

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sumber energi terbarukan berbasis karbon yang paling baik di dunia saat ini adalah biomassa. Biomassa merupakan sumber karbon untuk aplikasi dalam pembuatan bahan kimia dan material baru. Biomassa sering digunakan secara non komersial untuk memasak dan diambil panasnya di negara berkembang. Hal ini sering dipandang sebagai energi yang tidak produktif dan menghasilkan polusi. Biomassa ini dapat dimanfaatkan dengan lebih baik sebagai alternatif bahan hemat energi dengan menggunakannya pada produk-produk yang bernilai tambah. Biomassa dapat digunakan untuk sintesis bahan kimia dan bahan bakar untuk masa depan (Shrotri *et al.*, 2017).

Biomassa terbentuk dari spesies yang hidup seperti tumbuhan dan hewan yang sekarang hidup atau pernah hidup beberapa waktu yang lalu. Biomassa dapat dikembangkan lebih cepat dan tidak membutuhkan waktu jutaan tahun. Tidak seperti bahan bakar fosil, sumber biomassa dapat berkembang biak, dan oleh karena itu dianggap terbarukan (Basu, 2010). Kebutuhan pada sumber energi alternatif menjadikan biomassa sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi dan berproyeksi besar dimasa depan untuk menekan serta menggantikan penggunaan bahan bakar fosil. Biomassa dapat dikonversi menjadi bahan bakar kendaraan ataupun mesin (Collard F. X. & Blin J., 2014). Dengan potensi biomassa yang besar pemanfaatan biomassa sudah banyak dilakukan industri di Lampung, hampir semua industri agro menerapkannya, misal GGPC, Sugar Group, dan semua industri CPO.

Dari sekian banyak sumber biomassa yang ada di Indonesia, biomassa dari kelapa sawit merupakan sumber yang potensial, terutama limbah atau produk sampingnya. Hal ini didukung oleh data dari Direktorat Jenderal Perkebunan tahun 2019, luas area perkebunan sawit di Provinsi Lampung seluas 203.674 Ha yang menghasilkan 508.772 Ton *Palm Oil* dari total area perkebunan sawit di Indonesia seluas 14.677.560 Ha dengan menghasilkan 51.443.315 Ton CPO (*Crude Palm Oil*) dan PKO (*Palm Kernel Oil*). Besarnya pertumbuhan industri kelapa sawit tentu

akan menghasilkan limbah kelapa sawit (limbah padat, cair dan gas) yang berpotensi sebagai sumber energi atau bahan baku material baru. Pada pabrik kelapa sawit dengan kapasitas 100 ribu ton tandan buah segar (TBS) pertahun akan menghasilkan limbah padat yang terdiri dari 6 ribu ton cangkang, 12 ribu ton serabut dan 23 ribu ton tandan buah kosong (Marpaung, 2009). Pelepah kelapa sawit bisa mencapai 40-50 pelepah tiap pohon dalam kurun satu tahun dengan masa 4,5 kg berat kering per pelepah (Maulina S., *et al.*, 2018). Pemanfaatan pelepah kelapa sawit sebagian besar masih dijadikan pupuk alami dan untuk menjaga kelembaban di area perkebunan (Pranata R. H. & Zulfan Arico1, 2019). Sedangkan serabut (*fiber*) tersebut digunakan sebagai bahan bakar pada boiler (Haryanti A., *et al.*, 2014).

Ada beberapa jenis proses pengolahan limbah padat khususnya biomass seperti *Liquefaction*, *Pyrolysis*, *Combustion*, *Gasification* dan *Torrefaction*. Salah satu metode alternatif yang bisa digunakan untuk mendapatkan produk bio-oil dari biomasa khususnya limbah serabut dan pelepah kelapa sawit adalah proses pirolisis. Pirolisis merupakan proses dekomposisi termal tanpa oksigen dari bahan organik pada kisaran temperatur 350-600°C (Damayanti D., *et al.*, 2020). Proses pirolisis akan menghasilkan 3 jenis produk, cair (*oxygenated oil* dan *aromatic compound* atau bio-oil), yaitu padat (arang), dan gas (CO, CO₂, H₂, H₂O dan CH₄) (Damayanti D., *et al.*, 2020). Bio oil hasil pirolisis dari karbonisasi biomassa telah mendapat perhatian yang signifikan untuk digunakan sebagai energi prekursor dan bahan kimia yang berharga. Bio oil memiliki sifat energi yang lebih baik dan berguna dalam sintesis bahan kimia (Salema *et al.*, 2017). Rasio produk pada proses pirolisis dipengaruhi oleh komponen senyawa dari umpan seperti kandungan lignoselulosanya, kondisi operasi dan desain alat yang digunakan.

Serabut dan pelepah kelapa sawit digunakan pada penelitian ini karena merupakan limbah padat dan sumber biomassa yang potensial untuk memproduksi bio oil. Pada proses pirolisis ini menggunakan optimasi temperatur proses pirolisis pada suhu 250, 300, 350, 400, dan 450°C. Bahan baku pirolisis serabut dan pelepah kelapa sawit diuji menggunakan metode TGA (*Thermo Gravimetric Analyzer*) sebelum dilakukannya proses pirolisis dengan tujuan untuk menganalisis perubahan pada sifat fisik dan kimianya sebagai fungsi pertambahan suhu (dengan laju

pemanasan konstan), atau sebagai fungsi suhu dan waktu terhadap penurunan massa sampel (Rahmat *et al.*, 2014). Komponen senyawa kimia pada fase oil dari bio-oil diidentifikasi dengan metode GC-MS (*Gas Chromatography-Mass Spectrometry*), pengujian secara fisika dilakukan untuk mengetahui (viskositas, massa jenis dan *flash point*) dan nilai kalor (HHV) yang diperoleh dengan perhitungan. Produk padat, cair dan gas hasil pirolisis juga diukur untuk mendapatkan nilai yield.

