalis terhadap kualitas *bio-oil*

Selain dari yield *bio-oil* yang dihasilkan, keberhasilan suatu pirolisis juga ditentukan oleh kualitas dari *bio-oil* yang dihasilkan. Semakin kompleks komponen yang terdapat dalam *bio-oil*, maka akan semakin sulit *bio-oil* tersebut untuk dipisahkan [9]. Tabel 1 menunjukkan komponen-komponen utama yang terdapat dalam *bio-oil* pada berbagai variasi katalis yang diperoleh dari uji GC-MS.

Tabel 1. Komponen-komponen utama *bio-oil* hasil pirolisis berbantuan gelombang mikro

| Komponen  | Area % |       |       |       |
|---|--------|-------|-------|-------|
|   | Sengon | 8%    | 11%   | 12.5% |
| Toluene   | 6.924  | 7.255 | 6.684 | 0.89  |
| Benzene, 1,2,3-trimethoxy-5-methyl-                                 | 7.058  | 2.77  | 3.598 | 5.954 |
| Phenol, 2,6-dimethoxy-  | 4.45   | 2.903 | 3.917 | 4.361 |
| 1,2,4-Trimethoxybenzene   | 2.804  | 2.325 | 3.108 | 3.449 |
| Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)                                    | 1.088  | 2.316 | 0.985 | 6.261 |
| Phenol, 2-methoxy-  | 3.239  | 2.569 | 4.045 |       |
| Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-                               | 4.09   | 1.18  | 1.588 | 2.974 |
| Phenol, 4-ethyl-2-methoxy   | 2.102  | 1.502 | 2.566 | 3.365 |
| Eugenol   | 2.118  | 1.074 | 1.935 | 2.424 |
| Phenol, 2-methoxy-4-methyl-   | 2.43   | 3.774 |       | 0.667 |
| Phenol, 4-methoxy-3-methyl-   |        |       | 6.153 |       |
| Cyclotrisiloxane, hexamethyl-                                       | 1.215  | 1.365 | 0.722 | 1.592 |
| Octasiloxane, 1,1,3,3,5,5,7,7,9,9,11,11,13,13,15, 15-hexadecamethyl | 1.225  | 1.159 | 0.323 | 1.52  |
| 2-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-                         | 1.185  | 0.674 | 1.219 | 0.929 |
| Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-, (E)-                             | 3.545  |       |       |       |
| Phenol, 4-methyl-   |        | 1.142 | 1.978 | 0.418 |
| Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-, (Z)-                             |        |       | 3.352 |       |
| Desaspidino   |        | 1.679 | 0.779 | 0.868 |
| 2,4-Hexadienedioic acid, 3,4-diethyl-, dimethyl ester, (E,Z)-       | 1.025  |       | 0.383 | 1.787 |
| 2-Methoxy-4-vinylpheno  | 0.911  | 0.325 | 0.605 | 0.942 |
| Benzene, 1,2,3-trimethoxy-5-methyl-                                 |        | 2.77  |       |       |
| Cycloheptasiloxane, tetradecamethyl-                                |        |       | 1.53  | 1.043 |

