BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biomassa sawdust

Biomassa *sawdust* merupakan salah satu sumber daya terbarukan yang berasal dari material biologis tumbuhan maupun limbah organik yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi maupun bahan baku industri. Secara umum, biomassa mencakup berbagai jenis material organik yang berasal dari tanaman maupun hasil samping aktivitas biologis, seperti kayu, rumput Napier, rapeseed, eceng gondok, rumput laut, mikroalga seperti *chlorella*, serbuk gergaji, serpihan kayu, jerami, sekam padi, limbah rumah tangga, limbah industri pulp, serta kotoran hewan (Sulasminingsih, 2023). Selain itu, biomassa yang berasal dari sektor perkebunan seperti kayu putih, *hybrid poplar*, kelapa sawit, tebu, dan rumput gajah juga termasuk dalam kelompok sumber biomassa yang berpotensi dikembangkan sebagai sumber energi. Pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi memiliki keunggulan karena berasal dari sumber daya yang dapat diperbarui, sehingga energi yang dihasilkan dari biomassa dikategorikan sebagai energi terbarukan (Sulasminingsih, 2023).

Dalam proses pemanfaatannya sebagai bahan bakar, pembakaran biomassa sawdust tetap menghasilkan emisi karbon dioksida (CO_2) sebagaimana proses pembakaran bahan bakar fosil. Namun, biomassa sering dikaitkan dengan konsep netral karbon karena karbon yang dilepaskan selama pembakaran diasumsikan dapat diserap kembali oleh tanaman baru melalui proses fotosintesis. Konsep tersebut hanya dapat diterapkan apabila sistem produksi biomassa dilakukan secara berkelanjutan, khususnya melalui pengelolaan lahan dan penanaman kembali sumber biomassa secara berkesinambungan. Pada kondisi tertentu, terutama di negara berkembang yang masih bergantung pada biomassa dari hutan tanpa sistem regenerasi yang memadai, asumsi netral karbon tersebut tidak selalu dapat diterapkan (Chum et al., 2011).

Karakteristik biomassa *sawdust* sangat bervariasi tergantung pada jenis bahan baku, kondisi pertumbuhan tanaman, serta metode pengolahannya.

SEKOLAH PASCASARJANA

Perbedaan tersebut dapat memengaruhi sifat kimia, karakteristik fisik, kadar air, kekuatan mekanis, hingga kesesuaian biomassa dalam proses konversi energi. Oleh karena itu, pengembangan teknologi konversi biomassa menjadi energi perlu mempertimbangkan aspek efisiensi, biaya, serta dampak lingkungan agar mampu menjadi alternatif yang berkelanjutan dalam mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dan menekan emisi CO_2 (Widjaja & Karsono, 2020).

Pembakaran energi biomassa sawdust akan menghasilkan CO_2, akan tetapi hampir semua karbon dalam bahan bakar akan diubah menjadi CO_2, yaitu seperti yang digunakan selama konsumsi bahan bakar fosil. Namun biomassa sawdustdikatakan sebagai memiliki jumlah bersih CO_2 yang nol berdasarkan anggapan bahwa pohon- pohon yang baru atau tumbuhan lain yang ditanam kembali akan memberikan CO_2 yang dihasilkan selama penggunaan energi biomassa. Konsep ini merujuk kepada perkebunan energi yang dikelola secara tepat, tetapi ia tidak bisa diaplikasikan untuk negara-negara berkembang dimana sebagian besar energi biomassa sawdustdiperoleh dari hutan yang tidak ditanam kembali. (Chum, H., et al., 2011).

Sawdust dikategorikan sebagai biomassa sawdustlignoselulosa yang tersusun dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Komposisi ini membuat *sawdust* memiliki karakteristik termal yang cukup baik sebagai bahan bakar. Menurut Herianto et al. (2021), nilai kalor *sawdust* mencapai sekitar 4,7 kWh/kg, atau setara dengan ±16–17 MJ/kg, sehingga secara teknis memungkinkan untuk digunakan sebagai substitusi parsial batubara. Informasi ini konsisten dengan data operasional PLTU Lontar, dimana *sawdust* yang digunakan memiliki nilai kalor sekitar 16,5 MJ/kg (PLTU Lontar, 2024) Secara teoritis, sawdust memiliki potensi *carbon neutral*. Potensi netralitas karbon (carbon neutrality) biomassa sawdust hanya dapat dicapai apabila biomassa berasal dari limbah industri kayu yang dikelola secara berkelanjutan, dan siklus penanaman kembali pohon terverifikasi. Selain itu, seluruh emisi dari proses pengeringan, transportasi, dan pembakaran harus diperhitungkan secara menyeluruh sesuai ISO 14067:2018 dan IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Karbon dioksida (CO_2) yang dilepaskan selama proses pembakarannya dapat diserap kembali oleh tanaman melalui

SEKOLAH PASCASARJANA

fotosintesis, sehingga membentuk siklus karbon tertutup. Konsep ini sebelumnya telah dijelaskan oleh Chum et al. (2011) bahwa biomassa sawdust dianggap tidak menambah emisi karbon bersih apabila berasal dari sumber yang dikelola secara berkelanjutan. Namun, efektivitas netralitas karbon tersebut sangat bergantung pada keberlanjutan rantai pasok, seperti pengelolaan hutan, distribusi, dan proses pemanenan.

Selain nilai kalor, karakteristik fisik sawdust seperti ukuran partikel, kadar air, dan densitas juga memengaruhi performanya sebagai bahan bakar. *Sawdust* memiliki densitas sekitar 650 kg/m³ (Setyawan & Paepenan, 2023), namun kadar airnya dapat berfluktuasi, sehingga perlu proses pengeringan untuk meningkatkan efisiensi pembakaran. Apabila kadar air tinggi, maka energi yang dihasilkan akan menurun dan efisiensi boiler menjadi lebih rendah. Dari perspektif ketersediaan, Indonesia memiliki potensi produksi sawdust yang melimpah karena industri kayu nasional menghasilkan limbah organik dalam jumlah besar setiap tahun. Dalam tesis ini, suplai *sawdust* untuk PLTU Lontar mencapai 7.490 ton/tahun, dengan fluktuasi 480–720 ton per bulan. Angka ini menunjukkan bahwa *sawdust* dapat menjadi sumber biomassa sawdustyang relatif stabil untuk skema co-firing level 5%, namun kajian lebih lanjut dibutuhkan untuk mengevaluasi kecukupan suplai apabila level *co-firing* ditingkatkan menjadi 10–15%.

