

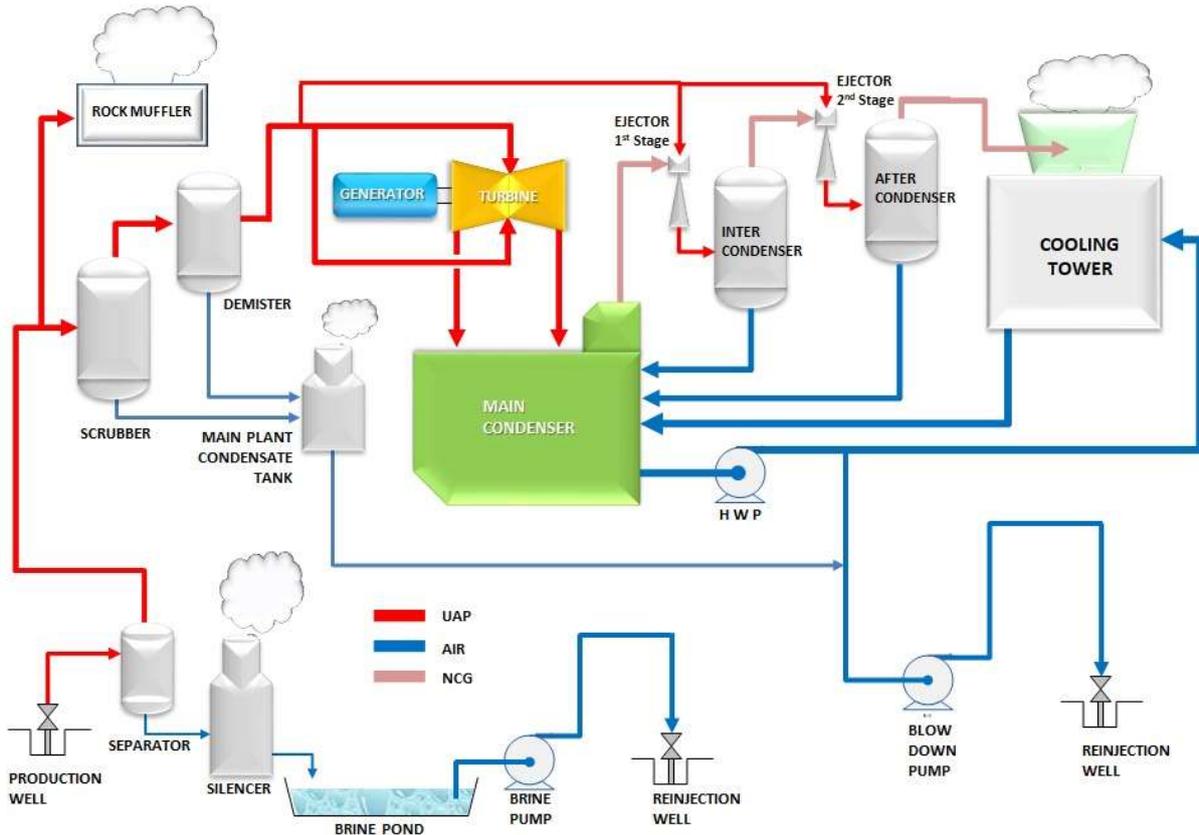
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)

Berdasarkan Peraturan Daerah Jawa Tengah Nomor 12 Tahun 2018 tentang Rencana Umum Energi Daerah Provinsi (RUED-P) Jawa Tengah menyebutkan bahwa pencapaian target RUED-P didahulukan melalui peran energi terbarukan dalam bauran energi, yang mana target kontribusi energi terbarukan pada 2025 mencapai 21,32%. Salah satu pembangunan infrastruktur energi terbarukan yang diprioritaskan adalah pengembangan pemanfaatan panas bumi. yang diarahkan untuk ketenagalistrikan. Panas bumi menurut UU No. 21 Tahun 2014 merupakan sumber energi panas yang terkandung di dalam air panas, uap air, serta batuan bersama mineral ikutan dan gas lainnya yang secara genetik tidak terpisahkan dalam suatu sistem panas bumi. Pada kegiatan pemanfaatan panas bumi secara tidak langsung terdapat beberapa proses agar uap air dapat dimanfaatkan untuk menjadi energi listrik