|  |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|
| Phenol, 4-ethyl-   | 0.483 | 0.621 | 0.954 |       |
| Phenol, 2-methyl-  |       | 0.631 | 1.042 | 0.338 |
| 2,4,6-Cycloheptatrien-1-one, 3,5-bis-trimethylsilyl-                               |       | 0.479 | 1.377 |       |
| Vanillin   |       | 0.535 | 0.494 | 0.625 |
| Benzaldehyde, 4-hydroxy-3,5-dimethoxy  | 0.255 | 0.979 | 0.278 |       |
| Bisphenol, bis(tert-butylidimethylsilyl) ether                                     | 0.35  |       |       | 1.132 |
| Phenol, 2,4-dimethyl-  |       | 0.367 | 0.995 |       |
| Cyclotetrasiloxane, octamethyl-  | 0.24  |       |       | 1.115 |
| Heptasiloxane, 1,1,3,3,5,5,7,7,9,9,11,11,13,13- tetradecamethyl                    |       | 0.749 |       | 0.362 |
| Phenol   |       | 0.787 | 1.081 |       |
| 1 Desaspidinol   | 0.903 |       |       |       |
| 2,5-Dihydroxyacetophenone, bis(trimethylsilyl) ether                               |       |       |       | 0.903 |
| 4-Hydroxy-2-methoxycinnamaldehyde  | 0.462 | 0.421 |       |       |
| Hexane, 3-methyl-  |       |       |       | 0.822 |
| Decane, 5,6-bis(2,2-dimethylpropylidene)-, (E,Z)-                                  |       | 0.797 |       |       |
| 3,6-Octadecadiynoic acid, methyl ester   | 0.783 |       |       |       |
| 2',6'-Dihydroxyacetophenone, bis(trimethylsilyl) ether                             |       |       |       | 0.764 |
| Heptane  |       |       | 0.746 |       |
| 4-Methyl-2,4-bis(4'- trimethylsilyloxyphenyl)pentene-1                             |       | 0.352 | 0.352 |       |
| 1,2-Benzisothiazol-3-amine tbdms   | 0.251 | 0.408 |       |       |
| Benzaldehyde, 3-hydroxy-4-methoxy-   | 0.652 |       |       |       |
| Prost-13-en-1-oic acid, 9-(methoxyimino)-11,15-                                    |       |       |       |       |
| bis[(trimethylsilyl)oxy]-, trimethylsilyl ester, (8.xi., 12.xi.)-                  | 0.327 |       | 0.318 |       |
| Cyclooctasiloxane, hexadecamethyl-   |       |       | 0.308 | 0.323 |
| Tetrasiloxane, 1,1,3,3,5,5,7,7-octamethyl-   | 0.234 |       |       | 0.375 |
| 2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl  | 0.298 |       | 0.307 |       |
| Hexasiloxane, 1,1,3,3,5,5,7,7,9,9,11,11- dodecamethyl                              |       |       | 0.264 | 0.34  |
| Heptadecane, 2,6,10,15-tetramethyl-  | 0.237 |       |       | 0.363 |
| p-Trimethylsilyloxybenzaldehyde oxime, trimethylsilyl-                             |       |       |       | 0.592 |
| Cyclohexane, methyl  | 0.294 |       | 0.277 |       |
| Cyclobutane, 1,3-bis[2-(2-isopropyl-3,3- dimethyloxiran-2-yl)ethenyl]-2,4-diacetyl | 0.526 |       |       |       |

Salah satu parameter untuk melihat kualitas *bio-oil* adalah kandungan phenol yang ada di dalamnya, Phenol adalah salah satu senyawa hidrokarbon yang cukup stabil serta dapat digunakan sebagai alternatif bahan bakar fosil setelah dilakukan pemisahan [10]. Dari Tabel 1, kandungan gugus phenol dalam *bio-oil* pada masing-masing variasi dapat diakumulasikan berturut turut sebesar 22.266 %, 16.612 %, 28.996 %, dan 19.496 %. *Bio-oil* yang dihasilkan dari katalis Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan nickel loading 11% manunjukkan kandungan phenol tertinggi.

Selain phenol, toluene juga dapat dijadikan sebagai parameter kualitas *bio-oil*. Toluene merupakan salah satu zat additive yang ditambahkan kedalam bahan bakar fosil untuk meningkatkan bilangan oktan. Dari Tabel 1, diketahui juga *bio-oil* yang dihasilkan dari pirolisis berbantuan gelombang mikro dengan tambahan katalis dengan *nickel loading* 11% memiliki komposisi toluene yang cukup tinggi.

