



Synthesis of Bio-Oil from Corn Cobs Using the Pyrolysis Process

Ivenda Sasquea Cakradetha, Suriyanto ✉, Sintha Soraya Santi, Isni Utami, dan Sutiyo

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur

Jalan Raya rungkut Madya Gunung Anyar, Surabaya Jawa Timur 60294, Telp. (031) 87062179

Info Artikel

Diterima: 21-07-2024

Disetujui: 22-07-2026

Dipublikasikan: 03-08-2026

Keywords:

Bio-Oil

Bonggol Jagung

Pirolisis

Abstrak

Bio-oil merupakan bahan baku yang dapat diproduksi melalui beberapa cara, salah satunya melalui proses pirolisis biomassa. Pirolisis biomassa telah banyak dipelajari sebelumnya dan menunjukkan hasil yang menjanjikan sebagai bahan bakar alternatif dikarenakan kandungan lignoselulosa di dalamnya. Produksi jagung pipil di Indonesia mencapai 23,1 juta ton dan menyisakan limbah berupa bonggol jagung dengan perbandingan jagung dengan bonggol sebesar 1:1. Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan bio-oil dari bonggol jagung dengan menggunakan variasi waktu tinggal 40, 60, 80, 100, dan 120 menit. Bonggol jagung yang telah diseragamkan ukurannya sebesar 20 mesh akan dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis dengan suhu 400 °C selama variasi waktu tersebut. Rendemen tertinggi diperoleh pada ukuran dan waktu tinggal 20 mesh 120 menit sebesar 72,46% dengan massa jenis 1,30 g/cm³, viskositas 1,67 mm²/s, dan nilai kalor 6,640 kkal/kg. Hasil analisis GC-MS menunjukkan kadar asam asetat 37,49% dan metil ester 22,19%.

Abstract

Bio-oil is a raw material that can be produced in several ways, one of which is through the biomass pyrolysis process. Biomass pyrolysis has been widely studied previously and has shown promising results as an alternative fuel due to the lignocellulose in biomass. Production of shelled corn in Indonesia reaches 23.1 million tons and leaves waste in the form of corn cobs with a ratio of 1:1 corn to cob. This research aims to produce bio-Oil from corn cobs using varying residence times of 40, 60, 80, 100, and 120 minutes. Corn cobs that have been uniform in size to 20 mesh will be inserted into the pyrolysis reactor at a temperature of 400°C for varying times. The highest yield was obtained at a size and residence time of 20 mesh 120 minutes of 72.4632% with a density of 1.3018 g/cm³, viscosity of 1.6712 mm²/s, and heating value of 6.640 Kcal/kg. The results of GC-MS analysis showed acetic acid levels of 37.49% and methyl esters of 22.19%.

Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara agraris di dunia, di mana peran sektor pertanian dalam perekonomian nasional sangat besar (Lomban, 2022). Indonesia juga merupakan negara dengan produksi jagung tertinggi di Asia Tenggara (Syachbudi, 2023). Produksi dan konsumsi jagung di Indonesia menunjukkan tren peningkatan, dengan pertumbuhan produksi sebesar 6,82% setiap tahunnya sejak tahun 1993-2018 dan meningkat sebesar 9,29% pada tahun 2019-2023 (Saputra, 2022). Studi regional di Kabupaten Lombok Timur menunjukkan produksi jagung berfluktuasi dari tahun 2010 hingga 2021, dengan prakiraan diperkirakan akan meningkat dari 172.079 ton pada tahun 2022 menjadi 240.799 ton pada tahun 2030 (Ladoni, 2023). Jagung yang sudah dipipil menyisakan bonggol jagung yang tidak termanfaatkan yang dapat dianggap sebagai limbah produksi. Diperkirakan dari data FAO bonggol jagung memiliki perbandingan hampir 1:1 dengan jumlah jagung pipil yang diproduksi. Bonggol jagung kerap kali dianggap sebagai limbah pertanian atau biomass. Bonggol jagung kaya akan kandungan lignoselulosa berupa selulosa sebesar 41%, hemiselulosa sebesar 36%, lignin sebesar 6% dan 17% komponen lain (Kiswanto & Rubianto, 2023). Kandungan dari bonggol jagung ini berpotensi sebagai alternatif *liquid fuel* dari bio-oil hasil pirolisis. Sintesis bio-oil melalui pirolisis berbagai sumber biomassa telah banyak diteliti sebelumnya.

