

Available online at: <http://reactor.poltekampdg.ac.id/>**REACTOR****Journal of Research on Chemistry and Engineering**

| ISSN Online 2746-0401 |



Sintesis Biooil dari Limbah Pelelepah Kelapa Sawit Berbasis Metode Pirolisis

Hendra Saputra¹, Ahdiat Leksi Siregar¹, Rahma Yusni Oktavia¹, Dimas Frananta Simatupang²

¹ Program Studi Pengolahan Hasil Perkebunan Kelapa Sawit, Politeknik Kelapa Sawit Citra Widya Edukasi, Jl. Gapura No.8 Bekasi, 17520, Indonesia

² Program Studi Teknik Kimia, Politeknik Teknologi Kimia Industri Medan, Jl. Medan Tenggara VII, 20228, Indonesia

ARTICLE INFORMATION

Received: December 17, 2022

Revised: May 31, 2023

Available online: June 06, 2023

KEYWORDS

Biooil, Palm Midrib, Pyrolysis

CORRESPONDENCE

Name: Hendra Saputra

E-mail: endsaputra11@gmail.com

ABSTRACT

Biooil is a liquid obtained from cracking lignocellulose structures into simpler compounds from the pyrolysis process. The lignocellulose content in palm midrib can be used as a raw material for making biooil. This study examines the effect of the length of time burning at a temperature of 250 °C on the physical and chemical characteristics of the resulting biooil. The independent variable was pyrolysis time with 1 hour, 2 hours, and 3 hours. The parameters used to determine the quality of biooil are specific gravity, pH, color, and composition of biooil by GC-MS instrument. From the results obtained, the highest yield of biooil was 7.9945% from sample with 2 hours pyrolysis time. The quality of biooil showed the average pH ranged between 2.65–3.08 and the average density ranged from 1.0485 to 1.1055. The visual of biooil was dark brown color with the largest biooil content being Cis-Vaccenic acid.

PENDAHULUAN

Potensi energi yang dapat diperbaharui dan terbarukan yang sampai saat ini masih belum banyak dieksplor dan dimanfaatkan adalah energi biomassa. Biomassa yang digunakan berasal dari berbagai jenis limbah seperti pertanian, perkebunan, industri, hutan, dan rumah tangga. Kelapa sawit juga adalah satu dari berbagai macam komoditas unggulan Indonesia yang perkembangannya pesat secara signifikan. Dengan tingginya produksi minyak yang berasal dari kelapa sawit maka semakin tinggi pula produk samping atau limbah pabrik kelapa sawit [1]. Salah satu limbah yang belum banyak dieksplor sebagai bahan baku biomassa adalah pelepah kelapa sawit. Pelepah kelapa sawit selama ini hanya digunakan masyarakat sebagai pupuk kompos atau sebagai pakan ternak. Sementara ketersediaan limbah pelepah kelapa sawit ini sebagai bahan baku sangat melimpah dan terbanyak jika dibandingkan limbah lainnya. Energi kalor atau panas yang cukup tinggi yang diekstrak dari limbah pelepah kelapa sawit sangat berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai biomassa [2].

Pelepah kelapa sawit mengandung beberapa komponen penyusun senyawa kimia meliputi selulosa (34,89%),

DOI: <http://dx.doi.org/10.52759/reactor.v4i1.68>

hemiselulosa (27,14%) dan lignin (19,87%). Dengan kandungan senyawa tersebut maka limbah pelepah kelapa sawit memiliki potensi yang tinggi untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan biooil, arang atau gas mampu bakar dan dimanfaatkan sebagai sumber energi [3]. Biooil didefinisikan sebagai campuran hidrokarbon rantai pendek-menengah (C5-C14) yang dapat diproses lebih lanjut untuk dijadikan biodiesel. Salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk memanfaatkan biomassa atau limbah organik menjadi biooil adalah teknik pirolisis [4]. Teknik pirolisis adalah salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengubah biomassa menjadi produk komersial yang memiliki nilai ekonomi tinggi. Merujuk pada hal ini maka limbah pelepah kelapa sawit yang mempunyai potensi sebagai sumber energi, dapat diolah sebagai biomassa untuk memproduksi biooil [5] [6]. Menurut Bridgwater and Bridge [7], pirolisis merupakan suatu proses pemanasan biomassa dengan temperatur tinggi (200-600 °C) dan tanpa oksigen sehingga terjadi proses dekomposisi komponen-komponen penyusunnya. Istilah lainnya dari teknik ini adalah penguraian yang terjadi secara tidak teratur dari bahan-bahan hayati/organik yang disebabkan oleh adanya pemanasan tanpa adanya oksigen atau udara dari luar. Hasil akhir dari proses

[Attribution-ShareAlike 4.0 International.](#)

pirolisis adalah minyak, arang, dan gas sintetis. Oleh sebab itu maka pirolisis sangat potensial diaplikasikan pada konversi yang berkaitan dengan teknologi thermo-chemical untuk memproduksi produk-produk dalam bentuk cairan [8].

