

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

| ISSN Online 2746-0401 |



Pengendalian Proses Pada Katalitik Pirolisis Serabut Kelapa Sawit Dengan Menggunakan Reaktor Batch

Yeni Ria Wulandari *, Amelia Sri Rezki, Dian Ayu Afifah, Rafiqul Hamdi

Program Studi Teknologi Rekayasa Kimia Industri, Politeknik Negeri Lampung, Bandar Lampung, 35141, Indonesia

ARTICLE INFORMATION

Received: October 16, 2024

Revised: November 27, 2024

Accepted: December 06, 2024

KEYWORDS

Al₂O₃, Al White, *Bio-oil*, *Bio-char*, Catalytic Pyrolysis, NiCl(II)

CORRESPONDENCE*

Name: Yeni Ria Wulandari

E-mail: yeniriawulandari@polinela.ac.id

ABSTRACT

Indonesia is the largest producer of palm oil in the world. The palm oil industry always produces solid waste, one of which is palm fiber. Palm fiber can be processed into chemicals or renewable fuels. Catalytic pyrolysis is a pyrolysis process using a catalyst, the purpose of pyrolysis using a catalyst is to upgrade the product. In this study, the pyrolysis process was carried out in a batch reactor with controlled temperature. Catalytic pyrolysis was carried out at a temperature of 400°C with a catalyst to oil palm fiber ratio of 1:2. The control system uses a feedback controller system. Pyrolysis of palm fiber with Al white and NiCl (II) catalysts produces *bio-oil* products with the highest yield. Pyrolysis with Al₂O₃ catalyst produces higher *Bio-char* products. The density of the water phase *bio-oil* is close to the density of water, and the viscosity of the *bio-oil* with the oil phase is more than 10 Cp. Based on GC-MS analysis, the largest component in *bio-oil* is acetic acid. *Bio-oil* and *Bio-char* pyrolysis products have the potential as new chemicals, renewable energy and adsorbents.

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki industri kelapa sawit terbesar di dunia sejak tahun 2006. Sub-sektor perkebunan kelapa sawit Indonesia yang begitu berkembang tidak lepas dari peran kebijakan pemerintah yang memberikan berbagai insentif, terutama bantuan subsidi dana investasi pembangunan pembangunan perkebunan rakyat dan kemudahan dalam hal perizinan dan dalam pembukaan wilayah baru untuk areal perkebunan besar bagi pihak swasta. Meningkatnya industri kelapa sawit berbanding lurus dengan meningkatnya limbah dari industri kelapa sawit. Industri kelapa sawit dalam pengolahan *Crude Palm Oil* (CPO) maupun *Crude Palm Kernel Oil* (CPKO) selalu menyisakan limbah industri kelapa sawit berupa biomassa, salah satunya *mesocarp fiber* (MF) atau serabut kelapa sawit. Berdasarkan data BPDP kelapa sawit tahun 2022, pengolahan tandan buah segar untuk memproduksi CPO akan menghasilkan serabut kelapa sawit sebesar 14,6%. Limbah serabut kelapa sawit merupakan biomassa mempunyai kandungan

lignoselulosa yang mempunyai potensi untuk dikembangkan lagi menjadi produk turunan senyawa kimia atau bahan baku melalui berbagai proses salah satunya dengan proses pirolisis. Proses pirolisis adalah proses termokimia dengan pemanasan tanpa oksigen pada suhu 300-600°C [1]. Pada proses pirolisis ini akan menghasilkan produk berupa *bio-oil*, *Bio-char* dan gas.

Produk *bio-oil* pada proses pirolisis dibagi menjadi dua yaitu *bio-oil* fasa cair atau disebut asap cair dan *bio-oil* fasa *oil* yang diperoleh dari proses kondensasi dari asap yang keluar saat proses pirolisis [2]. Parameter penting yang mempengaruhi proses pirolisis adalah suhu, laju pemanasan, dan ukuran bahan baku dan penambahan katalis. Parameter katalis akan mempengaruhi pereakan yang terjadi pada struktur biomassa. Selain komposisi kandungan kimia penyusun biomassa (lignin, selulosa, hemiselulosa) juga akan menghasilkan produk bervariasi. Misalnya jika biomassa banyak mengandung lignin maka hasil akan mengandung fenol. Apabila biomassa banyak mengandung selulosa dihasilkan levoglukosan (senyawa organik hasil pirolisis biomassa