Berdasarkan jenis pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) terbagi menjadi tiga, yaitu *dry steam plants*, *flash steam plants*, *binary cycle power plant*. Uap panas bumi yang kering langsung digunakan untuk menggerakkan turbin pada *dry steam plants*. Uap panas bumi dapat berupa air panas dengan temperatur lebih dari 200 °C yang dipisahkan terlebih dahulu antara fase uap dan air sebelum dimanfaatkan pada *flash steam plants*. *Binary cycle power plant* memanfaatkan air panas untuk memanaskan cairan organik dengan titik didih lebih rendah pada *heat exchangers* sehingga menghasilkan uap yang memutar turbin. Jenis PLTP yang paling banyak digunakan adalah *flash steam plants* (Ermawati et al., 2014). Selain itu terdapat teknologi *Enhanced Geothermal System* yang mana dibuat sumur injeksi sampai lapisan batuan panas sehingga terbentuk jaringan reservoir baru (Clark et al, 2011).



Gambar II.1 Proses Operasional Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Unit Dieng

Lapangan Panas Bumi di wilayah Dieng merupakan jenis sistem panas bumi dua fasa yang cenderung di dominasi air (water dominated system). Kelebihan sistem dominasi air ini bila dibandingkan dengan sistem dominasi uap adalah ketersediaan cadangannya yang relatif lebih terjaga. Hal ini dikarenakan jumlah air yang diinjeksikan ke dalam bumi relatif lebih banyak dibandingkan sistem dominasi uap, sehingga siklus panas bumi yang terjadi lebih terjaga.

Pada gambar II.1 merupakan proses operasional dari lapangan panas bumi Dieng sampai menjadi produk listrik. Proses produksi dimulai dari fluida yang keluar sumur produksi masuk ke separator dan dipisahkan antara fase air dan fase uap. Air dengan suhu tinggi ini akan keluar melalui outlet bawah separator dan menuju ke Silencer. Di Silencer inilah temperatur dan tekanan akan dikurangi mendekati temperatur ambien. Bagian atas silencer yang dibiarkan terbuka sehingga silencer ini dapat disebut juga *atmospheric flash tank*. Air yang keluar dari silencer akan melewati saluran terbuka untuk menurunkan temperatur air. Selain itu pada saluran terbuka ini, silika yang terkandung di dalam air akan terendapkan. Selanjutnya air masuk ke kolam penampungan air atau *brine pond* untuk kemudian diinjeksikan melalui sumur injeksi. Uap air yang berasal dari sumur produksi memasuki power plant melalui *steam line*. Setelah sampai di area pembangkit, uap tersebut menuju scrubber untuk mengeluarkan

kondensat yang terbentuk. Lalu uap air yang lolos dari scrubber akan mengalir menuju demister. Di dalam demister, akan terjadi penangkapan butiran-butiran air yang masih terkandung dalam uap sesaat sebelum uap air memasuki turbin. Uap yang lolos dari demister akan mulai memasuki turbin dan menyebabkan turbin berputar. Berputarnya turbin akan mengakibatkan hidupnya generator yang mengubah energi putar/mekanik menjadi energi listrik. Listrik yang dihasilkan, akan dialirkan menuju konsumen (PLN) menggunakan trafo.

