



PENGARUH SUHU DAN JUMLAH KATALIS NIKEL TERHADAP YIELD DAN KOMPOSISI BIO-OIL PADA PIROLISIS AMPAS TEBU

The Effect of Temperature and Amount of Nickel Catalyst on Yield and Bio-Oil Composition in Pyrolysis of Sugarcane Bagasse

Zulia Arifah¹, Martomo Setyawan², Aditya Waskitha Nugraha³, Ahyar Rosidi⁴, Siti Jamilatun^{5*}

^{1,2,3}Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta, Indonesia

^{3,4,5}Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan Yogyakarta, Indonesia

*Email korespondensi : sitijamilatun@che.uad.ac.id

Article info : Received in 11 September 2023, Revised in 10 October 2023,
Accepted 25 October 2023

ABSTRACT

The abundance of bagasse waste from sugar cane processing needs special attention apart from being used for direct combustion in boilers. Sugarcane bagasse waste can be further processed by pyrolysis so that it will produce bio-oil, bio-gas and char products which have the potential to be used as fuel or high-value chemicals. Pyrolysis of bagasse was carried out to study the effect of temperature and the ratio of the amount of Ni catalyst on the yield and composition of bio-oil in the form of oxygen to carbon (O/C) ratio, hydrogen to carbon (H/C) ratio, higher heating value (HHV), content of oxygenated compounds and range of aromatic compounds. Pyrolysis of bagasse is carried out in a fixed bed reactor with a heating rate of 10-12 °C/minute to the desired temperature. Pyrolysis with and without a catalyst was carried out at a temperature range of 300-600 °C with a variation of Ni catalyst weighing 2.5 grams and 5 grams. Liquid product analysis was tested using GCMS (Gas Chromatography and Mass Spectroscopy) to determine the compound content in the liquid product resulting from pyrolysis of sugarcane bagasse. Bio-oil resulting from pyrolysis of sugarcane bagasse contains several dominant compounds including alcohol, fatty acids, esters, carotenoids and levoglucosan. However, the yield of sugarcane bagasse bio-oil without catalyst was dominated by high levoglucosan, namely 70.52%. Meanwhile, the bio oil resulting from pyrolysis which varied with 2.5 grams and 5 grams of Ni catalyst was dominated by esters, namely 69.07% and 81.68% respectively. These compounds have different chemical properties and applications, and understanding the composition of bio-oil can help in deciding how to use it efficiently.

Keywords: bagasse; bio-oil; catalyst Ni; GCMS; pyrolysis

ABSTRAK

Melimpahnya limbah ampas tebu hasil pengolahan tebu perlu mendapat perhatian khusus selain dimanfaatkan untuk pembakaran langsung pada boiler. Limbah ampas tebu dapat diolah lebih lanjut dengan cara pirolisis sehingga akan menghasilkan produk *bio-oil*, *bio-gas* dan *char* yang berpotensi untuk dijadikan bahan bakar atau bahan kimia bernilai tinggi. Pirolisis ampas tebu dilakukan untuk mempelajari pengaruh suhu dan perbandingan jumlah katalis Ni terhadap rendemen dan komposisi *bio-oil* berupa perbandingan oksigen terhadap karbon (O/C), rasio hidrogen terhadap karbon (H/C), nilai kalor (HHV) yang lebih tinggi, kandungan senyawa teroksigenasi dan kisaran senyawa aromatik. Pirolisis ampas tebu dilakukan dalam reaktor *fixed bed* dengan laju pemanasan 10-12 °C/menit sampai suhu yang diinginkan. Pirolisis dengan dan tanpa katalis dilakukan pada kisaran suhu 300-600 °C dengan variasi katalis Ni seberat 2,5 gram dan 5 gram. Analisis produk cair diuji menggunakan GC MS (*Gas Chromatography and Mass Spectroscopy*) untuk mengetahui kandungan senyawa dalam produk cair hasil pirolisis ampas tebu. *Bio-oil* hasil pirolisis ampas tebu mengandung beberapa senyawa yang dominan diantaranya alkohol, asam lemak, ester, karotenoid dan levoglucosan. Namun hasil *bio-oil* ampas tebu tanpa katalis lebih didominasi oleh *levoglucosan* yang tinggi yaitu 70,52 %. Sedangkan untuk *bio oil* hasil pirolisis yang di variasi dengan 2,5 gram dan 5 gram katalis Ni di dominasi oleh ester yaitu masing – masing seberat 69,07 % dan 81,68% . pada senyawa tersebut memiliki sifat kimia dan aplikasi yang berbeda, dan pemahaman komposisi dari *bio-oil* dapat membantu dalam memutuskan bagaimana menggunakannya secara efisien.