yang mengandung asam kabohidrat) [3]. Serabut kelapa sawit memiliki 23,7% selulosa, 30,5% hemiselulosa dan 27,3% lignin [4]. Meningkatkan produk *bio-oil* dapat dilakukan dengan cara menggunakan katalis saat proses pirolisis. Katalis yang digunakan akan mempengaruhi produk yang dihasilkan dari proses pirolisis. Katalis membantu untuk proses degradasi atau pemecahan ikatan karbon pada biomassa lebih cepat [5]. Pirolisis yang menggunakan katalis disebut dengan katalitik pirolisis. Penggunaan katalis pada pirolisis juga dapat menurunkan energi aktivasi yang dibutuhkan untuk menghasilkan suatu produk dan mempercepat reaksi [6]. Katalis yang digunakan akan mempengaruhi produk yang dihasilkan, jenis katalis yang digunakan pada proses pirolisis seperti base katalis yaitu NaOH, zeolit dan katalis dari bahan metal atau campuran metal dan zeolit [7]. Katalitik pirolisis dengan menggunakan katalis Fe-Ca/SiO₂ dapat meningkatkan yield dari komponen aromatic [8]. Pada penelitian sebelumnya katalitik pirolisis dengan menggunakan katalis campuran NI₂Cl₃ menghasilkan benzene dan toluene dengan presentasi yield yang tinggi [9]. Pirolisis tandan kosong kelapa sawit dengan menggunakan katalis Al White menghasilkan lebih banyak *bio-oil* dibandingkan dengan tanpa katalis [2, 10]. Pada penelitian ini metode katalitik pyrolysis dengan katalis Al white, NiCl (II) dan Al₂O₃ digunakan pada proses pirolisis serabut kelapa sawit dalam kondisi terkontrol pada suhu 400°C, menggunakan *batch reactor* dilengkapi auto temperatur *controller*, merupakan perangkat pengendalian yang digunakan untuk mengendalikan suhu proses pyrolysis secara otomatis. Auto temperatur *controller* memantau suhu dalam reaktor dan mengatur pasokan panas yang dibutuhkan untuk menjaga suhu tetap selama proses pirolisis.

METODOLOGI

Alat dan Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah serabut kelapa sawit yang didapatkan dari PTPN VII Bekri dan katalis yang digunakan adalah Al white, Al₂SO₃ dan NiCl(II). Serabut kelapa sawit ini didapatkan dari sisa-sisa proses pengepresan dari tandan buah segar kelapa sawit. Alat yang digunakan adalah reaktor *batch* pirolisis dengan volume 4 L dan seperangkat kondensor yang terhubung dengan reaktor *batch*. Alat lain yang digunakan adalah piknometer 5 mL untuk mengukur densitas *bio-oil*, viskosimeter untuk mengukur kekentalan *bio-oil*, gelas ukur untuk mengukur berapa banyak *bio-oil* yang didapat, neraca analitik untuk menimbang, gelas beaker, termometer untuk mengukur suhu, diskmill untuk mengecilkan ukuran, *stopwatch* untuk memantau waktu pirolisis, air pendingin sebagai pendingin pada

kondensor dan corong pisah untuk memisahkan *bio-oil* fasa *oil* dan fasa air.

Penyiapan Bahan

Bahan baku serabut kelapa sawit diperoleh dari PTPN VII Bekri. Serabut dikecilkan ukuran hingga 60 mesh dengan menggunakan diskmill, selanjutnya ditimbang dengan menggunakan neraca analitik sebanyak 300 gram. Katalis yang digunakan sebanyak 150 gram, perbandingan serabut kelapa sawit dan katalis sebesar 2:1. Serabut kelapa sawit dan katalis dicampur lalu diaduk hingga homogen setelah itu dimasukkan kedalam reaktor.

Proses Pirolisis

Proses pirolisis dilakukan pada serabut dan katalis yang telah dicampurkan, dipirolisis didalam reaktor batch pada suhu 400°C. Proses ditunggu hingga terjadi pembetukan asap yang mengalir melalui kondensor dan menjadi kondensat sehingga *bio-oil* dan asap cair akan tertampung pada labu leher tiga yang terkoneksi dengan kondensor dan reaktor. Pendinginan menggunakan kondensor kaca 30 cm dengan air dicampur dengan es batu sebagai prndinginnya. Suhu pendingin sekitar 12°C. *Bio-oil* dan asap cair diambil setelah proses selesai. Indikator proses pirolisis selesai adalah tidak terbentuk lagi asap dan tidak ada asap yang mengalir pada kondensor. *Bio-oil* berbentuk cairan berwarna hitam yang fasanya seperti *oil* sedangkan asap cair adalah cairan yang berfasa seperti air. *Bio-oil* dan asap cair dipisahkan menggunakan corong pemisah dan masing-masing dihitung densitas dan viskositasnya. Produk *Bio-char* diambil setelah reaktor dingin, *Bio-char* tertinggal didalam reaktor. Proses pirolisis dapat dilihat pada Gambar 1.

Perhitungan Neraca Massa Produk Pirolisis

Perhitungan neraca massa pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

Massa *Bio-char* = massa yang tertinggal didalam reaktor – 150 gram (massa katalis) (1)

Massa *bio-oil* = v *bio-oil* x ρ *bio-oil* (2)

Massa asap cair = v asap cair x ρ asap cair (3)

Massa gas = 300 g – massa *Bio-char* – massa *bio-oil* – massa asap cair (4)

Densitas (ρ) = $\frac{\text{massa cairan (gram)}}{\text{volume cairan (mL)}}$ (5)

