

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Rawa Pening

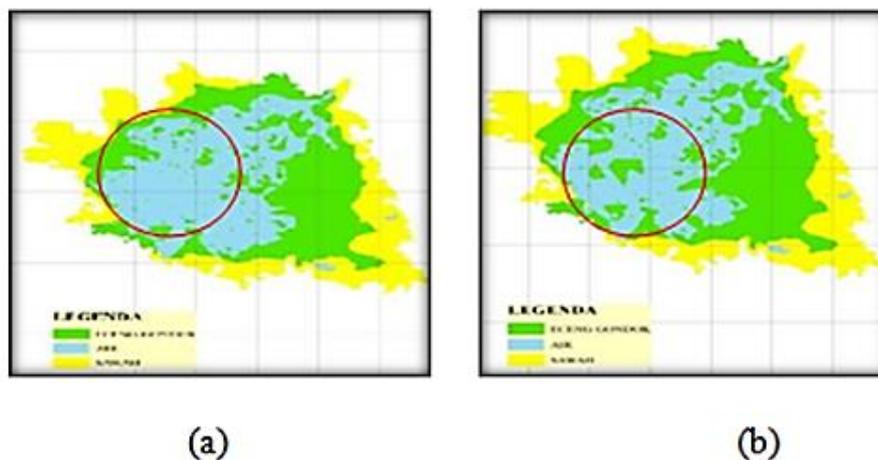
Rawa Pening merupakan salah satu danau di Kabupaten Semarang, Provinsi Jawa Tengah, dengan luas 2.670 hektare. Rawa Pening berada 32 km dari kota Semarang dan pada bagian selatan kota Salatiga sejauh 10 km. Rawa Pening berada di lereng Gunung Telomoyo, Gunung Merbabu, dan Gunung Ungaran. Danau Rawa Pening berada di antara 4 kecamatan: Ambarawa, Banyubiru, Tuntang, dan Bawen. Rawa Pening terletak pada koordinat  $110^{\circ}24'46''$ - $110^{\circ}49'06''$  BT dan  $7^{\circ}04'00''$ - $7^{\circ}30'00''$  LS berada di atas permukaan air laut pada ketinggian sekitar 450 – 470 meter (Indrayati & Hikmah, 2018).

Rawa Pening memiliki nilai historis, nilai ekologis, dan nilai ekonomis yang tinggi. Secara historis, ia mempunyai peranan penting dalam munculnya sejarah kearifan lokal di tanah Jawa. Secara ekologis, Rawa Pening adalah danau semi alami yang terletak 45 km sebelah selatan Semarang dan kurang lebih 9 km timur laut Salatiga. Danau ini merupakan inlet bagi 16 sungai yang terletak di 9 sub-sub DAS. Rawa Pening terbentuk secara alami melalui proses letusan vulkanik yang kemudian mengalirkan lava basalt dan menutup aliran di Kali Pening, Tuntang. Letusan vulkanik mengakibatkan lembah di Kali Pening menjadi reservoir genangan air yang sangat penting bagi sistem ekologi. Rawa Pening kemudian berubah menjadi danau semi alami sejak pembangunan pertama dan dikembangkan di hulu Sungai Tuntang (Wulandari *et al.*, 2019).

Secara ekonomis, Rawa Pening mempunyai peranan sangat tinggi bagi masyarakat sekitar. Keberadaannya dimanfaatkan secara ekonomi untuk irigasi,

pertanian, perikanan, pembangkit listrik tenaga air, dan pariwisata. Penggunaan air untuk lahan dibagi dalam beberapa bagian: tegalan (35%), persawahan (18,3%), permukiman (13,8%), lahan terbuka (11,6%), perkebunan (8%), kebun campur (7,8%), rawa/danau (4,5%), dan penggunaan lahan lainnya (1%). Namun saat ini kondisinya telah mengalami banyak perubahan karena kurang lebih 120 ha wilayahnya tertutup oleh eceng gondok (*Eichornia crassipes*). Persentase penutupan permukaan oleh tumbuhan air makin meningkat, bahkan pada musim kemarau bisa mencapai 70% (Agatha Piranti *et al.*, 2019).

Permukaan air yang tertutup oleh eceng gondok bisa makin meluas apabila tidak dikendalikan. Pertumbuhan eceng gondok yang tidak terkendali ini dapat menyebabkan munculnya pulau terapung akibat pendangkalan. Rawa Pening mengalami pendangkalan akibat terperangkapnya sedimen di akar tanaman dan terakumulasinya seresah eceng gondok di dasar perairan (Soeprbowati & Suedy, 2010; Prasetyo *et al.*, 2021). Terlihat perbedaan yang nyata pada Rawa Pening yang dikendalikan dan yang tidak, sebagaimana pada Gambar 2.1. Pada Gambar 2.1a, terlihat badan air Rawa pening yang lebih luas karena eceng gondok dikelola dengan baik (Indrayati & Hikmah 2018).



Gambar 2.1. Kondisi Rawa Pening dikendalikan (a) dan tidak (b)

Sedimentasi di Rawa Pening telah mencapai 270-880 kilogram per hari atau sekitar 780 ton per tahun. Akibat sedimentasi Rawa Pening yang tinggi, volume air menjadi berkurang sekitar 30 persen. Penyebab sedimentasi yang tinggi ini adalah eceng gondok yang telah menutup 70 persen bagian permukaan perairan. Permukaan air yang tertutup eceng gondok diprediksi sebagiannya akan menjadi daratan pada tahun 2021. Kondisi Rawa Pening ini menggambarkan kondisi danau hampir di seluruh Indonesia. Kondisi danau tersebut harus diwaspadai dan memerlukan upaya penyelamatan dengan prioritas utama tentang keberadaan eceng gondok (Nontji, 2016).

## 2.2 Eceng Gondok

Eceng gondok menjadi permasalahan yang serius untuk segera ditangani. Gambar 2.2 adalah gambaran eceng gondok yang menutup badan air di Rawa Pening. Eceng gondok adalah tumbuhan yang mengapung dipermukaan air dan dapat tumbuh dengan sangat cepat sekitar 3% per hari. Cepatnya pertumbuhan eceng gondok menyebabkan berbagai permasalahan, di antaranya mengganggu pada sektor transportasi, menyebabkan sungai menjadi sempit, dan menutupi permukaan sungai. Pertumbuhannya sangat cepat, dalam 10 hari sudah terjadi penggandaan (Hidayah *et al.*, 2014; Prasetyo *et al.*, 2021).