#### IV. KESIMPULAN

Penambahan absorber berupa arang tempurung kelapa (CSC) terbukti dapat meningkatkan suhu pirolisis berbantuan gelombang mikro. Waktu pirolisis berpengaruh dalam meningkatkan yield *bio-oil* yang dihasilkan dengan waktu optimum 30 menit. Penambahan absorber dan katalis juga terbukti dapat meningkatkan yield *bio-oil*. Analisis GC-MS menunjukkan kualitas *bio-oil* terbaik dihasilkan dari pirolisis kayu sengon laut dengan penambahan katalis dengan *nickel-loading* 11%.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Saya mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang turut serta dalam kelancaran terutama kepada laboran Lab TMBGB UGM Bapak Suhardi dan laboran Lab Biomassa UMY Mas Fajar dan Mas Dhani yang telah membantu pelaksanaan penelitian ini. Yang terakhir, yang selalu ada menjadi tempat berdiskusi, rekan-rekan mahasiswa lab TMBGB tak lupa saya ucapkan terimakasih.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Mamaeva, A. Tahmasebi, L. Tian, and J. Yu, "Microwave-assisted catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass for production of phenolic-rich bio-oil," *Bioresour. Technol.*, vol. 211, pp. 382–389, 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2016.03.120.
- [2] S. Yang *et al.*, "Novel Ni–Al nanosheet catalyst with homogeneously embedded nickel nanoparticles for hydrogen-rich syngas production from biomass pyrolysis," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 2, pp. 1762–1776, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.10.127.
- [3] Y. Guo *et al.*, "Modeling and Optimizing the Synthesis of Urea-formaldehyde Fertilizers and Analyses of Factors Affecting these Processes," *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–10, 2018, doi: 10.1038/s41598-018-22698-8.
- [4] R. D. Kusumaningtyas, H. Prasetiawan, W. Astuti, W. D. Pita Rengga, and D. R. Aji Muhammad, "Design and Construction of Microwave-Assisted Pyrolysis of Waste Coconut Shell for the Isolation of Pyrolygneous Acid," *KnE Soc. Sci.*, no. July, 2019, doi: 10.18502/kss.v3i18.4745.
- [5] S. N. Ab Jabal, Y. B. Seok, and W. F. Hoon, "Carbon composition, surface porosities and dielectric properties of coconut shell powder and coconut shell activated carbon composites," *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 11, no. 6, pp. 3832–3837, 2016.
- [6] S. Qiu *et al.*, "Effects of poplar addition on tar formation during the co-pyrolysis of fat coal and poplar at high temperature," *RSC Adv.*, vol. 9, no. 48, pp. 28053–28060, 2019, doi: 10.1039/c9ra03938d.
- [7] P. Rex, V. Ganesan, V. Sivashankar, and S. Tajudeen, "Prospective review for development of sustainable catalyst and absorbents from biomass and application on plastic waste pyrolysis," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, no. 0123456789, 2022, doi: 10.1007/s13762-022-04292-8.
- [8] Y. Yu, J. Yu, B. Sun, and Z. Yan, "Influence of catalyst types on the microwave-induced pyrolysis of sewage sludge," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 106, pp. 86–91, 2014, doi: 10.1016/j.jaap.2014.01.003.
- [9] D. S. Fardhyanti, A. Chafidz, B. Triwibowo, H. Prasetiawan, N. N. Cahyani, and S. Andriyani, "Improving the Quality of Bio-Oil Produced from Rice Husk Pyrolysis by Extraction of its Phenolic Compounds," *J. Bahan Alam Terbarukan*, vol. 8, no. 2, pp. 90–100, 2020, doi: 10.15294/jbat.v8i2.22530.
- [10] Q. Lu, M. xing Zhou, W. tao Li, X. Wang, M. shu Cui, and Y. ping Yang, "Catalytic fast pyrolysis of biomass with noble metal-like catalysts to produce high-grade bio-oil: Analytical Py-GC/MS study," *Catal. Today*, vol. 302, no. June 2017, pp. 169–179, 2018, doi: 10.1016/j.cattod.2017.08.029.