Bio-oil merupakan senyawa organik yang memiliki kandungan oksigenat tinggi seperti phenol, alkohol, asam karboksilat, keton dan aldehyd (Kumar, 2019). Bio-oil merupakan bahan mentah yang dapat dihasilkan dengan beberapa cara salah satunya dengan proses pirolisis. Produksi bio-oil melalui pirolisis berbagai sumber biomassa telah banyak diteliti sebelumnya dan menunjukkan hasil yang menjanjikan sebagai bahan bakar alternatif. Pirolisis kulit durian secara lambat pada suhu 250-400°C dan ukuran sampel 10-20 mesh menghasilkan bio-oil sebesar 60% yang mengandung senyawa fenolik (66,37%) dan komponen organik lainnya (Rahmatullah et al., 2019). Pirolisis cepat serbuk gergaji mahoni pada suhu 550°C menghasilkan bio-oil dengan nilai kalor 9,28 MJ/kg (Wibowo, 2016). Studi-studi ini menunjukkan bahwa bio-oil dari berbagai sumber biomassa dapat diproduksi melalui pirolisis, dengan karakteristik yang mirip dengan bahan bakar konvensional. Bio-oil biasanya mengandung asam asetat, fenol, dan komponen mudah terbakar lainnya, menjadikannya alternatif atau bahan tambahan yang potensial untuk alternatif bahan bakar fosil.

Kebaruan (novelty) penelitian ini dibandingkan dengan penelitian terdahulu terletak pada fokus optimasi waktu tinggal pirolisis untuk memaksimalkan rendemen bio-oil dari limbah bonggol jagung lokal, serta analisis profil komposisi kimia spesifik (GC-MS) yang belum banyak dilaporkan secara komprehensif untuk biomassa ini. Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan menghasilkan bio-oil dari limbah bonggol jagung dengan mempertimbangkan jumlah *yield* bio-oil yang dihasilkan.

Metode

Bahan utama yang digunakan pada penelitian ini adalah limbah bonggol jagung jenis *Zea mays L* (jagung pipil). Bonggol jagung diperoleh dari Petani Jagung di Desa Kunti, Kecamatan Bungkal, Kabupaten Ponorogo, Jawa Timur.

Pada penelitian ini menggunakan rangkaian alat pirolisator yang terdiri atas reactor, jacket pemanas, dan kondensor, sebagai tempat terjadinya proses pirolisis.

Penelitian ini dilakukan melalui tiga tahapan. Pertama adalah tahap preparasi bahan baku berupa pencucian, pengeringan, pengecilan ukuran, dan screening. Tahapan ini, limbah bonggol jagung dilakukan pencucian dengan air mengalir. Bonggol jagung yang telah bersih kemudian dikeringkan menggunakan oven dengan suhu 100°C selama 2 jam untuk mengurangi kadar air yang terdapat di dalam bonggol jagung. Bonggol jagung kemudian dihancurkan dan diayak dengan ukuran 20 mesh untuk memperkecil serta menyeragamkan ukuran agar perambatan panas optimal. Kedua adalah tahap proses pirolisis bonggol jagung untuk menghasilkan bio-oil. Sebanyak 100gram partikel bonggol jagung dipirolisis. Pirolisis dilakukan menggunakan rangkaian alat pirolisis dengan suhu 400 °C dan waktu tinggal 40, 60, 80, 100, dan 120 menit. Ketiga adalah tahap analisis densitas dengan menggunakan piknometer, viskositas dengan menggunakan viscometer ostwald, Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC-MS) dengan menggunakan merek Shimadzu QP 2010 SE, dan Nilai Kalor dengan menggunakan calorimeter IKA C200 dari bio-oil hasil pirolisis bonggol jagung.