1.2 Tujuan

Adapun Tujuan dari penelitian ini antara lain:

1. Mengetahui suhu degradasi senyawa organik pada serabut dan pelepah kelapa sawit.
2. Mengetahui yield bio-oil dari proses pirolisis serabut dan pelepah kelapa sawit
3. Mengetahui senyawa kimia penyusun bio-oil fase oil hasil pirolisis serabut dan pelepah kelapa sawit.
4. Mengetahui karakteristik fisik bio oil fase oil (viskositas, massa jenis, HHV dan *flash point*)

1.3 Kerangka Pemikiran

Biomassa merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi dan berproyeksi besar di masa depan untuk menekan serta menggantikan penggunaan bahan bakar fosil. Kelapa sawit merupakan salah satu sumber biomassa yang memiliki proyeksi baik. Sumber biomassa yang potensial dari kelapa sawit terdapat pada limbah atau produk samping produksi minyak kelapa sawit. Pirolisis menggunakan biomassa untuk menghasilkan produk yang digunakan sebagai sumber energi dan bahan baku untuk produksi kimia (Mohan Dinesh *et al.*, 2006).

Limbah padat kelapa sawit merupakan biomassa yang juga potensial untuk diolah menjadi bio-oil contohnya seperti serabut dan pelepah kelapa sawit, dikarenakan memiliki jumlah yang melimpah dan pemanfaatannya masih belum masif. Dalam hal ini untuk memperoleh bio-oil dari serabut dan pelepah kelapa sawit digunakan teknologi proses pirolisis. Bio-oil yang dihasilkan dapat

dimanfaatkan sebagai energi terbarukan dan bahan baku untuk produksi bahan kimia.

Untuk memperoleh kondisi yang optimum, dilakukan optimasi suhu yang berbeda pada suhu 250, 300, 350, 400, dan 450°C. Bahan baku serabut dan pelepah kelapa sawit masing-masing memiliki massa 300 gram berdasarkan sepertiga ukuran volume rektor yang digunakan dan menurut Azri Rajib, 2014 ukuran bahan baku yang digunakan adalah 80 mesh. Berdasarkan penelitian Wulandari. Y. R 2020, bio-oil banyak dihasilkan dari pirolisis biomass lignoselulosa pada suhu 450°C, suhu 250-350°C yang merupakan temperatur degradasi senyawa hemiselulosa dan selulosa.

1.4 Hipotesis

Hipotesis penelitian ini adalah:

1. Temperatur optimum pirolisis serabut dan pelepah kelapa sawit dalam menghasilkan bio-oil berada di rentang temperatur 250°C sampai 350°C.
2. Bi-oil hasil pirolisis serabut dan pelepah kelapa sawit mengandung senyawa-senyawa kimia yang berpotensi sebagai bahan bakar dan sumber bahan baku untuk produksi bahan kimia.

1.5 Kontribusi

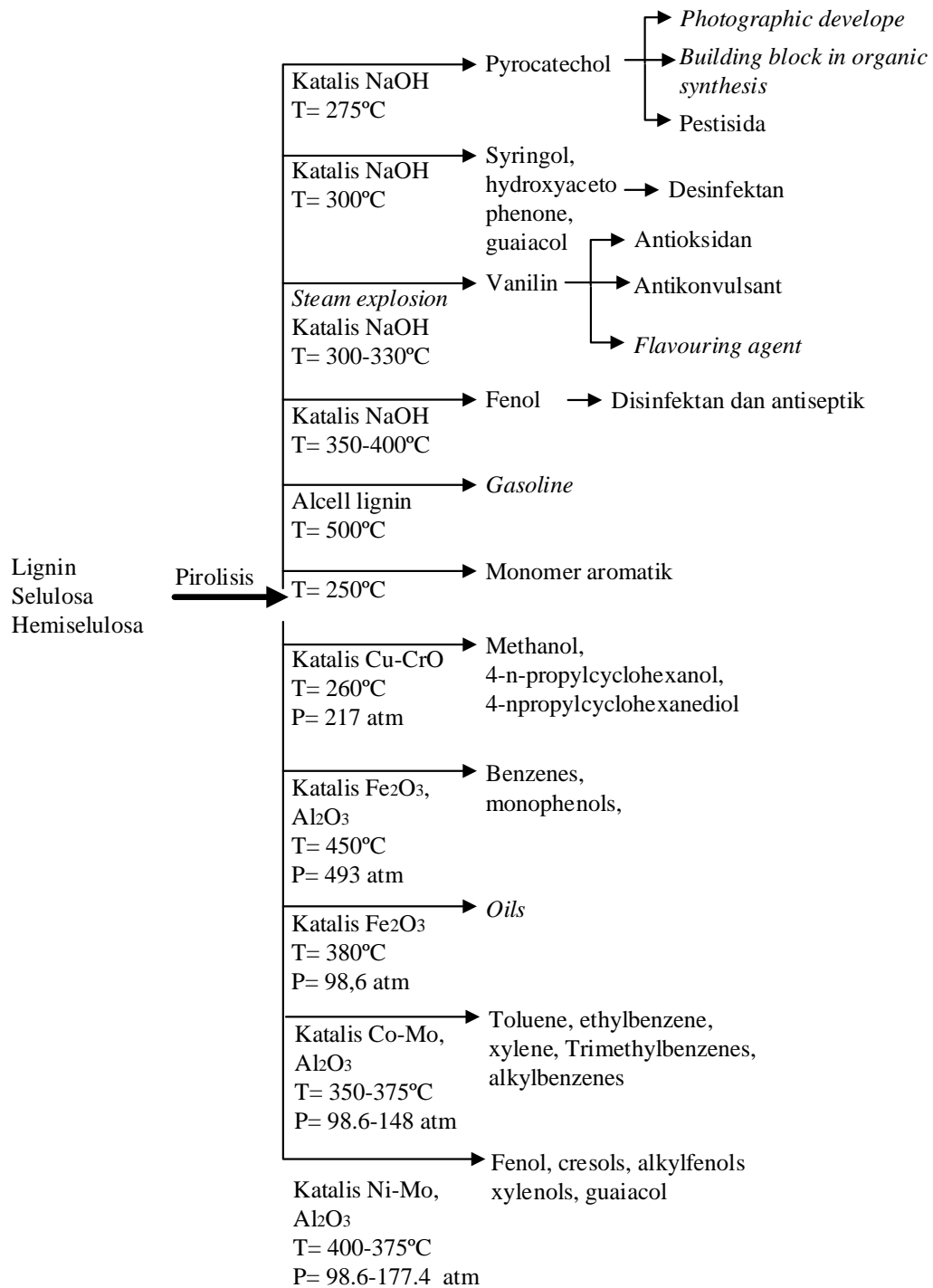
Adapun kontribusi dari penelitian ini adalah memberikan alternatif pengelolaan limbah padat pabrik kelapa sawit dengan cara memanfaatkan limbah padat (serabut dan pelepah kelapa sawit) menjadi produk yang bernilai ekonomis dan ramah lingkungan yang disebut bio-oil. Bio-oil dapat dimanfaatkan sebagai energi terbarukan di masa depan sebagai pengganti bahan bakar fosil dan bahan baku untuk produksi bahan kimia.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biomasa