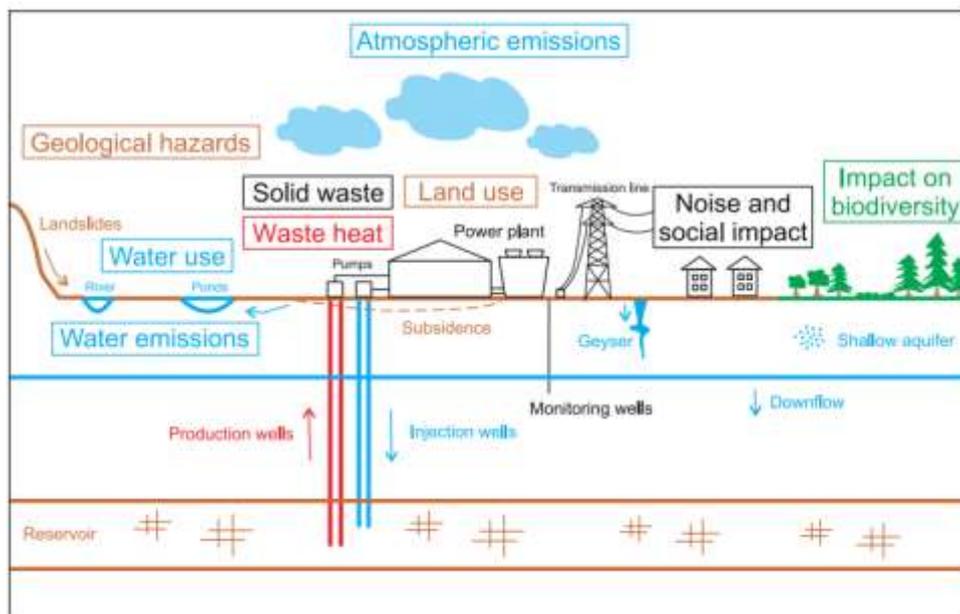
Uap air yang menggerakkan turbin, lama kelamaan akan berubah menjadi air kondensat lalu jatuh dan ditampung di kondensor utama (main condenser). Di dalam kondensor utama terdapat ejektor yang berfungsi untuk mengkondisikan vakum di dalam main kondensor ketika air kondensat jatuh dari turbin. Fluida didominasi uap di dalam main kondensor, akan dikondensasikan menjadi air sehingga tidak ada ruang yang terisi oleh uap dan kondisi yang mendekati vakum dapat tercipta. Lalu air kondensat dikeluarkan dari main kondensor dan dipompakan menuju cooling tower oleh hot well pump. Kondensat yang berwujud uap akan dikeluarkan ke udara dengan *fan* yang berada di dalam cooling tower. Sebagian air akan dikembalikan ke main kondensor untuk mengkondensasikan fluida berikutnya, dan sebagian lagi akan dialirkan ke sumur injeksi. Berikut adalah uraian atau deskripsi dari masing-masing unit proses dalam lingkup kajian LCA *gate to gate* pembangkit beserta data *input* dan *outputnya*.

- Scrubber adalah unit yang berfungsi sama dengan separator, yaitu memisahkan uap dan air dari separator melalui pipa sebelum masuk turbin. Hasil uap dari separator masih mengandung butiran-butiran air yang kemudian dipisahkan lagi melalui demister untuk memperoleh uap yang kering. Unit ini memiliki input berupa material steam yang berasal dari separator dengan satuan Ton, serta memiliki output berupa steam yang akan diteruskan menuju unit proses demister dan air yang akan diteruskan menuju unit proses Main Plate Condensate Tank; keduanya memiliki satuan Ton.
- Demister merupakan unit proses yang berfungsi menangkap butiran-butiran air yang masih terkandung dalam uap sesaat sebelum uap air memasuki turbin. Uap air yang lolos dari demister akan mulai memasuki turbin dan menyebabkan turbin berputar.
- Turbin dan Generator. Turbin merupakan mesin penggerak, dimana blade diputar dengan menggunakan fluida kerja. Turbin uap dioperasikan dengan menggunakan uap panas lanjut. Generator berfungsi sebagai alat pembangkit listrik dengan menggunakan tenaga putaran yang diperoleh dari turbin uap.