Kata kunci: ampas tebu; *bio-oil*; GC MS; katalis Ni; pirolisis

PENDAHULUAN

Berbagai permasalahan ekonomi dan lingkungan muncul akibat terus digunakannya bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Sumber daya energi terbarukan berpotensi mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) dan meningkatkan ketahanan energi karena dampak GRK yang dikonsumsi dari bahan bakar fosil mempunyai dampak buruk terhadap lingkungan dan sosial di masa depan. Oleh karena itu, selama beberapa tahun terakhir, terjadi pertumbuhan dan perkembangan luar biasa dalam produksi dan konsumsi energi terbarukan seperti biomassa (Nilsen *et al.*, 2007) (Chen & Geng, 2017) (Mora *et al.*, 2018). Biomassa terdiri dari biomassa murni seperti lignoselulosa,

tanaman pangan dan sayuran, biomassa limbah padat kota, dan limbah pertanian. Biomassa dapat diubah menjadi bahan bakar (Kavitha *et al.*, 2014) dan produk lainnya melalui proses biokimia (Kavitha *et al.*, 2020) dan termokimia (Kumar *et al.*, 2020). Salah satu biomassa yang berpotensi untuk dikembangkan sebagai energi terbarukan dan bahan kimia adalah biomassa dari tebu yang berupa limbah tebu.

Proses pirolisis selanjutnya dapat mengolah limbah ampas tebu, sehingga dapat menghasilkan produk padat (arang), cair (minyak), dan gas. Produk organik yang terkondensasi menjadi arang dan gas dengan berat molekul rendah dipecah oleh produk pirolisis biomassa yang berasal dari reaksi perengkahan pirolisis sekunder awal yang

bersifat mudah menguap dan terkondensasi. Beberapa faktor yang mempengaruhi produk dari pirolisis biomassa, seperti karakteristik reaksi, laju reaksi, rendemen produk, dan komposisi yang digunakan. Parameter operasi utama dalam pirolisis adalah tekanan, suhu, laju pirolisis, komposisi bahan baku, kadar abu, ukuran, bentuk partikel, kepadatan, dan kelembaban (Guan *et al.*, 2015). *Biochar*, produk padat yang dihasilkan dari pirolisis biomassa lignoselulosa, mengandung antara 65% dan 90% karbon, dan hasil *biochar* maksimum diperoleh selama pirolisis lambat (<500°C) (Y. Li *et al.*, 2020). *Bio-oil* merupakan produk cair hasil pirolisis yang berwarna coklat tua dan mengandung berbagai unsur yang dapat digunakan sebagai bahan bakar maupun bahan kimia. *Bio-oil* mengandung tiga kategori, yaitu senyawa yang mengandung gula (gula hidro dan furan), kemudian senyawa yang mengandung lignin (oligomer aromatik, fenol) dan senyawa karbonil kecil (aldehida, keton, dan asam) (Kan *et al.*, 2016) (C. Li & Suzuki, 2009) merupakan campuran dari H₂, gas hidrokarbon (C₁–C₄), CO, H₂S, dan CO₂. Suhu tinggi, waktu tinggal yang lambat, dan penambahan katalis adalah kondisi yang paling disukai oleh pirolisis biomassa lignoselulosa untuk menghasilkan gas sintesis atau H₂ yang kaya akan gas (Kan *et al.*, 2016) (Piskorz *et al.*, 1998).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui persentase senyawa yang

terdapat pada *bio-oil* hasil pirolisis ampas tebu serta mengetahui pengaruh suhu dan jumlah katalis Ni terhadap rendemen dan komposisi *bio-oil* hasil pirolisis ampas tebu. Produk dari proses pirolisis. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi ilmu pengetahuan, yaitu sebagai alternatif pemanfaatan ampas tebu sebagai *bio-oil*. Serta arang yang dihasilkan bisa dimanfaatkan. Bagi bangsa dan negara, penelitian ini diharapkan dapat membantu pemerintah dalam mencari sumber energi baru berbasis biomassa.