Biomasa secara umum merupakan total material organik yang terkandung pada suatu organisme hidup pada tempat dan waktu tertentu (Collard F. X. & Blin J., 2014). Satuan biomasa tumbuhan biasanya dinyatakan dalam kg/m atau ton/ha, biomasa tumbuhan merupakan material kering dari suatu organisme hidup (tumbuhan) pada waktu, tempat dan luasan tertentu (Collard F. X. and Blin J., 2014). Dengan adanya pelepas panas, pada akhirnya semua biomassa akan membusuk menjadi molekul dasarnya. Proses alam menyerupai pelepasan energi dari konversi biomassa menjadi energi. Energi yang diperoleh dari biomassa merupakan bentuk energi terbaharukan. Berbeda halnya dengan bahan bakar fosil karena pada prinsipnya adalah pemanfaatan energi guna mendaur ulang karbon dan tidak menambahkan karbon dioksida ke lingkungan. Biomassa merupakan sumber karbon yang dapat diperbaharui, dan juga mampu diproses menjadi bahan bakar gas, cair, dan padat (Basu, 2010).

Ada beberapa kelompok tentang potensi biomassa, kelompok pertama menjelaskan tentang potensi biomassa yang bersumber dari residu primer hasil pertanian, diantaranya: jerami padi sawah, jerami padi ladang, batang jagung dan batang ubi kayu. Kelompok kedua merupakan potensi biomassa yang bersumber dari sekunder pertanian, yang terdiri dari: sekam padi sawah, sekam padi ladang, dan tongkol jagung. Sedangkan kelompok ketiga adalah potensi biomassa yang bersumber dari perkebunan kelapa sawit, yang terdiri dari: tandan kosong kelapa sawit, serat, Cangkang dan Limbah cair (POME) (Panwar NL., *et al.*, 2011) Karakteristik dari tiga komponen pokok biomassa itu adalah hemiselulosa terdekomposisi antara temperatur 220–320°C, selulosa terdekomposisi setelah hemiselulosa yaitu antara 250–360°C dan untuk lignin terdekomposisi antara temperatur 400–500°C karena mempunyai sifat yang berbeda dengan dua komponen diatas sehingga terdekomposisi secara merata antara temperatur hemiselulosa dan selulosa (Wijayanti Widya, 2019). Proses pirolisis biomassa memiliki pohon industri yang dapat dilihat seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Pohon industri biomassa (Damayanti D., *et al.*, 2020)

Biomassa terbentuk melalui reaksi fotosintetik dari karbon dioksida dengan air, yang terdiri dari oksigen, karbon, dan hidrogen, yang terdapat dalam bentuk polimerik makroskopik kompleks. Setiap biomassa memiliki kandungan

biopolimer yang bervariasi. Komposisi biopolimer biomassa dan sawit tersaji pada Tabel 1 dan kandungan komponen sawit pada Tabel 2.

Tabel 1. Komposisi biopolimer biomassa dan sawit

Biopolimer	Struktur Kimia	Kandungan pada Biomassa (%)	Kandungan pada Sawit (%)
Selulosa	$(C_6H_{10}O_5)_x$	40-60	59,7
Hemiselulosa	$(C_5H_8O_4)_y$	20-4	22,1
Lignin	$(C_9H_{10}O_3(CH_3O)_{0.9-1.7})_z$	10-25	18,1

Sumber: Abdullah N, Gerhauser H, Bridgwater AV., 2007

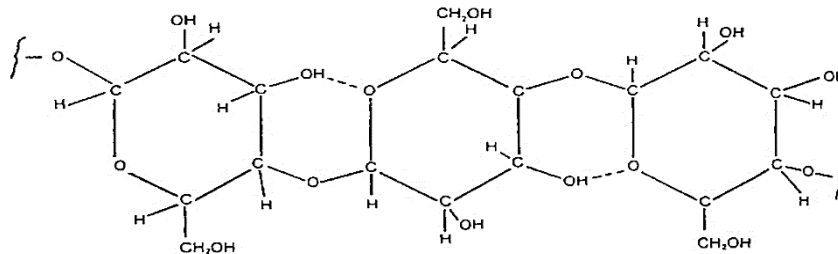
Tabel 2. Kandungan komponen kelapa sawit

Jenis limbah kelapa sawit	Selulosa (%)	Hemiselulosa (%)	Lignin (%)	Referensi
Cangkang	27,7	21,6	44	Abnisa <i>et al.</i> , 2013
TKKS	51,2	22,5	21,3	Abnisa <i>et al.</i> , 2013
Serabut	23,7	30,5	27,3	Abnisa <i>et al.</i> , 2013
Pelepah	49,8	23,5	20,5	Atnaw <i>et al.</i> , 2012

2.2 Selulosa

Selulosa merupakan senyawa organik paling umum di bumi, komponen struktural utamanya adalah dinding sel dalam biomassa. Jumlahnya bervariasi dari tergantung pada jenis tanamannya. Diwakili oleh rumus generik $(C_6H_{10}O_5)_x$, selulosa adalah polimer rantai panjang dengan derajat polimerisasi tinggi (~ 10.000) dan berat molekul besar (~ 500.000). Selulosa memiliki ribuan unit struktur kristal, yang terdiri dari banyak molekul glukosa. Struktur ini memberikan kekuatan tinggi, yang memungkinkannya untuk menyediakan struktur kerangka dari sebagian besar biomassa darat (Chen H., 2014). Selulosa terutama terdiri dari d-glukosa yang terbuat dari enam karbon atau gula heksosa. Selulosa sangat tidak larut, meskipun merupakan karbohidrat namun tidak dapat dicerna oleh manusia. Selulosa merupakan komponen kayu yang dominan dan menyusun sekitar 40 sampai 44%

berat kering (Basu, 2010). Gambar 2 menunjukkan struktur kimia selulosa. Saat ini, selulosa banyak diterapkan pada nanocontainers, hidrogel, flame retardant dll (Hu, L., *et al.*, 2020)