Hasil dan Pembahasan

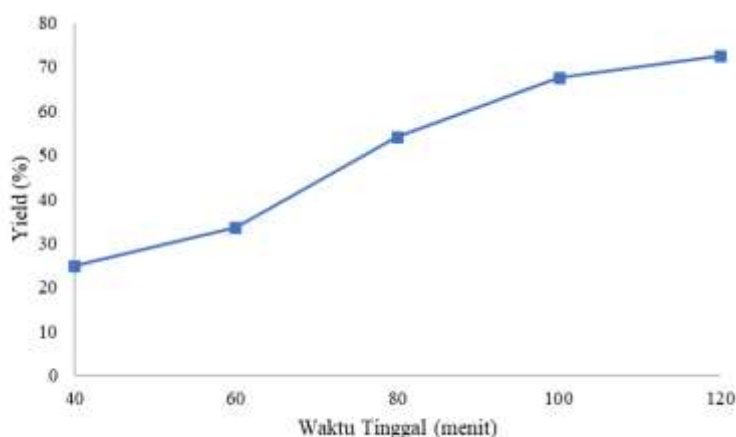
Penelitian mengenai proses untuk menghasilkan bio-oil dengan metode pirolisis yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh waktu tinggal terhadap yield yang dihasilkan berhasil dilakukan. Perlakuan diawali dengan preparasi bahan baku berupa pengeringan untuk menurunkan kadar air didalamnya serta penyeragaman ukuran. Pirolisis dilakukan pada bahan baku bonggol jagung dengan berat 100gram dan

ukuran 20 mesh disetiap variabel waktu. Persentase hasil merupakan hal yang paling utama pada penelitian ini. Persentase halis dilihat dari jumlah keseluruhan produk mulai dari arang hasil pembakaran, liquid atau bio-oil serta gas yang terbuang. Tabel 1 menunjukkan hasil yield bio-oil bonggol jagung mencapai 72,5% pada ukuran 20 mesh.

Tabel 1. Yield Bio-Oil Bonggol Jagung

Waktu (menit)	%Liquid
40	24.7521
60	33.4972
80	54.0557
100	67.4996
120	72.4632

Tabel 1 menunjukkan pengaruh waktu tinggal pirolisis terhadap rendemen bio-oil yang dihasilkan meningkat secara bertahap dari waktu tinggal 40 hingga 120 menit berturut-turut sebesar 24,75%, 33,50%, 54,06%, 57,50%, dan 72,46%. Terlihat bahwa rendemen terbesar eksperimen pada waktu 120 menit sebesar $\pm 72\%$. Terjadi peningkatan rendemen dari waktu 40 menit ke 60 menit sebesar $\pm 8\%$. Peningkatan rendemen mencapai 2-3 kali lipat dimulai pada waktu eksperimen 80 menit.



Gambar 1. Pengaruh Waktu Tinggal terhadap Yield Bio-Oil

Berdasarkan gambar 1 dapat terlihat waktu optimum untuk eksperimen yaitu pada waktu 120 menit. Hal tersebut terlihat peningkatan yang tinggi terhadap waktu 40 menit dengan besar peningkatan rendemen sebesar $\pm 47\%$. Peningkatan rendemen terhadap peningkatan waktu dapat terjadi karena perambatan panas yang terjadi pada bahan baku lebih baik. Berdasarkan hasil eksperimen rendemen yang dihasilkan pada waktu 100 dan 120 menit memiliki selisih kecil, berdasarkan hal tersebut dapat diperkirakan jika eksperimen dilakukan dengan adanya penambahan waktu akan stagnan terhadap rendemen yang didapatkan. Menurut Rahman (2018) waktu pengontakan panas terhadap suatu bahan yang lebih lama dapat memberikan waktu untuk gas panas untuk masuk kedalam bahan secara menyeluruh yang menyebabkan proses penguapan senyawa dalam bahan terjadi dengan lebih baik.

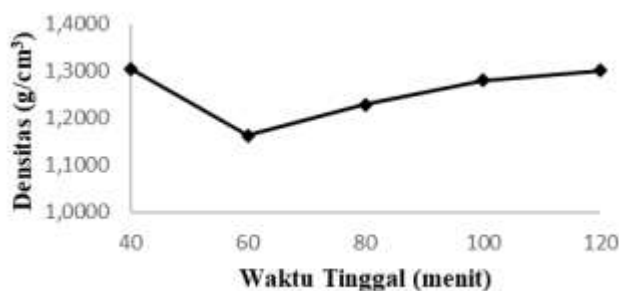
Analisa Densitas dan Viskositas

Pengujian densitas dan viskositas terhadap rendemen dilakukan menggunakan piknometer dan viskometer Ostwald. Berdasarkan data hasil pengujian, densitas dan viskositas yang didapatkan cukup bervariasi. Untuk densitas berkisar di antara 1,1634 – 1,3055 g/cm³, sedangkan untuk viskositas berkisar pada 1,5569 – 1,68 mm²/s. Bila nilai ini dibandingkan dengan standar yang dikeluarkan oleh *American Society for Testing and Material* (ASTM) dengan kode D 7544-12, hasil eksperimen yang didapatkan telah memenuhi kriteria. Kriteria standar ASTM untuk densitas yaitu berada di antara 1,1-1,3 g/cm³ dan viskositas berada di bawah 125 mm²/s.