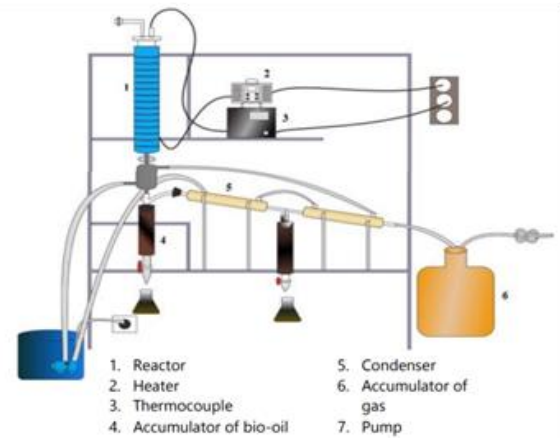
BAHAN DAN METODE

Bahan utama yang digunakan adalah ampas tebu yang diperoleh dari PGPS Madukismo Yogyakarta sedangkan katalis Ni di beli di salah satu toko online. Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah seperangkat alat pirolisis yang terdiri dari *reactor, heater, thermocouple, accumulator of bio-oil, condenser, accumulator of gas and pump*.

Metode Penelitian

Reaktor yang digunakan adalah reaktor *fixed bed* berbentuk silinder vertikal berbahan *stainless steel* dengan dimensi diameter dalam 40 cm, diameter luar 4,4 cm, dan tinggi dalam reaktor 60 cm. Reaktor menggunakan pemanas nikel yang dililitkan di bagian luar reaktor. Rangkaian lengkap alat ditunjukkan pada Gambar 1.

Tahap pertama dilakukan dengan menginjeksikan 15 gram ampas tebu tanpa katalis ke dalam reaktor, memanaskannya pada kisaran suhu 300-600 °C, dengan kecepatan pemanasan 10-15°C/menit, kemudian mencari suhu yang memberikan yield *bio-oil* yang optimal (terbanyak). Tahap kedua dilakukan dengan memasukkan ampas tebu dan katalis sebanyak 15 gram ke dalam reaktor dengan perbandingan katalis 2,5 gram dan 5 gram, kemudian dilakukan pemanasan pada suhu optimal seperti tahap pertama dengan kecepatan pemanasan yang sama. Gas yang terkondensasi hasil pirolisis selanjutnya disimpan dalam akumulator, kemudian berat gas tersebut diukur menggunakan timbangan digital dan dianalisis menggunakan GC-MS. Gas yang tidak dapat terkondensasi akan diserap dengan cara memasukkan ke dalam tangki air, dan gas yang terkondensasi akan diuji menggunakan GC. Setelah pirolisis selesai, arang (charcoal) yang terbentuk di dalam reaktor akan ditimbang. Pirolisis dihentikan setelah 1 jam waktu reaksi. Gambar proses penelitian ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 1. Peralatan Pirolisis

Hasil *bio-oil*, tar ringan, tar berat, arang, dan gas serta konversinya dihitung dengan persamaan (1) - (5) (Jamilatun, 2019). Persamaan untuk menghitung total produk cair, berat *bio-oil*, dan berat gas:

$$Y_{lt} = \frac{W_{lt}}{W_m} \times 100\% \quad (1)$$

$$Y_{ht} = \frac{W_{ht}}{W_m} \times 100\% \quad (2)$$

$$Y_c = \frac{W_c}{W_m} \times 100\% \quad (3)$$

$$Y_g = \frac{W_m - W_{lt} - W_{ht} - W_c}{W_m} \times 100\% \quad (4)$$

Dengan Y_{lt} , Y_{ht} , Y_c , dan Y_g merupakan hasil dari *light tar* (wt%), *heavy tar* (wt%), *char* (wt%), dan *gas* (wt%). W_m , W_{lt} , W_{ht} , dan W_c merupakan bobot sampel ampas tebu (gram), tar ringan (gram), tar berat (gram), dan arang (gram). Nilai O/C, H/C, oksigenat, dan komponen aromatik diperoleh dari data GC-MS. Sedangkan nilai HHV *bio-oil* diperoleh dari persamaan berikut:

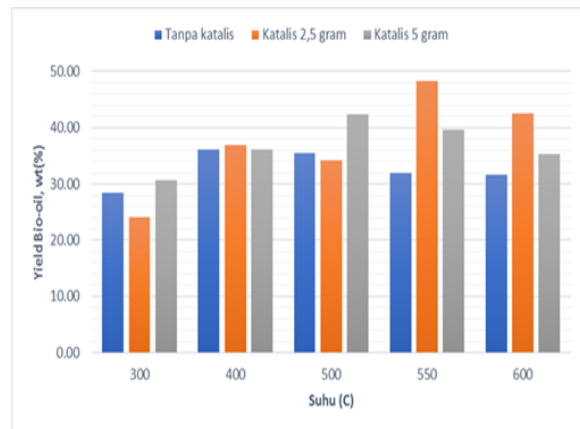
$$HHV \frac{MJ}{Kg} = 0,0335 (C) + 1,432 (h) - 0,154 (O) \quad (5)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses pirolisis dilakukan pada berbagai variasi temperatur untuk mengetahui rendemen maksimal *bio-oil* yang dapat dihasilkan. Variasi suhu yang digunakan adalah 300°C, 400°C, 500°C, 550°C, dan 600°C. Pengaruh rendemen *bio-oil* dapat dilihat pada Gambar 2.

Dari Gambar 2 terlihat bahwa semakin besar suhu pirolisis maka semakin besar pula *yield bio-oil* (Varma & Mondal, 2017). Pada proses pirolisis non katalis, *yield bio-oil* maksimum terjadi pada suhu optimum 400°C dengan persen *yield bio-oil* sebesar 36,13%. Pada proses pirolisis dengan menggunakan katalis sebanyak 2,5 gram terlihat bahwa *yield bio-oil* maksimum terjadi pada suhu optimum 550°C dengan persentase *yield bio-oil* sebesar 48,27%. Pada proses pirolisis menggunakan katalis seberat 5 gram, berat hasil *bio-oil* maksimum terjadi pada suhu optimum 500°C dengan persentase hasil *bio-oil* sebesar 42,40%. Setelah proses pirolisis mencapai suhu optimum, maka akan terjadi penurunan *yield bio-oil* akibat adanya reaksi perengkahan sekunder pada fasa *bio-oil* dan air atau perubahan ikatan C-C pada rantai karbon polimer dan berat molekul menjadi monomer dan rantai karbon kecil, dimana *bio-oil* yang terbentuk pada perengkahan primer akan terurai (Jamilatun *et al.*, 2020). Jamilatun *et al.*, (2022) mengungkapkan bahwa suhu optimum 550°C akan menghasilkan hasil 6,11% (Jamilatun,

Pitoyo, Arifah, *et al.*, 2022). Hal ini dapat mempengaruhi kenaikan suhu pirolisis, semakin banyak rantai hidrokarbon yang terputus, semakin tinggi hasil *bio-oil*. Komponen *bio-oil* dibagi menjadi lima jenis berdasarkan berat molekulnya, termasuk PAH berat. *Biofuel* cair ini tidak terdeteksi oleh GC, aromatik heterosiklik, PAH ringan, dan hidrogen aromatik ringan (Ponzio *et al.*, 2006). Produk dari gasifikasi dapat menghasilkan suhu tinggi dengan waktu tinggal kurang dari 10 detik, dan suhu minimum 1200°C harus dimiliki oleh hidrokarbon aromatik yang berasal dari pirolisis bahan bakar padat (Qi *et al.*, 2020).

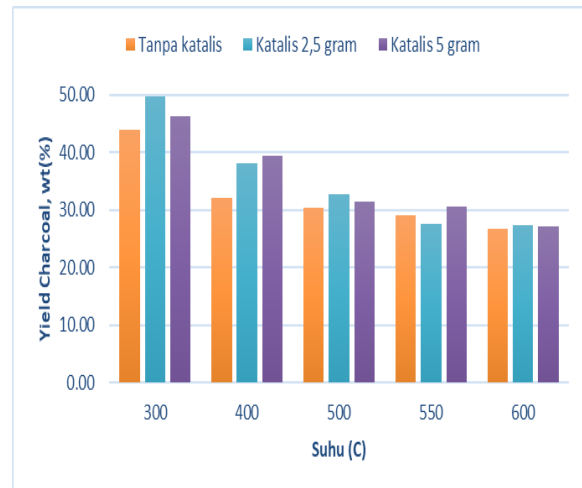


Gambar 2. Pengaruh suhu terhadap rendemen *bio-oil*

Gambar 3 menunjukkan bahwa semakin besar suhu pirolisis yang digunakan maka rendemen arang yang diperoleh akan semakin sedikit. Antara pirolisis tanpa menggunakan katalis dan pirolisis menggunakan katalis 2,5 gram dan 5 gram, semakin besar suhu maka *yield* arang yang diperoleh akan semakin berdekatan, hal ini ditunjukkan pada suhu

500°C ke atas dimana *yield* arang yang diperoleh relatif sama. Terjadi penurunan % *yield* arang pada pirolisis tanpa katalis dari suhu 300°C menjadi 600°C sebesar 17,20%. Terjadi penurunan % rendemen arang pada pirolisis dengan katalis 2,5 gram dari suhu 300°C menjadi 600°C sebesar 22,40%. Terjadi penurunan % rendemen arang pada pirolisis dengan katalis 5 gram dari suhu 300°C menjadi 600°C sebesar 19,02%.