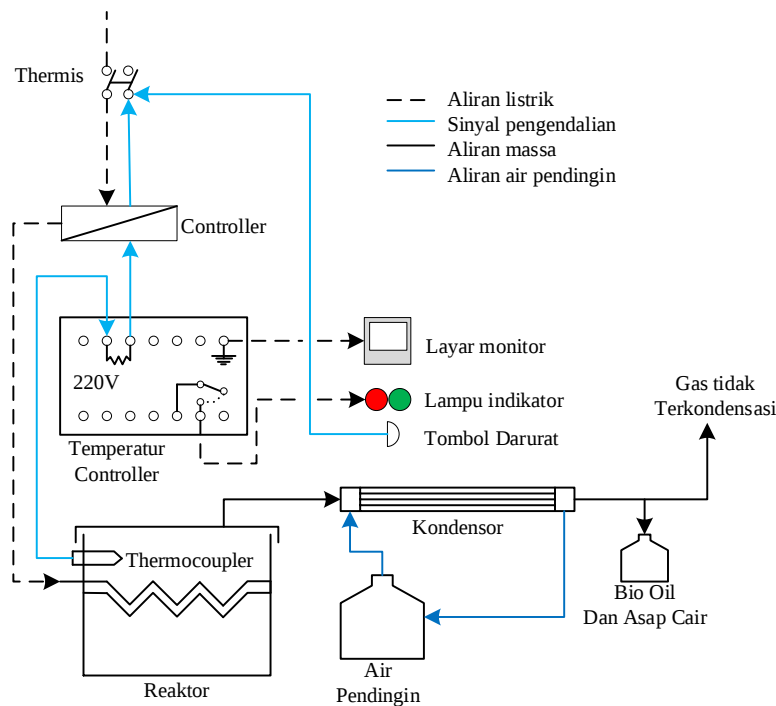
Yield (%) = $\frac{\text{massa produk (gram)}}{\text{massa awal (300 gram)}} \times 100\%$ (6)

Keterangan:

ρ = densitas (gram/mL)

v = volume (mL)

m = massa (gram)



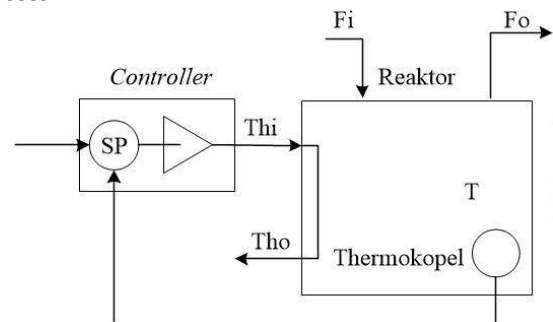
Gambar 1. Sistem Pengendalian dan Skematik Pirolisis

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengendalian Proses Pada Sistem

Kondisi operasi dapat diatur atau dijaga melalui upaya pengendalian proses. Pengendalian proses dilakukan guna mengendalikan suhu pirolisis secara *feedback control* atau umpan balik, merupakan metode pengendalian bekerja dengan cara mengukur keadaan aktual sistem fisik dan menentukan sejauh mana keadaan tersebut menyimpang dari keadaan yang diinginkan. Hasil pengukuran ini kemudian digunakan untuk menghasilkan sinyal kendali yang akan dipakai untuk membawa sistem ke keadaan yang diinginkan. Sistem pengendalian dapat dilihat pada Gambar 1, Pengendalian umpan balik atau *feedback control* merupakan pengendalian yang membandingkan nilai yang keluar dengan *set point* awal. Pada sistem pengendalian reaktor menggunakan sistem pengendalian temperatur secara otomatis, temperatur diatur sesuai yang diinginkan. Pada penelitian ini temperatur pirolisis diatur pada suhu 300°C. Ketika *heater* pada reaktor telah dihidupkan maka *thermocouple* pada reaktor akan mendeteksi panas dialirkan melalui *transmitter* lalu pada *box panel* akan membaca sinyal yang ditransfer dan nilainya ditampilkan pada layar monitor. Proses dikontrol dengan mengukur variabel temperatur yang terekam dengan membandingkan nilainya dengan nilai yang diinginkan (*set point* ke pengontrol), dan memasukkan perbedaan (*kesalahan*) ke dalam pengontrol umpan balik yang mengubah variabel yang dimanipulasi untuk mendorong

variabel yang dikontrol jika melebihi temperatur *set point* kembali ke nilai yang diinginkan, sehingga temperatur reaktor terjaga pada suhu 300°C. Dalam pengendalian proses terdapat jenis-jenis variabel proses untuk mengetahui faktor pendukung dan penghambat pengendalian serta variabel yang dikendalikan. Berikut merupakan Gambar 2 diagram variabel pengendalian proses



Gambar 2. Diagram Variabel Pengendalian Proses

PV (*Process Variable*) merupakan harga variabel tersebut dikendalikan pada penelitian ini yang dikendalikan adalah temperatur reaksi yang dijaga pada T (temperatur reaktor), SP (*Set Point*) adalah nilai atau batas untuk dilakukannya pengendalian yaitu pada temperatur 300°C, MV (*Manipulated Variable*) merupakan variabel yang dapat diatur untuk proses pengendalian yaitu panas masuk reaktor (T_{hi}) sedangkan *disturbance* adalah variabel yang dapat mengganggu jalannya proses yaitu *input* yang masuk kedalam reaktor (F_{in}) pada penelitian ini adalah bahan yang digunakan serta katalis yang digunakan, *output* dari reaktor (F_o) dan

panas yang keluar dari reaktor (To) juga termasuk *disturbance*. Pengendalian proses menggunakan metode *feedback control*, merupakan metode pengendalian yang dilakukan ketika variabel proses telah mencapai *set point* dengan cara mempertahankan yang dikendalikan pada keadaan *set point*.

