

**SINTESIS KARBON AKTIF DARI LIMBAH KAYU MERBAU (*Intsia spp.*)
TERAKTIVASI KOH SEBAGAI PENGEMBAN LOGAM Ni, Pd, Pt, DAN
Ni-Pd UNTUK HIDRORENGKAH MINYAK JARAK MENJADI *BIOFUEL***

Dwi Bagus Wicaksono

16/398552/PA/17513

INTISARI

Karbon aktif (KA) dan karbon aktif teremban logam Ni, Pd, Pt, dan Ni-Pd sebagai katalis untuk hidrorengkah minyak jarak menjadi *biofuel* telah disintesis. KA disintesis dari limbah kayu merbau yang telah dipirolisis melalui aktivasi kimia menggunakan KOH. Aktivasi dilakukan pada 800 derajat C, dengan rasio berat KOH/arang sebesar 1,2,3, dan 4. KA dianalisis dengan uji bilangan iodin untuk menentukan KA terbaik. KA terbaik dianalisis dengan FTIR, XRD, TEM, dan SAA. Pengembanan logam dilakukan dengan metode impregnasi basah menggunakan garam prekursor $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, PdCl_2 dan PtCl_4 , diikuti kalsinasi dengan gas N_2 dan reduksi dengan gas H_2 menghasilkan katalis Ni/KA, Pd/KA, Pt/KA, dan Ni-Pd/KA. Katalis dianalisis dengan FTIR, XRD, SEM-EDX, SAA, dan uji keasaman dengan uap amonia. Katalis digunakan untuk hidrorengkah minyak jarak pada 550 derajat C selama 2 jam dibawah aliran gas H_2 . Stabilitas Ni-Pd/KA diuji dengan penggunaan berulang katalis sebanyak 3 kali untuk hidrorengkah minyak jarak dan dikarakterisasi menggunakan TEM. Produk cair hidrorengkah dianalisis dengan GC-MS.

Hasil karakterisasi menunjukkan KA dengan bilangan iodin tertinggi dihasilkan dari rasio berat (KOH/arang) sebesar 2 (KA2). KA2 memiliki luas permukaan $469,85 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ dan diameter rerata pori 2,24 nm. Katalis Ni-Pd/KA2 memiliki performa katalitik terbaik, dengan fraksi cair mencapai 88,80% (b/b) dan selektivitas terhadap alkohol sebesar 71,69% (b/b). Katalis Ni-Pd/KA2 memiliki luas permukaan $428,5 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, nilai keasaman $5,123 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$, dengan kadar logam Ni 3,24% dan Pd 0,24% (b/b). Pada pemakaian ketiga, aktivitas katalis mengalami penurunan yakni 84,34% (b/b) dengan selektivitas terhadap fraksi alkohol (*biofuel*) sebesar 62,16% (b/b). Citra TEM katalis pada pemakaian ketiga, menunjukkan terjadinya *sintering* logam dan terbentuknya endapan kokas.

Kata kunci: alkohol, *biofuel*, hidrorengkah, karbon aktif.

SYNTHESIS OF ACTIVATED CARBON FROM MERBAU WASTE WOOD (*Intsia* spp.) by KOH AS SUPPORT MATERIAL OF Ni, Pd, Pt, AND Ni-Pd METAL FOR HYDROCRACKING OF CASTOR OIL INTO BIOFUEL

Dwi Bagus Wicaksono
16/398552/PA/17513

ABSTRACT

Synthesis of activated carbon (AC) and activated carbon impregnated with Ni, Pd, Pt, and Ni-Pd as catalyst for hydrocracking of castor oil into biofuel had been carried out. The AC was synthesized through chemical activation from pyrolyzed merbau waste wood with KOH. Activation temperature was performed at 800 degree C with N₂ gases flow, and the weight ratio of KOH/carbon was 1, 2, 3, and 4. Characterization of AC was performed by using iodine number test to determine the best AC performance. Metal impregnation was carried out by wet impregnation method using Ni(NO₃)₂·6H₂O, PdCl₂ and PtCl₄ as salt precursors, followed by calcination with N₂ gases and reduction with H₂ gases flow, producing Ni/AC, Pd/AC, Pt/AC, and Ni-Pd/AC catalyst. The AC and catalyst were characterized using FTIR, XRD, SEM-EDX, SAA, and acidity test using ammonia vapor. The catalyst was used for hydrocracking of castor oil at 550 degree C for 2 hours under H₂ gases flow. Catalyst reusability was investigated by using the Ni-Pd/AC catalyst for 3 times of hydrocracking castor oil and characterized using TEM. The obtained liquid hydrocracking fraction was analyzed using GC-MS.

The result showed AC with the highest iodine number was produced by weight ratio (KOH/carbon) of 2 (AC2). The AC2 had specific surface of 469,85 m². g⁻¹ and average pore diameter of 2,24 nm. The Ni-Pd/AC2 catalyst had the best catalytic performance, with liquid fraction of 88,8% (w/w), and selectivity toward alcohol fraction (biofuel) of 71,69% (w/w). The AC2 had specific surface area of 428,5 m². g⁻¹, acidity of 5,12 mmol. g⁻¹, with Ni content of 3,24% (w/w) and Pd content of 0,24% (w/w). The third used of Ni-Pd/AC2 catalyst for hydrocracking of castor oil, resulted decrease of catalyst activity by 84,34% (w/w) with selectivity towards alcohol by 62,16% (w/w). The TEM image showed the occurrence of sintering and coke deposition after the third used.

