

Pemanfaatan limbah bunga pinus menjadi *bio-oil* dengan penambahan variasi konsentrasi katalis Mo/lempung menggunakan metode pirolisis

Ramlan Manullang¹, Arif Rahman Saleh², Rany Puspita Dewi²

¹Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Tidar

²Staf Pengajar, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Tidar
Jl. Kapten Suparman No.39, Kota Magelang, Jawa Tengah 56116

Email korespondensi: ramlanmanullang3@gmail.com

Abstrak

Dalam era modern ini, konsumsi energi yang tinggi dalam perkembangan teknologi menimbulkan potensi krisis energi karena keterbatasan sumber energi fosil yang tidak dapat diperbaharui. Salah satu solusi yang dapat dikaji adalah penggunaan energi terbarukan dengan memanfaatkan biomassa. Kajian ini bertujuan untuk mengonversi limbah bunga pinus menjadi *bio-oil* melalui proses pirolisis dengan bantuan katalis Mo/lempung, untuk mengetahui pengaruh penambahan katalis Mo/lempung terhadap yield *bio-oil* yang dihasilkan dan menganalisis perbandingan karakteristik fisika *bio-oil* hasil pirolisis limbah bunga pinus dengan bahan bakar solar. Variasi konsentrasi katalis yang digunakan yaitu 0% (tanpa katalis), 7%, 9%, dan 11% dengan pengembunan logam Mo sebesar 1% dari massa katalis. Pirolisis dilakukan pada suhu 320°C selama 120 menit tanpa oksigen, kemudian didestilasi untuk menghilangkan air dari *bio-oil*. Hasil kajian menunjukkan bahwa penambahan katalis Mo/lempung memiliki pengaruh positif terhadap yield dan karakteristik fisika *bio-oil* yang dihasilkan. Hasil terbaik dicapai pada konsentrasi katalis 9%, dengan massa jenis 1,008 gr/ml, viskositas 49,603 cSt, dan nilai kalor 8.266,4981 kal/g. Namun demikian, *bio-oil* dari limbah bunga pinus belum dapat secara langsung digunakan sebagai bahan bakar pengganti biosolar.

Kata kunci: limbah bunga pinus, *bio-oil*, katalis Mo/lempung, pirolisis, karakteristik fisika.

Abstract

In the modern era, the high energy consumption associated with technological advancements poses a potential energy crisis due to the finite nature of fossil fuel resources. One explored solution is the utilization of renewable energy through biomass conversion. This study aims to convert pine flower waste into *bio-oil* via pyrolysis with the assistance of Mo/clay catalysts, to investigate the effect of Mo/clay catalyst addition on the resulting *bio-oil* yield, and to analyze the physical characteristics of the pyrolyzed pine flower waste *bio-oil* in comparison with conventional diesel fuel. Various catalyst concentrations 0% (without catalyst), 7%, 9%, and 11% with Mo loading of 1% of the catalyst mass, were employed. Pyrolysis was conducted at a temperature of 320°C for 120 minutes under oxygen-free conditions, followed by distillation to remove water content from the *bio-oil*. The results of the study demonstrate that the addition of Mo/clay catalyst positively influences the *bio-oil* yield and its physical characteristics. The optimal results were achieved at a catalyst concentration of 9%, resulting in a density of 1.008 g/ml, viscosity of 49.603 cSt, and calorific value of 8,266.4981 cal/g. However, the pine flower waste-derived *bio-oil* has yet to be directly employed as a substitute for conventional diesel fuel.

Keywords: pine flower waste, *bio-oil*, Mo/clay catalyst, pyrolysis, physical characteristics.