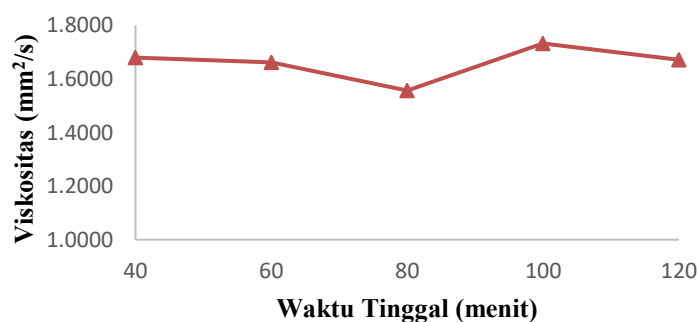
Berdasarkan data densitas, bio-oil menunjukkan adanya penurunan pada waktu 60 menit dan mulai terjadi peningkatan pada waktu 80 sampai 120 menit. Hal ini dapat terjadi karena proses pirolisis berfokus pada pemutusan rantai organik bahan baku yang berupa bonggol jagung. Senyawa yang terkandung di dalam bahan baku berupa selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Hal tersebut menyebabkan masing-masing senyawa dapat terkonversi menjadi beberapa senyawa yang berbeda. Selulosa dapat terkonversi menjadi beberapa senyawa di antaranya levoglucosan, glikosal, dan 2,3-dihidroksipropanal. Banyaknya ragam konversi ini menyebabkan nilai densitas yang berbeda-beda (Kanaujia *et al.*, 2014). Setiap senyawa memiliki berat molekul yang berbeda-beda. Berat molekul pada levoglucosan, Glyoxal, dan 2,3-Dihydroxypropanal secara berturut sebesa 162,14 g/mol ; 90,08 g/mol ; dan 58,1 g/mol (National Library of Medicine). Selain itu densitas bio-oil merupakan densitas campuran yang dipengaruhi oleh fraksi dari setiap senyawa yang terkandung. Untuk densitas campuran sendiri dihitung menggunakan jumlah dari farksi yang dibagi dengan setiap densitas senyawanya.

Tabel 2. Densitas dan Viskositas Bio-Oil Bonggol Jagung

Waktu Tinggal (menit)	Densitas (g/cm ³)	Viskositas (mm ² /s)
40	1.3055	1.6800
60	1.1634	1.6624
80	1.2299	1.5569
100	1.2807	1.7328
120	1.3018	1.6712



Gambar 2. Pengaruh Waktu Tinggal terhadap Densitas Bio-Oil Bonggol Jagung



Gambar 3. Pengaruh Waktu Tinggal terhadap Viskositas Bio-Oil Bonggol Jagung

Berdasarkan data viskositas, bio-oil bonggol jagung menunjukkan penurunan nilai pada waktu 60, 80, serta 120 menit yang tidak terlalu signifikan dan terlihat konstan. Sama halnya dengan densitas, viskositas ini dipengaruhi oleh jenis senyawa dan komposisi senyawa dalam campuran. Secara teori, nilai viskositas sendiri dapat dihitung menggunakan nilai senyawa pembanding air berupa viskositas air dikalikan dengan densitas campuran dibagi densitas air (Perry, 2008). Penurunan dan kestabilan nilai viskositas ini mengindikasikan bahwa komposisi senyawa hidrokarbon yang terbentuk pada rentang waktu tersebut memiliki distribusi berat molekul yang relatif seragam, di mana rantai hidrokarbon yang panjang cenderung