Penanganan yang serius untuk memberantas baik secara biologik, kimiawi, dan mekanik di beberapa negara, termasuk Indonesia, belum memberikan hasil yang maksimal. Hasil dari penanganan yang belum maksimal mengakibatkan berbagai masalah, salah satunya banjir.



Gambar 2.2. Eceng gondok di Rawa Pening

Banjir merupakan masalah banyak yang dikeluhkan oleh masyarakat. Masyarakat sekitar Rawa Pening, menganggap eceng gondok mampu memberikan nilai tambah ekonomi, walaupun hasil yang diperoleh masih sangat minim jika dibandingkan dengan tenaga yang harus dikeluarkan saat panen. Pemanen eceng gondok menyampaikan bahwa, 15-20 tahun yang lalu, ikan di Rawa Pening merupakan mata pencaharian mereka sehari-hari. Masyarakat Rawa Pening merasakan jika jumlah ikan makin berkurang sehingga para nelayan danau/rawa beralih profesi menjadi pemanen eceng gondok. Pemanen eceng gondok mendapat penghasilan maksimal sekitar Rp. 50.000,- (lima puluh ribu rupiah) sampai Rp. 70.000 (tujuh puluh ribu) per hari. Tidak memungkinkan bagi mereka untuk melampaui Rp 70.000 karena kelelahan. Medan untuk panen eceng gondok berbahaya sehingga diperlukan tenaga yang kuat dan pembiasaan. Pemanen eceng gondok yang masih bertahan sampai saat ini umumnya berusia tua dan sudah lama berprofesi sebagai nelayan. pencari ikan, atau pemanen eceng gondok. Walaupun eceng gondok tersedia sangat banyak, pemuda sekitar tidak tertarik berprofesi sebagai pemanen eceng gondok.

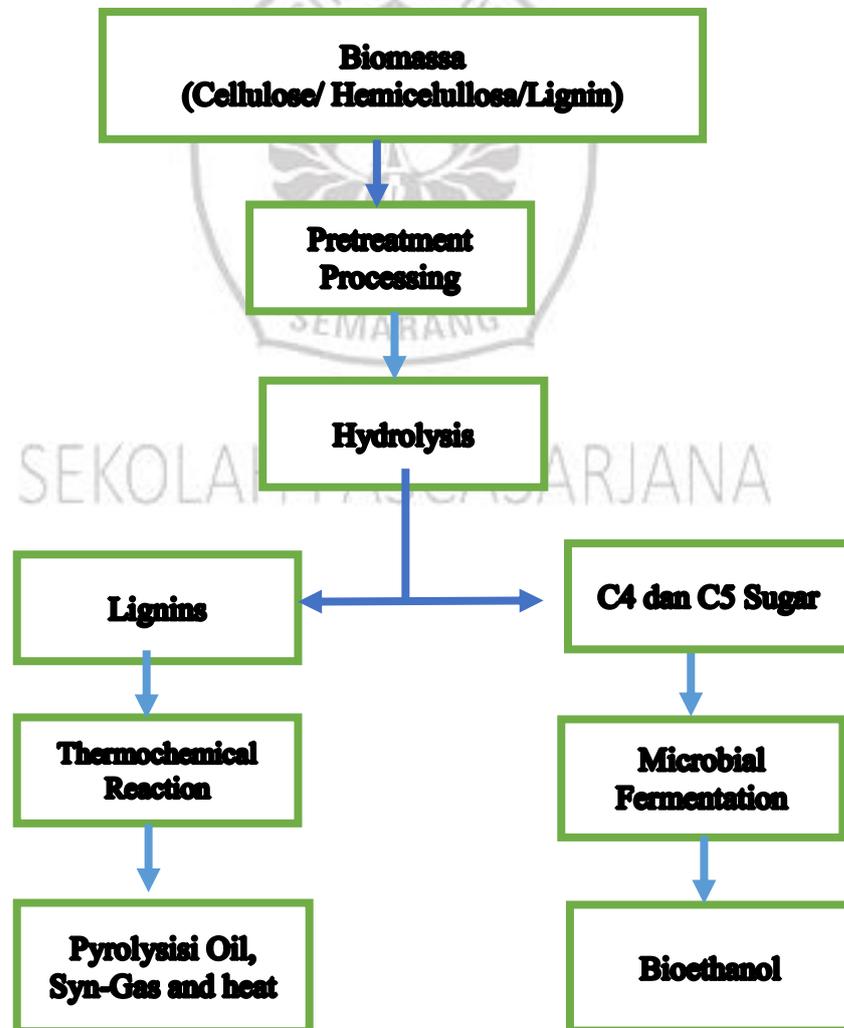
Sangat banyak eceng gondok di Rawa Pening. Pemerintah dan masyarakat berupaya untuk menangani permasalahan eceng gondok di Rawa Pening. Soeprbowati (2012) menyampaikan beberapa usulan, yang pertama adalah melakukan panen secara serentak dan massal. Usulan kedua adalah menyisakan 20 % demi kestabilan ekosistem, dan yang ketiga, membuat kolam inlet sungai ke danau.

Kolam inlet berfungsi untuk menampung air sungai yang mengandung fosfat dan nitrogen tinggi sebelum masuk Rawa Pening. Kolam inlet dibuat dengan tujuan untuk menurunkan konsentrasi nutrisi sehingga pertumbuhan eceng gondok dapat ditekan. Eceng gondok yang telah dipanen massal juga harus segera dicarikan jalan keluar untuk proses selanjutnya supaya memberikan manfaat. Membuat eceng gondok menjadi asap cair dengan metode pirolisis adalah salah satu upaya untuk memanfaatkannya.

Potensi eceng gondok menjadi asap cair dalam bentuk bioenergi sudah diteliti. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa eceng gondok dapat diolah menjadi biofuel untuk energi alternatif di abad 21. Eceng gondok segar mengandung 95,5% air, 3,5% bahan organik, 1,0% abu, 0,06%  $P_2O_5$ , 0,04% N, dan 0,20%  $K_2O$ . Dari basis kadar air, ia mengandung 75,8% bahan organik, 1,5% N, dan 24,2% abu. Kandungan abu sebanyak 24,2% tersebut mengandung protein, yang tersusun dari 7,2 g leusin, 5,34 g lisin, 4,72 g fenilalanin, 4,32 g treonin, 4,32 g isoleusin, 0,72 g metionin, dan 0,27 g valin (Bhattacharya & Kumar, 2010; Sagar & Kumari, 2013).