- Ejector 1st Stage merupakan steam ejector yang berfungsi untuk menarik NCG pada main condensor yang tidak terkondensasi untuk dikondensasikan kembali di inter condensor dan after condensor. Unit ini memiliki input berupa steam dari demister dan NCG dari main condenser dengan satuan Ton dan output berupa steam dan NCG yang dialirkan ke inter condenser dengan satuan Ton.
- Inter Condenser merupakan unit yang berfungsi untuk mengkondensasikan sisa uap yang tidak dapat terkondensasi pada kondensor, dimana uap dan gas (NCG) tersebut dihisap oleh steam ejector tingkat pertama untuk diteruskan ke inter condensor. Unit ini memiliki input berupa steam dan NCG dari ejector 1st stage, penggunaan listrik sendiri dengan satuan kWh untuk vacuum system water pump yang terdapat pada inter condenser. Sedangkan output yang dihasilkan adalah NCG yang dialirkan ke unit ejector 2nd stage dan air yang dialirkan ke unit main condenser dengan satuan Ton.
- Ejector 2nd Stage merupakan steam ejector yang berfungsi untuk menarik NCG pada main condensor yang tidak terkondensasi untuk dikondensasikan kembali di inter condensor dan after condensor. Unit ini memiliki input berupa steam dan NCG dari demister dan NCG dari inter condenser dengan satuan Ton dan output berupa steam dan NCG yang dialirkan ke after condenser dengan satuan Ton.
- After Condenser merupakan unit yang berfungsi untuk mengkondensasikan sisa uap yang tidak dapat terkondensasi pada kondensor, dimana uap dan gas (NCG) tersebut dihisap oleh steam ejector tingkat pertama untuk diteruskan ke inter condensor. Unit ini memiliki input berupa steam dan NCG dari ejector 2nd stage, penggunaan listrik sendiri dengan satuan kWh untuk auxiliary cooling water pump yang terdapat pada after condenser. Sedangkan output yang dihasilkan adalah NCG yang dialirkan ke unit cooling tower dan air yang dialirkan ke unit main condenser dengan satuan Ton.
- Main Plate Condensate Tank berfungsi untuk menampung kondensat dari scrubber dan demister sebelum masuk kedalam reinjection well. Unit ini memiliki input berupa air kondensat dengan satuan Ton dan output berupa air yang dialirkan ke condensate pond dengan satuan Ton.
- Main Condenser merupakan unit yang berfungsi untuk mengondensasikan uap dari turbin dengan kondisi tekanan yang hampa. Unit ini memiliki input berupa steam dari turbin dan generator, serta air dari inter condenser, after condenser, dan cooling tower dengan satuan Ton. Selain itu di main condenser ini terdapat penggunaan listrik sendiri dengan satuan kWh. Unit ini memiliki output berupa air dan NCG dengan satuan Ton.

- Cooling Tower merupakan unit proses produksi yang berfungsi sebagai pendingin dan hasil kondensasi yang berasal dari condensor. Selain itu, cooling tower juga berfungsi sebagai unit pembuangan akhir yang berupa uap atau gas. Unit ini memiliki input berupa NCG dan air dengan satuan Ton, penggunaan listrik sendiri dengan satuan kWh untuk operasional fan cooling tower dan blowdown pump.
- Condensate Pond adalah penampungan kondensat sebelum disalurkan ke sumur reinjeksi. Unit ini memiliki input berupa air dari cooling tower dan main plate condensate tank dengan satuan Ton, serta terdapat penggunaan listrik sendiri dengan satuan kWh untuk operasional blowdown pump yang terdapat pada condensate pond. Output dari unit ini adalah air dengan satuan Ton yang akan diteruskan ke reinjection well.
- Reinjection Well (Condensate) merupakan sumur yang berfungsi menginjeksikan cairan kondensat ke dalam tanah yang berasal dari sisa hasil pemisahan produksi uap. Unit ini memiliki input berupa air dengan satuan Ton dari condensate pond serta kondensat dengan satuan Ton dari CDP dan output berupa air dengan satuan Ton yang kemudian diinjeksikan ke dalam tanah dengan parameter pencemar berupa H₂S terlarut dan NH₃ dengan satuan Ton.

II.2 Dampak Lingkungan Kegiatan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi



Gambar II.2 Dampak Lingkungan Kegiatan PLTP
(Sumber: Yu et al., 2017)

Kegiatan produksi PLTP untuk menghasilkan listrik dengan uap yang sudah dipisahkan dengan fase air. Pada gambar II.1 skema proses operasional PLTP Unit Dieng terlihat bahwa proses

separasi uap dan air terjadi beberapa tahap di lapangan uap dan pembangkit. Pemisahan air dari uap pada lapangan panas bumi terjadi pada separator yang menghasilkan air terproduksi dan sisa panas berupa emisi uap air yang dilepaskan melalui silencer. Pada kegiatan pembangkitan listrik, air terproduksi dan sisa panas dihasilkan dari sistem pendinginan antra kondensor dan menara pendingin. Kegiatan produksi PLTP ini yang menghasilkan air terproduksi dan emisi uap dapat memberikan beberapa potensi dampak. Selain itu pada gambar II.2 terlihat beberapa dampak lain dari kegiatan PLTP baik pada saat operasional maupun pengeboran seperti penggunaan air, penggunaan lahan, pencemaran tanah, kebisingan dan dampak sosial, serta bahaya geologi seperti pergeseran dan penurunan permukaan tanah.