Neraca Massa

Neraca massa pada penelitian ini merupakan perhitungan massa yang masuk dan yang keluar dari proses katalitik pirolisis. Massa yang masuk merupakan bahan baku awal yaitu serabut kelapa sawit dan katalis dan massa keluar merupakan produk yang dihasilkan. Produk dari katalitik pirolisis serabut kelapa sawit yaitu *bio-oil* atau cairan berwarna hitam yang fasanya seperti *oil*, asap cair, gas dan *Bio-char*.

Tabel 1. Neraca massa katalitik pirolisis serabut kelapa sawit dengan katalis Al White

Running 1 (Katalis Al White)	Massa Masuk (gram)	Massa Keluar (gram)
Serabut Kelapa Sawit	300	-
Katalis	150	150
<i>Bio-oil</i> fasa <i>oil</i>	-	10
<i>Bio-oil</i> fasa air/Asap Cair	-	148,2
<i>Bio-char</i>	-	137,68
Gas	-	4,12
Jumlah	450	450

Tabel 2. Neraca massa katalitik pirolisis serabut kelapa sawit dengan katalis NiCl(II)

Running 2 (Katalis NiCl(II))	Massa Masuk (gram)	Massa Keluar (gram)
Serabut Kelapa Sawit	300	-
Katalis	150	150
<i>Bio-oil</i> fasa <i>oil</i>	-	5
<i>Bio-oil</i> fasa air/Asap Cair	-	156
<i>Bio-char</i>	-	135,42
Gas	-	4
Jumlah	450	450

Neraca massa pada penelitian ini merupakan kesetimbangan antara massa yang masuk dan massa yang keluar pada sistem. Massa masuk pada reaktor adalah 450 g dan keluar menjadi produk dengan total jumlah produk sebesar 450 g. Komponen yang masuk merupakan serabut kelapa sawit dan katalis, sedangkan yang keluar berupa produk cair (*bio-oil* fasa *oil* dan *bio-oil* fasa air), gas dan *Bio-char*. Katalis tidak mengalami perubahan, maka jumlah katalis yang masuk sama dengan katalis yang keluar. *Bio-oil* fasa air berwarna

kuning kecoklatan dan *bio-oil* fasa *oil* berwarna hitam dan lebih kental. Kadar air *bio-oil* fasa air sangat tinggi dan *bio-oil* fasa *oil* memiliki kadar air yang rendah [11]. *Bio-oil* fasa *oil* yang terdegradasi dari selulosa berada pada lapisan atas sedangkan *bio-oil* fasa *oil* yang terbentuk dari lignin akan berada pada lapisan bagian bawah ketika fasa *oil* dan fasa air disatukan [11]. Produk *bio-oil* terbentuk dari degradasi hemiselulosa, selulosa dan lignin. Selulosa merupakan komponen terbanyak yang menyumbang terbentuknya *bio-oil*. Temperatur degradasi selulosa dan hemiselulosa pada 200°C – 300°C [12]. Pada pirolisis suhu dibawah 200°C merupakan proses penghilangan kadar air yang terdapat pada biomassa [13]. Produk *Bio-char* berwarna hitam tertinggal dalam reaktor setelah proses pirolisis selesai [1]. Katalis pada proses pirolisis berfungsi untuk menurunkan energi aktivasi yang diperlukan selama proses pirolisis [14]. Penggunaan katalis pada proses pirolisis biomassa dapat memperbanyak produk *bio-oil*. Setiap katalis memiliki spesifikasi sendiri atas kecenderungan produk yang yang di bentuk [2]. Produk *Bio-char* dan katalis tercampur dan tertinggal didalam reaktor. Produk char dominan terbentuk dari lignin, karena lignin memiliki temperatur degradasi yang lebih tinggi dibanding selulosa dan hemiselulosa [15]. Tahap akhir pirolisis merupakan tahap terbentuknya *Bio-char*, pada tahap ini uap yang terbentuk semakin sedikit [7].

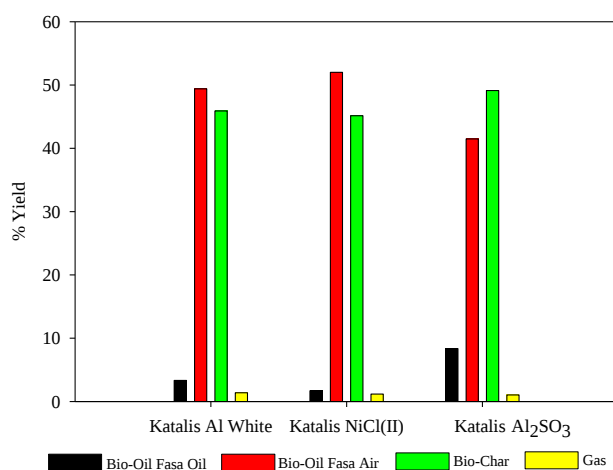
Tabel 3. Neraca massa katalitik pirolisis serabut kelapa sawit dengan katalis Al₂O₃

Running 3 (Katalis Al ₂ O ₃)	Massa Masuk (gram)	Massa Keluar (gram)
Serabut Kelapa Sawit	300	-
Katalis	150	150
<i>Bio-oil</i> fasa <i>oil</i>	-	25,08
<i>Bio-oil</i> fasa air/Asap Cair	-	124,45
<i>Bio-char</i>	-	147,37
Gas	-	3,1
Jumlah	450	450