Keywords: activated carbon, alcohol, biofuel, hydrocracking.

BAB I PENDAHULUAN

I.1 Latar belakang

Krisis Bahan Bakar Minyak (BBM) belakangan ini terjadi karena harga minyak mentah di pasar internasional menjadi sangat tinggi. Selain itu, volume impor minyak mentah dan BBM terus meningkat. Hal ini menjadi salah satu penyebab kenaikan harga BBM yang cukup signifikan. Kenaikan harga ini tentu sangat berdampak besar bagi masyarakat Indonesia, mengingat ketergantungan Indonesia yang tinggi terhadap penggunaan BBM dan subsidi pemerintah terhadap harga BBM nasional. Menipisnya cadangan bahan bakar fosil dunia mendorong untuk beralih ke sumber bahan bakar alternatif terbarukan. Hal ini penting guna membangun ketahanan energi masa depan bangsa Indonesia.

Minyak nabati sering disebut energi hijau karena emisinya bersifat ramah lingkungan dan tidak menyebabkan meningkatnya pemanasan global. Namun, minyak alami ini tidak dapat digunakan secara langsung sebagai pengganti bahan bakar karena viskositasnya yang tinggi dan angka *cetane* yang rendah sehingga menyebabkan performa mesin yang buruk meskipun minyak menunjukkan nilai kalor yang tinggi (Ramezani dkk., 2010; Meller dkk., 2016). Oleh karena itu, diperlukan beberapa langkah yang harus dilakukan untuk menghasilkan bahan bakar nabati (*biofuel*) dari minyak tumbuhan alami.

Biofuel merupakan bahan bakar ramah lingkungan yang menjanjikan untuk mengurangi impor bahan bakar minyak. Contoh *biofuel* yang telah dikembangkan di Indonesia adalah *gasohol*. *Gasohol* merupakan *biofuel* yang terdiri dari 90% bensin dan 10% alkohol. Penggunaan *gasohol* sebagai bahan bakar alternatif cukup menjanjikan karena memiliki angka oktan yang tinggi dan dapat mengurangi dan bahkan mengganti penggunaan TEL (tetra-etil lead) yang mencemari lingkungan (Murachman dkk., 2014). Indonesia sendiri sudah berpengalaman dalam produksi *gasohol*, namun terhambat karena pasokan yang tidak konsisten (Aziz dan Gozan, 2017).

Minyak jarak berpotensi untuk dijadikan sebagai sumber bahan baku pembuatan bahan bakar karena kandungan asam risinoleat yang tinggi mencapai 89% asam lemak dalam minyak (Ahmad dkk., 2020). Asam risinoleat mengandung 16-18 atom karbon dalam satu molekul. Hal ini menjadikan minyak jarak berpotensi dijadikan sebagai bahan baku pembuatan bahan bakar yang dapat diperbarui. Selain itu, tingginya kandungan risin dan risinin pada biji minyak jarak menyebabkan penggunaannya tidak bersaing dengan produksi pangan karena bersifat *toxic* (Román-Figueroa dkk., 2016).

Bahan bakar biomassa dari minyak nabati dapat disintesis dengan berbagai metode. Hidrorengkah (*hydrocracking*) yang diaplikasikan pada minyak alami atau asam lemak bebas akan menghasilkan campuran hidrokarbon dan turunan asam lemak dengan panjang rantai yang lebih pendek. Untuk meningkatkan produk hidrorengkah, katalis *bifunctional* (katalis pembawa logam) dibutuhkan dalam reaksi perengkahan dan aktivasi hidrogen (Wijaya dkk., 2018). Katalis *bifunctional* memiliki dua situs aktif, di mana logam pada permukaan bahan pendukung bertindak sebagai situs aktif menyediakan proses hidrogenasi/dehidrogenasi dan situs lain bertindak sebagai situs asam yang menyediakan reaksi perengkahan. Logam transisi sering digunakan sebagai katalis dalam proses hidrorengkah karena memiliki elektron tidak berpasangan yang dapat memulai reaksi hidrorengkah (Majka dkk., 2018).

Nikel (Ni) dikenal memiliki aktivitas katalitik yang tinggi, stabilitas thermal relatif tinggi, dan harganya yang murah. Namun kelemahan logam ini adalah luas permukaannya yang rendah, cepat mengalami deaktivasi karena deposisi karbon dan sitering pada sisi aktif logam (Trisunaryanti dkk., 2005). Paladium (Pd) dan platinum (Pt) telah terbukti sangat aktif dan selektif dalam membentuk hidrokarbon parafin rantai lurus (Cheah dkk., 2019). Logam Pd dan Pt mempunyai aktivitas spesifik yang tinggi, dan dapat diimbangkan pada berbagai macam bahan pengemban dengan komponen aktif dalam jumlah yang relatif kecil (0,1-0,5% berat) (Foger, 1984).

Terlepas dari performa katalitiknya yang tinggi, Nikel sebagai situs logam aktif lebih rentan terhadap deaktivasi karena keracunan situs aktif oleh kokas.