1. Pendahuluan

Di zaman modern ini, konsumsi energi dalam perkembangan teknologi telah meningkat drastis. Keadaan ini tentu dapat mengakibatkan krisis energi, apalagi energi atau bahan bakar yang tersebar luas saat ini masih berasal dari sisa-sisa fosil purbakala dan tidak dapat diperbaharui. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengkaji dan mencari sumber energi terbarukan yang dapat diperbaharui dalam jumlah yang cukup. Saat ini telah ditemukan beberapa sumber energi terbarukan, salah satunya adalah pengembangan energi alternatif dari biomassa. Biomassa merupakan campuran kompleks bahan organik hidrokarbon yang terdiri dari tiga komponen utama yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin [1]. Biomassa dapat diubah menjadi berbagai bahan bakar cair, padat dan gas menggunakan teknologi yang berbeda seperti bio-briket atau *bio-oil* [2]. Salah satu

contoh biomassa yang dapat diolah menjadi bahan bakar alternatif yaitu bunga pinus. Bunga pinus memiliki potensi menjadi energi alternatif yang ramah lingkungan yaitu berupa arang briket [3]. Selain menjadi briket, bunga pinus memiliki potensi menjadi *bio-oil* karena kandungan holoselulosa pada pohon pinus cukup tinggi, di mana pada kulitnya terdapat kandungan sebesar 59,38%. Semakin besar kandungan holoselulosa suatu biomassa, maka laju produksi pembentukan *bio-oil* semakin banyak. Indonesia merupakan negara dengan hutan pinus terluas ketiga di dunia. Selain luas daratan yang cukup luas, iklim di Indonesia sesuai untuk perkembangbiakan pohon pinus, sehingga bunga pinus sangat melimpah dan menjadi limbah karena belum dapat dimanfaatkan secara maksimal. Untuk memanfaatkan limbah bunga pinus menjadi bio-briket atau *bio-oil* dapat menggunakan metode pirolisis.

Kajian produksi *bio-oil* dari kulit kayu pinus telah dilakukan dengan nilai karakteristik fisika yang hampir setara dengan biosolar menggunakan metode pirolisis pada suhu 320°C selama 120 menit, di mana pada *yield* optimum nilai massa jenis 0,778 gr/ml, viskositas 1,769 cSt, dan nilai kalor 10,518 kal/g [4].

Pirolisis merupakan suatu proses pemecahan struktur karbon kimia bahan mentah menjadi fasa gas dengan pemanfaatan energi termal tanpa oksigen dalam reaktor pirolisis. Kemudian gas tersebut didinginkan menjadi minyak pirolisis melalui kondensor yang dialiri air dalam suhu ruang [5]. Untuk menghasilkan minyak atau *bio-oil* yang lebih baik, proses pirolisis ini dilakukan dengan penambahan katalis. Katalis berfungsi dalam mempercepat reaksi karena mampu mengurangi energi aktivasi dan meningkatkan jumlah produk yang dihasilkan [6]. Lempung merupakan salah satu katalis yang memiliki keunggulan yang lebih baik daripada zeolit seperti struktur pori yang besar, sehingga mampu menerima logam aktif yang menjadikan luas permukaan katalis mejadi lebih besar dan stabilitas termal yang tinggi [4].

Kajian ini bertujuan untuk memanfaatkan limbah bunga pinus menjadi *bio-oil*, mengetahui pengaruh penambahan katalis terhadap *yield* dan nilai karakteristik fisika *bio-oil* limbah bunga pinus, serta menganalisis perbandingan nilai karakteristik fisika *bio-oil* dari limbah bunga pinus dengan bahan bakar solar untuk mengetahui apakah *bio-oil* ini dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif pengganti solar.

2. Metode

Bahan yang digunakan pada kajian ini adalah lempung alam yang berasal dari Desa Sidoagung, Kecamatan Tempuran, Kabupaten Magelang. Limbah bunga pinus diperoleh dari Bukit Tidar, asam sulfat (H_2SO_4), *aquadest*, dan amonium molibdat tetrahidrat $(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$.

Alat yang digunakan selama kajian ini adalah lumpang *porcelain*, ayakan berukuran 100 *mesh*, gelas *beaker*, timbangan digital, gelas ukur, kompor induksi, oven, reaktor pirolisis, kondensor, *thermocouple*, gas LPG, gelas ukur plastik, timbangan digital, alat distilasi, termometer digital, pH meter, viskometer, dan bom kalorimeter.