Yield Produk

Yield produk pirolisis adalah perbandingan masing-masing massa produk terhadap jumlah massa total dari produk pirolisis. Produk pirolisis berupa *bio-oil* fasa air. Gambar 3 menunjukkan *yield* produk pirolisis serabut dengan masing-masing katalis. Pirolisis serabut kelapa sawit dengan massa 300 g dicampur dengan katalis padat sebanyak 150 g pada suhu 400°C, menghasilkan produk *bio-oil*, *Bio-char* dan gas. Pada Gambar 3 diatas pirolisis serabut pirolisis dengan katalis Al white produk paling tinggi adalah *bio-oil* fasa air, *Bio-char*, *bio-oil* fasa *oil* dan paling sedikit produknya adalah gas. Pirolisis dengan katalis NiCl(II) fenomena produk yang dihasilkan sama

dengan yang menggunakan katalis Al white. Pirolisis dengan menggunakan katalis NiCl(II) menghasilkan produk *bio-oil* fasa air paling banyak. Sedangkan pirolisis serabut kelapa sawit dengan katalis Al₂O₃ mayoritas produk yang dihasilkan adalah *Bio-char*, tetapi menghasilkan produk *bio-oil* fasa *oil* paling banyak dibandingkan dengan katalis yang lain. Pada penelitian sebelumnya pirolisis tandan kosong kelapa sawit dengan menggunakan katalis Al white menghasilkan produk *bio-oil* lebih banyak pada suhu 350°C [2], dibandingkan dengan yang tanpa katalis [10]. Al₂O₃ dan NiCl(II) merupakan katalis jenis metal, dimana katalis ini dapat memperbanyak produk *bio-oil* pada proses pirolisis biomassa [7]. Setiap katalis memiliki kecenderungan masing-masing dalam memproduksi suatu produk, seperti katalis NiCl(II) memproduksi banyak *bio-oil* dan katalis Al₂O₃ memproduksi banyak *Bio-char*. Pirolisis biomassa dengan menggunakan katalis nano Al₂O₃ dapat meningkatkan yield dari *bio-oil* [16]. Penggunaan katalis pada proses pirolisis dapat mempercepat reaksi, memperbaiki produk dan memperbanyak produk tertentu. Penggunaan katalis Ni biasanya digunakan dalam proses pemecahan hidrokarbon untuk memproduksi biodiesel [17].



Gambar 3. Yield produk pirolisis serabut kelapa sawit dengan variasi katalis

Penggunaan katalis Al₂O₃ dicampurkan dengan katalis yang berasal dari mineral alam atau logam yang lainnya dapat memperbaiki sifat *bio-oil* yang dihasilkan seperti memperbanyak produk aromatik [18]. Serat mesokarp kelapa sawit dipirolisis pada zeolit yang disintesis dari abu kelapa sawit dengan menggunakan reaktor unggun tetap dengan *slow* pirolisis pada suhu 400 °C–600 °C. Hasil *bio-oil* maksimum dari pirolisis yang menggunakan katalis pada suhu 550 °C adalah 37,98 wt%, yang lebih tinggi daripada hasil pirolisis non-katalitik (31,95 wt%) pada suhu yang sama [19]. katalitik pirolisis serabut kelapa sawit dengan katalis heterogen mengungkapkan tiga katalis yang berbeda: jenis zeolit (H-Beta), tungsten–zirconia (WO₃/ZrO₂) dan alumina

yang dimodifikasi (KOH/Al₃O₂). pirolisis pada suhu 650 °C menggunakan WO₃/ZrO₂ sebagai katalis yang menghasilkan 40,5% *biofuel*, 7,1% *Bio-char* dan 14,3% gas [20].

Produk *Bio-char* dari proses pirolisis biomassa dapat dikembangkan lagi menjadi produk yang lain seperti karbon aktif, amelioran dan briket. Pembuatan karbon aktif dari hasil *Bio-char* pirolisis dapat menggunakan aktivasi fisik maupun kimia, aktivasi kimia dapat menggunakan pelarut asam contoh HCl dan juga pelarut basa contoh H₃PO₄ [21, 22]. *Bio-char* dari pirolisis biomassa dapat dijadikan sebagai biobriket, karena proses pirolisis yang dibakar tanpa oksigen mengakibatkan kadar karbon meningkat sehingga nilai kalor dari *Bio-char* juga meningkat sehingga baik menjadikan energi baru terbarukan [23]. *Bio-char* yang memiliki kadar karbon tinggi dan memiliki sifat yang *porous* sehingga baik untuk penyerapan logam berat, limbah padat kelapa sawit yang jumlahnya cukup banyak dapat digunakan sebagai biosorben penjerat logam berat [24]. Produk gas dari pirolisis biomassa merupakan produk gas yang mempunyai kandungan gas seperti CH₄, CO, CO₂, dan H₂. Gas-gas tersebut merupakan gas yang disebut dengan *syngas*. Kandungan gas tersebut merupakan hasil pemotongan ikatan karbon dengan energi panas.

Densitas dan Viskositas

Densitas dan viskositas merupakan karakteristik yang telah dilakukang untuk mengetahui kerapatan dan kekentalan dari produk *bio-oil*. Hasil karakteristik kerapatan dan kekentalan dari *bio-oil* fasa air dan fasa *oil* dapat dilihat pada Tabel 4. Berikut ini.

Tabel. 4. Densitas dan viskositas dari produk *bio-oil*.