Kokas yang terakumulasi dapat menyebabkan penutupan pori dan situs aktif (Noor dkk., 2018). Nwosu, (2012) menjelaskan bahwa logam Pd dan Pt memiliki aktivitas katalitik yang lebih baik dibandingkan logam transisi lainnya dikarenakan adsorpsi umpan dan desorpsi produk berjalan secara seimbang. Penambahan logam Pd pada katalis Ni dapat mengatasi masalah desorpsi produk yang tidak sempurna (Soszka dkk., 2020).

Material karbon aktif (KA) telah menunjukkan potensi besar dalam berbagai aplikasi. Material ini memiliki banyak keuntungan diantaranya yaitu tahan asam dan basa, tahan suhu tinggi, bersifat *inert*, memiliki luas permukaan yang tinggi, ekonomis, dan dapat didaur ulang (Mochida dkk., 2006). Ulfa dkk. (2015) menyatakan bahwa merbau (*Intsia bijuga O.Kuntze*) anggota family *Fabaceae* merupakan salah satu jenis tanaman hutan yang bernilai ekonomis. Kayu merbau dikenal sebagai salah satu kayu yang menghasilkan limbah serbuk yang banyak karena volume penggunaannya yang begitu besar. Adapun serbuk ini terdiri dari senyawa kimia, biomassa seperti lignin, selulosa, dan hemiselulosa (Bridgwater dan Peacocke, 2000). Serbuk kayu merbau berpotensi besar sebagai sumber karbon karena kandungan lignoselulosanya yang tinggi, dimana pada penelitian ini karbon aktif digunakan sebagai pendukung untuk katalis.

Li dkk. (2014) menyatakan bahwa aktivasi KOH dari lignin kraft yang kaya karbon menghasilkan karbon aktif dengan luas permukaan tinggi mencapai 2763 m²/g. Aktivasi dengan KOH akan menghasilkan karbon aktif dengan luas area yang tinggi dan pengembangan pori yang bagus. Namun, jumlah rendemen yang dihasilkan sedikit, berkisar 30-40% dibandingkan aktivator lainya seperti ZnCl₂, dan H₃PO₄. Mengganti larutan KOH dengan KOH padat dapat mengurangi langkah aktivasi menjadi satu langkah, dan membuat proses preparasi lebih ramah lingkungan (Bhomick dkk., 2019).

Berdasarkan uraian di atas, pada penelitian ini dilakukan sintesis karbon aktif (KA) dari limbah kayu merbau melalui aktivasi secara kimia menggunakan KOH. Rasio KOH/arang divariasikan untuk menghasilkan KA dengan luas permukaan tertinggi berdasarkan analisis bilangan iodin yang teradsorp. KA dengan bilangan iodin tertinggi kemudian digunakan sebagai material pengemban logam

Ni, Pd, Pt, dan Ni-Pd untuk menjadi katalis Ni/KA, Pd/KA, Pt/KA, dan Ni-Pd/KA dalam hidorengkah minyak jarak menjadi *biofuel*. Aktivitas dan selektivitas katalis diujikan dalam rasio katalis:mpm (b/b), dan hasil konversi produk dibandingkan dengan hidorengkah dengan katalis KA dan thermal. Katalis Ni-Pd/KA diuji secara berulang untuk mengamati stabilitas katalis dalam menghasilkan *biofuel* dari hasil hidorengkah minyak jarak.

I.2 Tujuan Penelitian

1. Sintesis dan karakterisasi karbon aktif (KA) dari limbah kayu merbau menggunakan aktivator KOH dengan metode satu langkah.
2. Mempelajari pengaruh pengembanan logam Ni, Pd, Pt dan Ni-Pd pada karbon aktif terhadap aktivitas dan selektivitasnya pada proses hidorengkah minyak jarak menjadi *biofuel*.
3. Mempelajari pengaruh pemakaian berulang katalis Ni-Pd/KA pada hidorengkah minyak jarak menjadi *biofuel*.

I.3 Manfaat penelitian

Adapun manfaat yang akan diperoleh dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan referensi pengolahan limbah kayu merbau sebagai prekursor sintesis material pendukung katalis
2. Memberikan alternatif baru modifikasi material karbon dari biomasa menggunakan KOH sebagai aktivator dengan metode satu langkah agar lebih ramah lingkungan.
3. Mengetahui pengaruh pengembanan logam Ni, Pd, Pt, dan Ni-Pd pada karbon aktif terhadap selektifitas dan aktivitas katalitiknya untuk reaksi hidorengkah minyak jarak menjadi *biofuel*.
4. Mempelajari stabilitas katalis Ni-Pd/KA dalam hidorengkah minyak jarak menjadi *biofuel*.