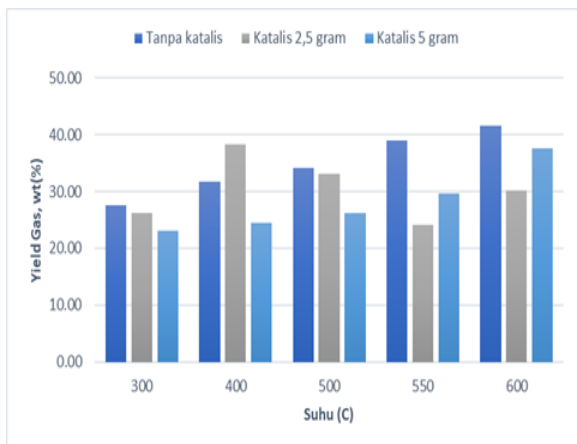
T. Dickerson (2013) menunjukkan bahwa pirolisis pada suhu kurang dari 400°C akan menghasilkan arang yang relatif tinggi (Dickerson & Soria, 2013). Laju pemanasan yang lebih rendah dan waktu tinggal yang lebih lama menyebabkan reaksi perengkahan sekunder yang akan mempengaruhi sifat-sifat *bio-oil*. Semakin tinggi suhu pirolisis yang digunakan maka kandungan arang akan semakin rendah karena kandungan ampas tebu akan terurai, dan semakin tinggi suhu pirolisis maka kandungan zat volatil akan semakin menurun. Namun menurut Guoli Qi (2020), perengkahan sekunder dapat dikondensasikan untuk menghasilkan arang sekunder dan gas yang tidak dapat terkondensasi (Qi *et al.*, 2020). Ren *et al.*, (2014) menyelidiki bahwa katalis yang digunakan untuk pirolisis katalitik biomassa dengan menghasilkan *syngas* dan *bio-oil* berkualitas adalah *biochar*, yang merupakan produk produksi pirolisis padat (Ren *et al.*, 2014).



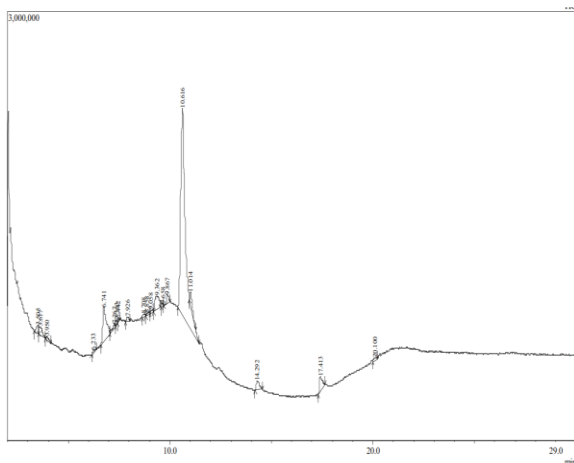
Gambar 3. Pengaruh suhu terhadap hasil arang

Gambar 4 menjelaskan bahwa pada pirolisis tanpa katalis dan pirolisis dengan katalis 5 gram, gas mengalami kenaikan suhu pirolisis, hal tersebut karena terjadinya *secondary cracking* dimana fasa organik akan terurai menjadi gas dan karbon. Dengan temperatur optimum gas pada suhu 600°C, berbeda dengan pirolisis yang menggunakan katalis 2,5 gram dimana temperatur optimum berada pada 400°C. Hal ini terjadi karena penggantian reaktor akibat putusnya kabel aliran panas di dalam reaktor. Dengan meningkatnya produksi gas, pori-pori secara bertahap meningkat, tekanan internal partikel dapat menurun dengan cepat, dan gas yang terakumulasi dalam partikel akan dilepaskan dengan cepat (Qi *et al.*, 2020). Kenaikan suhu gas yang dihasilkan cenderung konstan bahkan sedikit meningkat seiring dengan peningkatan suhu. Hal ini terjadi karena reaksi sekunder tidak mengubah komponen

yang mudah menguap menjadi gas yang tidak dapat terkondensasi, sehingga menghasilkan *bio-oil* yang rendah dan tinggi. Peningkatan suhu menyebabkan hasil *biochar* yang lebih rendah (Jamilatun *et al.*, 2022).