Eceng gondok mengandung lignin sebanyak 10%, selulosa 20%, dan hemiselulosa 33%. Eceng gondok tumbuh dengan sangat cepat dan mengandung

kandungan nitrogen tinggi. Karena kandungan nitrogen yang tinggi, biomassa ini juga dapat digunakan untuk menghasilkan biogas dan produk sampingan berupa pupuk organik. Kandungan nitrogen pada eceng gondok yang cukup tinggi ini diharapkan dapat diolah menjadi asap cair dengan metode pirolisis untuk mendapatkan hasil yang lebih besar. Potensi besar lainnya dari eceng gondok adalah kandungan lignin. Eceng gondok berpotensi menjadi pirolisis oil berupa asap cair karena lignin yang dimilikinya. Gambar 2.3 menunjukkan bahwa lignin yang mengalami reaksi termokimia akan menghasilkan asap cair.



Gambar 2.3. Diagram alur pembuatan asap cair (Bhattacharya dan Kumar, 2010)

## 2.3 Pirolisis

Pirolisis adalah destruksi panas suatu biomassa di dalam reaktor hampa udara. Proses pirolisis biasanya berlangsung pada suhu 200-700°C, dan menghasilkan gas-gas yang tak terembunkan, tar, dan asap cair. Gas yang tidak terembunkan adalah CO, CH<sub>4</sub>, dan H<sub>2</sub> (Wijayanti & Tanoue, 2013; Wijayanti, 2014). Hasil pirolisis adalah berupa produk cair yang disebut dengan istilah seperti asap cair, distilat kayu, cairan kayu, minyak kayu, minyak pirolisis, bio-minyak, minyak bio-mentah, minyak *bio-fuel*, *tarpyroligneous*, asam *pyroligneous*, dan *bio-oil*. *Bio-oil* dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam boiler, mesin diesel, atau turbin gas untuk panas dan listrik generator (Balat et al., 2009).

Pirolisis merupakan proses pemanasan suatu zat tanpa adanya oksigen sehingga terjadi penguraian komponen-komponen senyawa kimia. Proses pirolisis terhadap selulosa, hemiselulosa, dan lignin menghasilkan asap cair dengan ciri-ciri bau yang khas menyengat, warna dari kuning kecoklatan sampai hitam, dan mempunyai daya hambat terhadap bakteri yang kuat karena mengandung senyawa asam karboksilat. Suhu dan waktu pirolisis akan menghasilkan senyawa aktif dan volume yang bervariasi. Berdasarkan hukum kimia fisika, apabila suhu dan tekanan dirubah maka volume akan berubah. Proses pirolisis dilakukan dengan memasukkan sejumlah biomassa ke dalam reaktor pirolisis dan memanaskannya dalam kondisi kedap udara pada suhu dan waktu tertentu. Asap akan mengalir melalui pipa penyalur asap menuju pipa kondensor selama pemanasan berlangsung sehingga dihasilkan cairan asap (Fauziati et al., 2018; Archana et al., 2020).

Jika dibandingkan dengan proses daur ulang pada umumnya, pirolisis relatif mudah dan fleksibel secara operasional serta tidak memerlukan proses penyortiran.

Penelitian pirolisis ban bekas telah dilakukan oleh Hu *et al.* (2020). Pirolisis satu langkah terhadap ban bekas menghasilkan rendemen minyak tertinggi (45,3 wt%) pada 500 °C, sedangkan minyak berkualitas tinggi dengan rendah kandungan bromin dapat diperoleh dengan pirolisis dua langkah. Pirolisis dan langkah-langkah reformasi katalitik menghadirkan produk khusus sebagai pengganti minyak cair dari pirolisis plastik (Alvarez *et al.*, 2019)

Eceng gondok merupakan salah satu biomassa yang dapat dikonversi menjadi asap cair melalui proses pirolisis. Pirolisis eceng gondok untuk bioetanol dan biogas dilakukan dalam upaya pencarian alternatif bahan bakar fosil. (Bhattacharya & Kumar, 2010; Puspitasari *et al.*, 2016). Skema proses pirolisis terlihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Skema proses pirolisis

Biomassa adalah sumber daya terbarukan yang pengelolaannya telah mendapatkan perhatian karena ramah lingkungan. Biomassa mengandung sulfur, nitrogen, dan abu sehingga akan memberikan emisi rendah sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>),

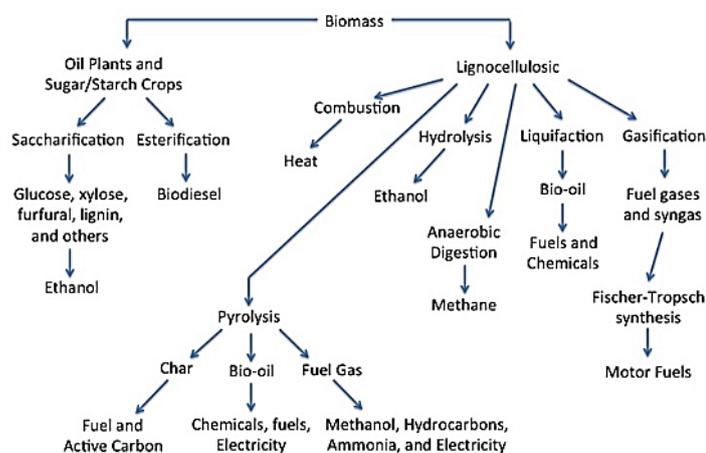
nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), dan karbon lebih kecil jika digunakan sebagai bahan bakar dibandingkan bahan bakar fosil konvensional. Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) kecil dapat dicapai karena CO<sub>2</sub> dari biomassa akan didaur ulang ke dalam tanaman dalam proses fotosintesis secara kuantitatif.