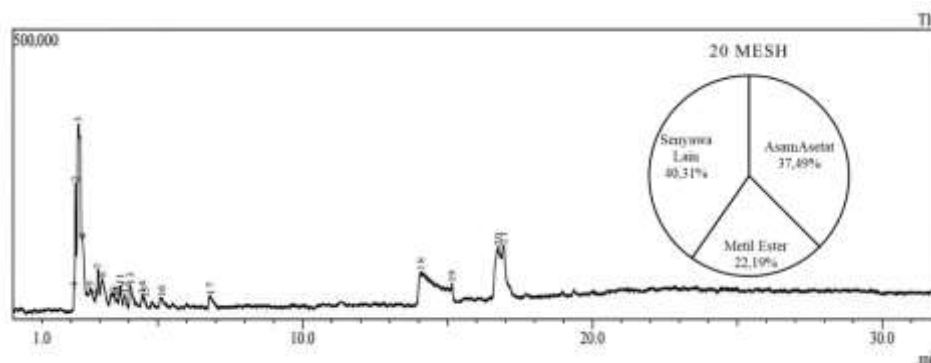
memiliki viskositas yang lebih tinggi dibandingkan hidrokarbon rantai pendek (Selpiana *et al.*, 2019; Ibadurrohman *et al.*, 2021).

Berdasarkan Gambar 3 di atas, viskositas dari bio-oil bonggol jagung menunjukkan penurunan nilai pada waktu 60,80 serta 120 menit yang tidak terlalu signifikan dan terlihat konstan. Sama halnya dengan densitas, dimana viskositas ini dipengaruhi oleh jenis senyawa dan komposisi senyawa dalam campuran. Secara teori nilai viskositas sendiri dapat dihitung menggunakan nilai senyawa pembanding air berupa viskositas air dikalikan dengan densitas campuran dibagi densitas air (Perry *ed* 8, 2008). Hal inilah yang menyebabkan viskositas sampel memiliki nilai yang variasi. Senyawa hidrokarbon dngan jumlah rantai yang berbeda memiliki nilai viskositas yang berbeda. Rantai hidrokarbon yang panjang cenderung memiliki viskositas yang lebih tinggi dibandingkan hidrokarbon rantai pendek (Selpiana, 2019; Ibadurrohman, 2021).

Analisis GC-MS

Tabel 3. Komposisi Senyawa Kimia Bio-Oil Bonggol Jagung pada Waktu Tenggat 120 menit

Puncak	Waktu retensi	Persentase %	Komponen	Rumus kimia
1	2.115	1.23	BICYCLO [2.2.1] HEPTANE, -5-(ETHYL-1-AMINE)	$C_9H_{17}N$
2	2.16	9.26	2-Propanone (CAS) Acetone	C_3H_6O
3	2.251	37.49	Acetic acid (CAS) Ethylic acid	$C_2H_4O_2$
4	2.405	8.41	Propane, 2-methyl-1-propoxy- (CAS) Ether, isobutyl propyl	$C_7H_{16}O$
5	2.672	1.08	Butanoic acid (CAS) n-Butyric acid	$C_4H_8O_2$
6	2.875	0.42	Pyridine, 2-methyl- (CAS) 2-Methylpyridine	C_6H_7N
7	2.943	3.23	1H-Pyrazole, 3,5-dimethyl- (CAS) 3,5-Dimethylpyrazole	$C_5H_8N_2$
8	3.083	4.27	cis-1,2-Diacetoxycyclohexane	$C_{10}H_{16}O_4$
9	3.486	2.96	2(3H)-Furanone, dihydro- (CAS) Butyrolactone	$C_4H_6O_2$
10	3.595	0.68	Pyridine, 2,3-dimethyl- (CAS) 2,3-Dimethylpyridine	C_7H_9N
11	3.704	2.51	1,3-Dioxolan-2-one, 4-methyl- (CAS) Propylene carbonate	$C_4H_6O_3$
12	3.866	1.61	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl- (CAS) 3-Methyl-2-cyclopentenone	C_6H_8O
13	4.054	2.59	Phenol (CAS) Iza	C_6H_6O
14	4.468	0.62	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl- (CAS) Corylon	$C_6H_8O_2$
15	4.565	0.45	2,3-Dimethyl-2-cyclopenten-1-one	$C_7H_{10}O$
16	5.14	0.99	Phenol, 2-methyl- (CAS) o-Cresol	C_7H_8O
17	6.81	2.43	2-Propenoic acid, 2-methyl-, ethyl ester (CAS) Ethyl methacrylate	$C_6H_{10}O_2$
18	14.084	2.02	Hexadecanoic acid, methyl ester (CAS) Methyl palmitate	$C_{17}H_{34}O_2$
19	15.156	0.82	Hexadecanoic acid, 15-methyl-, methyl ester (CAS) METHYL-15-METHYL HEXADECANOATE	$C_{18}H_{36}O_2$
20	16.75	9.89	9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl ester (CAS) Methyl oleate	$C_{19}H_{36}O_2$
21	16.94	7.03	17-Octadecenoic acid, methyl ester (CAS) METHYL OCTADEC-17-ENOATE	$C_{19}H_{36}O_2$