Selain itu, pemanfaatan *sawdust* berkontribusi dalam mengurangi risiko lingkungan dari limbah kayu. Tanpa pengelolaan yang tepat, serbuk gergaji dapat memicu peningkatan partikulat debu (PM10), potensi kebakaran, hingga pelepasan gas metana (CH_4) dari proses pembusukan alami. Oleh karena itu, penggunaan sawdust sebagai bahan bakar tidak hanya menambah nilai ekonomi tetapi juga berfungsi sebagai strategi mitigasi limbah padat industri. Dari sisi lingkungan, sawdust memberikan profil emisi yang lebih rendah dibandingkan batubara. Studi Cahyo (2021) menemukan bahwa *co-firing sawdust*–batubara mampu menurunkan emisi CO_2, NO_x, dan SO_2 secara signifikan. Hal ini sejalan dengan laporan kajian *Life Cycle Assessment* (LCA) PLTU Lontar yang menunjukkan bahwa tahap pembakaran *sawdust* menghasilkan potensi pemanasan global (GWP) yang lebih rendah dibanding pembakaran batubara murni

SEKOLAH PASCASARJANA

2.2 Konversi Energi Biomassa

Pemanfaatan biomassa sawdust sebagai sumber energi panas pada prinsipnya dilakukan melalui proses pembakaran langsung (direct combustion) untuk menghasilkan energi termal. Energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran tersebut selanjutnya dimanfaatkan dalam sistem pembangkit listrik untuk menghasilkan energi listrik. Pada sistem pembangkit berbasis biomassa, panas hasil pembakaran biomassa digunakan untuk memanaskan air di dalam boiler hingga menghasilkan uap bertekanan tinggi. Uap tersebut kemudian dialirkan menuju turbin uap sehingga energi panas dari uap dapat dikonversi menjadi energi mekanik berupa putaran poros turbin. Selanjutnya, energi mekanik tersebut diteruskan ke generator untuk menghasilkan energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik pada komponen magnet di dalam generator (Alpaslan K. A. et al., 2022).

Secara umum teknologi konversi biomassa sawdustmenjadi bahan bakar dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu :

1. Pembakaran langsung, Pembakaran langsung merupakan teknologi yang paling sederhana karena pada umumnya biomassa sawdustdapat langsung dibakar. Beberapa biomassa sawdustperlu dikeringkan terlebih dahulu dan didensifikasi untuk kepraktisan dalam penggunaan.
2. Konversi termokimiawi, Konversi termokimiawi merupakan teknologi yang memerlukan perlakuan termal untuk memicu terjadinya reaksi kimia dalam menghasilkan bahan bakar.
3. Konversi biokimiawi, merupakan teknologi konversi yang menggunakan bantuan mikroba dalam menghasilkan bahan bakar.

(Alpaslan K. A., et al., 2022)

2.3 Teori Energi Fosil

Pemanfaatan bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama memberikan berbagai konsekuensi terhadap lingkungan, terutama melalui peningkatan emisi gas

SEKOLAH PASCASARJANA

rumah kaca (GRK) yang berkontribusi terhadap terjadinya pemanasan global. Fenomena pemanasan global terjadi akibat meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer yang menyebabkan energi panas dari radiasi matahari terperangkap dan menghambat proses pelepasan panas kembali ke luar atmosfer bumi (Pratama, 2019). Peningkatan emisi gas rumah kaca tersebut banyak dipengaruhi oleh aktivitas antropogenik, terutama pada sektor pembangkitan energi listrik, transportasi, dan industri yang masih bergantung pada penggunaan bahan bakar fosil (Pratama, 2019). Pembakaran bahan bakar fosil menghasilkan karbon dioksida (CO_2) dalam jumlah besar sehingga menyebabkan peningkatan konsentrasi CO_2 di atmosfer melebihi kemampuan penyerapan alami oleh ekosistem. Kondisi ketidakseimbangan antara jumlah karbon yang dilepaskan dan karbon yang diserap tersebut menyebabkan terjadinya kondisi carbon positive yang memperkuat dampak perubahan iklim (Sarwono, 2016).

2.4 *Cofiring*

Teknologi *co-firing* merupakan metode pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar campuran dengan batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), dimana biomassa digunakan sebagai substitusi sebagian bahan bakar fosil dalam proses pembakaran di boiler. Penerapan teknologi ini memungkinkan peningkatan penggunaan energi terbarukan tanpa memerlukan pembangunan pembangkit listrik berbasis biomassa baru, sehingga menjadi salah satu strategi transisi energi yang relatif kompetitif dibandingkan pengembangan infrastruktur energi terbarukan secara mandiri (PT PJB, 2022).

SEKOLAH PASCASARJANA

Implementasi *co-firing* pada PLTU batu bara memberikan beberapa manfaat, antara lain mengurangi konsumsi batu bara, menurunkan emisi gas rumah kaca, serta berpotensi meningkatkan efisiensi biaya penyediaan energi listrik. Program *co-firing* dengan memanfaatkan biomassa *sawdust* menjadi salah satu program "*Green Booster*" yang dikembangkan oleh PLN untuk mendukung peningkatan kontribusi energi baru dan terbarukan (EBT) dalam bauran energi nasional (PT PJB, 2022).

Persentase substitusi biomassa dalam sistem co-firing umumnya masih berada pada kisaran 3–10% dari total bahan bakar yang digunakan. Peningkatan proporsi biomassa dalam campuran bahan bakar berpotensi menurunkan jumlah emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dibandingkan penggunaan batu bara secara penuh (Cahyo, 2021). Selain itu, biomassa sawdust memiliki kandungan sulfur yang lebih rendah dibandingkan batu bara, sehingga pencampuran biomassa dengan batu bara berpotensi mengurangi emisi karbon dioksida (CO_2), nitrogen oksida (NO_x), dan sulfur oksida (SO_x) dari proses pembakaran (Cahyo, 2021).