Beberapa parameter yang mempengaruhi hasil akhir pirolisis adalah kecepatan aliran gas inert, temperatur dan ukuran partikel umpan masuk. Kemudian komposisi senyawa kimia penyusun biomassa seperti kandungan air, abu, lignin, selulosa juga akan berdampak pada produk yang bervariasi. Sebagai contoh, jika biomassa tersusun dari banyak senyawa lignin maka hasil akhir proses akan mengandung banyak fenol. Dan jika biomassa mengandung banyak selulosa maka biooil yang dihasilkan semakin tinggi. Sementara itu, kandungan air yang terdapat dalam biomassa akan mempengaruhi nilai kalor dari biooil dengan kandungan air yang semakin tinggi maka nilai kalor yang dihasilkan akan semakin rendah. Sementara apabila semakin tinggi kadar abunya maka tingkat produksi arang akan semakin tinggi [7] [9].

Biooil merupakan senyawa anorganik berfase cairan yang diproduksi melalui teknik pirolisis. Biooil ini terbentuk dari proses kondensasi asap hasil pembakaran biomassa. Cairan biooil tersusun dari berbagai senyawa yang terbentuk sebagai efek teknik pirolisis dari tiga komponen yaitu selulosa, hemiselulosa dan lignin. Senyawa kimia dalam biooil merupakan campuran uap organik seperti alkohol, aldehid, asam, eter, ester, keton, fenol, furan, butanediol, asetaldehid, metanol dan hidrokarbon. Biooil umumnya memiliki warna gelap dengan visual luar mirip seperti penampilan kopi dan beraroma asap [10].

Cairan biooil dihasilkan dari proses pendinginan cepat dari degaradasi dan dekomposisi selulosa, hemiselulosa dan lignin. Biooil dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar atau bahan kimia dalam berbagai industri. Beberapa penelitian pembuatan biooil telah dilakukan dengan metode pirolisis dengan bahan baku limbah padat kelapa sawit (campuran batang dan tandan kosong) dengan rendemen yang dihasilkan mencapai 4% pada suhu pirolisis 500 OC [11]. Cangkang kelapa sawit juga digunakan untuk pembuatan biooil dengan pirolisis dan rendemen tertinggi yang dihasilkan sebesar 7,0825% pada suhu 300 OC [12]. Penelitian lainnya yang menggunakan tandan kosong kelapa sawit dengan metode pirolisis menghasilkan rendemen biooil mencapai 55,53 wt% pada suhu 700 OC [13]. Pada penelitian ini, dilakukan sintesis biooil dengan bahan baku hanya dari pelepah kelapa sawit menggunakan metode pirolisis. Biooil yang diperoleh kemudian ditentukan rendemennya, pH, densitas dan warnanya

yang disesuaikan dengan rujukan standar biooil. Selanjutnya biooil diuji karakteristik senyawa yang terkandung didalamnya menggunakan instrumen Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC-MS).

METODOLOGI

Beberapa alat dan instrumen yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian ini adalah oven, neraca analitik, reaktor drum pirolisis, thermocouple, burner, pompa, piknometer, pH meter, pipet tetes, botol kaca, GC-MS. Adapun bahan yang digunakan meliputi pelepah kelapa sawit, dan air dingin.

Persiapan Sampel

Sampel pelepah kelapa sawit dipotong kecil-kecil kemudian dibersihkan dari pengotornya. Sampel kemudian dihaluskan hingga mencapai ukuran 6-10 mesh. Selanjutnya sampel pelepah dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C selama 12 jam untuk mengeliminasi molekul air yang terkandung dalam pelepah. Kemudian sampel yang sudah kering ditimbang dengan neraca analitik.