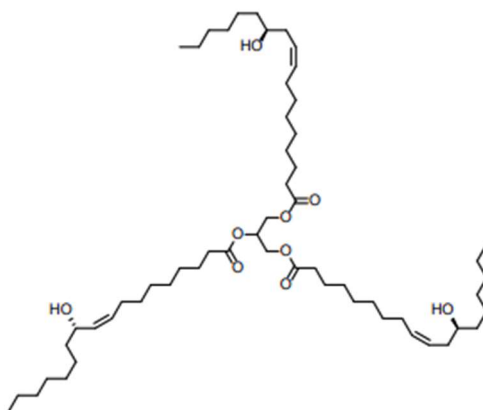
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN PERUMUSAN HIPOTESIS

II.1 Tinjauan Pustaka

II.1.1 Minyak jarak (*Ricinus communis L.*)

Minyak jarak (*Ricinus communis L.*) merupakan anggota famili tumbuhan tropis *Euphorbiaceae*. Minyak jarak merupakan minyak kental, kuning pucat, tidak mudah menguap dan tidak mengering dengan rasa yang hambar (Ogunniyi, 2006).



Gambar II.1 Struktur kimia minyak jarak (Ahmad dkk., 2020)

Biji tanaman jarak mengandung persentase minyak yang besar, sehingga mulai dilirik orang untuk digunakan sebagai sumber bahan bakar alternatif dimasa yang akan datang. Minyak jarak dihasilkan dengan cara mengekstrak biji keringnya secara mekanik ataupun kimiawi. Minyak jarak berwarna kuning, tidak berbau dan tidak mudah menguap, larut dalam methanol dan metil ester, higroskopisitas tinggi dan sangat kental. Minyak jarak memiliki densitas ($956,97 \text{ kg/m}^3$) dan viskositas kinematik yang tinggi ($1295 \text{ mm}^2/\text{s}$), dibandingkan minyak yang biasa digunakan untuk pembuatan biodiesel (Torrentes-Espinoza dkk., 2017). Hal ini disebabkan kandungan asam risinoleat yang tinggi. Kandungan asam risinoleat (asam 12-hidroksi-9-oktadekenoat) pada minyak jarak mencapai 86%-92% dari asam lemak yang ditemukan dalam minyak (Vollmann and Laimer, 2013).

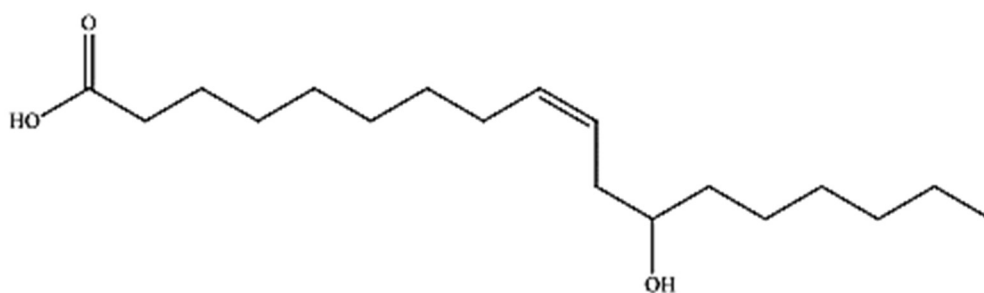
Keberadaan gugus hidroksil pada asam risinoleat menyebabkan interaksi antarmolekul yang kuat antara ikatan hidrogen. Hal ini menyebabkan baik densitas maupun viskositas kinematik relatif lebih tinggi dibandingkan minyak lain sehingga

tidak bisa digunakan secara langsung sebagai bahan bakar karena mengurangi atomisasi bahan bakar dan dapat menyebabkan masalah obstruksi pada mesin dan sistem injeksi, meskipun minyak menunjukkan nilai kalor yang tinggi (Ramezani dkk., 2010).

Tabel II.1 Asam lemak dalam minyak jarak (Torrentes-Espinoza dkk., 2017)

Asam lemak	Struktur	Masa (%)	Ikatan C=C	Gugus -OH
Risinoleat	$C_{18}H_{34}O_3$	86,63	1	1
Linoleat	$C_{18}H_{32}O_2$	5,29	2	0
Oleat	$C_{18}H_{34}O_2$	3,91	1	0
Stearat	$C_{18}H_{36}O_2$	1,51	0	0
Palmitat	$C_{16}H_{32}O_2$	1,30	0	0
Linolenat	$C_{18}H_{30}O_2$	0,56	3	0
Eukosanoat	$C_{20}H_{40}O_2$	0,29	0	0
Lain-lain		0,51		

Asam risinoleat merupakan asam lemak tak jenuh dengan gugus tunggal hidroksi sebagai penyusun utama profil asam lemaknya. Asam ini memiliki polaritas yang tidak biasa karena posisi gugus hidroksil. Minyak jarak, sering digambarkan sebagai asam risinoleat trigliserida, satu-satunya minyak nabati yang tersedia secara komersial yang mengandung gugus fungsi hidroksi dari asam lemak secara melimpah (70-90%) (Parekh dkk., 2011).