Tujuan utama penerapan *co-firing* adalah mengurangi ketergantungan terhadap batu bara melalui pemanfaatan bahan bakar alternatif dalam komposisi tertentu dengan tetap mempertimbangkan karakteristik dan kualitas bahan bakar agar sesuai dengan kebutuhan operasional pembangkit (Cahyo, 2023). Biomassa yang digunakan dalam teknologi *co-firing* dapat berasal dari berbagai sumber bahan organik, baik yang diperoleh secara langsung dari tanaman maupun secara tidak langsung melalui hasil samping aktivitas pertanian, kehutanan, industri pangan, dan peternakan (Cahyo, 2023).

Biomassa mencakup berbagai material biologis seperti kayu, rumput energi, tanaman perkebunan, limbah pertanian, limbah kehutanan, limbah industri pengolahan kayu, serta residu organik lainnya. Beberapa contoh biomassa yang berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi antara lain serbuk gergaji, serpihan kayu, jerami, sekam padi, limbah industri pulp, limbah perkebunan kelapa sawit, tebu, dan rumput energi. Keragaman sumber biomassa tersebut menjadikan biomassa sebagai salah satu sumber daya terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan dalam mendukung pengurangan penggunaan bahan bakar fosil (Cahyo, 2023).

Pemanfaatan teknologi *co-firing* pada PLTU berbahan bakar batu bara menjadi salah satu pendekatan yang dapat dilakukan untuk mempercepat pengurangan emisi karbon dari sektor ketenagalistrikan. Melalui substitusi sebagian batu bara dengan bahan bakar terbarukan seperti biomassa kayu, limbah pertanian, maupun limbah olahan, teknologi ini dapat menjadi strategi transisi energi jangka menengah sebelum penerapan sistem energi terbarukan secara penuh.

SEKOLAH PASCASARJANA

Penggunaan biomassa dalam proses *co-firing* berpotensi memberikan kontribusi terhadap pengurangan emisi CO_2 karena sebagian karbon yang dilepaskan selama pembakaran berasal dari siklus karbon biologis biomassa (Cahyo, 2023). Ada tiga peristiwa dalam Co-firing:

1. *Co-firing* Langsung

Campuran bahan bakar alternatif dan batubara, kemudian masuk ke boiler. Biomassa sawdustdicampur dengan batubara dalam bahan bakar yang sama menggunakan peralatan yang sama atau terpisah.

2. *Co-firing* Tidak Langsung

Pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar alternatif pada pembangkit listrik dapat dilakukan melalui sistem pembakaran terpisah dari batu bara. Pada metode ini, biomassa tidak langsung dicampurkan dengan batu bara dalam satu sistem pembakaran, melainkan diproses menggunakan fasilitas tersendiri yang dilengkapi dengan peralatan tambahan. Salah satu teknologi yang dapat diterapkan adalah proses gasifikasi biomassa, dimana biomassa sawdust dikonversi terlebih dahulu menjadi gas sintesis (*syngas*) sebelum dilakukan proses pembakaran untuk menghasilkan energi panas (Fitriani et al., 2023).

Keunggulan metode gasifikasi adalah adanya tahapan pemurnian (syngas cleaning) yang dapat mengurangi kandungan pengotor sebelum proses pembakaran sehingga berpotensi menekan emisi pencemar. Selain itu, sistem ini memberikan fleksibilitas dalam pemilihan jenis biomassa yang dapat digunakan sebagai bahan bakar. Namun, penerapan teknologi tersebut membutuhkan investasi tambahan karena memerlukan pembangunan fasilitas gasifikasi serta sistem pembakaran terpisah, terutama apabila biomassa digunakan dalam proporsi yang lebih tinggi (Fitriani et al., 2023).

Pada sistem pembakaran terpisah, biomassa *sawdust* dan batu bara dibakar menggunakan boiler yang berbeda. Uap yang dihasilkan dari kedua proses pembakaran tersebut kemudian digabungkan untuk menggerakkan turbin uap dan generator sehingga menghasilkan energi listrik. Sistem ini memungkinkan pemanfaatan biomassa dalam jumlah yang lebih besar dibandingkan metode

SEKOLAH PASCASARJANA

pencampuran langsung, tetapi konsekuensinya adalah kebutuhan investasi dan kompleksitas operasional yang lebih tinggi.

Biomassa *sawdust* termasuk sumber daya energi terbarukan karena berasal dari material biologis yang dapat diperbarui melalui proses pertumbuhan tanaman. Energi yang dihasilkan dari biomassa dikategorikan sebagai energi terbarukan karena memanfaatkan sumber karbon biologis dalam siklus alami. Di Jepang, biomassa diklasifikasikan sebagai salah satu bentuk energi baru (new energy) dan telah memiliki pengakuan secara hukum dalam kebijakan energi nasional negara tersebut (Hardiyon, 2022).

Meskipun biomassa sering dikategorikan sebagai energi rendah karbon, proses pembakarannya tetap menghasilkan emisi karbon dioksida (CO_2). Karbon yang terkandung dalam biomassa akan dilepaskan ke atmosfer selama proses pembakaran, sebagaimana yang terjadi pada pembakaran bahan bakar fosil. Perbedaan utama terletak pada asal karbon tersebut, dimana karbon biomassa berasal dari siklus karbon biologis, sedangkan karbon bahan bakar fosil berasal dari penyimpanan karbon jangka panjang di dalam bumi (*International Energy Agency*, 2025).

2.5 Energi alternatif

Energi alternatif didefinisikan sebagai sumber energi yang digunakan sebagai pengganti bahan bakar fosil, dengan tujuan utama mengurangi dampak lingkungan dan meningkatkan ketahanan energi (Ellabban, 2014). Definisi ini menekankan bahwa energi alternatif mencakup berbagai sumber energi non-fosil, baik yang terbarukan maupun non-terbarukan, selama sumber tersebut menawarkan solusi yang lebih ramah lingkungan dibandingkan energi konvensional (Twidell & Weir, 2015).