Variabel yang digunakan pada kajian ini terdiri atas 3 variabel yaitu variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol. Variabel bebas dari kajian ini adalah konsentrasi variasi katalis yang ditambahkan sebanyak 0% (tanpa katalis), 7%, 9%, dan 11% dari massa bunga pinus yang digunakan. Dengan pengembanan logam molibdenum sebesar 1% terhadap massa katalis pada setiap variasi. Variabel terikat dari kajian ini adalah pengujian massa jenis, viskositas, dan nilai kalor dari *bio-oil* hasil pirolisis limbah bunga pinus. Dan variabel kontrolnya adalah

suhu proses pirolisis 320°C dan waktu pirolisis selama 120 menit.

Aktivasi Katalis Lempung

Pertama, persiapkan lempung yang akan diaktivasi dengan kondisi kering dan bersih dari kotoran atau material yang tidak diinginkan dengan massa 1500 gram yang telah digerus dan diayak menggunakan ayakan 100 *mesh*.

Mencampurkan lempung dan air, dengan perbandingan volume air 2:1 dari jumlah lempung yang digunakan lalu diaduk hingga tercampur rata. Campuran tersebut kemudian dibiarkan selama satu jam hingga terjadi pelarutan.

Kemudian panaskan campuran tersebut pada suhu 70-80°C selama 3 jam. Setelah proses pemanasan, air dari campuran tersebut dibuang lalu *cake* yang diperoleh dikeringkan di dalam oven selama 12 jam pada suhu 110°C agar menghilangkan kelembapan yang tersisa.

Campuran lempung yang telah kering, selanjutnya diaktivasi menggunakan asam sulfat (H_2SO_4) dengan rasio 2:100 (2 gram asam sulfat per 100 gram campuran lempung). Proses aktivasi dilakukan dengan mencampurkan asam sulfat dan campuran lempung yang telah dilarutkan dengan air yang telah dipanaskan sebelumnya pada suhu 80°C. Namun sebelum pencampuran, pH larutan air panas dan lempung diukur terlebih dahulu dan dicatat. Lalu campuran kedua larutan tersebut diaduk hingga merata dan diukur menggunakan pH meter, kemudian dibiarkan selama 16 jam serta ditutup menggunakan *aluminium foil* agar tidak terkontaminasi dengan udara dalam laboratorium.

Setelah proses aktivasi selesai, bersihkan campuran tersebut dengan *aquades* berkali-kali hingga pH campuran kembali normal seperti pengukuran pH awal sebelum diberi asam sulfat. Campuran lempung (*cake*) kemudian dikeringkan kembali dengan oven pada suhu 110°C selama 4 jam. Dari proses ini maka didapatkan katalis lempung yang siap digunakan.

Penggabungan Katalis Mo/Lempung

Tahapan ini adalah melakukan penggabungan antara logam molibdenum (Mo) dengan katalis lempung yang telah teraktivasi dengan metode impregnasi. Adapun hal-hal yang akan dilakukan yaitu melarutkan amonium molibdat tetrahidrat $((NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O)$ yang telah diukur massanya menggunakan 200 ml *aquadest* hingga larutan tersebut homogen. Lalu lempung yang telah teraktivasi dicampurkan ke dalam larutan tersebut. Kemudian dipanaskan serta diaduk pada suhu 60°C selama 3 jam. Selanjutnya, endapan (*cake*) dari Mo/lempung dikeringkan kembali dengan oven selama 6 jam pada suhu 110°C. Dari proses ini diperoleh katalis Mo/lempung. Penggunaan massa senyawa amonium molibdat tetrahidrat divariasikan sesuai dengan konsentrasi katalis pada pengembanan logam molibdenum sebesar 1%.