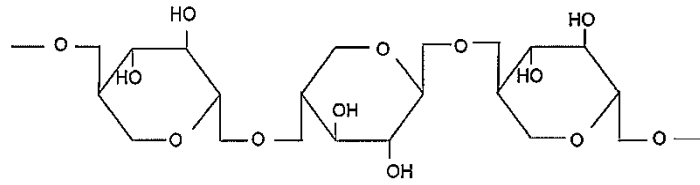


Gambar 2. Struktur selulosa (Basu, 2010)

2.3 Hemiselulosa

Hemiselulosa adalah penyusun lain dari dinding sel tumbuhan. Selulosa adalah Kristal dengan struktur kuat yang tahan terhadap hidrolisis, sedangkan hemiselulosa memiliki struktur amorf acak dengan sedikit kekuatan. Ini adalah sekelompok karbohidrat dengan struktur rantai bercabang dan tingkat polimerisasi yang lebih rendah (~100-200), dan dapat diwakili oleh rumus umum $(C_5H_8O_4)_y$ (Chen H., 2014). Hemiselulosa mirip dengan selulosa yang merupakan polimer gula. Tetapi berbeda dengan selulosa yang hanya tersusun dari glukosa, hemiselulosa tersusun dari berbagai macam jenis gula. Monomer gula penyusun hemiselulosa terdiri dari monomer gula berkarbon 5 (C_5) dan 6 (C_6), misalnya xilosa, mannose, glukosa, galaktosa, arabinosa, dan sejumlah kecil rhamnosa, asam glukoroat, asam metal glukoronat, dan asam galaturonat (Basu, 2010).

Terdapat variasi yang signifikan dalam komposisi dan struktur hemiselulosa di antara berbagai biomassa. Kebanyakan hemiselulosa biasanya berisi 50 hingga 200 unit dalam struktur bercabang mereka. Hemiselulosa cenderung menghasilkan lebih banyak gas dan lebih sedikit tar daripada selulosa (Chen H., 2014). Hemiselulosa larut dalam larutan alkali lemah dan mudah dihidrolisis oleh asam atau basa encer. Hemiselulosa memiliki sekitar 20 sampai 30% dari berat kering kebanyakan kayu. (Basu, 2010). Struktur bangun hemiselulosa dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Struktur bangun hemiselulosa (Garcia-Perez, 2008)

Hemiselulosa merupakan komponen penting dari dinding sel tanaman, yang terutama digunakan dalam biofuel dan bioproduk. Aplikasi hemiselulosa digunakan seperti produksi biofuel, bidang pengemasan, dan adsorben (Huang L-Z., *et al.*, 2021). Hemiselulosa digunakan untuk memproduksi alkohol melalui fermentasi dan sorbitol melalui reduksi (Girio *et al.*, 2010), yang memiliki aplikasi penting dalam makanan, pasta gigi, kosmetik, manufaktur bahan peledak, dan pembuatan kertas (Falco *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2014). Xylooligosaccharides, sebagai salah satu produk degradasi hemiselulosa, banyak digunakan dalam makanan fungsional dan bidang farmasi karena sifat fisik dan kimia dan fungsi fisiologisnya yang unik (Bian *et al.*, 2014).

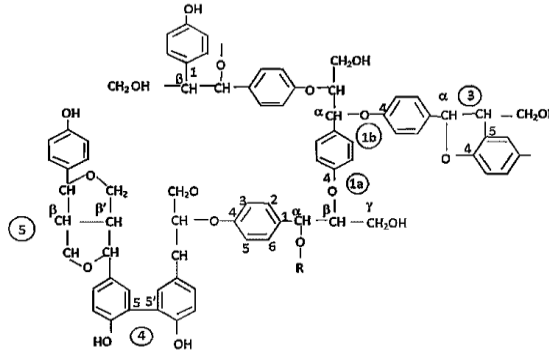
2.4 Lignin

Lignin adalah polimer fenilpropana bercabang tinggi yang kompleks dan merupakan bagian integral dari dinding sel sekunder tumbuhan dan merupakan polimer tiga dimensi dari 4-propenil fenol, 4-propenil-2-metoksi fenol, dan 4-propenil-2, 5-dimetoksi fenol (Chen H., 2014). Lignin merupakan material yang paling kuat terdapat pada biomassa. Lignin memiliki titik leleh 140°C. Ini adalah konstituen penting ketiga dari dinding sel biomassa kayu.

Lignin adalah agen penyemen untuk serat selulosa yang menyatukan sel-sel yang berdekatan. Satuan monomer yang dominan dalam polimer lignin adalah cincin benzen atau senyawa aromatik yang saling dihubungkan dengan rantai alifatik, yang terdiri dari 2-3 karbon. Senyawa kimia aromatis yang berupa fenol, terutama kresol merupakan hasil dari proses pirolisis lignin.

Lignin sangat tidak larut, bahkan dalam asam sulfat (Chen H., 2014). Kandungan lignin pada kayu keras tipikal sekitar 18 sampai 25%, sedangkan kayu lunak mengandung 25 sampai 35% berat keringnya. Lignin sangat resisten terhadap degradasi, baik secara enzimatik dengan mikroba maupun kimia. Lignin memiliki

rasio dari C:O dan H:O lebih besar dibandingkan dengan fraksi karbohidrat lainnya di dalam biomassa. Hal ini membuat lignin lebih potensial untuk proses oksidasi. Struktur bangun lignin dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Struktur bangun lignin (Garcia-Perez, 2008)

Secara global lignin teknis diproduksi sekitar 1,65 Mt/y (kecuali produksi bioenergi). Di pasaran produksi lignin paling banyak berasal dari lignosulfonat yang berkisar hingga 80%, dan aplikasi utama adalah surfaktan, agen pengikat untuk paletisasi, dispersan dalam keramik dan bahan tambahan beton (Dessbesell L., *et al.*, 2020). Depolimerisasi lignin merupakan metode paling potensial yang dapat menghasilkan produk bernilai tambah dari bahan baku lignin untuk mengubah senyawa kompleks lignin menjadi molekul kecil untuk bahan bakar dan bahan kimia dasar atau oligomer untuk aplikasi lebih lanjut (Wang H., *et al.*, 2013).