Proses Pirolisis

Sampel pelepah kelapa sawit yang sudah diberi perlakuan sebelumnya sebanyak 500 gram dimasukkan ke dalam reaktor drum pirolisis untuk pembakaran. Penutup reaktor dipastikan sudah tertutup rapat untuk mencegah adanya udara yang masuk. Kemudian air bersuhu 24 °C dialirkan secara terus menerus pada kondensor dengan pompa. Selanjutnya, api (burner) dinyalakan dan proses pembakaran dilakukan pada suhu 250°C dengan variasi lama waktu 1, 2 dan 3 jam. Asap hasil pembakaran melewati pipa drum pirolisis dan dikondensasi sehingga menghasilkan dua produk yaitu cairan sebagai biooil dan gas. Cairan inilah yang ditampung dalam botol kaca dan dianalisis lebih lanjut [11] [12].

Analisis pH, Densitas, dan Warna

Biooil yang diperoleh dari hasil pirolisis dilakukan analisis pH menggunakan pH meter [14]. Selanjutnya, biooil dilakukan pengukuran densitas menggunakan piknometer dan analisis warna dengan pengamatan secara visual.

Analisis Kandungan Senyawa Kimia

Untuk menentukan kandungan senyawa kimia penyusun dalam biooil maka dilakukan analisis menggunakan kromatografi gas yang ditandem dengan spektrofotometri massa (GC-MS) [15].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pelelepah kelapa sawit memiliki potensi sebagai bahan baku dalam sintesis biooil yang memiliki banyak manfaat melalui metode pirolisis karena mengandung kadar hemiselulosa, selulosa dan lignin yang tinggi. Biooil yang dihasilkan berdasarkan waktu pembakaran dapat dilihat pada Gambar 1.



(A)



(B)



(C)

Gambar 1. Foto Hasil Biooil yang didapatkan dengan Waktu Pembakaran selama satu jam (A), dua jam (B) dan tiga jam (C)

Hasil perhitungan massa biooil dan %rendemen dapat ditunjukkan pada Tabel 1. Dari hasil penelitian yang dilakukan, sampel dengan waktu pembakaran selama 2 jam menghasilkan rata-rata biooil paling banyak yaitu 39,9723 gr dengan %rendemen tertinggi adalah 7,9944%. Secara umum, semakin tinggi massa biooil yang dihasilkan maka semakin besar %rendemen namun waktu pirolisis optimal dalam penelitian ini adalah

selama 2 jam dengan jumlah biomassa yang sama. Nilai rendemen biooil dari pelelepah kelapa sawit menggunakan metode pirolisis masih lebih besar dari rendemen biooil dari campuran batang dan tandan kosong kelapa sawit (4%) [11] dan masih lebih kecil dari rendemen biooil dari bahan baku ampas tebu (40%) yang menggunakan metode yang sama [16].

Hasil analisis pH, densitas dan warna terhadap biooil yang dihasilkan dapat ditunjukkan pada Tabel 2. Kandungan senyawa kimia dalam biooil hasil dari metode pirolisis ditentukan dari jenis biomassa yang digunakan sebagai sampel bahan baku. Metode pirolisis dengan sampel bahan baku pelelepah kelapa sawit menghasilkan biooil dengan nilai pH terbesar yaitu 3,08 pada waktu pembakaran selama 3 jam. Sedangkan nilai densitas tertinggi adalah 1,1055 g/ml pada waktu pembakaran selama 3 jam.

Tabel 1. Hasil perhitungan massa biooil dan % yield

Waktu	Sampel	Biooil (gr)	Rendemen (%)
1 Jam	1	34,0304	6,8061
	2	32,3407	6,4681
	3	38,4069	7,6814
	Rata-rata	34,9260	6,9852
2 Jam	1	38,1985	7,6397
	2	16,557	3,3114
	3	65,1616	13,0323
	Rata-rata	39,9723	7,9945
3 Jam	1	14,8969	2,9794
	2	10,4479	2,0896
	3	14,0014	2,8003
	Rata-rata	13,1154	2,6231