Proses Pirolisis

Proses pirolisis meliputi pemasukkan bahan baku bunga pinus ke dalam reaktor, memasukkan katalis ke dalam reaktor, lalu mengoperasikan alat pirolisis dalam batasan suhu 320°C selama 120 menit. Dari proses tersebut akan terbentuk uap, uap yang terbentuk ini akan dikondensasi oleh kondensor. Setelah uap hasil pirolisis terkondensasi menjadi cair atau berupa minyak, kemudian minyak tersebut ditampung terlebih dahulu pada wadah yang telah disiapkan.

Proses Distilasi

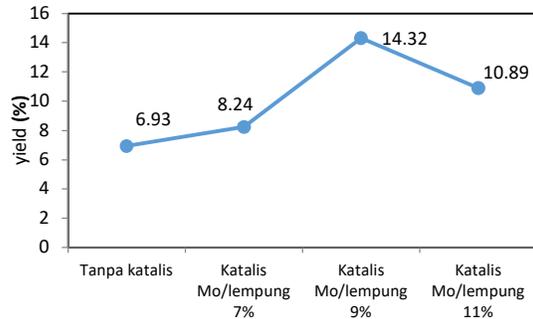
Proses distilasi dilakukan untuk memisahkan air dan minyak dari *bio-oil* limbah bunga pinus. Distilasi ini dilakukan pada suhu 100-105°C selama 120 menit. Dari proses ini akan diperoleh air dan *bio-oil* yang telah dipisahkan. Setelah proses distilasi, dilakukan pengukuran terhadap massa jenis *bio-oil* limbah bunga pinus.

Pengujian Karakteristik Fisika Bio-oil

Produk setelah distilasi yakni berupa *bio-oil* dari limbah bunga pinus ini selanjutnya akan diuji karakteristik fisiknya. Karakteristik bahan bakar yang akan diuji yaitu massa jenis, viskositas, dan nilai kalor dari *bio-oil* limbah bunga pinus.

3. Hasil dan Pembahasan

Pada Gambar 1 ditunjukkan hasil *yield* dari proses produksi *bio-oil* limbah bunga pinus.



Gambar 1. Perbandingan yield *bio-oil* limbah bunga pinus.

Berdasarkan data tersebut, terlihat bahwa *yield bio-oil* memiliki nilai yang lebih besar ketika menggunakan katalis Mo/lempung dibandingkan tanpa katalis. Hal ini dapat terjadi karena dengan penambahan katalis, reaksi pirolisis dapat bekerja lebih cepat dan mengurangi energi aktivasi pirolisis, sehingga menghasilkan *bio-oil* yang lebih banyak daripada tanpa penggunaan katalis. Hasil pengujian menunjukkan peningkatan *yield bio-oil* menjadi semakin besar pada *bio-oil* tanpa katalis hingga penambahan konsentrasi katalis Mo/lempung sebesar 9%, namun ketika konsentrasi katalis Mo/lempung ditingkatkan menjadi 11%, terjadi penurunan *yield*

bio-oil. Secara teori penambahan massa katalis seharusnya meningkatkan *yield bio-oil*, namun dalam praktiknya, terjadi penurunan *yield bio-oil*. Hal ini dapat disebabkan oleh laju reaksi pembakaran yang sangat cepat, sehingga menghasilkan banyak fraksi hidrokarbon rantai pendek yang tidak dapat dikondensasikan oleh kondensor, menyebabkan *yield bio-oil* yang dihasilkan menjadi lebih rendah [4]. Penurunan *yield bio-oil* bisa disebabkan oleh terbentuknya produk gas *non-condensable* seperti CH₄, CO₂, dan H₂ yang tidak dapat dikondensasi. Kajian sebelumnya juga mengenai konversi kulit kayu pinus menjadi *bio-oil* menggunakan katalis Mo/lempung mengalami fenomena serupa dengan penurunan *yield bio-oil*. Dengan variasi konsentrasi 3%, 5%, dan 7% dan pengembanan kadar logam Mo (1-3%) terjadi penurunan nilai *yield bio-oil* pada konsentrasi katalis Mo/lempung 7% [7]. Dari Gambar 1 di atas, terlihat bahwa *yield bio-oil* hasil pirolisis limbah bunga pinus terbesar terjadi pada penambahan konsentrasi katalis 9% yaitu sebesar 14,32% dan yang terkecil dengan tanpa katalis yaitu 6,93%.