2.5 Biomassa dari Kelapa Sawit

Di Indonesia kelapa sawit menjadi salah satu tanaman primadona pada bidang perkebunan, karena menjadi sumber penghasil devisa non-migas negara. Nilai ekonomi dari kelapa sawit sangatlah tinggi untuk keperluan industry, karena banyak dari bagian kelapa sawit dapat dimanfaatkan menjadi produk yang ber harga jual ekonomis. Prospek komoditi minyak kelapa sawit sangatlah cerah dalam perdagangan secara global sehingga mendorong pemerintah Indonesia untuk mengembangkan areal perkebunan kelapa sawit (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2018).

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 perijinan dan dalam pembukaan wilayah baru untuk areal perkebunan besar bagi pihak swasta. Jika dikonversi dari 100 kg sawit dapat menghasilkan 20 kg minyak, fakta bahwa total luas area perkebunan sawit di Indonesia sebesar 14.677.560 Ha dengan menghasilkan 51.443.315 Ton CPO dan PKO (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2018).

Perkebunan kelapa sawit memiliki dua hasil utama yaitu minyak inti kelapa sawit (Palm Kernel Oil-PKO) dan minyak kelapa sawit (Crude Palm Oil-CPO). Negara Indonesia telah menjadi produsen minyak sawit terbesar di dunia sejak tahun 2006. Indonesia dan Malaysia telah menguasai hampir 90% produksi minyak sawit dunia (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2018). Besarnya nilai Produksi minyak sawit dan minyak inti sawit tahun 2009-2019 tersedia pada Tabel 3.

Tabel 3. Produksi minyak sawit dan minyak inti sawit di Indonesia 2009-2019

Tahun	Luas Areal (Ha)	Produksi (ton)		
	Jumlah/ Total	CPO	PKO	Jumlah/Total
2009	7.873.294	3.864.859	3.864.8	23.189.152
2010	8.385.394	4.391.624	4.391.6	26.349.744
2011	8.992.824	4.619.308	4.619.3	27.715.849
2012	9.572.715	5.203.104	5.203.1	31.218.622
2013	10.465.020	5.556.401	5.556.4	33.338.405
2014	10.754.801	5.855.638	5.855.6	35.133.827
2015	11.260.277	6.214.003	6.214.0	37.284.018
2016	11.201.465	6.346.192	6.346.1	38.077.153
2017	14.048.722	7.593.045	7.593.0	45.558.269
2018*)	14.327.093	8.113.446	8.113.4	48.680.676
2019**)	14.677.560	8.573.886	8.573.8	51.443.315

Keterangan:

1. *) Sementara
2. **) Estimasi

Sumber: Direktorat Jenderal Perkebunan, 2018

Tingginya angka produksi minyak sawit ditunjang dari semakin luasnya areal perkebunan. Saat ini perkebunan kelapa sawit yang ada di Indonesia sudah tersebar di berbagai daerah dengan kapasitas yang bervariasi. Produksi minyak kelapa sawit Indonesia tahun 2019 diperkirakan mencapai 51.443.315 ton. Angka ini naik 5,68% dari tahun lalu yang hanya 48.680.676 ton. Semakin meningkatnya areal perkebunan, maka produksi minyak sawit akan turut meningkat dan limbahnya pun akan meningkat. Produk samping industri kelapa sawit ditunjukkan pada Gambar 5. Selain menghasilkan minyak sawit, pabrik pengolahannya juga menghasilkan limbah atau produk samping, antara lain:

- Limbah cair (POME= Palm Oil Mill Effluent)
- Limbah padat berupa cangkang, tandan kosong, pelepah dan serabut sawit



Gambar 5. Produk samping kelapa sawit

Pabrik kelapa sawit dengan kapasitas 100 ribu ton tandan buah segar (TBS) pertahun akan menghasilkan limbah padat yang terdiri dari 6 ribu ton cangkang, 12 ribu ton serabut dan 23 ribu ton tandan buah kosong (Marpaung, 2009). Jumlah ini yang memiliki potensi untuk dimanfaatkan menjadi biomassa penghasil energi terbarukan pengganti bahan bakar fosil dan juga untuk mengurangi keberadaannya sebagai produk samping atau limbah pabrik pengolahan kelapa sawit.

2.5.1 Pelelah Kelapa Sawit

Pelelah kelapa sawit seperti pada gambar 6 adalah salah satu produk samping (*by-product*) berupa padatan dari industri pengolahan kelapa sawit. Ketersediaan pelelah kelapa sawit cukup melimpah. Pelelah kelapa sawit bisa mencapai 40-50 pelelah tiap pohon dalam kurun satu tahun dengan masa 4,5 kg berat kering pelelah. Pelelah yang dihasilkan per tahun dalam satu hektar perkebunan kelapa sawit diperkirakan mencapai 6,3 ton. Kandungan air pada pelelah kelapa sawit berkisar 75% dan termasuk kategori limbah basah (*wet by-product*) (Maulina S., *et al.*, 2018). Pelelah kelapa sawit sebagian besar masih dimanfaatkan sebagai pupuk alami dan untuk menjaga kelembaban di area perkebunan (Pranata R. H. & Zulfan Arico1, 2019).



Gambar 6. Pelelah kelapa sawit

Pelelah kelapa sawit berdasarkan hasil uji ultimat pada bio-oil hasil pirolisis pelelah memiliki C = 42,9%, H = 6,9%, N = 0,5%, O = 46,3% (Omar N.N., *et al.*, 2018). Bio-oil yang dihasilkan memiliki jumlah yang dipengaruhi oleh karakteristik dari masing-masing umpan. Karakteristik yang berpengaruh dominan adalah kandungan selulosa dan kandungan abu. Semakin tinggi kandungan selulosa maka akan semakin banyak bio-oil yang dihasilkan. Semakin tinggi kandungan abu maka semakin banyak jumlah arang yang terbentuk sebagai produk samping pirolisis (Damayanti D., *et al.*, 2020).