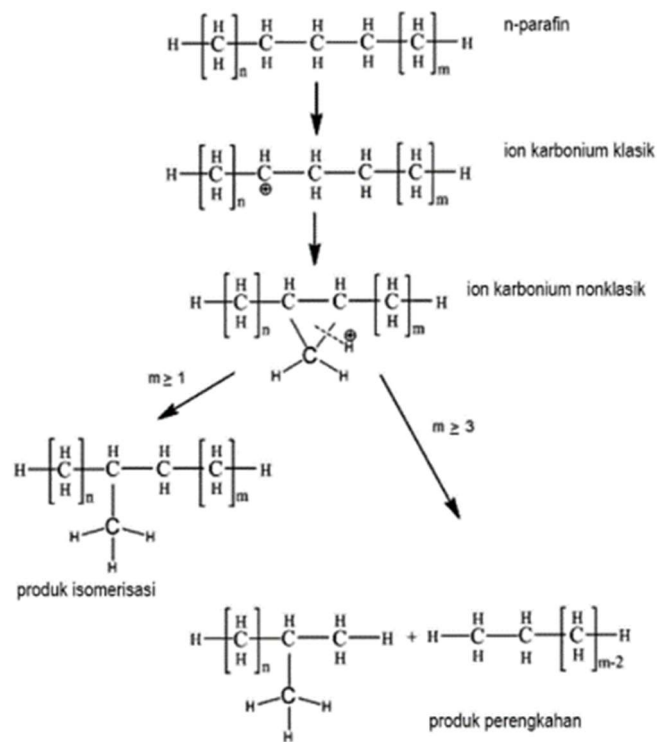


Gambar. II.2 Struktur asam risinoleat (Keera dkk., 2018)

II.1.2 Hidrorengkah minyak jarak

Hidrorengkah merupakan reaksi dua langkah yang mengkombinasikan perengkahan katalitik dan hidrogenasi. Pada reaksi ini, bahan baku dengan fraksi hidrokarbon panjang akan dipecah menjadi fraksi hidrokarbon yang lebih pendek dengan adanya gas H_2 pada tekanan tinggi. Trisunaryanti, (2018) menyebutkan reaksi hidrorengkah menghasilkan fraksi hidrokarbon lebih pendek seperti fraksi

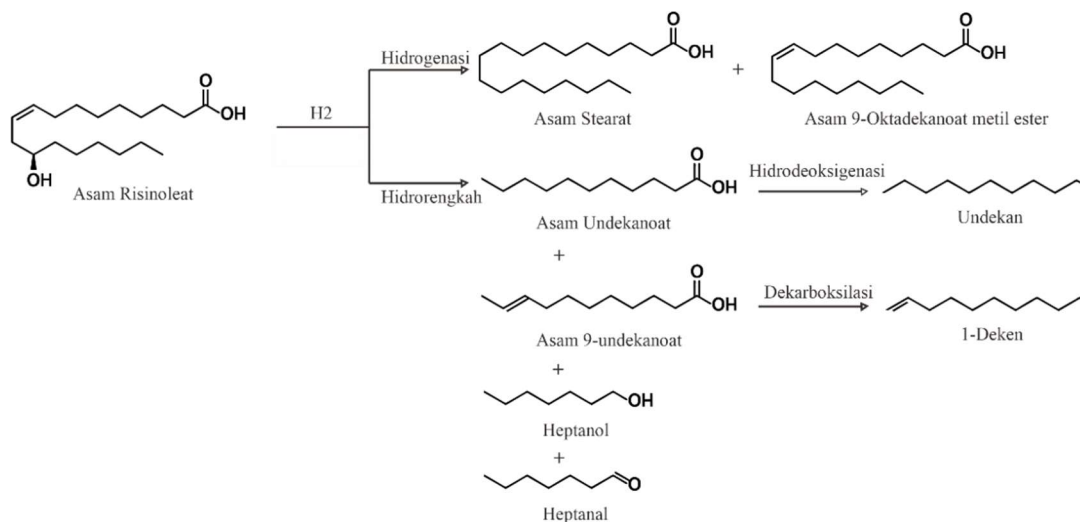
bensin (C_5 - C_{12}), dan solar (C_{15} - C_{18}). Hidrorengkah dapat dilakukan dengan katalis maupun tanpa katalis (*thermal*). Hidrorengkah katalitik melibatkan ion karbonium dalam mekanisme reaksinya. Ion karbonium akan mengalami pemotongan membentuk fragmen baru dengan rantai C yang lebih pendek sehingga dihasilkan produk cair yang dominan (Almanza dkk., 1999). Pada sistem logam/pengemban, reaktan mengalami dehidrogenasi pada sisi logam. Kemudian berdifusi pada situs asam Brønsted sehingga dapat terprotonasi menjadi ion karbonium yang dapat mengalami penataan ulang sehingga membentuk ion karbonium dengan rantai yang lebih pendek seperti pada Gambar II.3. Ion karbonium selanjutnya berdifusi ke sisi logam dan mengalami hidrogenasi (Weitkamp, 2012).



Gambar II. 3 Mekanisme pemotongan ikatan C-C pada situs asam Brønsted (Sie, 1993)

Hidrorengkah yang diaplikasikan pada minyak jarak akan menghasilkan campuran hidrokarbon, turunan asam lemak dengan panjang rantai yang lebih pendek dan juga alkohol (Meller dkk., 2016). Selama reaksi berlangsung, trigliserida akan dipecah menjadi molekul yang lebih kecil seperti monogliserida

dan asam karboksilat. Produk tersebut kemudian mengalami reaksi dekarboksilasi, dekarbonilasi, dan hidrideoksigenasi seperti pada Gambar II.4.