Bahan baku pembuatan asap cair yang sudah banyak diteliti adalah tempurung kelapa, tandan kelapa sawit, sekam padi, dan serbuk gergaji kayu. Karakteristik bahan baku asap cair adalah biomassa yang mengandung hemiselulosa, selulosa, dan lignin. Suhu pirolisis memengaruhi proses destruksi. Pada suhu 100°C, kelembaban biomassa mulai menguap. Dekomposisi hemiselulosa terjadi pada suhu 200-260°C, diikuti oleh dekomposisi selulosa pada suhu 240-340°C, dan dekomposisi lignin pada suhu 280-500°C. Ketika suhu mencapai 500°C, reaksi pirolisis hampir selesai (Yokayama & Matsumura, 2008). Proses pirolisis kayu akan mengalami pemanasan yang tidak sempurna. Pemanasan yang tidak sempurna akan menghasilkan berbagai senyawa asam, fenol, karbonil, furan, hidrokarbon, lakton, alkohol, polisiklik aromatik berupa asap. Asap adalah sistem kompleks yang terdiri dari medium gas sebagai pendispersi dan cairannya terdispersi. Reaksi pirolisis adalah proses dekomposisi polimer menjadi senyawa organik dengan berat molekul rendah. Reaksi tersebut terjadi karena pengaruh panas yang menyebabkan reaksi oksidasi, depolimerisasi, dan kondensasi. Asap hasil pirolisis akan terkondensasi menjadi cairan yang disebut asap cair dari proses pirolisis (Sunarsih *et al.*, 2012).

Pirolisis terhadap limbah kayu yang sudah mengandung bahan sintetis, poliuretan, dan vernis poliester diteliti potensinya untuk dikonversi menjadi bahan bakar cair terbarukan. Komposisi produk ternyata dipengaruhi oleh jenis kayu

vernisi. Cairan hasil pirolisis dinamakan asap cair, bio-minyak, atau *bio-oil*. Hasil asap cair maksimum sebesar 46,7% diperoleh dari pirolisis limbah kayu yang mengandung vernis poliester pada suhu pirolisis akhir 500°C. Asap cair dari limbah kayu yang mengandung vernis terdiri dari fenol, aldehida, asam, keton, alkohol, benzen, dan senyawa yang mengandung unsur Nitrogen. Fenol menyumbang jumlah senyawa terbesar dalam asap cair. Asap cair yang dihasilkan dari limbah kayu yang telah dipernis bisa menjadi pengganti yang potensial untuk bahan bakar dan bahan kimia yang lebih ramah lingkungan (Özbay et al., 2017). Teknologi konversi biomassa menjadi asap cair dapat dilihat pada skema pada Gambar 2.5. Biomassa yang mengandung *lignoselulosa* apabila mengalami proses pirolisis akan berubah menjadi *char*, asap cair, dan *fuel gas* (Dickerson & Soria 2013).

Penelitian mengenai proses pirolisis dari biomassa sampah organik padat juga berhasil dilakukan. Asap cair yang dihasilkan berwarna cokelat kemerahan dengan kisaran pH 3,8-4,8, rendemen 32,87- 34,67 %, dan total fenol berkisar  $6,15 \times 10^{-3}$ - $2,24 \times 10^{-2}$ %. Apabila suhu pirolisis makin tinggi, kadar total fenolnya makin tinggi juga. Kadar fenol optimum tercapai pada suhu 505°C. Uji komponen asap cair menggunakan GCMS mengidentifikasi sebanyak 61 senyawa (Haji et al., 2007).



Gambar 2.5. Teknologi konversi biomassa (Dickerson and Soria, 2013)

Pirolisis limbah kayu dan bambu juga telah diteliti. Penelitian dioperasikan pada suhu 110-500 °C. Pirolisis pada suhu tersebut menghasilkan asap cair, arang, dan tar. Rendemen terbaik limbah kayu bambu adalah 62,89%, limbah kayu pinus 58,33%, dan limbah kayu jati 55,20%. Kadar asam tertinggi yang diperoleh secara berurutan adalah kayu bambu 23,02%, kayu jati 18,58%, dan kayu sengon 17,58%. Total fenol tertinggi adalah 205,711 mg/L dari limbah kayu bambu. Persentase komponen kimia terbesar diperoleh limbah kayu pinus dengan 2 *propanon* (CAS) *aseton* 35,06% dan asam asetat 31,65% (Wijaya *et al.*, 2008).

Pirolisis limbah kayu pinus juga telah diteliti oleh Ozbay dan Ayrilmis (2017). Hasil pirolisis kayu pinus terbaik ketika diberi perlakuan panas 500°C pada kondisi vakum. Hasil analisis *FTIR* (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) menunjukkan bahwa asap cair yang diperoleh dari limbah kayu pinus dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif dan bahan baku kimia. Bahan baku kimia yang dimaksud adalah kandungan karbonil, fenol dan asam asetat yang dapat dimanfaatkan sebagai pemberi aroma, warna, rasa, antioksidan, dan antimikroba pada berbagai produk. Produk asap cair sangat dipengaruhi oleh proses pirolisis.

Asap cair dari proses pirolisis dipengaruhi katalis, jenis reaktor, dan variabel proses. Proses pirolisis ada berbagai macam. Ada yang menggunakan katalis dan ada yang tidak. Penelitian yang pernah dilakukan dengan katalisator NiMo/NZA akan meningkatkan aktivitas katalitiknya sehingga akan meningkatkan *yield* asap cair. Penelitian serupa juga menemukan bahwa pengembunan logam dalam zeolit akan meningkatkan aktivitas katalitiknya dan *yield* asap cair yang dihasilkan belum tentu dapat meningkat. Namun jika rasio katalisator Ni/NZA terhadap biomassa dinaikkan

maka *yield* asap cairnya juga akan makin meningkat (Saputra *et al.*, 2015; Yanti *et al.*, 2015).

Reaktor pirolisis adalah wadah fisik tempat reaksi dijalankan. Pirolisis adalah prekursor pemanasan dan juga gasifikasi atau pemanasan parsial. Oleh karena itu, reaktor yang sama digunakan untuk gasifikasi sering digunakan untuk pirolisis. Reaktor pirolisis ada beberapa jenis, di antaranya *bubbling fluidized bed pyrolyzers*, *circulating fluidized bed pyrolyzers*, *rotating plate pyrolysis reactors*, dan *rotating cone pyrolysis reactor*. Reaktor mempunyai kelebihan dan kelemahan masing-masing (Sadaka & Boateng, 2017). Proses pirolisis dipengaruhi juga oleh variabel proses atas produk yang dihasilkan.