Gambar 4. Kromatogram GC dan Komposisi Relatif Bio-Oil Bonggol Jagung pada Waktu Tenggat 120 menit

Analisa GC-MS atau Gas Chromatografi-Mass Spectrometry sendiri menggunakan Shimadzu QP 2010 SE dan merupakan metode pengujian yang dilakukan untuk mengetahui senyawa apa saja yang terkandung dalam bio-oil dari bonggol jagung. Pengujian GC-MS dilakukan pada titik yang menghasilkan jumlah yield terbesar yaitu pada waktu 120 menit. Hasil pengujian GC-MS dapat dilihat pada Gambar 4 dan Tabel 3 di atas.

Pada Gambar 4 menunjukkan bahwa sampel memiliki kandungan asam asetat yang mendominasi yaitu sebesar 37,49%. Asam asetat merupakan senyawa organik yang dapat digunakan sebagai sumber energi dalam berbagai aplikasi. Dalam proses pembuatan biogas, asam asetat dihasilkan melalui fermentasi asetogenesis menggunakan bahan baku seperti bungkil kopi (Iriani & Ambriani, 2020). Asam asetat juga dapat digunakan dalam produksi metil asetat melalui reaksi esterifikasi dengan metanol, (Hapsari & Wibowo, 2020). Bio-oil yang dihasilkan biasanya mengandung oksigen dan tingkat keasaman yang tinggi, dibuktikan dengan adanya asam organik seperti asam asetat dan fenol (Jenita, 2019; M. Muzdalifah dkk., 2020). Kandungan asam asetat dan senyawa lain seperti fenol menyebabkan bio-oil bersifat asam dan korosif (Dewayanto & Nordin, 2016). Berdasarkan Gambar 4 juga terlihat keberadaan senyawa metil ester sebesar 22,9%. Metil ester berperan penting dalam menentukan kualitas bahan bakar, khususnya sebagai bahan bakar alternatif pengganti solar (Pupu, 2024). Metil ester biasanya diproduksi melalui esterifikasi atau transesterifikasi minyak nabati, seperti minyak sawit mentah, minyak kepayang, dan minyak jagung (Amelyanti, 2023; Berliana, 2023). Selain kedua senyawa tersebut terdapat pula beberapa senyawa lainnya seperti fenol, 2-Propanone (CAS) Acetone, Butanoic acid, dan senyawa asam lain (Tabel 3).

Berdasarkan hasil GC-MS pada Tabel 3 dapat diketahui bio-oil dari bonggol jagung mengandung senyawa-senyawa kimia diantaranya asam asetat, Propanon, fenol, Hexadecanoic acid, Benzen, Octadecanoic dll. Kandungan bio-oil bonggol jagung yang diperoleh tersebut memiliki kesamaan dengan bio-oil dari tandan kosong kelapa sawit dan serbuk gergaji kayu sengon (Wicaksono, 2021; Wibowo, 2016). Senyawa-senyawa tersebut merupakan pererkahan dari lignoselulosa yang terdapat di dalam bonggol jagung, seperti asam asetat yang merupakan salah satu pererkahan dari hemiselulosa dan fenol merupakan pererkahan dari lignin (Kanuija, 2014). Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa konversi yang terjadi pada selulosa, hemiselulosa dan lignin dapat terkonversi secara acak dan tidak menentu.