Analisis Karakteristik Fisika Bio-oil

Hasil uji karakteristik fisika *bio-oil* dari limbah bunga pinus dengan variasi konsententrasi katalis Mo/lempung sebesar 0% (tanpa katalis), 7%, 9% dan 11% pada pengembanan kadar logam Mo 1% secara keseluruhan dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Sampel	Massa jenis (gr/ml)	Viskositas kinematik (cSt)	Nilai kalor (kal/g)
Tanpa Katalis	1,083	37,858	3.078, 1387
Konsentrasi katalis Mo/lempung 7%	1,043	44,871	8.492,9109
Konsentrasi katalis Mo/lempung 9%	1,008	49,603	8.266,4981
Konsentrasi katalis Mo/lempung 11%	1,067	103,84	8.230, 0763

Dari Tabel 1 di atas dapat terlihat bahwa massa jenis yang dihasilkan dari pirolisis bunga pinus berada pada *range* 1,008-1,083 gr/ml. Berdasarkan standar *range bio-oil*, maka secara umum rata-rata massa jenis yang dihasilkan dari limbah bunga pinus dengan menggunakan variasi konsentrasi katalis Mo/lempung berada pada standar *range bio-oil* yaitu 0,94-1,2 gram/ml [7]. Dari data di atas juga membuktikan bahwa penggunaan katalis mampu memberikan nilai massa jenis yang lebih kecil daripada tanpa penggunaan katalis, di mana katalis mampu berperan dalam mengurangi residu ataupun molekul-molekul air di dalam *bio-oil* yang dihasilkan. Perbedaan nilai massa jenis dipengaruhi oleh berat molekul-molekul yang terkandung dalam *bio-oil* yang dihasilkan pada setiap konsentrasi katalis yang ditambahkan [7]. Selain itu, penggunaan katalis dalam proses pirolisis menghasilkan fraksi-fraksi ikatan karbon yang lebih ringan daripada tanpa penggunaan katalis.

Nilai viskositas tanpa penggunaan katalis memiliki nilai yang lebih kecil daripada dengan penggunaan katalis. Di mana nilai viskositas tanpa katalis sebesar 37,858 cSt, sedangkan dengan variasi konsentrasi katalis Mo/lempung secara berurutan dari 7%, 9%, 11% yaitu sebesar 44,871 cSt, 49,603 cSt, dan 103,843 cSt. Nilai viskositas *bio-oil* yang semakin besar menunjukkan bahwa semakin besar katalis yang diberikan, maka kandungan air dan senyawa-senyawa oksigenat dalam *bio-oil* tersebut semakin sedikit, sehingga tingkat kekentalannya semakin besar pula [8]. Dilihat dari rentang nilai viskositas hasil pirolisis limbah bunga pinus telah sesuai dengan standar viskositas *bio-oil* yaitu 15-125 cSt [9].

Dari data nilai kalor di atas, ditunjukkan bahwa dengan penambahan konsentrasi katalis Mo/lempung menghasilkan *bio-oil* dengan nilai kalor yang lebih besar daripada tanpa penggunaan katalis. Penggunaan katalis dalam proses pirolisis memiliki dampak yang signifikan karena kemampuannya untuk menguraikan molekul-molekul kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana, serta mengurangi pembentukan produk samping yang tidak diinginkan. Katalis berperan penting dalam mempercepat konversi reaksi, sehingga menghasilkan minyak dengan kualitas yang lebih unggul daripada jika tanpa penggunaan katalis

Tabel 2. Perbandingan karakteristik fisika antara *bio-oil* limbah bunga pinus dengan *bio-oil* standar, biodiesel, dan biosolar.