Nilai pH adalah salah satu parameter dalam menentukan kualitas dari biooil yang dihasilkan. Pengukuran dilakukan dengan pH meter untuk melihat nilai pH dari masing-masing sampel [17]. Nilai pH menunjukkan tingkat proses dekomposisi biomassa yang terjadi untuk menghasilkan senyawa asam pada biooil. Bila biooil yang dihasilkan memiliki pH yang rendah maka kualitasnya akan tinggi karena umumnya berdampak langsung terhadap masa awet dan daya simpan produk asapan. Biooil jenis ini masuk dalam grade 3 dan aplikasinya bukan untuk digunakan sebagai pengawet bahan pangan dikarenakan masih banyak mengandung tar. Namun biooil ini digunakan untuk penghilang bau, pengolahan karet dan pengawet kayu agar tahan terhadap rayap. Nilai keasaman pH sampel di waktu 1 jam berkisar 2,58-2,77, sampel di waktu 2 jam berkisar 2,74-3,09, dan sampel di waktu 3 jam berkisar 2,73-3,28. Sedangkan pH standar biooil berkisar antara 2,3-3,3 [16]. Maka dari itu, dapat disimpulkan bahwa pH biooil dari pelelepah kelapa sawit memiliki pH yang sesuai dengan standar biooil.

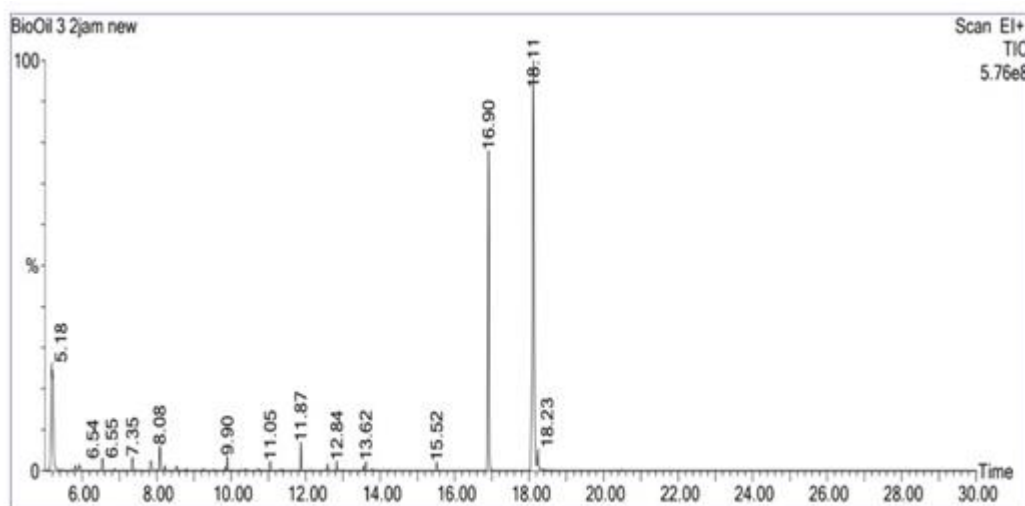
Hasil ini berbeda dengan sintesis biooil yang berasal dari limbah kelapa sawit memiliki rentang pH 4-5 dengan metode catalytic fast pyrolysis. Hal ini terjadi karena adanya pengaruh katalisis yang digunakan selama proses pirolisis [18].

Tabel 2. Sifat Fisika Biooil dari Pelelepah Kelapa Sawit

Waktu	Sampel	Sifat Fisika		
		pH	Densitas (g/mL)	Warna
1 Jam	1	2,59	1,0522	Coklat pekat
	2	2,77	1,0496	Coklat pekat
	3	2,58	1,0438	Coklat pekat
	Rata-rata	2,65	1,0485	
2 Jam	1	3,09	1,0644	Coklat pekat
	2	2,85	1,0487	Coklat pekat
	3	2,74	1,0478	Coklat pekat
	Rata-rata	2,89	1,0536	
3 Jam	1	3,28	0,8811	Coklat pekat
	2	3,23	1,2189	Coklat pekat
	3	2,73	1,2166	Coklat pekat
	Rata-rata	3,08	1,1055	