Katalis	Produk <i>Bio-oil</i>	Densitas (g/mL)	Viskositas (Cp)
Al white	<i>Bio-oil</i> fasa air	1	1,05
	<i>Bio-oil</i> fasa oil	1,25	10,33
NiCl(II)	<i>Bio-oil</i> fasa air	1,04	0,74
	<i>Bio-oil</i> fasa oil	0,84	4,04
Al ₂ SO ₃	<i>Bio-oil</i> fasa air	1,31	1,38
	<i>Bio-oil</i> fasa oil	1,25	11,65

Kerapatan atau densitas *bio-oil* pada Tabel 4 diatas menunjukan angka 0,84 – 1,31 g/mL. Densitas 0,84 g/mL pada *bio-oil* fasa *oil* dengan menggunakan katalis NiCl(II) dan densitas tertinggi pada *bio-oil* fasa air dengan katalis Al₂O₃ 1,31 g/mL. Densitas yang mpirolisis menggunakan katalis Al₂O₃ memiliki densitas diatas satu. *Bio-oil* fasa air dengan menggunakan katalis Al white bernilai 1 g/mL dan *bio-oil* fasa *oil* 1,25 g/mL. Densitas *bio-oil* yang mendekati satu mempunyai

kandungan air yang banyak sehingga densitas sama atau mendekati densitas air [1]. *Bio-oil* yang warna kekuningan dan fasa ya seperti air memiliki kadar air yang tinggi sekitar 80%, sehingga produk mayoritas adalah air. Air yang terbentuk saat proses pirolisis dari unsur oksigen dan hidrogen yang terdapat pada biomassa. Unsur O pada biomassa cukup tinggi [11]. *Bio-oil* fasa *oil* atau disebut *light oil* mempunyai warna hitam dan memiliki densitas dibawah *bio-oil* fasa air. *Bio-oil* fasa *oil* memiliki kandungan air dibawah 1% [11]. Kandungan air pada *bio-oil* juga dipengaruhi oleh kadar air awal yang terdapat pada biomassa. Kekentalan dari *bio-oil* fasa *oil* memiliki kekentalan yang tinggi, *bio-oil* fasa *oil* ini seperti minyak mentah warna hitam, kental dan baunya menyengat. *Bio-oil* fasa *oil* ini mempunyai potensi sebagai bahan bakar terbarukan. *Bio-oil* fasa *oil* ini dapat dibakar dengan mudah. Kekentalan dari *bio-oil* fasa *oil* dengan menggunakan katalis al white dan Al_2O_3 nilainya diatas 10 Cp. Kekentalan *bio-oil* fasa *oil* dipengaruhi oleh kandungan tar atau zat terbang yang masuk kedalam *bio-oil* fasa *oil*, sehingga memiliki kekentalan yang tinggi [1]. Viskositas *bio-oil* fasa air memiliki nilai viskositas yang mendekati viskositas air. *Bio-oil* fasa air memiliki sifat seperti air dan laut dalam air, sedangkan *bio-oil* fasa *oil* tidak larut dalam air.

Analisa GC-MS *Bio-oil* Fasa Air

Analisa GC-MS dilakukan untuk mengetahui komponen kimia yang terdapat *bio-oil*. *Bio-oil* yang dianalisa pada pirolisis serabut kelapa sawit yang menggunakan katalis $NiCl(II)$ karena memiliki *yield* tertinggi dan memiliki densitas yang rendah. Hasil analisa GC-MS pada *bio-oil* dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel. 5. Komponen kimia pada *bio-oil* menggunakan katalis $NiCl(II)$

R.Time	% Area	Komponen
1,5	2,59	Aseton
1,578	4,20	Propanona
1,846	52,64	Asam Asetat
1,882	22,53	Urea
3,435	6,70	Furfural
9,899	11,34	Fenol

Komponen asam asetat merupakan komponen yang terbanyak yang terdapat pada *bio-oil* yang terdeteksi dari GC-MS. Komponen kedua terbanyak adalah urea dan yang ketiga adalah fenol. Komponen komponen tersebut terbentuk dari degradasi lignoselulosa. Pirolisis serabut kelapa sawit mengasilkan mayoritas produk asam, karbolik, fenol dan hidrokarbon lainnya [19]. *Bio-oil* mengandung banyak karbonil teroksigenasi dan senyawa aromatik sebagai bahan baku yang cocok untuk bahan bakar dan bahan kimia terbarukan [25]. Fenol merupakan

senyawa yang dapat membunuh kuman dan bakteri. *Bio-oil* dari proses pirolisis biomassa dapat diaplikasikan sebagai peptisida alami pada tanaman [2]. Penggunaan katalis logam seperti katalis kalsium oksida (CaO), magnesium oksida (MgO), dan seng oksida (ZnO) digunakan sebagai katalis pada pirolisis serabut kelapa sawit karena potensinya dalam meningkatkan sifat *bio-oil*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa secara keseluruhan, ketiga katalis berdampak positif pada sifat *bio-oil*. Di antara katalis, CaO menunjukkan efek yang paling menguntungkan dalam hal mengurangi keasaman *bio-oil* dan anhidrogula [26]. Pirolisis serat kelapa sawit menggunakan katalis KOH/Al_2O_3 menghasilkan jumlah *bio-fuel* paling sedikit, tetapi mengandung komposisi senyawa fenolik paling banyak. Senyawa-senyawa ini ditransformasikan dari kandungan lignin dalam serat kelapa sawit pada situs alkali katalis KOH/Al_2O_3 [20].