Energi alternatif memainkan peran sentral dalam upaya global membatasi pemanasan global di bawah 2°C, sebagaimana diamanatkan dalam skenario IPCC AR6 (IPCC, 2022). Untuk mencapai target tersebut, porsi listrik dari sumber rendah karbon harus mencapai 93–97% pada 2050, dengan penurunan konsumsi batu bara tanpa teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS) sebesar 67–82%

SEKOLAH PASCASARJANA

pada 2030 (IPCC, 2022). Sektor listrik diproyeksikan menjadi tulang punggung dekarbonisasi, didukung oleh elektrifikasi transportasi, pemanasan, dan industri, serta integrasi hidrogen dan bioenergi untuk sektor yang sulit dielektrifikasi (IEA, 2023). Pengembangan energi alternatif di Indonesia dan negara berkembang lainnya menghadapi berbagai tantangan struktural dan teknis. Hambatan utama meliputi investasi awal yang tinggi, keterbatasan infrastruktur jaringan listrik, akses pembiayaan yang terbatas, serta ketidakpastian regulasi dan tumpang tindih kewenangan antar lembaga (Aditya et al., 2025). Namun, prospek pengembangan energi alternatif tetap besar, didukung oleh potensi sumber daya yang melimpah, penurunan biaya teknologi, dan komitmen global terhadap dekarbonisasi (IRENA, 2023). Kebijakan internasional seperti *Just Energy Transition Partnership* (JETP) dan komitmen *net zero emission* 2060 memberikan dorongan tambahan untuk akselerasi transisi energi di Indonesia (IEA, 2026).

2.6 *Life Cycle Asessment* (LCA)

Life Cycle Assessment (LCA) adalah teknik untuk menilai aspek lingkungan dan potensi dampak lingkungan yang terkait dengan suatu produk, proses, atau jasa sepanjang daur hidupnya, mulai dari pengambilan bahan baku, produksi, distribusi, penggunaan, hingga pengelolaan akhir masa pakai (ISO, 2006). LCA juga merupakan pendekatan sistematis yang digunakan untuk memahami serta mengukur dampak lingkungan yang timbul dari seluruh tahapan siklus hidup suatu produk atau sistem guna mendukung pengambilan keputusan yang berkelanjutan (Curran, 2017).

SEKOLAH PASCASARJANA

2.6.1 Tujuan dan Ruang Lingkup

LCA bertujuan untuk memberikan informasi komprehensif tentang dampak lingkungan yang dihasilkan oleh suatu produk atau layanan, sehingga dapat membantu dalam pengambilan keputusan yang lebih berkelanjutan. Selanjutnya, beberapa faktor yang biasanya dievaluasi dalam LCA meliputi penggunaan energi, emisi gas rumah kaca, polusi air dan udara, penggunaan sumber daya alam, serta dampak terhadap kesehatan manusia dan ekosistem. (Curran, M. A., 2017)

Tujuan dari penerapan LCA adalah:

a. Melakukan penilaian dampak lingkungan (*environmental footprint*) untuk membuat program perbaikan ke depan.

b. Melaksanakan identifikasi peluang untuk meningkatkan kinerja lingkungan agar mengurangi dampak lingkungan secara konsisten.

c. Mengumpulkan data inventori sebagai bentuk kontribusi pembuatan database LCA nasional.

Melakukan deklarasi produk ramah lingkungan (*Environmental Product Declarations-Share Environmental Metrics of Products to Customer*) untuk produk listrik dengan satuan per 1 kWh produksi listrik dalam jangka panjang.

PLTU Banten Lontar merupakan jenis industri pembangkit listrik tenaga uap dengan kapasitas produksi sebesar 3 x 315 MWh. Adapun bahan baku utama berupa batu bara dari kegiatan penambangan dan produksi batu bara yang berasal dari pihak ketiga yaitu PT Bukit Asam Tbk Unit Penambangan Tanjung Enim dan transportasi batu bara (*cradle*), yang mana kemudian di proses pada unit produksi perusahaan seperti Condenser, *Condensate Polishing* Unit, LP *Heater*, 02 Tujuan dan Ruang Lingkup – Laporan Kajian *Life Cycle Assessment* 4 PLTU Banten Lontar – Tahun 2024 *Deaerator, HP Heater,* MBFP - BFPT*, Pulverizer, Boiler, Turbine-Generator, Transformator, Air preheater*, ESP, WWTP, *Multiple Effect Distillation* dan *Demineralized Plant.* Serta memiliki *Chlorine Plant, Hydrogen Plant, Coal Handling, Ash Pond*, Pengelolaan Limbah NB3, pengelolaan Limbah B3, *Waste Water Treatment Plant* (WWTP), dan *Fuel Oil Tank (gate),* dan menghasilkan produk utama berupa listrik. Produk listrik yang dihasilkan tersebut kemudian di transmisikan dan di distribusikan ke masyarakat (*grave*). Kajian LCA PLTU Banten Lontar telah mencakup produk utamanya yaitu listrik dengan persentase produk 100%.

SEKOLAH PASCASARJANA

2.6.2 Analisis Inventori

Analisis Inventori LCA (*Life Cycle Inventory* / LCI) adalah tahap kedua dalam metodologi LCA yang berfungsi untuk mengumpulkan data kuantitatif mengenai seluruh aliran material dan energi dalam sistem produk yang dianalisis.

LCI mengidentifikasi, menghitung, dan mencatat semua input dan output sistem untuk masing-masing tahapan dalam siklus hidup produk.

Menurut Guinée (2002), LCI adalah tahap yang paling data-intensif dalam LCA, yang membutuhkan integrasi antara neraca massa dan energi, struktur proses, serta pemodelan aliran sumber daya. LCIA atau Penilaian Dampak Siklus Hidup, mengacu pada evaluasi potensi dampak terhadap kesehatan manusia dan lingkungan yang diidentifikasi selama tahap LCI, termasuk alokasi input dan output ke dalam kategori dampak dan karakterisasi dampak tersebut menggunakan faktor konversi berbasis ilmiah. Wawasan lebih lanjut mengenai hal ini dapat diperoleh dengan melengkapi analisis inventaris dengan studi penilaian dampak. Misalnya, kita tahu bahwa emisi karbon dioksida dan metana berbahaya bagi lingkungan. Namun, untuk membandingkan dampak masing-masing polutan ini terhadap pemanasan global, kabut asap, dan sebagainya, penilaian dampak dapat bermanfaat. (Ramanathan, A., et al., 2021).