Densitas atau berat jenis merupakan suatu perbandingan antara berat jenis dengan volume. Sifat fisik produk berfase cairan hasil pirolisis sangat ditentukan oleh senyawa-senyawa kimia yang terkandung dalam produk tersebut. Peningkatan atau penurunan konsentrasi pada suatu senyawa akan berpengaruh pada karakteristik biooil. Densitas dapat menunjukkan banyaknya

komponen yang terkandung dalam suatu senyawa. Temperatur reaksi sangat penting dalam mempengaruhi konsentrasi dan jenis-jenis senyawa yang terkandung dalam biooil. Semakin tinggi suhu pirolisis, maka reaksi perengkahan semakin cepat dan menghasilkan senyawa kimia dengan ikatan rantai karbon yang pendek. Dengan demikian, semakin tinggi suhu maka akan semakin kecil nilai densitasnya. Densitas yang dihasilkan dari proses pirolisis tidak sesuai dengan teori. Karena suhu pada setiap sampel sama, tetapi nilai densitas yang dihasilkan berbeda-beda. Beberapa hal yang dapat mempengaruhi hasil densitas biooil, yaitu suhu pemanasan dan penyimpanan biooil. Suhu pirolisis yang dilakukan hanya mencapai 250 °C. Penggunaan suhu yang rendah ini berpengaruh terhadap reaksi perengkahan senyawa yang ada di umpan. Dan juga proses pirolisis yang dilakukan saat pembakaran sehingga menyebabkan pembakaran kurang sempurna. Menurut Ningrum [19] biooil adalah zat cair dengan tingkat volatilitas yang tinggi, sehingga teknik penyimpanan biooil dijaga pada suhu yang rendah seperti freezer. Namun jika penyimpanan ini tidak dilakukan maka akan berpengaruh pada hasil densitas yang didapat. Secara umum, nilai densitas produk biooil yang dihasilkan mendekati densitas air yaitu 1 g/mL [20]. Kedekatan nilai densitas biooil yang dihasilkan dengan densitas air, ini menunjukkan bahwa biooil yang dihasilkan masih memiliki kandungan air. Penelitian pembuatan biooil dari limbah cangkang kelapa sawit dengan metode pirolisis juga menghasilkan nilai densitas biooil yang mendekati nilai densitas air [12].



Gambar 2. Hasil GC-MS Biooil dari Pelelepah Kelapa Sawit

Hasil analisis terhadap warna biooil dari pelelepah kelapa sawit menunjukkan bahwa semua sampel memiliki warna coklat kehitaman. Visual warna biooil dipengaruhi oleh banyaknya campuran tar pada masing-masing produk [21]. Tak hanya itu, temperatur saat reaksi berlangsung juga berpengaruh terhadap jumlah tar.

Semakin tinggi suhu reaksi, maka jumlah tar mengalami penurunan. Fenomena ini sebagai akibat dari proses konversi pirolisis yang semakin cepat berlangsung pada temperatur yang lebih tinggi sehingga jumlah tar yang dihasilkan akan semakin kecil. Akan tetapi pada saat reaksi berlangsung suhu yang dapat dicapai adalah

250°C, penggunaan suhu yang rendah inilah berpengaruh pada jumlah tar yang dihasilkan dan menyebabkan warna visual biooil menjadi coklat kehitaman.

Biooil yang dihasilkan dari penelitian ini masih berada pada grade 3 atau biooil yang baru dihasilkan dari proses pirolisis dan memiliki warna yang masih pekat. Dalam penggunaannya biooil grade 3 ini dapat digunakan untuk pengawetan dalam industri kehutanan, perkebunan maupun bidang lainnya. Hal ini dikarenakan biooil mengandung senyawa fenol dan asam yang memiliki peran sebagai antioksidan dan antimikroba sehingga biooil ini banyak digunakan sebagai agen antimikroba dan antioksidan [22].

Hasil analisa kandungan senyawa kimia biooil yang dilakukan menggunakan instrumen GC-MS dapat dilihat pada Gambar 2. Puncak-puncak spektra yang terlihat (umumnya dikenal dengan peak) pada Gambar 2 menunjukkan jenis-jenis komponen yang terkandung dalam biooil. Berdasarkan Tabel 3 dapat ditentukan bahwa jumlah komponen atau senyawa kimia yang teridentifikasi sebanyak 45 jenis senyawa yang ditunjukkan dengan terbentuknya 50 puncak dengan 6 puncak senyawa yang sama. Dari hasil data pembacaan komponen yang terkandung dalam biooil yang diuji dibandingkan dengan data standar GC-MS terdapat bahwa komponen utama dari cairan produk pirolisis yang dihasilkan berupa asam, fenol beserta turunannya dan hidrokarbon penyusun bahan bakar/oli. Hasil GC-MS ini juga memiliki kemiripan dengan biooil yang disintesis dari bahan baku tandan kosong kelapa sawit dengan metode fast pyrolysis tanpa katalis [23]. Dari total 50 senyawa yang terkandung dalam biooil maka senyawa kimia paling dominan adalah Cis-Vaccenic acid dengan luas area 46,953%, n-Hexadecanoic acid 23,603%, phenol 15,251%. Cis-Vaccenic acid dan n-Hexadecanoic acid beserta turunannya (termasuk oleic acid) merupakan senyawa dengan komposisi paling besar. Hal ini membuktikan saat dilakukan uji nilai pH dengan pH meter, biooil hasil pirolisis dari pelepah kelapa sawit memiliki pH yang sangat kecil. Penelitian yang berkaitan dalam produksi biooil dari tandan kelapa sawit menggunakan metode pirolisis pada suhu 300 °C hanya menghasilkan 25 senyawa kimia yang juga dianalisis dengan instrument GC-MS [13]. Penelitian lainnya dalam analisis kandungan kimia dalam biooil yang berasal dari limbah padat sawit teridentifikasi mengandung etanol, toluene, xylen dan benzene [11].