Analisis Standart Bio-Oil

Tabel 4. Perbandingan Bio-Oil Bonggol Jagung dengan ASTM D 7544-12

Karakteristik	ASTM D 7544-12	Bio-Oil Bonggol Jagung
Viskositas, mm ² /s	≤ 125	1.5569 – 1.68
Densitas, kg/L	1.1 – 1.3	1.1634 – 1.3055
Nilai Kalor, MJ/kg	≥ 15.0	27.78

Tabel 4 menunjukkan perbandingan bio-oil bonggol jagung dengan nilai standar bio-oil yang ditetapkan oleh American Society for Testing and Materials (ASTM) D 7544-12. Nilai viskositas sampel percobaan dibandingkan dengan nilai standar ASTM yang memenuhi kriteria, di mana bio-oil memiliki nilai viskositas 1,5569 – 1,68 mm²/s sedangkan standar ASTM di bawah 125 mm²/s. Selain itu, densitas sampel percobaan dibandingkan dengan nilai standar ASTM telah memenuhi. Dimana kriteria batas densitas bio-oil menurut ASTM D 7544-12 berkisar 1,1-1,3 kg/L dan densitas bio-oil bonggol jagung yang diperoleh berkisar 1,1634 – 1,3055 kg/cm³. Terakhir, nilai kalor eksperimen di atas standar ASTM yaitu

27,78 MJ/Kg sedangkan nilai standar sebesar lebih dari 15 MJ/kg. Ketiga ciri tersebut menunjukkan bahwa bio-oil yang dihasilkan sudah memenuhi standar bio-oil mentah, yang menunjukkan bahwa eksperimen dengan bio-oil yang berasal dari proses pirolisis telah berhasil.

Simpulan

Sintesis Bi-Oil dari bonggol jagung dengan proses pirolisis diperoleh hasil terbaik pada ukuran 20 mesh dengan waktu 120 menit. Pada kondisi tersebut diperoleh yield bio-oil sebesar 72,5% dengan karakteristik densitas sebesar 1,3018 g/cm³, viskositas sebesar 1,6712 mm²/s, dan nilai kalor sebesar 6,640 kkal/kg. Selain itu, pada kondisi tersebut kandungan asam asetat sebesar 37,49% dan kandungan metil ester sebesar 22,19%.

Daftar Referensi

- Amelyanti, E., Usman, T., & Rahmalia, W. (2023). Determination of optimum conditions for synthesis of methyl ester from bleached crude palm oil using Sn-zeolite and red mud catalysts. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 20(2), 267–279. <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v20i2.267-279>
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Dewayanto, N., & Nordin, M. R. (2015). Catalytic pyrolysis of biomass to synthesize bio-oil and chemicals: A review. *CHEMICA: Jurnal Teknik Kimia*, 2(1), 29–37. <https://doi.org/10.26555/chemica.v2i1.4566>
- Goyal, H. B., Seal, D., & Saxena, R. C. (2008). Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 504–517. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.014>
- Hapsari, N. A. P., & Wibowo, A. A. (2020). Studi kasus simulasi reaktor equilibrium pada produksi metil asetat menggunakan software CHEMCAD. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 6(2), 49–55. <https://doi.org/10.33795/distilat.v6i2.74>
- Ibadurrohman, I. A., Hamidi, N., & Yuliati, L. (2021). Pengaruh panjang rantai karbon dan derajat ketidakjenuhan terhadap karakteristik pembakaran droplet asam lemak tunggal. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 12(2), 331–347. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2021.012.02.11>
- Iriani, P., & Ambriani, P. (2020). Analisis hasil asetogenesis bungkil kopi pada sistem biodigester anaerob dua tahap. *Jurnal Teknik Energi*, 4(2), 317–321. <https://doi.org/10.35313/energi.v4i2.1746>
- Jenita, J., & Anggraini, S. P. A. (2019). Pembuatan asap cair dari tempurung kelapa, tongkol jagung, dan bambu menggunakan proses slow pyrolysis. *eUREKA: Jurnal Penelitian Teknik Sipil dan Teknik Kimia*, 3(1), 42–49.
- Kanaujia, P. K., Sharma, Y. K., Garg, M. O., Tripathi, D., & Singh, R. (2014). Review of analytical strategies in the production and upgrading of bio-oils derived from lignocellulosic biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 105, 55–74. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.10.004>
- Kiswanto, C. M. J., & Rubianto, L. (2022). Pengaruh waktu fermentasi dan konsentrasi H₂SO₄ terhadap kadar glukosa pada pembuatan bioetanol dari tongkol jagung. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 8(4), 765–770. <https://doi.org/10.33795/distilat.v8i4.452>
- Kumar, R., Strezov, V., Lovell, E., Kan, T., Weldekidan, H., He, J., Dastjerdi, B., & Scott, J. (2019). Bio-oil upgrading with catalytic pyrolysis of biomass using copper/zeolite-nickel/zeolite and copper-nickel/zeolite catalysts. *Bioresource Technology*, 279, 404–409. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.067>
- Ladoni, R., Sjah, T., & Ibrahim, I. (2023). Analisis perkembangan produksi jagung di Kabupaten Lombok Timur. *Agroteksos*, 33(1), 157–165. <https://doi.org/10.29303/agroteksos.v33i1.816>
- Lomban, S. D., Sahara, & Azijah, Z. (2022). Dampak COVID-19 terhadap kinerja ekspor dan impor sektor pertanian Indonesia: Pendekatan analisis input-output. *Buletin Ilmiah Litbang Perdagangan*, 16(2), 167–184. <https://doi.org/10.55981/bilp.2022.11>