2.6.3 Functional Unit

functional unit merupakan ukuran kuantitatif dari kinerja suatu sistem produk yang digunakan sebagai unit referensi (*the quantified performance of a product system for use as a reference unit*). Tujuan utama dari *functional unit* adalah membandingkan sistem yang memberikan fungsi yang sama, bukan sekadar membandingkan jumlah bahan bakar atau emisi. Functional unit memastikan bahwa semua hasil dihitung berdasarkan acuan yang setara. Dengan demikian, semua input (batubara, biomassa, air, listrik internal) dan output (CO_2, SO_2, NO_x, abu, dan lain-lain) dinormalisasi terhadap functional unit tersebut.

SEKOLAH PASCASARJANA

2.6.4 Penilaian Dampak Lingkungan

Pada tahap LCIA terdapat berbagai proses yang kompleks dikarenakan banyaknya data hasil analisis inventori dan rumitnya pengolahan data melalui serangkaian proses yang telah disebutkan pada sub bab sebelumnya. Oleh sebab itu, dikembangkan berbagai metode LCIA untuk mempermudah pelaksanaannya. Tahapan *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) merupakan bagian dalam metode

Life Cycle Assessment (LCA) yang bertujuan untuk menginterpretasikan hasil inventori daur hidup (*Life Cycle Inventory/LCI*) menjadi informasi mengenai potensi dampak lingkungan. Pada tahap ini, data emisi dan penggunaan sumber daya yang diperoleh dari proses inventarisasi akan dikelompokkan ke dalam kategori dampak tertentu melalui proses klasifikasi dan karakterisasi sehingga dapat diketahui besarnya kontribusi suatu aktivitas terhadap permasalahan lingkungan (Menoufi et al., 2013).

Dalam proses karakterisasi LCIA, penentuan besarnya dampak lingkungan dapat dilakukan menggunakan faktor karakterisasi berdasarkan hubungan sebab-akibat (*impact pathway*). Secara umum, terdapat dua pendekatan utama yang digunakan dalam penilaian dampak, yaitu pendekatan titik tengah (*midpoint approach*) dan pendekatan titik akhir (*endpoint approach*) (Menoufi et al., 2013). Pendekatan midpoint mengevaluasi dampak pada tahap awal atau menengah dari rantai sebab-akibat lingkungan, seperti perubahan iklim (*climate change*), penipisan lapisan ozon (*ozone depletion*), dan asidifikasi (*acidification*). Hasil yang diperoleh dari pendekatan ini menunjukkan besarnya potensi dampak berdasarkan perubahan karakteristik lingkungan yang terjadi akibat aktivitas tertentu.

Berbeda dengan pendekatan midpoint, pendekatan endpoint melakukan evaluasi pada tingkat dampak yang lebih lanjut dengan menghubungkan perubahan lingkungan terhadap kerusakan akhir (*damage*) yang berpengaruh terhadap tiga area perlindungan utama, yaitu kesehatan manusia (*human health*), kualitas ekosistem (*ecosystem quality*), dan ketersediaan sumber daya alam (*natural resources*). Oleh karena itu, pendekatan endpoint memberikan gambaran dampak yang lebih menyeluruh, tetapi memiliki tingkat ketidakpastian yang lebih tinggi dibandingkan pendekatan midpoint.

Pada penelitian ini, metode LCIA menggunakan pendekatan *midpoint* karena pendekatan tersebut mampu memberikan informasi yang lebih spesifik terkait perubahan karakteristik fisik dan kimia lingkungan akibat suatu proses. Pendekatan midpoint juga dinilai sesuai untuk mengidentifikasi sumber utama *(hotspot)* kontribusi dampak lingkungan pada sistem pembangkit listrik berbasis biomassa sawdust. Sementara itu, pendekatan endpoint lebih

SEKOLAH PASCASARJANA

berfokus pada konsekuensi akhir terhadap sistem biologis dan memiliki cakupan analisis yang lebih luas.

Pemilihan kategori dampak dalam kajian LCA ini mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 1 Tahun 2021 serta Pedoman Penyusunan Laporan Penilaian Daur Hidup (LCA) oleh Sekretariat PROPER Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. Penyesuaian terhadap pedoman tersebut dilakukan agar hasil kajian tidak hanya memenuhi tujuan penelitian, tetapi juga sesuai dengan kriteria evaluasi kinerja lingkungan dalam program PROPER.

Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 1 Tahun 2021, kategori dampak lingkungan dalam kajian LCA dapat dikelompokkan menjadi dampak primer dan dampak sekunder. Dampak primer mencakup kategori Global Warming Potential (GWP), potensi penipisan ozon (*ozone depletion potential*), potensi asidifikasi (*acidification potential*), serta potensi eutrofikasi (*eutrophication potential*). Sementara itu, kategori dampak sekunder meliputi potensi pembentukan oksidan fotokimia (*photochemical oxidant formation*), potensi penurunan sumber daya abiotik baik fosil maupun nonfosil, potensi penurunan sumber daya biotik, dampak karsinogenik, toksisitas, jejak air (*water footprint*), serta perubahan penggunaan lahan (*land use change*). Berdasarkan Pedoman Penyusunan Laporan Penilaian Daur Hidup (LCA) oleh Sekretariat PROPER – Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI terdapat dampak tambahan yang perlu dikaji yaitu dampak *Cumulative Energy Demand* (CED) atau dampak pemakaian energi. Untuk menganalisis kategori dampak diatas, kajian LCA ini dilakukan dengan 4 metode utama dalam tahap Life Cycle Impact Assessment (LCIA), yaitu:

1. Metode CML-IA (*Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden Impact Assessment*), yang berfokus pada pendekatan midpoint untuk menilai potensi dampak seperti global warming potential (GWP), *acidification, eutrophication, dan photochemical oxidation*. Metode ini umum digunakan karena mampu memberikan hasil yang spesifik dan dapat dibandingkan antar sistem.

SEKOLAH PASCASARJANA

2. Metode ReCiPe, yang merupakan pengembangan dari CML dan Eco-Indicator, dengan dua pendekatan midpoint dan endpoint. Dalam penelitian ini, aspek midpoint dari ReCiPe digunakan untuk memperkuat validitas hasil pada kategori dampak utama seperti perubahan iklim dan kualitas ekosistem.
3. Metode IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), yang digunakan secara khusus untuk menghitung nilai Global Warming Potential (GWP) berdasarkan kontribusi emisi gas rumah kaca (CO_2, CH_4, N_2O) terhadap pemanasan global dalam satuan kg CO_2-ekuivalen.
4. Metode Cumulative Energy Demand (CED), yang digunakan untuk menilai total kebutuhan energi selama siklus hidup produk atau proses, baik dari sumber fosil maupun non-fosil. Analisis CED membantu dalam memahami sejauh mana efisiensi energi dan ketergantungan terhadap energi tak terbarukan.