Gambar II. 4 Mekanisme konversi trigliserida menjadi alkana dan alkohol (Meller dkk., 2016)

Proses perengkahan sangat selektif, terjadi di antara karbon di sebelah ikatan rangkap dan karbon yang membawa gugus hidroksil, antara karbon 11 dan 12, seperti yang ditunjukkan pada Gambar II.4. Produk tersebut kemudian mengalami reaksi dekarboksilasi, dekarbonilasi, dan hidrideoksigenasi seperti pada Gambar II.4. Produk alkana yang diperoleh selanjutnya mengalami perengkahan menjadi fraksi ringan (Al Alwan dkk., 2014).

Wijaya *et al.* (2018) telah berhasil melakukan hidorengkah minyak jarak menggunakan katalis Cr/Al₂O₃-bentonit. Produk hidorengkah mengandung campuran alifatik, siklik, aldehida, keton dan asam karboksilat, seperti asam 1-undecanoic, acetamide, 9 octadecenal dan 10-undecenoic acid. Persentase fraksi biogasolin yang diperoleh dari karbon C₅-C₁₀ adalah 37,73%.

II.1.3 Kayu merbau (*Intsia spp.*)

Merbau (*Intsia spp.*) dari famili *Caesalpiniaceae* merupakan salah satu kayu bernilai tinggi yang banyak terdapat terutama di Propinsi Papua, selain Aceh dan Maluku. Kayu ini memiliki berat jenis tinggi (BJ) maksimum 1,08, minimum 0,52 dan rata-rata 0,84. Kekerasan rata-rata kayu merbau sangat tinggi, dibanding jenis

kayu komersial di dunia (Malik dkk., 2015). Menurutny kekerasan kayu merbau (*Intsia bijuga*) dari Indonesia adalah 842 kg/cm². Nilai ini lebih tinggi dari kempas (610 kg/cm², keruing (427 kg/cm²) dan nyatoh (302 kg/cm²).

Kayu merbau merupakan salah satu kayu dengan kualitas terbaik dan dikenal sebagai kayu yang paling banyak menghasilkan limbah serbuk gergaji (Xu dkk., 2015). Serbuk gergaji ini terdiri dari senyawa kimia biomassa seperti lignin, selulosa, dan hemiselulosa (Bridgwater dan Peacocke, 2000). Konstituen kimia utama biomassa kayu adalah hemiselulosa, selulosa, dan lignin. Komponen kimia minor adalah protein dan minyak. Rata-rata, proporsi kuantitatif hemiselulosa, selulosa, dan lignin dalam biomassa kayu masing-masing dalam kisaran 20–35%, 40–50%, dan 15–35% (Danish dan Ahmad, 2018).

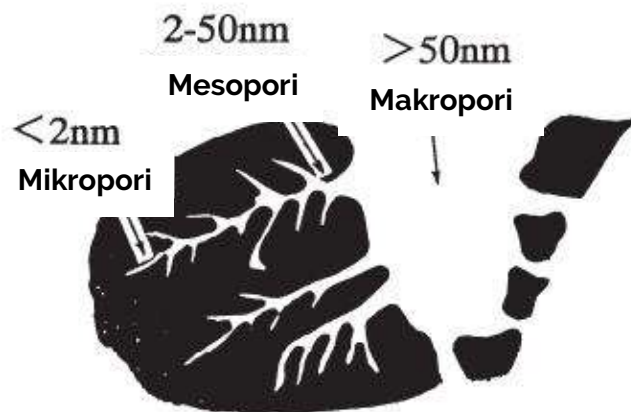
Selama pirolisis biomassa berlignoselulosa, dekomposisi hemiselulosa terjadi dalam kisaran suhu 200-260 °C, diikuti dengan dekomposisi selulosa dalam kisaran suhu 240-350 °C, dan lignin akan terdegradasi pada suhu 280-500 °C. Hilangnya massa dalam kisaran suhu 240-400 °C disebabkan karena pemotongan rantai dan mineralisasi unit lignin dan selulosa dengan memutus ikatan C-C dan C-O dalam cincin glikopranosa dengan penguapan molekul air, CO, dan CO₂ (Macedo dkk., 2008).

Pemanfaatan biomassa untuk menghasilkan karbon aktif merupakan pendekatan dalam strategi pengendalian polusi dengan dua cara. Pertama, dapat memperbaiki karbon biomassa yang mencegah produksi CO₂ atau CH₄, dan kedua, menghasilkan karbon aktif yang berguna secara industri dan bahan ramah lingkungan dan masuk proses siklus karbon alami (Danish dan Ahmad, 2018). Serbuk kayu merbau ini memiliki potensi besar sebagai sumber karbon untuk pengemban dalam katalis. (Tuo dkk., 2016) telah berhasil mensintesis karbon mesopori sebagai pengemban dari kayu spruce-fine-pir (SPF), dimana kayu ini memiliki karakteristik yang mirip dengan kayu merbau.