Senyawa Cis-Vaccenic acid dan n-Hexadecanoic acid merupakan senyawa asam dominan yang terdapat dalam CPO/*Crude Palm Oil* (minyak kelapa sawit) dan PKO/*Palm Kernel Oil* (minyak inti sawit) yang memiliki

sifat antibakteri dan juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku kosmetik dan sabun [24].

Tabel 3. Senyawa Kimia dalam Biooil Hasil Analisis GC-MS

No.	Komponen	Area (%)
1.	4-Pyridazinamine	0,019
2.	Phenol	15,251
3.	Ketene	0,033
4.	Ethanone, 1-cyclopropyl	0,034
5.	Creatinine	0,406
6.	Propanoic acid, 2-methyl-, anhydride	0,510
7.	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	0,788
8.	3-(N-Aziridyl)-2-methylpropionitrile	0,102
9.	Phenol, 4-methyl-	0,936
10.	6-Hydroxynicotinic acid	0,023
11.	Phenol, 4-methyl-	0,972
12.	Pyruvic acid	0,038
13.	Phenol, 2-methoxy-	1,800
14.	Cyclobutanol	0,351
15.	Maltol	0,273
16.	d-Alanine, N-propargyloxycarbonyl-, isohexyl ester	0,018
17.	2-Acetyl-2-methyltetrahydrofuran	0,117
18.	Bicycle(5.2.0)non-1-ene	0,076
19.	2-Methyl-1-octen-3-yne	0,052
20.	3-Pyridinecarbonitrile, 1,4-dihydro-	0,056
21.	Oxalic acid, allyl isohexyl ester	0,145
22.	2-Methoxy-5-methylphenol	0,692
23.	Ketene	0,016
24.	Ketene	0,027
25.	2-Propenoic acid, 2-methyl-, octyl ester	0,045
26.	Methylphosphonic acid	0,129
27.	N,N,O-Triacetylhydroxylamine	0,138
28.	4-Acetyl-5-methyl-1,3-dihydro-2H-imidazol-2-one	0,018
29.	Ethanone, 1-(2,4-dihydroxyphenyl)-	0,416
30.	Ketene	0,022
31.	5-Methylcytidine	0,065
32.	Phenol, 2,6-dimethoxy-	1,344
33.	2-Propanone, 1,1,1-trifluoro-	0,022
34.	Pyruvic acid	0,460
35.	Propoxur	0,331
36.	Chloromethyl 4-chloropentanoate	0,034
37.	1-Cycloheptene-1-acetic acid, a,a-dimethyl-	0,203
38.	Dopamine	0,414
39.	Ketene	0,170
40.	Ketene	0,029
41.	2-hydroxy-3-methoxybenzoic acid	0,049
42.	Carbamic acid, dimethyl-, 3-pyridinyl ester	0,025
43.	Diphenylhydramine	0,483
44.	n-Hexadecanoic acid	23,603
45.	Cis-Vaccenic acid	46,953
46.	4-Tetradecanol	1,745
47.	1H-Tetrazole-1,5-diamine	0,137
48.	Propanesulfonylacetonitrile	0,017
49.	2-Propenoic acid, 2-propenyl ester	0,031
50.	Phenacetin	0,075

Kemudian biooil jenis ini dapat diproses lebih lanjut dengan teknik tepat sebagai bahan baku farmasi dan petrokimia. Biooil yang baik memiliki pH yang rendah rentang 1,5-3,7 karena pada kondisi tersebut mikroorganisme yang berspora akan mati dan tidak dapat berkembang biak sehingga dapat menghambat laju pertumbuhan mikroorganisme. Sedangkan senyawa fenolik mampu meningkatkan kemampuan pembakaran produk cair, namun karena kandungan air dalam produk cair ini masih ada walaupun dalam jumlah sedikit dan senyawa oksigenat yang tinggi maka pembakaran produk cair ini masih tergolong lama [25].