KESIMPULAN

Pengendalian proses pada katalitik pirolisis menggunakan reaktor *batch* dengan sistem otomatis dengan panas reaktor dapat dikendalikan otomatis dengan sistem proses *feedback control*. Pengendalian produk dilakukan dengan menggunakan katalis. Setiap katalis memiliki spesifikasi dalam produk yang dihasilkan. Pirolisis serabut kelapa sawit dengan katalis al white dan $NiCl(II)$ menghasilkan produk *bio-oil* dengan *yield* tertinggi. Pirolisis dengan katalis Al_2O_3 menghasilkan produk *Bio-char* lebih tinggi. Densitas dari *bio-ol* mendekati satu sehingga *bio-oil* banyak mengandung air. Viskositas dari *bio-oil* fasa *oil* memiliki kekentalan yang tinggi dibandingkan dengan *bio-oil* fasa air. *Bio-oil* dari proses pirolisis mempunyai potensi yang baik sebagai bahan bakar atau zat kimia terbarukan. Katalitik pirolisis serabut kelapa sawit dengan menggunakan katalis $NiCl(II)$ menghasilkan *bio-oil* lebih banyak dan memiliki densitas yang rendah mendekati densitas biodiesel. Kandungan Asam asetat yang tinggi pada *bio-oil* maka *bio-oil* tersebut dapat digunakan sebagai peptisida nabati atau diproses lagi dengan menggunakan metode distilasi untuk menghasilkan produk yang lebih murni. Rasio antara katalis dan bomassa dapat dioptimasi agar mendapatkan *bio-oil* yang lebih banyak lagi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. R. Wulandari, F. F. Silmi, D. Ermaya, N. P. Sari, and D. Teguh, "EFEK SUHU PIROLISIS JERAMI PADI UNTUK PRODUKSI BIO-OIL MENGGUNAKAN REAKTOR BATCH," *Jurnal Inovasi Teknik Kimia*, vol. 8, pp. 167-172, 2023.
- [2] Y. R. Wulandari, A. S. Rezki, D. A. Afifah, N. P. Sari, V. Elsyana, and H. Gustian, "Studi