Gambar 4. Hubungan antara suhu dan gas



Gambar 5. Identifikasi senyawa produk cair dengan metode GC-MS pada suhu 500°C dari Pirolisis Tanpa Katalis

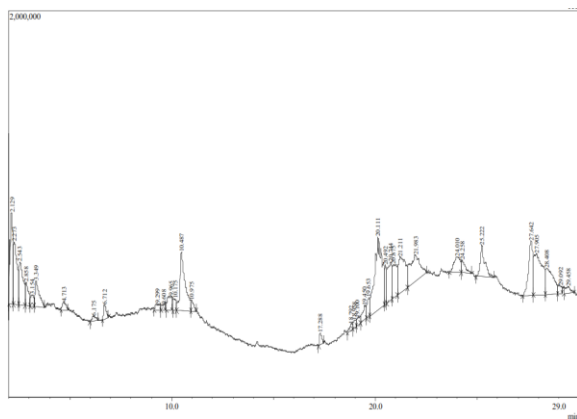
Puncak spektra pada gambar 5 di atas menunjukkan jenis komponen yang terkandung dalam cairan pirolisis. Berdasarkan gambar 5 terlihat jumlah komponen yang teridentifikasi mencapai 20 *peak*. Hasil identifikasi komponen-komponen tersebut kemudian

dikelompokkan berdasarkan jenis senyawa yang dikandungnya (C. Li & Suzuki, 2009). Rincian senyawa hasil pirolisis tanpa katalis pada suhu 500°C dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik produk cair pirolisis GC-MS pada suhu 500°C dari Pirolisis tanpa Katalis

Senyawa	Area %
amida	0,55
aromatik	5,25
asam karboksilat	0,42
asam paltitat	2,02
ester	11,34
furan	0,87
hidrokarbon alifatik	0,52
hidrokarbon siklik	0,41
karbohidrat	2,18
keton	4,89
levoglucosan	70,52
oksida heterosiklik	0,63
pirrolidin	0,39

Dari tabel 1 terlihat bahwa komponen utama produk pirolisis cair pada suhu 500°C adalah 1,6-Anhydro- β -D-glucopyranose (*Levoglucosan*) dengan jumlah 70,52%. Sedangkan sisanya adalah senyawa lain antara lain ester, furan, keton, asam, hidrokarbon alifatik, hidrokarbon siklik, dan lain-lain, menurut pendapat Properti Suzuki C. (2009) (C. Li & Suzuki, 2009).



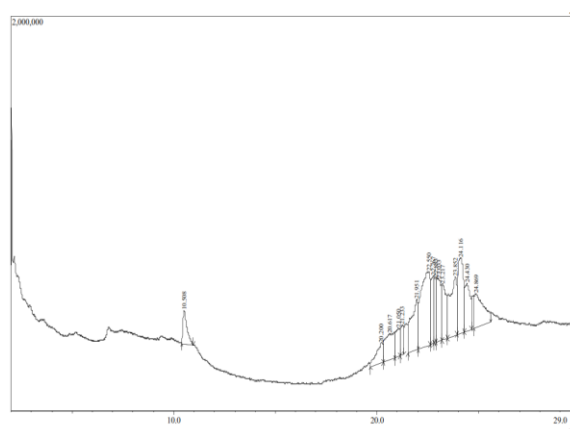
Gambar 6. Identifikasi senyawa produk cair dengan metode GC-MS pada suhu 500°C hasil pirolisis dengan katalis 2,5 gram

Puncak spektra pada gambar 6 di atas menunjukkan jenis komponen yang terkandung dalam cairan pirolisis. Berdasarkan gambar 6 terlihat jumlah komponen yang teridentifikasi mencapai 35 *peak*. Hasil identifikasi komponen tersebut dapat dikelompokkan berdasarkan senyawanya masing-masing. Tabel 2 menunjukkan senyawa-senyawa yang terkandung dan nomor luasnya.

Tabel 2. Karakteristik produk cair pirolisis GC-MS pada suhu 500°C hasil pirolisis dengan katalis 2,5 gram.