2.5.2 Serabut Kelapa Sawit

Serabut kelapa sawit seperti pada Gambar 7 adalah salah satu produk samping (*by-product*) berupa padatan dari industri pengolahan kelapa sawit. Serabut kelapa sawit memiliki jumlah yang cukup melimpah. Pada basis satu ton Tandan Buah Segar Kelapa Sawit (TBS) menghasilkan 10 % sampai dengan 12 % serat buah kelapa sawit (Pardamaian, 2008). Serabut kelapa sawit juga dimanfaatkan untuk penguat sifat mekanik komposit *fiber glass*, di industri kertas dalam pembuatan *pulp*, dan sebagai alternatif media tanam. Selain itu, dapat pula dijadikan alternatif pengganti solar dan batubara pada pembangkit listrik. Serabut (*fiber*) tersebut digunakan sebagai bahan bakar pada boiler untuk merebus dengan cara menguapkan kelapa sawit sebelum mencapai proses pengolahan (Haryanti A., *et al.*, 2014). Serabut kelapa sawit pada pengujian ultimat menunjukkan bio-oil serabut kelapa sawit mengandung C = 16,39%, H = 12,01%, N = 0,88%, O = 70,72% dan memiliki nilai kalor atau *heigh heating value* (HHV) sebesar 18,1 MJ/kg (Chen, *et al.*, 2016).

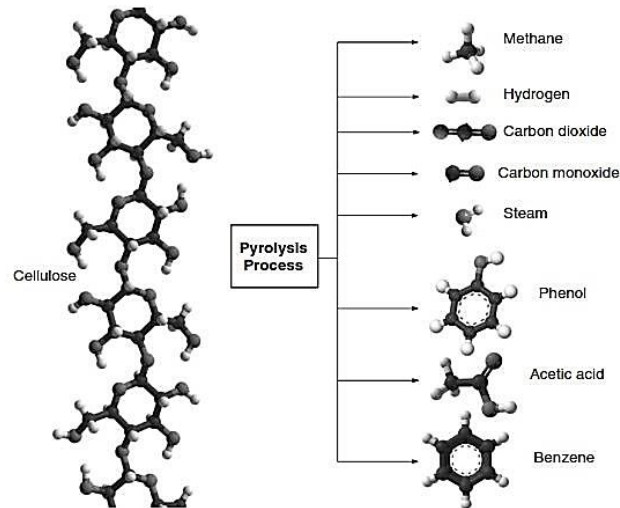


Gambar 7. Serabut kelapa sawit

2.6 Pirolisis

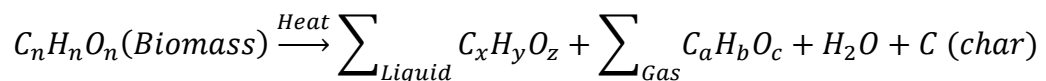
Pirolisis merupakan proses penguraian yang tidak teratur dari bahan - bahan organik yang disebabkan oleh adanya pemanasan pada suhu 300-650°C tanpa berhubungan dengan udara luar. Reaksi pirolisis akan menghasilkan produk berupa padatan, cairan dan gas (Damayanti D., *et al.*, 2020). Pirolisis biomassa biasanya dilakukan dalam kisaran suhu 300-650°C sedangkan suhu 800-1000°C untuk proses gasifikasi dan 200-300°C untuk proses torefaksi.

Proses pirolisis umumnya akan menghasilkan gas yang terdiri dari H₂, CO₂, CO, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, gas organik dan uap air (Damayanti D., *et al.*, 2020). Proses penguraian molekul hidrokarbon besar menjadi lebih kecil selama proses pirolisis dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Proses penguraian molekul hidrokarbon besar menjadi lebih kecil selama pirolisis.

Dalam reaksi fase gas, uap yang dapat terkondensasi dipecah menjadi molekul yang lebih kecil dari gas permanen tak terkondensasi seperti CO dan CO₂. Proses pirolisis dapat diwakili oleh reaksi umum seperti berikut.



Seperti disebutkan sebelumnya, pirolisis melibatkan pemecahan molekul kompleks yang besar menjadi beberapa molekul yang lebih kecil. Produknya diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama:

1. Padat (kebanyakan arang atau karbon)

Arang/ *char* adalah residu yang mengandung karbon diproduksi dalam reaksi pirolisis. *Char* hasil pirolisis dapat digunakan sebagai bahan bakar padat untuk produksi panas dan listrik, bahan baku untuk proses gasifikasi, bahan baku untuk produksi karbon aktif, bahan baku untuk karbon produksi nanofilamen.

2. Cair/ bio-oil(tar, hidrokarbon lebih berat, dan air)

Bio-oil adalah produk lain dari biomassa pirolisis yang dapat menjadi sumber energi alternatif untuk bahan bakar minyak atau diesel. Penggunaan utama industri pirolisis bio-oil dapat sebagai berikut: mesin pembakaran, boiler, mesin diesel statis dan gas turbin yang efektif digunakan sebagai pengganti diesel, bahan bakar minyak berat, bahan bakar minyak ringan dan natural gas untuk berbagai macam boiler. Bio-oil perlu ditingkatkan spesifikasinya dengan menghilangkan dan menurunkan kandungan oksigen. Bio-oil dapat menggantikan bahan bakar minyak bumi setelah dilakukan proses lanjutan peningkatan dan pemurnian yang sesuai (Hereng C. Y., 2020).

3. Gas (CO_2 , H_2O , CO , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_6H_6 , dll.)

Gas yang dihasilkan selama proses pirolisis merupakan produk samping. Berbagai macam bahan biomassa dapat dikonversi menjadi gas yang mudah terbakar (H_2 , CO , C_2H_2 , CH_4 , C_2H_4 , dll). Peningkatan suhu reaksi pada proses pirolisis menciptakan peningkatan signifikan produk gas. Gas-gas mudah terbakar ini dapat digunakan langsung dalam boiler untuk produksi panas atau dalam turbin gas atau mesin untuk produksi listrik (Kathlene J., *et al.*, 2013).

Pirolisis mengkonversi biomassa menjadi produk yang merupakan sumber energi maupun sebagai bahan baku untuk memproduksi bahan kimia (Mohan Dinesh *et al.*, 2006). Komposisi biomassa terutama rasio hidrogen-karbon (H/C), memiliki pengaruh penting terhadap hasil pirolisis. Masing-masing dari tiga unsur utama biomassa lignoselulosa memiliki kisaran suhu dekomposisinya masing-masing. Analisis data dari *thermogravimetric analysis* (TGA) dan *differential thermogravimetry* (DTG) pada biomassa dipilih untuk menunjukkan kisaran suhu inisiasi pirolisis (Wulandari Y. R., *et al.*, 2020).