[5]. Nilai kalor dengan variasi konsentrasi katalis Mo/lempung sudah memenuhi nilai kalor *bio-oil* standar yaitu minimal 3.582,69 kal/g bahkan mendekati nilai kalor biodiesel yaitu 8.641 kal/g [10]. Kajian mengenai pirolisis limbah bunga pinus dengan katalis zeolit sebelumnya menghasilkan nilai kalor sebesar 7.419,2161-8.340,1051 kal/g, sedangkan pada kajian ini menghasilkan 8.230,0763-8.492,9109 kal/g [11]. Dilihat dari nilainya, nilai kalor pada kajian ini menghasilkan nilai yang lebih baik. Hal ini dapat terjadi dikarenakan penggunaan katalis yang berbeda. Kajian sebelumnya menggunakan zeolit sebagai katalis, sedangkan pada kajian ini menggunakan katalis Mo/lempung. Perbedaan dalam nilai kalor ini disebabkan oleh perbedaan karakteristik antara lempung sebagai katalis dengan zeolit. Lempung memiliki struktur pori yang lebih besar, stabilitas termal yang tinggi, luas permukaan yang lebih besar, dan aktivitas katalitik yang baik jika dibandingkan dengan zeolit. Selain itu, dengan penambahan logam molibdenum mampu memperluas permukaan lempung menjadi lebih luas, sehingga mampu bereaksi dengan reaktan lebih cepat untuk menghasilkan nilai kalor yang lebih baik [12].

Nilai uji karakteristik fisika berdasarkan *yield bio-oil* limbah bunga pinus optimum dihasilkan dari penambahan konsentrasi katalis Mo/lempung 9% dengan nilai massa jenis 1,008 gr/ml, viskositas 49,603 cSt, dan nilai kalor 8.266,4981 kal/g. Sedangkan nilai uji terendah diperoleh dari *bio-oil* limbah bunga pinus tanpa katalis. Perbedaan hasil yang diperoleh dapat disebabkan oleh perbedaan jumlah minyak yang terkandung dalam *bio-oil* yang dihasilkan setelah pirolisis [13]. Selain itu, perolehan nilai uji yang rendah diduga dapat disebabkan oleh kadar air yang tinggi (komponen cuka kayu) yang terdapat pada sampel [14].

Parameter	Bio-oil limbah bunga pinus	Bio-oil standar ^[9]	Biodiesel ^[10]	Biosolar ^[10]
Massa jenis (gr/ml)	1,008	0,94-1,3	0,85-0,89	0,86
Viskositas kinematik (cSt)	49,603	15-125	2,3-6,0	2,0-4,5
Nilai kalor (kal/g)	8.266,4981	Min. 3.582,69	8.641	10.602

Pada Tabel 2 menunjukkan perbandingan nilai parameter spesifikasi karakteristik fisika *bio-oil* dari limbah bunga pinus, *bio-oil* standar/*conventional*, biodiesel, dan biosolar. Dari data di atas, hasil uji karakteristik *bio-oil* limbah bunga pinus menggunakan katalis Mo/lempung 9% terhadap biomassa, sudah memenuhi standar *bio-oil* ASTM D 7544-09 dan hampir mendekati karakteristik biodiesel. Namun jika dibandingkan dengan nilai parameter karakteristik biosolar, hasil uji karakteristik *bio-oil* limbah bunga pinus masih belum dapat dijadikan menjadi bahan bakar alternatif pengganti biosolar. Hal ini dapat terjadi karena beberapa hal yaitu komposisi kimia kompleks yang sulit terurai, kadar air yang tinggi, dan kadar oksigen yang tinggi. Komposisi kimia limbah bunga pinus sulit terurai dikarenakan suhu pirolisis yang digunakan hanya 320°C, sehingga sebagian besar senyawa lignin dan pembentukan senyawa fenol di dalam biomassa limbah bunga pinus belum terdekomposisi sempurna [7]. Dekomposisi bahan organik untuk memecah rantai-rantai hidrokarbon yang sulit terurai harus mencapai suhu 400-600°C [11]. Senyawa fenol terbentuk melalui dekomposisi lignin yang terdapat dalam biomassa pada suhu antara 400°C hingga 500°C [15]. *Bio-oil* yang memiliki kandungan fenol lebih dari 50% sangat cocok digunakan sebagai bahan bakar karena memenuhi standar fisika yang sesuai dengan biosolar [12]. Namun pada kajian ini, suhu yang digunakan untuk proses pirolisis hanya 320°C, jika dilihat dari nilai karakteristik fisiknya yang jauh dari spesifikasi biosolar, maka kandungan fenol dari limbah bunga pinus tidak terbentuk sempurna atau tidak dapat terbentuk. Oleh karena itu, nilai massa jenis yang belum sesuai dengan spesifikasi biosolar maupun biodiesel dapat diakibatkan oleh struktur rantai karbon yang belum terdekomposisi secara sempurna. Nilai massa jenis dipengaruhi oleh struktur rantai hidrokarbon yang terdapat dalam *bio-oil*, di mana semakin banyak ikatan yang terurai, maka semakin ringan *bio-oil* yang dihasilkan [11].