- Mohan, D., Pittman, C. U., Jr., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy & Fuels*, 20(3), 848–889. <https://doi.org/10.1021/ef0502397>
- Muzdalifah, M., Syarif, T., & Aladin, A. (2020). Potensi pemanfaatan limbah biomassa serbuk gergaji kayu besi (*Eusideroxylon zwageri*) menjadi asap cair melalui proses pirolisis. *ILTEK: Jurnal Teknologi*, 15(2), 78–81. <https://doi.org/10.47398/iltek.v15i2.523>
- Rahman, M. M., Liu, R., & Cai, J. (2018). Catalytic fast pyrolysis of biomass over zeolites for high-quality bio-oil: A review. *Fuel Processing Technology*, 180, 32–46. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.08.002>
- Rahmatullah, R., Putri, R. W., & Nurisman, E. (2019). Produksi bio-oil dari limbah kulit durian dengan proses pirolisis lambat. *Jurnal Teknik Kimia*, 25(2), 50–53. <https://doi.org/10.36706/jtk.v25i2.425>
- Saputra, D., Erlina, Y., & Barbara, B. (2022). Analisis tren produksi dan konsumsi jagung pipilan di Indonesia. *J-SEA (Journal Socio Economics Agricultural)*, 17(1), 30–46. <https://doi.org/10.52850/jsea.v17i1.4340>
- Selpiana, S., Susmanto, P., Cundari, L., Putri, R. W., Ibrahim, O., & Oktari, D. (2019). Pengaruh waktu dan temperatur terhadap sifat fisik cairan hasil proses perengkahan limbah plastik jenis expanded polystyrene. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 30(2), 123–128. <https://doi.org/10.28959/jdpi.v30i2.5592>
- Sitorus, I. P. B., Meriatna, M., Masrullita, M., Jalaluddin, J., & Nurlaila, R. (2023). Karakterisasi metil ester dari minyak kepayang (*Pangium edule* Reinw.) melalui proses transesterifikasi menggunakan katalis kulit jengkol (*Archidendron pauciflorum*). *Chemical Engineering Journal Storage*, 3(6), 829–843. <https://doi.org/10.29103/cejs.v3i6.11968>
- Syachbudy, Q. Q. (2023). Tata kelola rantai nilai komoditas jagung di Provinsi Gorontalo. *Mimbar Agribisnis: Jurnal Pemikiran Masyarakat Ilmiah Berwawasan Agribisnis*, 9(1), 291–307. <https://doi.org/10.25157/ma.v9i1.8384>
- Wibowo, S. (2016). Karakteristik bio-oil dari limbah industri hasil hutan menggunakan pirolisis cepat. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 34(1), 61–76. <https://doi.org/10.20886/jphh.2016.34.1.61-76>
- Wicakso, D. R., Lestari, R. A., Maulana, R., & Andriya, D. (2021). Pengaruh suhu pada proses catalytic cracking untuk up-grading bio-oil dari hasil pirolisis tandan kosong sawit (TKS) dengan katalisator lempung gambut. *Prosiding Seminar Nasional Lingkungan Lahan Basah*, 6(2).
- Widodo, H., & Maesaroh, E. (2016). Studi kinetika reaksi metil asetat dari asam asetat dan metanol dengan variabel waktu, konsentrasi katalis, dan perbandingan reaktan. *Jurnal Ilmiah WIDYA*, 3(4), 28–34.
- Winaryo, A. P., Sari, D. Y., Maya, M. A., Ragil, M., Soeharja, M. A., & Yudistira. (2024). Review kandungan metil ester dalam biodiesel generasi ke-3 mikroalga dan penggunaan katalis. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan IV (SENASTITAN IV)*, 4, 1–7.