Keempat metode tersebut dipilih karena memiliki tingkat reliabilitas yang tinggi, didukung oleh referensi internasional, serta sesuai dengan Pedoman LCA PROPER Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.

2.6.5 Interpretasi

Life Cycle Assessment (LCA) merupakan metode evaluasi lingkungan yang digunakan untuk mengidentifikasi dan mengkuantifikasi potensi dampak lingkungan yang dihasilkan dari suatu sistem produk atau proses berdasarkan seluruh tahapan siklus hidupnya. Pendekatan ini mempertimbangkan berbagai aktivitas yang terjadi sejak tahap penyediaan bahan baku, proses produksi atau pengolahan, distribusi, penggunaan produk, hingga tahap akhir pengelolaan limbah (ISO 14040, 2006). Dalam konteks industri energi, penerapan LCA menjadi penting karena mampu memberikan gambaran secara menyeluruh mengenai hubungan antara penggunaan sumber daya, konsumsi energi, serta emisi yang dihasilkan selama suatu proses berlangsung. Seiring meningkatnya kebutuhan terhadap sistem industri yang lebih berkelanjutan, LCA banyak diterapkan sebagai

SEKOLAH PASCASARJANA

metode pengambilan keputusan untuk membandingkan alternatif proses dan menentukan peluang peningkatan kinerja lingkungan (Gillani, 2010).

Pada sektor pembangkitan listrik, LCA dapat digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan yang timbul akibat penggunaan berbagai jenis bahan bakar, termasuk pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar alternatif pengganti sebagian bahan bakar fosil. Melalui pendekatan ini, suatu alternatif energi tidak hanya dinilai berdasarkan kemampuan menghasilkan energi, tetapi juga berdasarkan besarnya dampak lingkungan yang ditimbulkan selama proses penyediaan hingga pemanfaatannya. Penggunaan perangkat lunak LCA seperti SimaPro membantu dalam melakukan pemodelan sistem, pengolahan data inventori, serta perhitungan kategori dampak lingkungan seperti potensi pemanasan global (Global Warming Potential/GWP) dan potensi pengasaman (Acidification Potential/AP) (Rosmeika et al., 2010).

Dalam penelitian ini, metode LCA digunakan untuk mengevaluasi keberlanjutan penggunaan biomassa sawdust sebagai bahan bakar alternatif dalam proses co-firing pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Melalui analisis LCA, dapat diketahui besarnya perubahan dampak lingkungan akibat substitusi sebagian bahan bakar batubara dengan biomassa sawdust, terutama terkait emisi gas rumah kaca dan polutan udara lainnya. Selain itu, hasil analisis dapat digunakan untuk mengidentifikasi tahapan proses yang memberikan kontribusi terbesar terhadap dampak lingkungan (environmental hotspot), sehingga dapat menjadi dasar dalam menentukan strategi pengurangan dampak dan peningkatan efisiensi penggunaan sumber daya (ISO 14044, 2006). Dengan demikian, penerapan LCA tidak hanya berperan sebagai metode evaluasi lingkungan, tetapi juga sebagai instrumen pendukung dalam pengembangan sistem energi yang lebih berkelanjutan dan mendukung pencapaian target pembangunan berkelanjutan (SDGs). Melalui manajemen daur hidup dan analisis daur hidup, perusahaan dapat mengidentifikasi dan mengurangi dampak lingkungan mereka, meningkatkan kepatuhan terhadap standar yang telah ditetapkan pemerintah dan bersaing secara global.

SEKOLAH PASCASARJANA

2.7 Batasan Sistem LCA

Life Cycle Assessment (LCA) memiliki Batasan system untuk menentukan dari unit proses produksi mana yang akan di analisis. Pemilihan batas ini harus konsisten dengan tujuan dari diperlakuannya penelitian studi. Beberapa Batasan dalam pengerjaan LCA ini tercantum dalam (Gabi, 2009) yaitu :

2.7.1 Cradle to Grave

Merupakan batas ssstem yang menyeluruh, termasuk bahan dan rantai produksi energi semua proses mulai dari proses ekstraksi bahan baku melalui tahap produksi, transportasi dan penggunaan hingga produk akhir dalam siklus hidupnya (ISO, 2006). Analisis ini mencakup semua proses, termasuk ekstraksi bahan baku, produksi, distribusi, penggunaan, dan pembuangan akhir (Baumann & Tillman, 2004). Keunggulan utama adalah cakupan yang komprehensif, sehingga memberikan gambaran lengkap mengenai dampak lingkungan. Namun, analisis ini memerlukan data yang sangat banyak dan kompleks (Finnveden et al., 2009). Dalam penelitian pembangkit listrik berbasis biomassa, Cradle to Grave dapat digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari ekstraksi biomassa, transportasi, pembakaran, hingga pembuangan abu (Guinée et al., 2002).

2.7.2 Cradle to Gate

Meliputi proses dari ekstraksi bahan baku hingga produk melalui tahap produksi (proses dalam pabrik). Dalam batas system ini tididak termasuk proses pembuangan atau tahap akhir dari suatu produk (ISO, 2006). Keunggulan adalah kesederhanaan analisis dan kebutuhan data yang lebih sedikit dibandingkan Cradle to Grave. Namun, analisis ini tidak mencakup dampak dari penggunaan dan pembuangan produk (Finnveden et al., 2009).

2.7.3 Gate to Gate

Gate to Gate mencakup analisis proses tertentu dalam siklus hidup produk, biasanya dalam satu tahap produksi (ISO, 2006). Analisis ini berfokus pada proses spesifik, seperti produksi energi atau pengolahan bahan baku sementara tahapan lain dalam siklus hidup produk dikecualikan (Baumann & Tillman, 2004).

SEMARANG
SEKOLAH PASCASARJANA

Keunggulan adalah fokus yang tinggi pada proses tertentu, sehingga cocok untuk analisis mendalam. Namun, analisis ini tidak memberikan gambaran lengkap mengenai dampak lingkungan (Finnveden et al., 2009). Dalam penelitian co-firing biomassa, Gate to Gate dapat digunakan untuk mengevaluasi efisiensi dan emisi dari proses pembakaran biomassa di pembangkit listrik (Guinée et al., 2002).