## **2.4 Faktor yang berpengaruh terhadap pirolisis**

Proses pirolisis dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor penting dalam pirolisis diantaranya adalah pengaruh waktu, suhu, dan kadar air. Penelitian oleh Akbar *et al.* (2013) mengungkapkan bahwa kualitas asap cair sangat dipengaruhi oleh variabel waktu dan suhu. Penelitian ini menghasilkan asap cair yang memiliki kadar fenol sebesar 0,057 mg/ml, kadar *asam* 36 mg/ml, dan pH 2,09. Asap cair dari limbah kayu pelawan ini paling efektif ketika dioperasikan pada suhu 150°C dan waktu 20 menit. Penelitian mengenai pengaruh suhu dan waktu pada pembuatan asap cair dari cangkang buah karet juga telah dilakukan. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa hasil asap cair terbaik pada suhu 200 °C dan waktu 2 jam (Fadillah & Alfiarty, 2015)

Pirolisis dipengaruhi variabel suhu dan waktu. Sulhatun *et al.* (2019) melaporkan pirolisis kulit kemiri mendapat hasil optimal pada suhu 450 °C dan 3,5 jam. Pirolisis kulit kemiri, sekam zaetun, sekan beech, dan serbuk kayu cemara

menjadi asap cair telah diteliti. Sekam zaetun mendapatkan hasil optimal pada suhu 327-627°C dengan perolehan sebesar 48,8% (Demirbas, 2007). Asap cair dari serbuk pelepah kelapa sawit menghasilkan rendemen tertinggi pada suhu pirolisis 250 °C selama 30 menit sebesar 20,69% (Maulina dan Putri, 2017).

Selain suhu dan waktu, kadar air bahan baku pembuatan asap cair juga merupakan variabel yang berpengaruh. Sunarsih *et al.* (2012) melaporkan bahwa variabel kadar air pada serat aren berpengaruh terhadap kerapatan asap cair dan volume yang dihasilkan. Kadar air yang tinggi akan menyebabkan kerapatan menurun, namun akan meningkatkan volume asap cair yang dihasilkan. Hasil analisis produk asap cair menggunakan GCMS menunjukkan bahwa suhu pirolisis yang tinggi akan menyebabkan komponen zat penyusun asap cair bertambah banyak.

## 2.5 Asap Cair

Asap cair merupakan produk atas dari pirolisis biomassa setelah melewati kondensasi. Hasil pirolisis biomassa mengandung senyawa asam, fenol, dan karbonil. Senyawa kimia asap cair tersebut merupakan hasil degradasi panas atas lignin, selulosa, dan hemiselulosa. Senyawa asam, fenol, dan karbonil dalam asap cair memiliki kontribusi dalam memberikan aroma, warna, rasa, antioksidan, dan antimikroba. Kandungan antimikroba dan antioksidan inilah yang memungkinkan asap cair dapat berperan sebagai bahan pengawet (Mardyaningsih *et al.*, 2016).

Asap cair dihasilkan dari dekomposisi termal lignin berupa fenol dan *eter fenolik* yang berperan memberikan aroma, aktivitas antioksidan, serta mengawetkan makanan. Aroma dihasilkan dari senyawa *syringol* (1,6-dimetoksi fenol), *guaikol* (2-metoksi fenol), dan derivatnya (Widiastuti *et al.*, 2019).

Dekomposisi lignin pada kisaran suhu 100-900°C akan menghasilkan fenol. Senyawa-senyawa fenol pada asap cair umumnya berupa hidrokarbon aromatik yang tersusun dari cincin benzena dengan sejumlah gugus hidroksil terikat. Senyawa fenolik ini dapat mengikat gugus-gugus lain diantaranya asam, keton, *aldehid*, dan ester (Kresnawaty *et al.*, 2017).

Pirolisis selulosa akan menghasilkan asam asetat dan karbonil yang terdiri dari *asetaldehida*, glikol, dan *akreolin*. Senyawa asam dalam asap cair dapat memengaruhi pH, umur simpan, citarasa, dan kandungan bakteri. Senyawa asam pada asap cair berupa asam butirat, asam valerat, asam propionat, dan asam asetat. Selulosa menyumbang peranan pada pewarnaan dan rasa produk. Pirolisis selulosa menghasilkan senyawa yang dapat bereaksi dengan protein sehingga memberikan efek warna cokelat. Warna yang dihasilkan dari asap cair mengakibatkan produk ikan/daging yang dihasilkan makin menarik karena mempunyai aroma yang unik seperti karamel. Senyawa karbonil pada asap cair di antaranya adalah *siringaldehida* dan *vanilin* (Suyitno *et al.*, 2009).

Pirolisis hemiselulosa akan menghasilkan *furan*, *furfural*, dan turunannya serta asam karboksilat. Proses dekomposisi lignin, selulosa, dan hemiselulosa sangat dipengaruhi oleh suhu. Dekomposisi hemiselulosa terjadi pada kisaran suhu 200-250°C. Jenis kayu juga menjadi faktor yang berpengaruh dalam pembuatan asap cair. Penelitian mengenai asap cair menggunakan dua jenis kayu, kayu keras dan kayu lunak. Kayu keras memiliki kadar lignin tinggi dan menghasilkan asap cair dengan kadar fenol yang juga tinggi. Kadar fenol tinggi dilaporkan atas pirolisis tempurung kelapa yang termasuk jenis kayu keras. Tempurung kelapa memiliki kadar lignin lebih tinggi dibandingkan dengan kadar lignin dari kayu sengon. Kayu

sengon, seperti yang dilaporkan oleh A'yuni *et al.* (2017), merupakan jenis kayu lunak. Kayu sengon memiliki kadar lignin sebesar 26,8%, sedangkan tempurung kelapa 46,29%. Kadar lignin, selulosa dan hemiselulosa pada tempurung kelapa juga berbeda tergantung jenis dan varietas tempurung kelapa, kelembaban, tanah, sumber kayu, dan umur tempurung kelapa.

Komposisi tempurung kelapa, seperti yang dilaporkan oleh Hartati *et al.* (2015), mengandung lignin 28,86%, selulosa 27,43%, dan hemiselulosa 27,08%. Komposisi kimia pada tempurung kelapa yang lain sedikit berbeda dengan kandungan lignin sebesar 23,84%, selulosa 33,61% dan hemiselulosa sekitar 29,27%. Komposisi kimia bahan baku berhubungan dengan komposisi kimia asap cair. Asap cair dari tempurung kelapa sudah banyak diteliti, pemanfaatannya juga sudah banyak dikaji. Pemanfaatan asap cair pada produk ikan dan daging wajib dimurnikan untuk memisahkan kandungan asam, fenol dan karbonilnya dari tar (Kadir *et al.*, 2010).