- Karakteristik Komposisi Produk Katalitik Pirolisis TKKS dengan katalis Al White," *JoASCE (Journal Applied of Science and Chemical Engineering)*, vol. 1, pp. 22-26, 2023.
- [3] G. Chen, C. Liu, W. Ma, X. Zhang, Y. Li, B. Yan, *et al.*, "Co-pyrolysis of corn cob and waste cooking oil in a fixed bed," *Bioresource technology*, vol. 166, pp. 500-507, 2014.
 - [4] F. Abnisa, A. Arami-Niya, W. M. A. W. Daud, and J. N. Sahu, "Characterization of bio-oil and Bio-char from pyrolysis of palm oil wastes," *BioEnergy Research*, vol. 6, pp. 830-840, 2013.
 - [5] L. Fan, Y. Zhang, S. Liu, N. Zhou, P. Chen, Y. Cheng, *et al.*, "Bio-oil from fast pyrolysis of lignin: Effects of process and upgrading parameters," *Bioresource Technology*, vol. 241, pp. 1118-1126, 2017/10/01/ 2017.
 - [6] D. Damayanti, Y. R. Wulandari, D. S. Marpaung, D. Supriyadi, D. T. Yohana, D. R. Saputri, *et al.*, "Unlocking green potential: Enhancing biomass valorization via thermal depolymerization with spent catalysts," *Catalysis Communications*, vol. 185, p. 106813, 2023/12/01/ 2023.
 - [7] D. Damayanti, Y. R. Wulandari, and H.-S. Wu, "Product Distribution of Chemical Product Using Catalytic Depolymerization of Lignin," *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis; 2020: BCREC Volume 15 Issue 2 Year 2020 (August 2020)DO - 10.9767/bcrec.15.2.7249.432-453*, 08/01/ 2020.
 - [8] Q. Lu, S. Yuan, C. Liu, T. Zhang, X. Xie, X. Deng, *et al.*, "A Fe-Ca/SiO₂ catalyst for efficient production of light aromatics from catalytic pyrolysis of biomass," *Fuel*, vol. 279, p. 118500, 2020.
 - [9] D. Damayanti, Y. R. Wulandari, and H.-S. Wu, "Product Distribution of Chemical Product Using Catalytic Depolymerization of Lignin," *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, vol. 15, pp. 432-453, 2020.
 - [10] A. S. Rezki, Y. R. Wulandari, L. R. Alvita, and N. P. Sari, "Potensi Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) sebagai Bioenergi pada Produksi Bio-Oil dengan Metode Pirolisis: Efek Temperatur: Potential of Empty Fruit Bunches (EFB) Waste as Bioenergy to Produce Bio-Oil Using Pyrolysis Method: Temperature Effects," *Jurnal Rekayasa Bahan Alam dan Energi Berkelanjutan*, vol. 7, pp. 22-29, 2023.
 - [11] Y. R. Wulandari, S. S. Chen, G. C. Hermosa, M. S. A. Hossain, Y. Yamauchi, T. Ahamad, *et al.*, "Effect of N₂ flow rate on kinetic investigation of lignin pyrolysis," *Environmental Research*, vol. 190, p. 109976, 2020/11/01/ 2020.
 - [12] Y. R. Wulandari, F. F. Silmi, A. S. Rezki, H.-S. Wu, V. A. Sukma, and S. Sudibyo, "TGA Study on Catalytic Thermal Degradation of Brown Solid (Fermented Product from Rice Straw) and Ash from Brown Solid as Catalyst," *CHEMICA: Jurnal Teknik Kimia*, vol. 11, 2024.
 - [13] B. Bushra and N. Remya, "Bio-char from pyrolysis of rice husk biomass—characteristics, modification and environmental application," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 14, pp. 5759-5770, 2024.
 - [14] D. Damayanti, Y. R. Wulandari, D. S. Marpaung, D. Supriyadi, D. T. Yohana, D. R. Saputri, *et al.*, "Unlocking green potential: Enhancing biomass valorization via thermal depolymerization with spent catalysts," *Catalysis Communications*, p. 106813, 2023/11/27/ 2023.
 - [15] A. K. Sakhiya, A. Anand, V. K. Vijay, and P. Kaushal, "Thermal decomposition of rice straw from rice basin of India to improve energy-pollution nexus: Kinetic modeling and thermodynamic analysis," *Energy Nexus*, vol. 4, p. 100026, 2021/12/30/ 2021.
 - [16] S. Ameen, Z. Hussain, M. I. Din, R. U. Khan, and R. Khalid, "Sustainable Al₂O₃ nanoparticles in catalytic pyrolysis: Unlocking high-yield bio-oil from Melia azedarach fruit biomass with comprehensive physicochemical analysis," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 181, p. 106635, 2024/08/01/ 2024.
 - [17] G. D. Ramanda, A. Allwar, M. Tamyiz, I. Fatimah, and R.-a. Doong, "Nickel/Bio-char from Palm Leaves Waste as Selective Catalyst for Producing Green Diesel by Hydrodeoxygenation of Vegetable Oil," *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis; 2023: BCREC Volume 18 Issue 1 Year 2023 (April 2023)DO - 10.9767/bcrec.16403*, 03/30/ 2023.
 - [18] M. Saidi and A. Zhandnezhad, "Valorization of neem seeds biomass to biofuel via non-catalytic and catalytic pyrolysis process: Investigation of catalytic activity of Co-Mo/Al₂O₃ and Ni-Mo/Al₂O₃ for biofuel production," *Journal of Environmental Management*, vol. 326, p. 116761, 2023/01/15/ 2023.
 - [19] W. A. Khanday, G. Kabir, and B. H. Hameed, "Catalytic pyrolysis of oil palm mesocarp fibre on a zeolite derived from low-cost oil palm ash," *Energy Conversion and Management*, vol. 127, pp. 265-272, 2016/11/01/ 2016.
 - [20] S. Echaroj, N. Pannucharoenwong, P. Rattanadecho, C. Benjapiyaporn, and J. Benjapiyaporn, "Investigation of palm fibre pyrolysis over acidic catalyst for bio-fuel production," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 599-607, 2021/11/01/ 2021.
 - [21] L. W. Rizky, I. Zulkarnain, I. Raharjo, and Y. R. Wulandari, "The Effect of HCl Activator on PET Adsorbent to Reduce Phosphate Content in Laundry Waste," *Equilibrium Journal of Chemical Engineering*, vol. 8, pp. 35-44, 2024.
 - [22] M. J. Herlambang, A. A. Ramandani, D. Cendekia, L. Rhea, and M. N. Efendi,

- "Optimization and Characterization of Adsorbent from Palm Kernel Shell Waste Using H₃PO₄ Activator," *CHEESA: Chemical Engineering Research Articles*, vol. 6, pp. 118-125, 2023.
- [23] S. Shintawati, D. Ermaya, Y. R. Wulandari, Y. Sukaryana, and R. Fernando, "Pengaruh Metode Pengarangan dan Ukuran Partikel Terhadap Kualitas Briket Cangkang Kelapa Sawit," *Jurnal Rekayasa Bahan Alam dan Energi Berkelanjutan*, vol. 8, pp. 17-23, 2024.
- [24] D. Teguh, D. A. Iryani, N. P. Sari, and Y. R. Wulandari, "Pengaruh PENGARUH KONSENTRASI KARBON DISULFIDA (CS₂) TERHADAP KINERJA BIOSORBEN SELULOSA XANTHATE UNTUK PENJERAPAN LOGAM BERAT: PENGARUH KONSENTRASI KARBON DISULFIDA (CS₂) TERHADAP KINERJA BIOSORBEN SELULOSA XANTHATE UNTUK PENJERAPAN LOGAM BERAT," *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, vol. 15, pp. 144-159, 2023.
- [25] G. Kabir, A. T. Mohd Din, and B. H. Hameed, "Pyrolysis of oil palm mesocarp fiber and palm frond in a slow-heating fixed-bed reactor: A comparative study," *Bioresource Technology*, vol. 241, pp. 563-572, 2017/10/01/ 2017.
- [26] Y. Y. Chong, S. Thangalazhy-Gopakumar, H. K. Ng, L. Y. Lee, and S. Gan, "Effect of oxide catalysts on the properties of bio-oil from in-situ catalytic pyrolysis of palm empty fruit bunch fiber," *Journal of Environmental Management*, vol. 247, pp. 38-45, 2019/10/01/ 2019.