2.7.4 Gate to Grave

Meliputi proses dari penggunaan pasca produksi sampai pada akhir fase kehidupan siklus hidupnya, digunakan untuk menentukan dampak lingkungan dari produk tersebut setelah meninggalkan pabrik (ISO, 2006). Analisis ini berfokus pada proses hilir, termasuk distribusi, penggunaan, dan pembuangan produk (Baumann & Tillman, 2004). Tahapan ekstraksi bahan baku dan produksi tidak termasuk dalam analisis ini (Curran, 2017). Keunggulan adalah fokus pada dampak penggunaan dan pembuangan produk. Namun, analisis ini tidak mencakup dampak dari proses hulu (Finnveden et al., 2009).

2.8 Metode Penilaian Dampak LCA

Salah satu pendekatan yang dapat digunakan dalam tahap Life Cycle Impact Assessment (LCIA) adalah metode CML-IA. Berdasarkan *Handbook for LCA Using GaBi Software* (2009), metode CML dikembangkan oleh *Centre of Environmental Science (CML)*, Leiden University, sebagai salah satu metode penilaian dampak lingkungan yang digunakan dalam kajian Life Cycle Assessment (LCA). Metode ini dirancang untuk mengevaluasi berbagai kategori dampak lingkungan melalui beberapa tahapan analisis, yaitu klasifikasi, karakterisasi, dan normalisasi (*Handbook for LCA Using GaBi Software*, 2009).

Metode CML Baseline merupakan salah satu metode penilaian dampak yang dikembangkan oleh Institut Lingkungan CML pada tahun 2001. Metode ini memiliki cakupan lebih dari 1.700 *elementary flows* yang dapat digunakan dalam proses analisis dampak lingkungan dan tersedia melalui basis data yang dikembangkan oleh institusi tersebut (*Handbook for LCA Using GaBi Software*, 2009). Dalam penerapannya, metode CML terbagi menjadi dua pendekatan, yaitu *baseline*dan *non-baseline*, dimana metode CML Baseline lebih banyak

SEKOLAH PASCASARJANA

digunakan dalam studi LCA karena menyediakan kategori dampak yang bersifat umum dan dapat diterapkan pada berbagai jenis sistem produk maupun proses (*Handbook for LCA Using GaBi Software*, 2009).

Menurut Nurunnisa (2020), metode CML-IA termasuk dalam kelompok metode *midpoint impact assessment*, yaitu pendekatan yang melakukan evaluasi dampak lingkungan pada tingkat pertengahan sebelum mencapai dampak akhir (*endpoint*). Kategori *midpoint* menggambarkan hubungan antara emisi atau penggunaan sumber daya dengan potensi perubahan lingkungan secara langsung melalui indikator dampak tertentu dengan mengacu pada prinsip standar ISO 14040. Dalam metode CML-IA, proses normalisasi dapat dilakukan untuk memberikan gambaran perbandingan besarnya dampak, namun metode ini tidak menerapkan tahap pembobotan (*weighting*) maupun agregasi terhadap hasil analisis (Nurunnisa, 2020). Berikut merupakan panduan CML-IA yang dapat dikelompokkan sebagai :

a. Kategori dampak wajib merupakan kategori indicator yang sebagian besar digunakan dalam analisis LCA
b. Kategori dampak tambahan merupakan indicator operasional yang tersedia, namun tidak selalu tercakup dalam analisis LCA.

2.9 Kajian Hidup Produk (KHP)

KHP digunakan untuk menilai *sustainability feasibility* pada horizon waktu panjang dengan meninjau konsistensi suplai biomassa, menghitung umur pakai teknologi boiler, keberlanjutan bahan baku, proyeksi kinerja lingkungan dari tahun ke tahun. KHP melengkapi LCA dengan dimensi temporal, sehingga memberikan gambaran keberlanjutan jangka panjang secara strategis. Kombinasi LCA + SWOT + KHP menjadi pendekatan terbaik untuk tujuan penelitian nomor tiga.

2.10 *Software* SimaPro

SimaPro merupakan salah satu perangkat lunak yang popular digunakan dalam analisis Siklus Hidup (*Life Cycle Assessment*). Perangkat lunak ini dikembangkan oleh *Pre Consultants* dan digunakan oleh banyak organisasi dan professional di seluruh dunia untuk melakukan analisis LCA yang komprehensif.

SimaPro menyediakan berbagai fitur dan fungsionalitas yang mendukung pengguna dalam melakukan analisis LCA. *Software* SimaPro mampu membantu dalam pembuatan penilaian pada siklus hidup suatu produk, pembuatan laporan mengenai *sustainability*, desain produk, menentukan indicator kinerja, dan sebagainya. SimaPro dikembangkan untuk membantu dalam pengumpulan fakta dalam mengukur dampak lingkungan dari produk pada semua tahap siklus hidup, serta mengidentifikasi hotspot atau sumber dampak dalam semua aspek tahap produksi, dari ekstraksi bahan baku, manufaktur, distribusi, penggunaan produk, hingga end of life suatu produk (Pre, 2019).

Salah satu keunggulan penggunaan SimaPro adalah kemampuannya dalam mendokumentasikan proses pengumpulan dan pengolahan data serta mendukung pemodelan aspek sosial secara terintegrasi melalui basis data *ecoinvent*. Integrasi tersebut memungkinkan pengguna melakukan analisis siklus hidup dengan cakupan data lingkungan yang lebih luas dan sistematis. Namun, SimaPro juga memiliki beberapa keterbatasan, di antaranya kebutuhan biaya investasi yang relatif tinggi serta keterbatasan jumlah format dataset yang tersedia dalam sistem basis datanya (Silva et al., 2017).