Asap cair sebagai produk antara untuk makanan perlu mendapatkan pemurnian terlebih dahulu. Kemurnian asap cair ditunjukkan dengan kandungan senyawa kimia dari analisis komposisi. Analisis kualitas ditunjukkan dengan senyawa asam, fenol, dan karbonil. Asap cair mengandung asam, fenol dan karbonil sebagai pengawet yang lebih aman untuk menggantikan pengawet makanan yang berbahaya. Asap cair dari tandan kosong sawit dijalankan secara pirolisis dan dilanjutkan dengan proses distilasi. Pirolisis tandan kosong sawit menghasilkan asap cair *grade 2* dan *grade 3*. Asap cair *grade 2* adalah asap cair yang telah didistilasi, sedangkan *grade 3* yang belum didistilasi. Asap cair *grade 3* masih mengandung tar yang merupakan senyawa yang berbahaya bagi kesehatan sehingga

tidak dapat digunakan untuk mengawetkan makanan. Asap cair *grade* 1 diperoleh setelah dilakukan distilasi berulang (Lestari *et al.*, 2015).

## 2.6 Manfaat Asap cair

Asap cair dimanfaatkan pada berbagai peruntukan, baik pangan maupun non pangan. Berikut adalah penggunaan asap cair bagi produk non pangan: menggumpalkan lateks, mencegah timbulnya bau, mencegah tumbuhnya jamur, sebagai koagulan pada pengolahan karet mentah, mengawetkan kayu, meningkatkan pertumbuhan tanaman, pembunuh serangga, bahan bakar cair, penyembuhan luka bakar, dan disinfektan alat klinik gigi (Kasim *et al.*, 2015; Erlytasari *et al.*, 2019; Permatasari *et al.*, 2019).

Asap cair sebagai koagulan dihasilkan dari tandan kosong kelapa sawit yang dipirolisis selama 8 jam pada suhu 400°C. Pada suhu dan waktu tersebut, diperoleh asap cair yang mengandung fenol 5% dan asam asetat 0,454%. Kandungan fenol dan asam yang diperoleh berhasil menjadi koagulan pada pengolahan karet mentah dengan hasil yang lebih bagus dibandingkan dengan penambahan asam format maupun air aki (Asmawit *et al.*, 2011). Asap cair bermanfaat untuk mengawetkan karet dan kayu. Asap cair dari tongkol jagung terbukti memiliki nilai rendemen tertinggi sebesar 48% dan senyawa fenol serta senyawa asam asetatnya 6,73% dan 84,45% sehingga efektif untuk mengawetkan kayu (Yuniningsih & Anggraini, 2013).

Asap cair bermanfaat bagi pertanian. Asap cair tandan kosong kelapa sawit mampu meningkatkan pertumbuhan bibit kakao menjadi lebih baik pada parameter tinggi bibit dan lingkaran batang (Yuningsih *et al.*, 2015). Asap cair

bermanfaat juga untuk membunuh serangga atau sebagai insektisida. Penelitian skala laboratorium membuktikan bahwa asap cair *grade 2* dari tempurung kelapa asli sangat beracun terhadap wereng cokelat (*Nilaparvata lugens*) dan bersifat *fitotoksik* pada tanaman padi (Wagiman *et al.*, 2014).

Asap cair juga dapat digunakan sebagai bahan bakar cair. Surest *et al.* (2013) melaporkan bahwa kayu akasia (*Acacia mangium mill*) yang dipirolisis pada suhu 400°C dan waktu pengambilan sampel 90 menit berpotensi menjadi bahan bakar cair. Penelitian membuktikan bahwa asap cair tersebut bisa terbakar, namun diperlukan proses lebih lanjut. Penelitian membuktikan perpaduan biodiesel dari asap cair dari kulit dan tempurung kelapa dengan Mesin 6.5 HP mampu menjalankan mesin diesel dengan performa yang tidak jauh berbeda, lebih jernih, tidak berbau, dan lebih ringan kecepatan mesinnya (Novita *et al.*, 2014).

Asap cair juga dapat dimanfaatkan untuk pengobatan. Telah dilakukan penelitian untuk mengevaluasi aktivitas penyembuhan luka bakar asap cair tempurung kelapa dalam model hewan yang mengalami luka bakar dan menunjukkan korelasi positif antara jumlah *fibroblas* dan kontraksi luka (Tarawan *et al.*, 2017). Asap cair kayu manis yang telah dimurnikan diuji toksisitasnya dan menunjukkan bahwa perbedaan dalam cara menyediakan pemurnian mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap persentase kematian larva udang. Perbedaan konsentrasi dan kombinasi pemurnian asap cair untuk pengobatan memberikan persentase kematian yang signifikan (Budaraga *et al.*, 2016).

Asap cair yang dapat digunakan untuk produk pangan adalah asap cair yang telah didistilasi berulang dan dimurnikan menggunakan adsorben zeolit atau karbon aktif. Hasil asap cair yang telah didistilasi kemudian dianalisis menggunakan

GCMS. Analisis asap cair dengan GCMS umumnya memiliki 9-19 senyawa dari golongan fenol, asam dan karbonil dan berfungsi sebagai pengawet. Asap cair memiliki sifat bakteriostatik dengan nilai KHM (Kadar Hambat Minimum) sebesar 6%. Pemanfaatan asap cair pada produk pangan di antaranya adalah sebagai anti bakteri pada pengawet tahu, belut, olahan steak, tahu dan bakso, ikan tuna, ikan pindang, ikan gabus, dan ikan tongkol (Utomo *et al.*, 2009; Ketut & Kencana, 2020)

Penggunaan asap cair untuk produk pangan telah banyak diterapkan untuk meningkatkan umur simpan. Penelitian oleh Ginayati *et al.* (2015) telah berhasil mengawetkan tahu menggunakan asap cair. Pirolisis asap cair dilakukan pada suhu 300-380°C dengan konsentrasi antara 0,5-6%. Asap cair melewati pemurnian dua tahap. Tahu yang telah melalui proses pengawetan diuji secara *organoleptik* dan *Total Volatile Base (TVB)*. Dari uji secara *organoleptik*, 90% responden menyukai aroma tekstur, dan rasa tahu. Hasil uji TVB menunjukkan bahwa umur simpan tahu bertahan selama 56 jam dibandingkan dengan tahu yang tidak diawetkan dengan asap cair yang hanya bertahan 16 jam.