KESIMPULAN

Pelepah kelapa sawit memiliki potensial tinggi untuk dikonversi menjadi biooil dengan metode pirolisis. Hasil pirolisis yang didapatkan bahwa biooil yang disintesis pada penelitian ini mendekati parameter sifat kimia dan fisika biooil sesuai standar dengan pH rata-rata berkisar antara 2,65–3,08 dan rata-rata densitas antara 1,0485–1,1055 dengan visual berwarna coklat pekat. Rendemen biooil tertinggi dihasilkan selama 2 jam waktu pirolisis mencapai 7,9945%. Rendemen biooil mungkin dapat ditingkatkan dengan menaikkan suhu pirolisis. Berdasarkan hasil GC-MS produk biooil hasil pirolisis pelepah kelapa sawit juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam industri farmasi karena mengandung banyak asam oleat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. P. Soetardji, C. Widjaja, Y. Djojarahardjo, F. E. Soetaredjo, and S. Ismadji, "Bio-oil from Jackfruit Peel Waste," in *Procedia Chemistry*, 2014, vol. 9, pp. 158–164, doi: 10.1016/j.proche.2014.05.019.
- [2] S. M. At Naw, S. A. Sulaiman, and S. Yusup, "Downdraft Gasification of Oil-palm Fronds," *Trends Appl. Sci. Res.*, vol. 6, no. 9, pp. 1006–1018, 2011, doi: 10.3923/tasr.2011.1006.1018.
- [3] E. Saragih, Padil, and Yelmida, "Pembuatan Nitroselulosa dari Selulosa Hasil Pemurnian Pelepah Sawit dengan Hidrogen Peroksida (H₂O₂) sebagai Bahan Baku Pembuatan Propelan," *urnal Online Mhs. Fak. Tek. Univ. Riau*, vol. 1, no. 2, pp. 1–10, 2014.
- [4] Nuraini, N. Osman, and E. Astuti, "Bio-Oil Production Using Waste Biomass via Pyrolysis Process: Mini Review," *J. Bahan Alam Terbarukan*, vol. 11, no. 200, pp. 37–49, 2022.
- [5] A. Inayat *et al.*, "Techno-Economical Evaluation of Bio-Oil Production via Biomass Fast Pyrolysis Process: A Review," *Front. Energy Res.*, vol. 9, no. January, pp. 1–9, 2022, doi: 10.3389/fenrg.2021.770355.
- [6] M. S. Islam, M. Y. Miah, M. Ismail, M. S. Jamal, S. K. Banik, and M. Saha, "Production of Bio-Oil from Municipal Solid Waste by Pyrolysis," *Bangladesh J. Sci. Ind. Res.*, vol. 45, no. 2, pp. 91–94, 1970, doi: 10.3329/bjsir.v45i2.5703.
- [7] S. Czernik and A. V. Bridgwater, "Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil," *Energy and Fuels*, vol. 18, no. 2, pp. 590–598, 2004, doi: 10.1021/ef034067u.
- [8] E. A. Aldayyat, M. N. Saidan, Z. Al-Hamamre, M. Al-Addous, and M. Alkasrawi, "Pyrolysis of solid waste for bio-oil and char production in refugees' camp: A case study," *Energies*, vol. 14, no. 13, pp. 1–11, 2021, doi: 10.3390/en14133861.
- [9] H. S. Heo *et al.*, "Bio-oil production from fast pyrolysis of waste furniture sawdust in a fluidized bed," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 1 SUPPL., pp. S91–S96, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2009.06.003.
- [10] R. Manimaran, K. Murugu Mohan Kumar, and N. Sathiyarayanan, "Synthesis of bio-oil from waste *Trichosanthes cucumerina* seeds: a substitute for conventional fuel," *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–12, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-74130-9.
- [11] E. Saputra and S. Bahri, "Bio-Oil dari Limbah Padat Sawit dengan Metoda Pirolisa," *J. Natur Indones.*, vol. 11, no. 2, p. 124, 2012, doi: 10.31258/jnat.11.2.124-128.
- [12] A. N. Afriliana, S. Salasiah, and A. S. Sanjaya, "Pembuatan Bio Oil Dari Cangkang Kelapa Sawit Dengan Metode Pirolisis," *J. Chemurg.*, vol. 5, no. 2, p. 53, 2021, doi: 10.30872/cmng.v5i2.4881.
- [13] S. Jamilatun, J. Pitoyo, A. Puspitasari, and D. Sarah, "Pirolisis Tandan Kelapa Sawit untuk Menghasilkan Bahan Bakar Cair, Gas, Water Fase," in *Seminar Nasional Penelitian LPPM UMJ*, 2022, pp. 1–7.
- [14] D. F. Simatupang and Ramadhani, "Penentuan Kebutuhan Injeksi Ammonia untuk Meningkatkan pH pada Air Umpan Boiler: Studi Kasus di PT . XYZ Sumatera Utara," *J. Pendidik. dan Teknol. Indones.*, vol. 1, no. 5, pp. 187–191, 2021, doi: 10.52436/1.jpti.42.
- [15] S. Mariyam, M. Alherbawi, N. Rashid, T. Al-Ansari, and G. McKay, "Bio-Oil Production from Multi-Waste Biomass Co-Pyrolysis Using Analytical Py-GC/MS," *Energies*, vol. 15, no. 19, 2022, doi: 10.3390/en15197409.
- [16] E. Erawati, W. B. Sediawan, and P. Mulyono, "Karakteristik Bio-Oil Hasil Pirolisis Ampas Tebu," *J. Kim. Terap. Indones.*, vol. 15, no. 2, pp. 47–55, 2013, doi: 10.14203/jkti.v15i2.113.
- [17] D. F. Simatupang, G. Saragih, and M. Siahaan, "Pengaruh Dosis Aluminium Sulfat Terhadap Kekeruhan dan Kadar Besi Air Baku pada IPA PDAM X," *J. Res. Chem. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–4, 2021.
- [18] W. W. Purwanto, D. Supramono, R. Muthia, and G. Annisa, "Konversi Limbah Kelapa Sawit Menjadi