II.1.4 Karbon aktif

Karbon aktif adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan bahan kaya karbon yang mengandung struktur pori internal dengan luas permukaan yang

tinggi. Porositas internal dan sifat-sifat terkaitnya seperti luas permukaan, volume pori, distribusi ukuran pori, dan keberadaan gugus fungsional pada permukaan pori memainkan peran penting dalam kapasitas adsorpsi karbon aktif (Corcho-Corral dkk., 2006). Material ini memiliki ketahanan terhadap asam-basa, stabilitas thermal yang tinggi ($>800\text{ }^{\circ}\text{C}$) dan mudah di preparasi untuk mendapatkan porositas dan sifat mekanik yang baik (Marsh and Rodriguez-Reinoso, 2006). Secara umum, karbon umumnya digunakan dalam aplikasi katalitik karena sifat tekstur dan mekaniknya yang sangat baik, kemampuannya untuk menahan partikel logam yang mengarah ke dispersi logam yang tinggi (Maniam dkk., 2014) dan harganya yang lebih rendah dibandingkan dengan alumina dan silika tradisional.

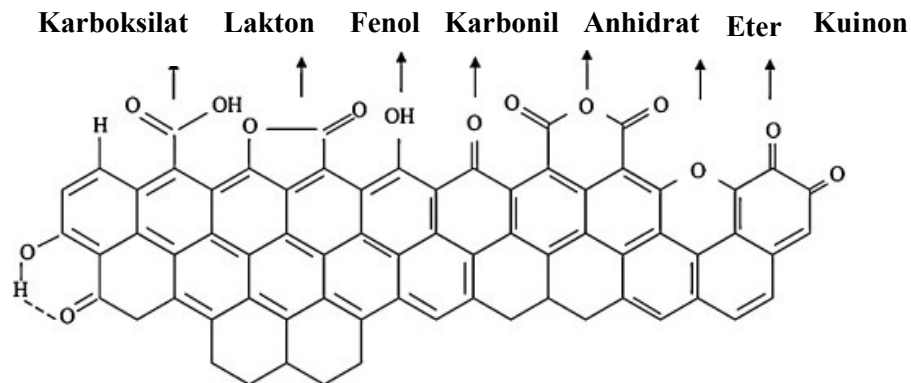


Gambar. II. 5 Struktur pori karbon aktif (Manocha, 2003).

Struktur dasar karbon aktif berupa struktur kristalin yang sangat kecil. Karbon aktif memiliki bentuk amorf, tersusun dan terikat secara kovalen dalam tatanan atom-atom heksagonal. Pada karbon aktif terdapat 3 ukuran pori, yaitu mikropori ($< 2\text{ nm}$), mesopori ($2\text{--}50\text{ nm}$), dan makropori ($> 50\text{ nm}$) (Marsh and Rodriguez-Reinoso, 2006). Selain itu, lebih jauh terdapat pula ukuran supermikropori ($0,7\text{--}2\text{ nm}$) dan ultramikropori ($< 0,7\text{ nm}$). Gambar II.5 menunjukkan skema struktur pori pada karbon aktif.

Selain terdiri dari atom karbon, karbon aktif mengandung sejumlah kecil hidrogen dan oksigen yang terikat pada gugus fungsi misalnya karboksil, fenol, dan eter. Gugus fungsi ini menjadikan permukaan karbon aktif reaktif secara kimia

dan dapat mempengaruhi sifat adsorpsinya. Struktur karbon aktif dapat dilihat pada Gambar II.6



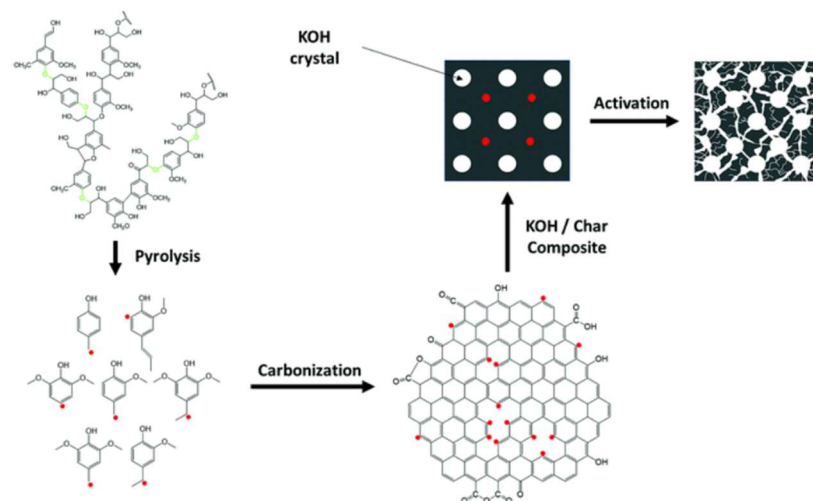
Gambar. II.6 Struktur karbon aktif (Sudibandriyo, 2003)