Manfaat asap cair dari serbuk kayu untuk pengasapan ikan, belut, dan olahan steak ikan diteliti oleh Ayudiarti & Sari (2010) dan menghasilkan produk ikan dan olahan ikan asap. Produk ikan asap memiliki kualitas yang lebih baik dalam hal rasa, aroma, dan warna. Pengasapan ikan dan olahannya juga bisa meminimalisir limbah dan mengurangi polusi. Pengawetan tahu dan bakso menggunakan kombinasi asap cair dan kitosan juga dilaporkan hasilnya, bahwa pada konsentrasi 1,5% dan 2,5% mampu memperpanjang umur tahu dan bakso selama tiga hari (Purba *et al.*, 2014).

Penelitian untuk mengetahui aktivitas antioksidan dan antimikrobia asap cair nanocapsul dari tempurung kelapa menggunakan chitosan dan *maltodextrin* sebagai enkapsulan dan penerapannya pada preservasi ikan tuna telah dilakukan oleh Saloko *et al.* (2014). Hasil penyelidikan menunjukkan bahwa asap cair nanocapsul terbukti efektif sebagai antioksidan pada ikan tuna. Hal tersebut menyebabkan teknologi nanoenkapsulasi cukup menjanjikan untuk aplikasi makanan.

Asap cair diaplikasikan pada makanan sebagai pengawet ikan pindang. Perlakuan penambahan asap cair pada pindang variasi konsentrasi 1%, 2%, dan 3% dengan masa simpan 3-7 hari memperoleh kandungan mikroba (TPC) sekitar  $3,1 \cdot 10^4$  -  $9,3 \cdot 10^4$  Cfugr. Hasil penelitian tersebut masih dalam batas yang sesuai persyaratan SNI-01-2717-1992, bahwa mutu ikan pindang secara mikrobiologi dengan TPC pergram maksimal sebesar  $1 \cdot 10^5$  Cfugr (Widawati & Budiyanto, 2014; Desvita *et al.*, 2020).

Sei ikan juga dapat diawetkan menggunakan asap cair. Ikan menjadi awet dikarenakan menyerap zat-zat komponen asap seperti asam-asam organik, fenol, dan *aldehid* lainnya yang merupakan zat-zat pengawet karena senyawa tersebut bersifat racun bagi bakteri. Racun yang dihasilkan berfungsi untuk mencegah dan mengontrol pertumbuhan mikrobia dari kerja sinergi kombinasi antara kandungan asam organik yang cukup tinggi dengan komponen fungsional fenol. Kadar asam pada asap cair yang tinggi dapat menghambat tumbuhnya mikrobia. Mikrobia hanya bisa tumbuh pada kadar asam yang rendah (Mardyaningsih *et al.*, 2016).

Salim & Rahmi (2017) melaporkan bahwa asap cair yang dibuat dari kayu galam (*Malaleuca leucadendra*) dapat digunakan untuk mengawetkan ikan gabus. Pengujian mikrobiologi, terutama pada nilai TPC dan Coliform, menunjukkan hasil

yang lebih baik. Sedangkan nilai TVB-N ikan gabus tidak memberikan pengaruh yang signifikan selama penyimpanan 10 hari pada suhu  $\pm 4^{\circ}\text{C}$ .

Asap cair untuk mengawetkan ikan tongkol pada penelitian Hardianto & Yunianta (2015) telah berhasil memberikan hasil terbaik dengan waktu penyimpanan 2 hari pada suhu ruang dengan lama perendaman 2 jam. Pengawetannya menggunakan asap cair tempurung kelapa. Asap cair diproduksi dengan menggunakan reaktor pirolisis untuk mengurangi emisi. Suatu dampak dari suatu kegiatan pirolisis dapat diketahui dengan penghitungan LCA.

## 2.7 Response Surface Methodology (RSM)

*Response Surface Methodology* (RSM) adalah metodologi permukaan respons. Data penelitian yang dimasukkan dianalisis secara matematis dan statistik demi memberikan kondisi optimal sebagai *output* yang diinginkan (Tripathi *et al.*, 2020). Berikut adalah tahapan RSM: (a) merancang eksperimen untuk memberikan pengukuran respons yang memadai dan andal, (b) mengembangkan model matematika yang paling sesuai dengan data yang diperoleh dari desain eksperimen, dan (c) menentukan nilai optimal dari variabel bebas yang menghasilkan nilai maksimum atau minimum dari respons (Istadi *et al.*, 2009).

RSM sudah berhasil dimanfaatkan untuk mengoptimalkan berbagai proses rekayasa untuk mempelajari secara statistik bagaimana variabel faktorial memengaruhi produk. Kelebihan RSM adalah dapat memperoleh parameter proses yang optimal dengan jumlah percobaan yang jauh lebih sedikit. Program ini dapat digunakan untuk analisis dan pemodelan dari suatu permasalahan dengan satu atau lebih perlakuan dalam penelitian sehingga dapat menghemat waktu dan tenaga. RSM dikembangkan untuk mengoptimalkan reaksi kimia demi mendapatkan hasil

dan kemurnian yang tinggi dengan biaya rendah dan melibatkan faktor-faktor seperti suhu, tekanan, durasi reaksi, dan proporsi reaktan (Dean *et al.*, 2017).

RSM juga dapat dimanfaatkan untuk memprediksi efek dari kombinasi dua atau lebih parameter proses pada *output* efek gabungan dari dua parameter proses. RSM dapat menetapkan *Analisis Of Varians* (ANOVA) untuk analisis statistik model yang diusulkan. Setelah melakukan analisis ANOVA pada data *input* eksperimen, data *output* dihasilkan dan diproses untuk mengembangkan model matematika yang sesuai. Model matematika yang diperoleh untuk memperkirakan hubungan fungsional antara variabel *input* dan *output* (respon) yang berbeda dari proses. Oleh karena itu, RSM dapat membangun kesepakatan yang baik antara nilai eksperimental dan prediksi. RSM Model CCD (*Central Composite Desain*) sangat efektif, efisien, dan sangat populer dalam situasi ketika studi perlu menyelidiki bagaimana variabel *input* memengaruhi *output*. Rentang CCD yang luas membuat RSM menjadi metode yang sangat berguna dan fleksibel. Model CCD berbasis RSM digunakan untuk menetapkan efek relatif dari variabel proses dan interaksinya (Das & Goud, 2021).