Senyawa	Area %
aldehid	1,4
alkena	0,52
alkohol	4,66
asam lemak jenuh	0,59
enaminom	1,32
ester	69,07
hidrokarbon siklik	0,45
keton	11,5
kompleks	1,44
lakton	0,86
levoglucan	0,86
lipid	1,44

Dari tabel 2 diatas terlihat bahwa komponen terbanyak pada pirolisis dengan katalis Ni 2,5 g dan suhu 500°C adalah senyawa ester dengan luas total 69,07%, sedangkan senyawa lainnya adalah alkohol, aldehida, keton, dan lain-lain. Ester mempunyai peranan yang penting dalam kandungan *bio-oil*, yaitu minyak yang dihasilkan dari proses pirolisis atau pengolahan biomassa secara termal (Pyl *et al.*, 2011).



Gambar 7. Identifikasi senyawa produk cair dengan metode GC-MS pada suhu 500°C dari Pirolisis dengan Katalis 5 gram

Puncak spektra pada gambar 7 menunjukkan jenis komponen yang terkandung dalam cairan pirolisis. Berdasarkan gambar 7 terlihat jumlah komponen yang teridentifikasi membentuk 15 *peak*. Hasil identifikasi komponen-komponen tersebut kemudian dikelompokkan menjadi beberapa senyawa dan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Karakteristik produk cair pirolisis GC-MS pada suhu 500°C hasil pirolisis dengan katalis 5 gram

Senyawa	Area %
alcohol	5,81
asam lemak	2,97
ester	81,68
carotenoid	6,09
Levoglucosan	3,44

Tabel 3 menunjukkan bahwa komponen yang paling signifikan pada pirolisis dengan katalis 5 gram Ni pada suhu 500°C adalah ester dengan luas total 81,68%, dan sisanya merupakan senyawa lain.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa pada rendemen *bio-oil*, semakin tinggi suhu pirolisis maka semakin banyak pula *bio-oil* dan gas yang dihasilkan dari pirolisis ampas tebu. Namun pada arang, semakin tinggi suhunya, semakin sedikit arang yang dihasilkan *bio-oil* pada pirolisis tanpa katalis, yang menunjukkan bahwa suhu pirolisis optimal adalah 400°C. Pada pirolisis menggunakan katalis 2,5 gram, suhu optimum untuk pirolisis adalah 550°C. Pada pirolisis menggunakan 5 gram katalis, suhu optimum untuk pirolisis adalah 500°C. Persentase produk cair hasil pirolisis ampas tebu tanpa katalis tertinggi adalah senyawa 1,6-Anhydro- β -D-glucopyranose (*Levoglucosan*). Rendemen produk cair pada pirolisis ampas tebu dengan katalis 2,5 gram

dan 5 gram, persentase kandungan tertinggi adalah senyawa ester dengan luas masing-masing 69,07% untuk katalis Ni 2,5 gram dan 81,68% untuk katalis Ni 5 gram.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Program Studi Magister Teknik Kimia Universitas Ahmad Dahlan atas pemberian dana beasiswa Tesis dari Dana Hibah PDKN 2023 dengan No. Kontrak: 006/PDKN/LPPM/UAD/IV/2023 dan Prof. Dr. Ir. Siti Jamilatun, M.T. serta Dr. Ir. Martomo Setyawan, S.T., M.T. yang telah membimbing dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Chen, W., & Geng, W. (2017). Fossil energy saving and CO₂ emissions reduction performance, and dynamic change in performance considering renewable energy input. *Energy*, 120, 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.080>
- Dickerson, T., & Soria, J. (2013). Catalytic Fast Pyrolysis: A Review. *Energies*, 6(1), 514–538. <https://doi.org/10.3390/en6010514>
- Guan, J., Qi, G., & Dong, P. (2015). A granular-biomass high temperature pyrolysis model based on the Darcy flow. *Frontiers of Earth Science*, 9(1), 114–124.