Kapasitas adsorpsi dan aktivitas katalitik dari karbon aktif ini sangat bergantung pada parameter strukturalnya dan keberadaan gugus permukaan atau kompleks yang mengandung heteroatom seperti O, N, P dan S (Park and Jung, 2002). Di antara kompleks permukaan dalam karbon, gugus oksigen permukaan sangat penting. Jumlah dan komposisi kimia dari gugus ini sangat bergantung pada prekursor awal dan proses pembuatannya. Gugus teroksigenasi ini dapat dibentuk ketika karbon aktif di aktivasi dengan agen pengoksidasi dengan metode kering dan basah yang berbeda. Material karbon biasanya di pirolisis pada suhu antara 600-900 °C di bawah atmosfer *inert* untuk karbonisasi, diikuti dengan proses aktivasi. Metode aktivasi dapat dibagi menjadi dua kategori: (1) aktivasi fisik, dan (2) aktivasi kimia. Aktivasi fisik menggunakan gas pengoksidasi, seperti CO₂ atau uap air untuk menghilangkan sebagian besar bahan yang mudah menguap (Xia and Shi, 2016). Proses aktivasi fisik dikontrol oleh gasifikasi dimana prekursor karbon (sebelumnya dikarbonisasi atau tidak) diaktifkan pada suhu antara 800-1000 °C menggunakan CO₂ atau uap air. Kedua zat pengaktif ini biasanya digunakan dan keduanya bereaksi secara *endothermal* dengan atom karbon prekursor sesuai dengan reaksi berikut (Solano dkk., 2012).



Aktivasi kimia terdiri dari pencampuran prekursor karbon dengan bahan pengaktif kimia. Campuran selanjutnya dipanaskan dalam atmosfer *inert*. Bahan karbon yang diperoleh melalui aktivasi kimia idealnya, memiliki struktur berpori yang berkembang dengan baik. Senyawa yang berbeda dapat digunakan untuk jenis aktivasi seperti KOH (Ji dkk., 2007), NaOH (Cazetta dkk., 2011), H_3PO_4 (Yorgun dan Yildiz, 2015), dan $ZnCl_2$ (Pezoti dkk., 2014). Zaini and Kamaruddin, (2013) menyatakan karbon yang mengalami pra karbonisasi (di udara atau N_2) dapat menawarkan luas permukaan spesifik yang lebih besar.

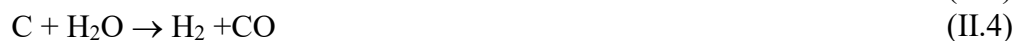
Li dkk. (2014) menyatakan bahwa aktivasi KOH dari lignin kraft yang kaya karbon menghasilkan karbon aktif dengan luas permukaan superior $2763 \text{ m}^2/\text{g}$. Aktivasi dengan KOH akan menghasilkan karbon aktif dengan luas area yang tinggi dan pengembangan pori yang bagus. Namun, jumlah rendemen yang dihasilkan sedikit, berkisar 30-40% dibandingkan aktivator lainnya seperti $ZnCl_2$, dan H_3PO_4 . Hal ini disebabkan karena pengembangan dari pori karbon, yang mana akan mempercepat hilangnya karbon sebagai hasil daripada reaksi KOH dengan permukaan karbon (Prahas dkk. 2008).



Gambar. II.7 Mekanisme aktivasi dengan penetrasi K ke dalam kisi karbon (Li dkk., 2018)

Mekanisme pembentukan pori melalui pencampuran fisik zat pengaktif padat seperti pelet KOH dengan karbon melalui reaksi padat-padat telah diusulkan terjadi melalui reduksi KOH menjadi logam K dan oksidasi karbon menjadi

karbonat (Raymundo-Piñero dkk., 2005). Logam kalium dapat menginterkalasi ke dalam karbon dan berinteraksi dengan karbon seperti yang ditunjukkan pada Gambar II.7 menyebabkan berkembangnya struktur pori (Wang dkk., 2020). Joseph dkk. (2006) dalam penelitiannya mengusulkan mekanisme aktivasi dengan KOH seperti yang ditunjukkan pada persamaan II.3, II.4, dan II.5 dimana terbentuknya produk gas selama reaksi berlangsung dapat membentuk/ menghasilkan pori baru pada permukaan karbon secara fisika. Sementara logam K yang terbentuk dapat terinterkalasi dalam matriks karbon dan mengembangkan struktur pori internalnya. Terjadinya pembentukan pori-pori baru selama reaksi akan meningkatkan luas permukaan dan volume pori (Saygılı dan Saygılı, 2019).



Wu dkk., (2017) pada penelitiannya mempelajari pengaruh peningkatan temperatur dari 500 °C-900 °C dimana peningkatan temperatur aktivasi secara progresif akan meningkatkan laju reduksi KOH, menghasilkan CO, H₂, dan H₂O dalam kondisi gas *inert*. Gas tersebut berperan dalam devolatilisasi yang selanjutnya mengembangkan struktur pori yang belum sempurna dalam arang menghasilkan struktur mikro-mesopori (Mopoung dkk., 2015). Selain temperatur, jumlah aktivator KOH yang digunakan juga berperan dalam peningkatan luas permukaan spesifik dan volume pori. Wang dkk., (2010) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa aktivasi menggunakan KOH memungkinkan untuk mengontrol derajat aktivasi dengan mengatur rasio KOH/ karbon dengan rasio masa (2-8), dimana dalam penelitiannya luas area dan volume pori akan meningkat seiring dengan naiknya rasio masa KOH/ karbon.

Tabel II.2 Pengaruh rasio impregnasi KOH pada karbon aktif (Wu dkk., 2017)

ACs	Luas permukaan BET (m ² /g)	Volume pori	Ukuran pori
IR 1	1936	1,32	2,73
IR 2	3089	1,76	2,28
IR 3	2448	2,04	3,34