## **2.8 Life Cycle Assesment (LCA)**

*Life Cycle Assessment* (LCA) adalah suatu metode yang dimanfaatkan untuk mengukur suatu dampak dari segi lingkungan (Sari *et al.*, 2012). LCA secara umum merupakan pendekatan yang digunakan untuk mengukur dampak lingkungan dari sebuah produk atau aktivitas selama siklus hidup produk dari *raw material*, diikuti proses produksi, penggunaan, dan berakhir pada pengolahan sampah. LCA sudah dilakukan untuk mengevaluasi *eco-cost* dari penggunaan material penyusun produk

dan *eko-efisiensi* produk batik cap dan produksi pakan ternak. Hasil yang diperoleh pada penelitian tersebut dapat dibuat rekomendasi untuk meningkatkan kinerja lingkungan (Efendi & Ciptomulyono, 2010). Singgih & Hennytasari (2009) melaporkan penggunaan LCA pada industri kertas dan karton serta barang dari logam. LCA pada bidang elektronika dan transportasi menggunakan bahan bakar dari asap cair hasil pirolisis biomassa (Fan *et al.*, 2011; Iribarren *et al.*, 2012). Penggunaan LCA untuk menghitung dampak dari produksi biodiesel juga telah dilakukan (Wahyono *et al.*, 2020).

Penerapan LCA berawal sejak adanya pertemuan United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) pada 1992. Organisasi tersebut bertemu untuk membahas mengenai ancaman terhadap lingkungan dan perubahan cuaca. Pertemuan dihadiri sebanyak 170 negara sebagai kelanjutan dari pertemuan sebelumnya. Pertemuan tersebut bertujuan untuk menemukan solusi untuk mengurangi efek gas rumah kaca. Pertemuan tahun 1997 sudah menetapkan enam jenis emisi gas rumah kaca: metana, *hydrofluorocarbon*, nitrogen dioksida, *perfluorocarbons*, *sulfurheksaflorida*, dan karbon dioksida. Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) merupakan salah satu emisi gas rumah kaca yang sangat signifikan pengaruhnya terhadap perubahan iklim.

Siklus LCA dimulai dari bahan mentah, proses produksi, transportasi, operasi, hingga proses daur ulang dari kegiatan yang menghasilkan produk. LCA adalah sebuah teknik untuk menilai dampak lingkungan yang berhubungan dengan suatu produk sebagaimana disebutkan dalam ISO 14040.

Penilaian lingkungan dengan LCA pada tahun 1960 masih terbatas pada tahap penggunaan suatu produk. Implementasi LCA pada lingkungan dimulai sejak

tahun 1980. Pada tahun 1994, dimulai dengan pengaturan pada ISO yang menetapkan bahwa LCA dapat digunakan pada semua industri. LCA yang sudah dilakukan antara lain pada produk kipas angin, pengelolaan sampah, pabrik semen, daur ulang plastik, biodiesel dari minyak sawit, budidaya ikan vaname, produksi biji kakao, produk kertas, pabrik lampu, pabrik susu KUD, pengolahan air, pengolahan ampas tebu, pabrik batik, pabrik biodiesel, perkebunan sagu, sawit dan padi, pabrik gula tebu, dan kemasan botol (Chaerul & Allia, 2020). Penilaian dampak pada pirolisis eceng gondok menjadi asap cair belum pernah dilakukan, sehingga akan dinilai dalam penelitian ini. Ada empat tahapan LCA: tujuan dan ruang lingkup, analisis inventori, analisis dampak lingkungan, dan interpretasi hasil.

## **2.9 Tujuan dan ruang lingkup.**

Tahapan yang pertama dilakukan adalah mendefinisikan ruang lingkup studi, termasuk mendefinisikan fungsi dari masing-masing bagiannya serta memberikan batasan. Tujuan dan ruang lingkup dipaparkan pada Gambar 4.3.

## **2.10 Tahap Analisis inventori.**

Inventarisasi kegiatan input serta output yang berhubungan dengan ruang lingkup studi dilakukan pada tahap ini. Tahapan pengumpulan data dimulai dengan bahan baku, proses produksi, serta kebutuhan energinya. Proses produksi secara industrial menjadi fokus dalam analisis inventori.

## **2.11 Tahap Analisis dampak lingkungan**

Tahapan ketiga yang dilakukan adalah melakukan evaluasi bertahap terhadap dampak yang potensi terhadap lingkungan menggunakan Life Cycle

Inventory (LCI). Hasil LCI menggambarkan siklus hidup dari tahapan interpretasi melalui tahapan penilaian dampak. Menurut ISO 14040 tahun 2006, tahapan penilaian dampak meliputi : (a) Definisi dan seleksi dampak. Tahapan ini wajib dilakukan untuk mengidentifikasi kategori dampak lingkungan yang paling sesuai, misalnya pengasaman, toksisitas teretrial, atau pemanasan global. (b) Klasifikasi. Pada tahapan ini wajib dilakukan untuk penetapan hasil LCI ke kategori dampak, misalnya mengklasifikasikan emisi yang keluar dari proses ke pemanasan global. (c) Karakterisasi. Memodelkan dampak LCI dalam kategori dampak menggunakan faktor konversi berbasis sains, misalnya pemodelan potensi dampak *karbon monoksida*. (d) Pemberian skor tunggal. Tahapan ini opsional dan dilakukan untuk menekankan dampak penting dengan potensi terbesar.

## **2.12 Interpretasi**

Tahapan interpretasi adalah tahapan akhir dalam LCA. Yang dilakukan pada tahap ini adalah menganalisis daur hidup, memberikan kesimpulan, dan mengambil keputusan berdasarkan pada batasan studi yang telah ditetapkan sebelumnya serta memberikan rekomendasi (Lee and Inaba, 2004).

## **2.13 Protokol Gas Rumah Kaca**

Protokol gas rumah kaca merupakan salah satu proses untuk menilai dampak siklus hidup. Protokol ini menghasilkan perhitungan kategori dampak *Fossil CO<sub>2</sub>eq*, *CO<sub>2</sub>Uptake*, *Biogenic CO<sub>2</sub>eq*, dan *CO<sub>2</sub>eq from land transformation*. Program SimaPro memiliki karakteristik setiap zat identik dengan metode IPCC 2007 GPW (100a).