Konstituen individu mengalami pirolisis secara berbeda dan memberikan hasil yang berbeda. Misalnya, selulosa dan hemiselulosa adalah sumber utama zat volatil dalam biomassa ligno-selulosa. Jumlah tersebut menunjukkan selulosa adalah sumber utama uap yang dapat terkondensasi. Sebaliknya, hemiselulosa menghasilkan lebih banyak gas yang tidak dapat terkondensasi dan lebih sedikit tar daripada yang dilepaskan oleh selulosa (Wulandari Y. R., *et al.*, 2020). Karena

kandungan aromatiknya, lignin terdegradasi perlahan, memberikan kontribusi besar pada hasil arang. Tipe reaktor pirolisis dan metode pemanasan dapat dilihat pada Tabel 4 dan Jenis bahan baku kelapa sawit dengan proses pirolisis ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 4. Tipe reaktor pirolisis dan metode pemanasan

Tipe Reaktor	Metode Pemanasan	Perusahaan / Organisasi
<i>Ablative coil</i>	<i>Wall heating</i>	Castle Capital, Colorado School Mines
<i>Ablative mill</i>	<i>Wall heating (disc)</i>	U. Aston, NREL
<i>Fluid bed</i>	<i>Heated recycle gas</i>	Union Fenosa Agritherm, Canada
	<i>Hot inert gas</i>	Biomass Engineering Ltd, UK
	<i>Partial gasification</i>	Dynamotive, Canada
	<i>Fire tubes</i>	RTI, Canada
<i>Microwave</i>		Carbonscape New Zealand & UK Bioenergy 2020 p gmbh, Austria
<i>Vortex Centrifuge reactor Ablative</i>		PyTec, Germany

Sumber: Bridgwater, A.V., 2012

Tabel 5. Jenis bahan baku kelapa sawit dengan proses pirolisis

<i>Feedstocks</i>	Temp . (°C)	Berat sampel (gr)	<i>Heating rate</i>	Ukuran partikel	Produk (%)			Tipe reactor	Ref.
					Gas	Bio-oil	Padat		
sludge dari minyak kelapa sawit	550	200	100 °C/min	2.00–3.35 mm	22.7	27.4	49.9	Fixed bed quartz reactor	(Thangalazhy-Gopakumar <i>et al.</i> , 2015)
CKS	500	200	10 °C/min	1.0 to 2.0 mm	17.31	47.43	35.26	Fixed bed	(Abnisa <i>et al.</i> , 2013)
TTKS	500				25.20	45.75	29.05		
SKS	500				26.31	43.87	29.80		
TKKS	500	2	100 °C/min	91-106 µm	35	42	23	fluidized fixed bed	(Sukiran <i>et al.</i> , 2009)

<i>Feedstocks</i>	Temp. (°C)	Berat sampel (gr)	<i>Heating rate</i>	Ukuran partikel	Produk (%)			Tipe reactor	Ref.
					Gas	Bio-oil	Padat		
SKS	450	110	10 °C/ min	-	23.15	26.04	34.82	Pirólisis skala laboratorium	(Khor <i>et al.</i> , 2009)
	500				28.02	22.27	33.10		
	550				31.37	23.45	31.10		
	600				33.14	21.83	30.64		
	650				34.77	20.85	29.15		
	700				35.09	21.45	28.85		
	750				35.85	18.77	28.13		
	800				36.86	22.22	25.89		
TKKS	200	152.9		3-4 cm	81.85	10.92	60.13	<i>Reactor batch</i>	(Ginting <i>et al.</i> , 2015)
	250				75.96	11.59	65.35		
	300				81.90	16.51	54.49		
	350				75.43	14.53	62.94		
	400				78.56	23.80	50.54		
	450				88.38	14.15	50.39		
TKKS	300				42.11	67.89	67.89	<i>Reactor batch</i>	(Mujiarto <i>et al.</i> , 2014)
	400				54.46	45.54	45.54		
	500				72.04	27.96	27.96		
	600				81.78	18.22	18.22		
TKKS	350			250 mesh	51.53		51.53	<i>Reactor batch</i>	(Ristianingsih <i>et al.</i> , 2015)
	400				42.39		42.39		
	450				30.74		30.74		
CKS	500	135					52.02	<i>Tube Furnace Type 21100</i>	(Haji, 2013)
	500						26.03		
TKKS		31					29.59		
TKKS	200	152.9		3-4 cm	81.85	10.92	60.13	<i>Reactor batch</i>	(Ginting <i>et al.</i> , 2015)
	250				75.96	11.59	65.35		
	300				81.90	16.51	54.49		
	350				75.43	14.53	62.94		
	400				78.56	23.80	50.54		
	450				88.38	14.15	50.39		
TKKS	400	2-2.8	10 °C/ min	250-355 µm				stainless steel pyrolyzer	(Abdullah <i>et al.</i> , 2017)
SKS	400	180	10 °C/ min		20.51	34.68	44.81	<i>Batch reactor</i>	(Safana <i>et al.</i> , 2018)
TKKS	500	10	30 °C/ min	125-250 µm	34.8	39.2	26	<i>vertical fixed bed reactor tube</i>	(Azduwin <i>et al.</i> , 2015)
TKKS	500	10	20 °C/ min	250-500 µm	21.79	46.20	32.01	<i>fixed bed reactor</i>	(Mohamed <i>et al.</i> , 2020)

Tabel 5. Lanjutan

<i>Feedstocks</i>	Temp (°C)	Berat sampel (gr)	<i>Heating rate</i>	Ukuran partikel	Produk (%)			Tipe reactor	Ref.
					Gas	Bio-oil	Padat		
TKKS	300	100			22.50	30.03	47.47	<i>microwa ve- induced pyrolysis</i>	(Idris <i>et al.</i> , 2021)
	400				24.46	31.50	44.04		
	450				24.23	33.40	42.38		
	500				26.62	38.26	35.11		
	550				31.99	34.28	33.74		
	600				37.27	32.23	30.51		
TKKS	628	70			27.52	45.29	27.82	<i>fixed bed reactor</i>	(Ferreira <i>et al.</i> , 2020)
TKKS	500	2000		1 – 2 mm	23.33	58.67	18	<i>Auger reactor</i>	(Rasid <i>et al.</i> , 2020)

Catatan: CKS (Cangkang Kelapa Sawit), TKKS (Tandan Kosong Kelapa Sawit), SKS (Serabut Kelapa Sawit)

2.7 Bio-Oil

Bio-oil diproduksi dengan depolimerisasi dan secara bersamaan memecah komponen biomassa selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Bio-oil adalah mikroemulsi, dimana fase kontinyu merupakan larutan encer dari produk dekomposisi selulosa dan hemiselulosa, dan molekul kecil dari dekomposisi lignin. Fase terputus-putus sebagian besar terdiri dari makromolekul lignin pirolitik (Wulandari Y. R., *et al.*, 2020). Bio-oil biasanya mengandung fragmen molekuler dari polimer selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang lolos dari proses pirolisis (Lee H., *et al.*, 2019).