Nilai viskositas yang masih jauh dari spesifikasi karakteristik biosolar mengidentifikasikan bahwa tingginya kadar air yang dihasilkan dari proses pirolisis limbah bunga pinus. Hasil pirolisis biomassa secara umum menghasilkan kadar air yang cukup tinggi [14]. Hasil pirolisis dengan kadar air yang

tinggi, ketika didistilasi atau dipisahkan molekul airnya akan menghasilkan *bio-oil* yang memiliki viskositas yang tinggi [14]. Sebagai bahan bakar pengganti biosolar, nilai viskositas *bio-oil* dari limbah bunga pinus masih terlalu tinggi dan tidak akan dapat mengalir dengan mudah. Viskositas merupakan salah satu elemen penting dalam atomisasi bahan bakar di ruang bakar. Agar menghasilkan pembakaran yang sempurna, diperlukan bahan bakar dengan viskositas yang kecil karena menghasilkan butiran bahan bakar yang kecil juga. Sedangkan bahan bakar dengan viskositas yang tinggi menghasilkan butiran bahan bakar yang besar sehingga pembakaran dapat menimbulkan pembakaran tidak sempurna pada ruang bakar [11].

Nilai kalor dari hasil pirolisis limbah bunga pinus hampir mendekati nilai kalor dari biodiesel, sedangkan bila dibandingkan dengan nilai biosolar, maka nilai tersebut masih memiliki perbedaan signifikan ± 2000 kal/g. Hal ini dapat terjadi karena kadar minyak pada *bio-oil* yang dihasilkan masih lumayan rendah dan mengandung kadar air (komponen cuka kayu).

4. Kesimpulan

Penambahan katalis Mo/lempung berpengaruh terhadap *yield* dan nilai karakteristik fisika *bio-oil* hasil pirolisis limbah bunga pinus. Hasil uji karakteristik fisika *bio-oil* dengan *yield* optimum dari pirolisis limbah bunga pinus masih belum bisa secara langsung menjadi bahan bakar alternatif pengganti biosolar karena belum mencapai standar spesifikasi biosolar B20 ataupun B30 pada parameter pengujian yang dilakukan. Adapun nilai uji karakteristik fisika *bio-oil* limbah bunga pinus yaitu massa jenis 1,008 gram/ml, viskositas 49,603 cSt, dan nilai kalor 8.266,4981 kal/g. Sedangkan nilai karakteristik fisika dari biosolar yaitu massa jenis 0,86 gram/ml, viskositas 2,0-4,5 cSt, dan nilai kalor 10.602 kal/g.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Tidar, atas dukungannya dalam melakukan kajian ini serta kepada dosen pembimbing yang telah membimbing dan membantu peneliti, sehingga kajian dapat diselesaikan dengan baik.