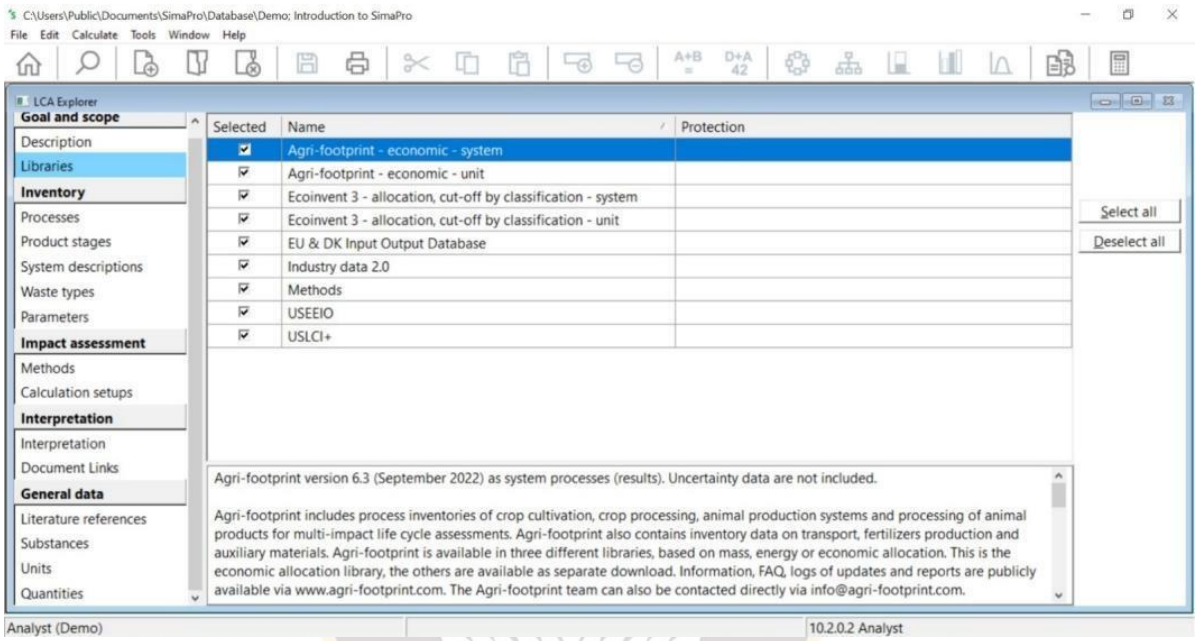
SimaPro mendukung semua tahapan LCA, mulai dari pemodelan proses hingga penilaian dampak. Beberapa fitur utama dalam SimaPro antara lain:

- Pemodelan Sistem Produk SimaPro memungkinkan pengguna untuk membuat sistem proses yang kompleks dalam bentuk unit proses yang terhubung, menyerupai alur produksi nyata.
- Database Terintegrasi SimaPro menyediakan akses ke berbagai basis data LCI standar internasional seperti *Ecoinvent, Agri-footprint, ELCD, dan Industry* Data 2.0.
- Metode Penilaian Dampak (LCIA) Pengguna dapat memilih metode penilaian dampak lingkungan sesuai kebutuhan, seperti *ReCiPe*, IPCC (GWP), CML, dan TRACI. Setiap metode memiliki karakteristik kategori dampak yang berbeda.
- Analisis Skenario dan Sensitivitas SimaPro memungkinkan perbandingan antara beberapa skenario produksi, bahan, atau desain

SEKOLAH PASCASARJANA

produk, serta analisis sensitivitas untuk melihat pengaruh variabel tertentu terhadap dampak lingkungan.

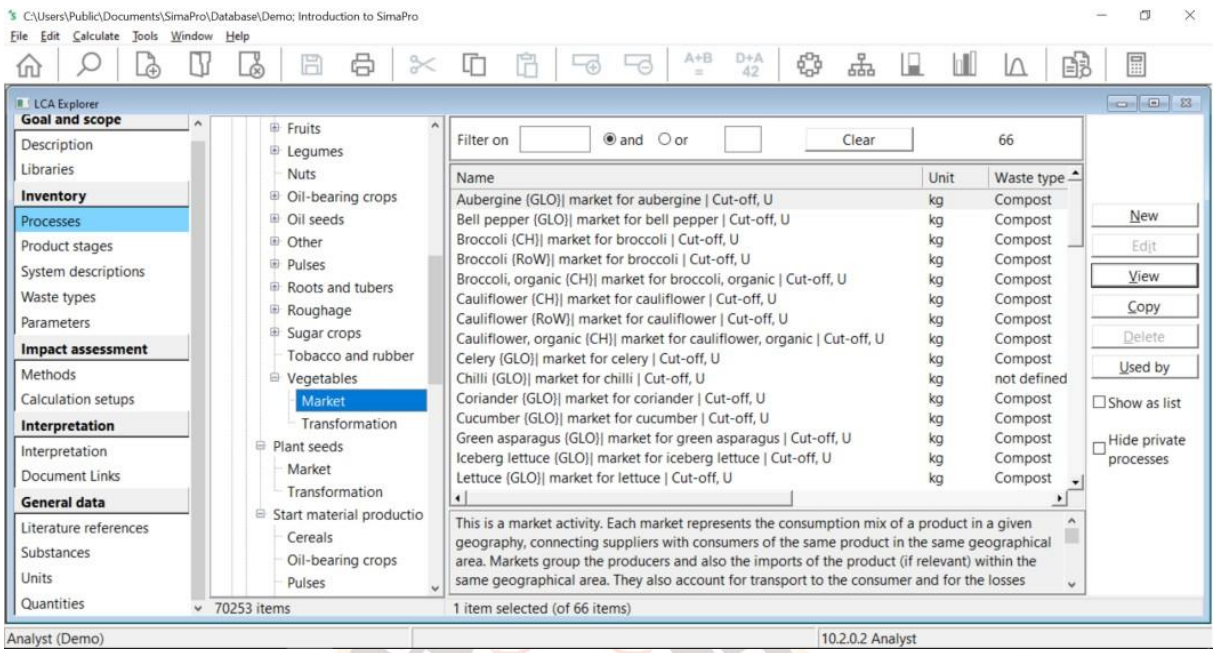
- Visualisasi Hasil LCA dapat divisualisasikan dalam bentuk grafik batang, diagram kontribusi, serta laporan yang dapat diekspor untuk keperluan dokumentasi atau publikasi.



Gambar II. 1 Tampilan *Goal and Scope Software* SimaPro

Sumber: Aplikasi SimaPro

SEMARANG
SEKOLAH PASCASARJANA



Gambar II.1 Tampilan *Inventory Software* SimaPro

Sumber : Aplikasi SimaPro

SEKOLAH PASCASARJANA