Struktur bio-oil tersusun atas campuran uap organik seperti asam, alkohol, aldehid, eter, ester, keton, furan, fenol, asetaldehid, butanedion, metanol, dan hidrokarbon. Cairan bio-oil terbentuk dari pendinginan yang cepat produk intermediet dari degradasi cepat selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Bio-oil ini berpotensi sebagai bahan bakar atau bahan kimia dalam industri kimia. Bio-oil memerlukan tahap perlakuan tambahan agar sesuai sebagai bahan baku kilang untuk menggantikan minyak mentah yang berasal dari minyak bumi, minyak, atau tar batu bara.

Bio-oil dinilai dapat digunakan sebagai bahan awal pembuatan berbagai bahan kimia atau sebagai bahan bakar nabati generasi kedua. Bio-oil adalah produk

dari pirolisis biomassa yang dapat digunakan untuk digunakan sebagai alternatif pengganti bahan bakar hidrokarbon seperti untuk mesin pembakaran, boiler, mesin diesel statis dan gas turbin yang efektif digunakan sebagai pengganti diesel, bahan bakar minyak berat, bahan bakar minyak ringan dan natural gas untuk berbagai macam boiler, menggantikan bahan bakar minyak bumi setelah dilakukan proses lanjutan peningkatan dan pemurnian yang sesuai (Herng C. Y., 2020).

Pirolisis lignoselulosa yang dilakukan akan memperoleh bio-oil sekitar 75% dan total karbon 66%, hidrogen 6% dan oksigen 27 % (Azadi P., *et al.*, 2013). Jumlah air yang ada dalam bio-oil yang dihasilkan dari pirolisis adalah 60% lebih rendah daripada yang dihasilkan dari pirolisis cepat (Duman, *et al.*, 2011).

2.8 Termogravimetrik Analisis (TGA)

TGA merupakan alat yang laboratorium penting untuk mengetahui karakterisasi material yang digunakan dalam berbagai bidang aplikasi lingkungan, makanan, farmasi, dan petrokimia. Analisis termogravimetri (TGA) telah banyak digunakan untuk mengembangkan model kinetik dekomposisi termal biomassa dalam hal laju kehilangan massa secara keseluruhan. TGA dilakukan untuk memahami karakteristik degradasi, dekomposisi dan stabilitas termal bahan pada berbagai kondisi pada bahan tertentu. Analisis bahan memberikan beberapa informasi dasar tentang stabilitas termal material. Pada prinsipnya dalam analisis TGA terjadi perubahan stabilitas termal yang dianalisa dalam hal persentase penurunan berat badan sebagai fungsi suhu (Iswara P. F., *et al.*, 2014). TGA terhubung dengan kontrol panel seperti furnace serta alat kontrol. Salah satu bagian alat yakni densiti evaluasi komputer yang berfungsi untuk menampilkan grafik perbandingan perubahan massa terhadap temperatur atau waktu yang berada pada operasi area (Gangil S., & Bhargav V. K., 2019). Selama analisis termogravimetri, massa sampel terus direkam selama rentang waktu dan suhu yang telah ditentukan. Hasil dari kurva TG memberikan informasi tentang perubahan komposisi sampel, stabilitas termal, dan parameter kinetik untuk reaksi kimia dari sampe (Ginting S. Agus, *et al.*, 2015). Pada kurva TGA dapat diidentifikasi suatu sampel mengalami pengurangan massa apabila kurva TG menurun sedangkan terjadi penambahan

massa apabila kurva TG naik. Oleh karena itu berdasarkan informasi tersebut, dapat diidentifikasi reaksi yang terjadi pada sampel uji (Gunapria D. K. A., *et al.*, 2016).

2.9 Kromatografi Gas-Spektrometri Massa (GC-MS)

Kromatografi gas-spektrometri massa (GC-MS) adalah metode analisis yang menggabungkan fitur kromatografi gas dan spektrometri massa untuk mengidentifikasi zat yang berbeda dalam sampel uji (Omar R., *et al.*, 2011). GC-MS untuk mendeteksi suatu senyawa yang terdapat dalam produk cairan dan gas hasil pirolisis (Gunapria D. K. A., *et al.*, 2016). Kromatografi gas (GC) merupakan jenis kromatografi yang digunakan dalam kimia organik untuk pemisahan dan analisis. GC dapat digunakan untuk menguji kemurnian dari bahan tertentu, atau memisahkan berbagai komponen dari campuran. Dalam beberapa situasi, GC dapat membantu dalam mengidentifikasi sebuah senyawa kompleks (Ridhuan Kemas, *et al.*, 2019). Kromatografi gas dilakukan dengan cara kolom fase diam akan menahan komponen-komponen secara selektif berdasarkan koefisien distribusinya dan akan dialirkan ke detektor yang memberi sinyal untuk kemudian dapat diamati pada sistem pembaca (Iswara P. F., *et al.*, 2014). Spektrometer massa diperlukan untuk identifikasi senyawa sebagai penentu bobot molekul dan penentuan rumus molekul. Prinsip dari MS adalah pengionan senyawa-senyawa kimia untuk menghasilkan molekul bermuatan atau fragmen molekul dan mengukur rasio massa/muatan. Molekul yang telah terionisasi akibat penembakan elektron berenergi tinggi tersebut akan menghasilkan ion dengan muatan positif, kemudian ion tersebut diarahkan menuju medan magnet dengan kecepatan tinggi. Medan magnet atau medan listrik akan membelokkan ion tersebut agar dapat menentukan bobot molekulnya dan bobot molekul semua fragmen yang dihasilkan (Gunapria D. K. A., *et al.*, 2016).