Bio-Oil melalui Proses Catalytic Fast Pyrolysis dan Upgradingnya,” in *Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia dan Musyawarah Nasional APTEKINDO 2012*, 2012, no. July 2016, pp. 1–10.

- [19] A. O. Ningrum, “Proses Pembuatan Biooil dari Limbah Kelapa Sawit(Tandan, Cangkang dan Serat) untuk Bahan Bakar Alternatif dengan Metode Fast Pirolisis,” Universitas Indonesia, 2011.
- [20] D. Mohan, C. U. Pittman, and S. Philip, “Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review Dinesh,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 62, no. 4, pp. 848–889, 2017, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2017.05.004>.
- [21] L. L. Sari, “Rendemen dan Beberapa Sifat Fisika Asap Cair (Liquid Smoke) dari Pelepah Pohon Aren (Arenga pinnaata Merr),” Politeknik Pertanian Negeri Samarinda, 2015.
- [22] D. E. Pszczola, “Tour highlight productions and use of smoke based plafors liquid smoke- natural aqueus condensate of wood smoke,” *Food Technol*, vol. 1, pp. 70–74, 1995.
- [23] S. Wibowo, L. Efiyanti, and G. Pari, “Karakterisasi Bio-Oil Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Penambahan Katalis Ni/Nza Menggunakan Metode Free Fall Pyrolysis,” *J. Penelit. Has. Hutan*, vol. 35, no. 2, pp. 83–100, 2017, doi: 10.20886/jphh.2017.35.2.83-100.
- [24] P. Semwal, S. Painuli, H. Badoni, and R. K. Bacheti, “Screening of phytoconstituents and antibacterial activity of leaves and bark of *Quercus leucotrichophora* A. Camus from Uttarakhand Himalaya,” *Clin. Phytoscience*, vol. 4, no. 1, pp. 0–5, 2018, doi: 10.1186/s40816-018-0090-y.
- [25] S. Miyusse and Y. Mitsuyoshi, “Carbonizaton of Melaleuca in VietNam by Japanese Style Charcoal Making Method,” in *Sustainable Development in the Mekong River Basin*, 2005, no. October, pp. 50–63.