Daftar Pustaka

- [1] Y.W.P. Wiyoto, E.P. Budiana, D.A. Himawanto. 2018. *Analisa thermogravimetry pada pirolisis limbah pertanian*. Jurnal Teknik Mesin Indonesia, Vol. 11 No.1, 25-30.
- [2] L. Parinduri, T. Parinduri. 2020. *Konversi Biomassa Sebagai Sumber Energi Terbarukan*. Journal of Electrical Technology, Vol. 5 No. 2, 88-92.
- [3] E.J. Hantono. 2016. *Pemanfaatan Bunga Pinus dalam Pembuatan Papan Partikel sebagai Bahan dalam Pembuatan Produk Kerajinan (Studi Kasus: Hutan Pinus di Karangpucung, Cilacap, Jawa Tengah) Utilization Of Fine Flowers In The Manufacture Of Particle Board*. Art & Design, Vol.3 No.3, 1-7.
- [4] I.Y. Yunanda, S. Bahri, E. Saputra. 2016. *Pirolisis Kulit Kayu Pinus Merkusii Menjadi Bio-oil Menggunakan Katalis Mo/Lempung Cengar*. Jom FTEKNIK Vol. 3 No.1.
- [5] Ch. Rangkuti, T. Sukarnoto, M. Rijani. 2019. *Pembuatan Minyak Plastik Dengan Proses Pirolisis*. Jurnal Teknik Mesin Indonesia, Vol. 14 No. 1, 1-4.
- [6] M. Syamsiro. 2015. *Kajian Pengaruh Penggunaan Katalis Terhadap Kualitas Produk Minyak Hasil Pirolisis Sampah Plastik*. Jurnal Teknik Vol. 5 No.1.
- [7] M.A.A. Firman, S. Bahri. Khairat. 2016. *Pirolisis Biomassa Kayu Pinus (Wood Pine) Dengan Katalis Mo/lempung Menjadi Bio-oil*. Jom FTEKNIK Vol 3 No. 1.
- [8] P.S. Dety, Sunarno, S. Bahri. *Pirolisis Tandan Kosong Sawit menjadi Bio-Oil dengan Katalis HZSM-5 melalui Proses Hidrodeoksigenasi*.
- [9] Syamsudin, R.B.I. Wattimena, A.T. Rizaluddin, I. Syaharuddin, Y. Setiawan. 2020. *Pirolisis Hydropuleper Reject Industri Kertas Untuk Produksi Bio-oil dan Listrik*. Jurnal: Seminar Teknik Mesin.
- [10] N. Kharis, H. Sutjahjono, D.L. Setyawan, N. Ilminnafik. 2018. *Karakteristik Termal Campuran Biosolar Dan Biodiesel Minyak Biji Randu (Ceiba Pentandra)*.
- [11] M. Christian. 2019. *Pembuatan Bio-oil Sebagai Bahan Bakar Alternatif Dari Proses Pirolisis Buah Pinus Menggunakan Katalis Zeolit. Tugas Akhir Teknik Kimia*, UKWM, Surabaya.
- [12] L. Kusmiati, S. Bahri, Khairat. 2015. *Pirolisis Kulit Kayu Pinus (Pinus Mercusii) Menjadi Bio-oil Menggunakan Katalis Ni/lempung*. Jom FTEKNIK Vol. 2 No.1.
- [13] Z. Achmad, A. Kuntaarsa, B. Alfitamara, A. Virgiandini. 2022. *Renewable Energy dari Pirolisis Kayu Pinus dengan Katalis Zeolit*. Eksergi, Vol. 19 No.1.
- [14] S. Wibowo. 2015. *Karakteristik Bio-oil Dari Limbah Industri Hasil Hutan Menggunakan Pirolisis Cepat*. Jurnal Penelitian Hasil Hutan Vol. 34 No.1.
- [15] A. Apriyana, S. Bahri, Z. Helwani. 2016. *Penggunaan Ni/NZA Sebagai Katalis Pada Proses Hidrodeoksigenasi Pirolisis Kulit Pinus (Pinus Merkusii) Menjadi Bio-oil*. Jom FTEKNIK Vol. 3 No.1.