- <https://doi.org/10.1007/s11707-014-0371-9>
- Jamilatun, S. (2019). Ex-Situ Catalytic Upgrading of Spirulina Platensis Residue Oil Using Silica Alumina Catalyst. *International Journal of Renewable Energy Research*, v9i4. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v9i4.10119.g7776>
- Jamilatun, S., 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>
- Jamilatun, S., Pitoyo, J., Arifah, Z., Amelia, S., & Maarif, A. (2022). Pirolisis Ampas Tebu(Saccharum officinarum Linn): Pengaruh Suhu terhadap Yield dan Karakteristik Produk. *Universitas Muhammadiyah Jakarta*.
- Jamilatun, S., Suhendra, Budhijanto, Rochmadi, Taufikurahman, Yuliestyan, A., & Budiman, A. (2020). *Catalytic and non-catalytic pyrolysis of Spirulina platensis residue (SPR): Effects of temperature and catalyst content on bio-oil yields and its composition*. 060003. <https://doi.org/10.1063/5.0013164>
- Kan, T., Strezov, V., & Evans, T. J. (2016). Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1126–1140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.185>
- Kavitha, S., Jayashree, C., Adish Kumar, S., Yeom, I. T., & Rajesh Banu, J. (2014). The enhancement of anaerobic biodegradability of waste activated sludge by surfactant mediated biological pretreatment. *Bioresource Technology*, 168, 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.118>
- Kavitha, S., Yukesh Kannah, R., Kasthuri, S., Gunasekaran, M., Pugazhendi, A., Rene, E. R., Pant, D., Kumar, G., & Rajesh Banu, J. (2020). Profitable biomethane production from delignified rice straw biomass: The effect of lignin, energy and economic analysis. *Green Chemistry*, 22(22), 8024–8035. <https://doi.org/10.1039/D0GC02738C>
- Kumar, G., Eswari, A. P., Kavitha, S., Kumar, M. D., Kannah, R. Y., How, L. C., Muthukaruppan, G., & Banu, J.

- R. (2020). Thermochemical conversion routes of hydrogen production from organic biomass: Processes, challenges and limitations. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01127-9>
- Li, C., & Suzuki, K. (2009). Tar property, analysis, reforming mechanism and model for biomass gasification—An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(3), 594–604. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.01.009>
- Li, Y., Xing, B., Ding, Y., Han, X., & Wang, S. (2020). A critical review of the production and advanced utilization of biochar via selective pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 312, 123614. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123614>
- Mora, C., Spirandelli, D., Franklin, E. C., Lynham, J., Kantar, M. B., Miles, W., Smith, C. Z., Freel, K., Moy, J., Louis, L. V., Barba, E. W., Bettinger, K., Frazier, A. G., Colburn Ix, J. F., Hanasaki, N., Hawkins, E., Hirabayashi, Y., Knorr, W., Little, C. M., ... Hunter, C. L. (2018). Broad threat to humanity from cumulative climate hazards intensified by greenhouse gas emissions. *Nature Climate Change*, 8(12), 1062–1071. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0315-6>
- Nilsen, M. H., Antonakou, E., Bouzga, A., Lappas, A., Mathisen, K., & Stöcker, M. (2007). Investigation of the effect of metal sites in Me–Al–MCM-41 (Me=Fe, Cu or Zn) on the catalytic behavior during the pyrolysis of wooden based biomass. *Microporous and Mesoporous Materials*, 105(1–2), 189–203. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2007.05.059>
- Piskorz, J., Majerski, P., Radlein, D., Scott, D. S., & Bridgwater, A. V. (1998). Fast pyrolysis of sweet sorghum and sweet sorghum bagasse. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 46(1), 15–29. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(98\)00067-9](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(98)00067-9)
- Ponzio, A., Kalisz, S., & Blasiak, W. (2006). Effect of operating conditions on tar and gas composition in high temperature air/steam gasification (HTAG) of plastic containing waste. *Fuel Processing Technology*, 87(3), 223–233. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.08.002>
- Pyl, S. P., Schietekat, C. M., Van Geem, K. M., Reyniers, M.-F., Vercammen, J., Beens, J., & Marin, G. B. (2011).

- Rapeseed oil methyl ester pyrolysis: On-line product analysis using comprehensive two-dimensional gas chromatography. *Journal of Chromatography A*, 1218(21), 3217–3223.
<https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.12.109>
- Qi, G., Wang, Z., Zhang, S., Dong, Y., Guan, J., & Dong, P. (2020). Numerical simulation on biomass-pyrolysis and thermal cracking of condensable volatile component. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(22), 12283–12297.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.199>
- Ren, S., Lei, H., Wang, L., Bu, Q., Chen, S., & Wu, J. (2014). Hydrocarbon and hydrogen-rich syngas production by biomass catalytic pyrolysis and bio-oil upgrading over biochar catalysts. *RSC Adv.*, 4(21), 10731–10737.
<https://doi.org/10.1039/C4RA0012>
- Varma, A. K., & Mondal, P. (2017). Pyrolysis of sugarcane bagasse in semi batch reactor: Effects of process parameters on product yields and characterization of products. *Industrial Crops and Products*, 95, 704–717.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.11.039>