Isu dampak lingkungan yang dapat timbul dari kegiatan PLTP berasal dari air terproduksi, emisi udara, limbah padat, ledakan sumur dan pipa, serta konsumsi air. Air terproduksi dari PLTP memiliki temperaatur tinggi, pH asam, dan logam berat. Emisi udara yang dapat timbul baik dari kegiatan uji sumur maupun dari luaran menara pendingin adalah hidrogen sulfida dan karbondioksida. Limbah padat dalam jumlah yang kecil dapat dihasilkan dari kegiatan PLTP adalah berupa sulfur, silika, dan karbonat. Konsumsi air dalam jumlah besar digunakan untuk pengeboran sumur, tes injektivitas sumur, dan *start up* sistem pendinginan (IFC, 2007).

Dampak lingkungan dari pemanfaatan panas bumi dapat dilihat dari tiga jenis fasilitas panas bumi, yaitu *flash steam*, siklus *binary*, dan *Enhanced Geothermal Systems* (EGS). Dari ketiga jenis fasilitas ini memiliki dampak lingkungan yang mirip seperti gangguan flora fauna, penurunan kualitas permukaan air, bahaya geologi, kebisingan, polusi termal, gangguan udara, dan pencemaran tanah. Dampak ini berasal dari kegiatan konstruksi, operasional, sampai pada pasca operasional (Geoelec, 2013).

Tabel II.1 Klasifikasi Dampak Lingkungan dari PLTP

Klasifikasi	Klasifikasi Sekunder	Detil
Dampak Lingkungan Bawah Permukaan	Dampak Hidrologi	Level air tanah, temperatur, sifat kimia, produksi air bersih
	Dampak Geologi	Deformasi struktur dan amblesan, reaktivasi patahan, dan aktivitas mikrogempa
	Dampak Mikrobiologi	Keanekaragaman mikroba

Dampak Lingkungan Permukaan	-	Penggunaan lahan, perubahan bentang lahan, pencemaran air permukaan, kerusakan ekosistem dan pertanian
Dampak Udara		Polusi udara dan kebisingan

Sumber: (Chen et al., 2020)

Dampak lingkungan pada aktivitas PLTP terdiri dari dampak pada bawah permukaan, permukaan, dan udara. Dampak lingkungan yang dikaji dengan metode daur hidup adalah dampak terjadi pada permukaan dan udara. Setiap zat keluaran dari aktivitas PLTP yang berinteraksi dengan lingkungan atau dengan polutan lainnya dapat menimbulkan dampak lingkungan (Dhar et al., 2020). Pada tabel II.2 terlihat bahwa masing-masing zat atau polutan dapat menimbulkan dampak lingkungan. Dampak lingkungan yang dapat timbul dapat berupa perubahan iklim, eutrofikasi, asidifikasi, *respiratory inorganic*, *photochemical oxidant*, penipisan ozon. Dampak-dampak ini merupakan detil dampak lingkungan pada permukaan dan udara.

Tabel II.2 Klasifikasi LCIA (*Life Cycle Impact Assessment*)

No	Dampak Lingkungan	Polutan
1	Perubahan iklim	CO ₂ , CH ₄
2	Eutrofikasi	BOD, NH ₃ , NO _x
3	Asidifikasi	H ₂ S, NO _x , SO ₂
4	Respiratori Inorganik	NH ₃ , NO _x , SO ₂ , CO, PM ₁₀
5	Oksidan Fotokimia	CH ₄ , NO _x , SO ₂ , CO
6	Penipisan Ozon	HCFCs dan HFCs
7	Penggunaan Lahan	CO ₂

Sumber: (Annisa & Rahardyan, 2018)

Pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 01 Tahun 2021 tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup (PROPER) telah memasukkan kajian daur hidup sebagai salah satu kriteria penilaian. Penilaian daur hidup sebagai salah satu persyaratan produk dan jasa ramah lingkungan dilakukan untuk menunjukkan komitmen perusahaan dalam membuat produk yang ramah lingkungan dengan menunjukkan informasi potensi dampak lingkungan. PROPER mengatur perusahaan yang mengikuti penilaian melebihi ketaatan melakukan penilaian dampak untuk kategori *global warming potential*, potensi penipisan ozon, potensi hujan asam, potensi eutrofikasi,

photochemical oxidant, potensi terjadi penurunan abiotik (fosil dan non fosil), potensi terjadi penurunan biotik atau ekotoksisitas, karsinogenik, *toxicity*, *water footprint*, *land use change*. Berikut ini adalah dampak yang mungkin terjadi dari aktivitas pembangkit listrik tenaga panas bumi dan dapat dikaji dengan metode daur hidup:

1. Potensi *Global Warming* (GWP)

Global warming (pemanasan global) merupakan peningkatan suhu yang ada di bumi, yang diakibatkan oleh tertahannya radiasi matahari oleh gas rumah kaca sehingga tidak dapat terlepas ke atmosfer. Radiasi matahari yang dipancarkan oleh matahari, sebagian akan terserap oleh permukaan bumi untuk menjaga suhu bumi agar stabil dan sebagian lainnya akan dipantulkan kembali ke atmosfer. Radiasi matahari yang dipantulkan tersebut, sebagian dapat melewati atmosfer namun sebagian lainnya terserap oleh gas rumah kaca dan dipantulkan kembali ke bumi. Hal inilah yang menyebabkan pemanasan global. Kategori dampak *global warming* dinyatakan dalam kg CO₂ eq sebagai dampak *midpoint*. Karakteristik dampak lingkungan ini berlandaskan oleh *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC).

Pada tahap operasional dampak yang muncul paling dominan adalah potensi pemanasan global. Emisi yang timbul berasal dari luaran menara pendingin dan air terproduksi. Pada Yu et al., 2017 menunjukkan hasil dari potensi pemanasan global dari PLTP kapasitas 110 MW sebesar $4,05 \times 10^{-8}$ kg CO₂eq. Studi kasus lain PLTP di negara Cina menunjukkan nilai indikator GWP sebesar 80,49 CO₂ eq/kWh (Wang et al., 2020). Studi yang lain pada Paulillo et al., 2019 dan Anderson & Rezaie, 2019 menunjukkan bahwa rentang GWP pada PLTP *single flash* sebesar 18-24 g CO₂ eq / kWh dan pada PLTP *double flash* sebesar 15-23 g CO₂ eq / kWh. Secara keseluruhan nilai indikator potensi pemanasan global PLTP semakin kecil seiring dengan usia pakai PLTP yang semakin panjang. Hal ini dikarenakan intensitas GWP yang dihasilkan semakin kecil akibat produksi yang semakin besar walaupun GWP yang dihasilkan besar terutama pada fase konstruksi (Pratiwi et al., 2018).

2. Potensi *Ozone Layer Depletion*

Emisi udara seperti CFC, halon metan, dan juga HCFC merupakan salah satu kontributor besar terhadap penipisan lapisan ozon. Terkikisnya lapisan ozon dapat mengurangi kemampuan ozon untuk mencegah ultraviolet (UV) yang bersifat karsinogenik (UVB) masuk ke dalam atmosfer bumi. Metode karakteristik dampak diambil berdasarkan *World Meteorological Organisation* (WMO). Kategori dampak lingkungan *ozone layer depletion* dinyatakan dalam kg CFC-11 eq sebagai dampak *midpoint*. Dampak *ozone layer depletion* menyebabkan kerusakan terhadap

kesehatan manusia dan kerusakannya dinyatakan dalam disability adjusted life years (DALY)/kg emisi sebagai dampak *endpoint*.

Potensi *Ozone Layer Depletion* muncul pada fase konstruksi atau pada saat pengeboran. Pada Yu et al., 2017 menunjukkan hasil dari potensi penipisan lapisan ozon dari PLTP kapasitas 110 MW sebesar 8,39 kg CFC-11eq. Potensi *ozone layer depletion* pada fase operasional dapat dominan muncul pada PLTP dengan teknologi *binary* dengan persentase 73% (Anderson & Rezaie, 2019).

3. Potensi Hujan Asam / *Acidification*

Acidification merupakan proses dimana gas asam seperti sulfur dioksida (SO₂) bereaksi dengan air yang ada di atmosfer kemudian membentuk hujan asam. Gas yang menimbulkan *acid deposition* seperti amonia (NH₃), nitrogen oksida (NO_x) dan sulfur oksida (SO_x). *Acidification* termasuk kedalam kategori dampak lingkungan yang merusak ekosistem, kerusakannya dinyatakan dalam kg SO₂ eq sebagai dampak *midpoint* dan satuan *potentially disappeared fraction (PAF)*m²*years/kg emission* sebagai dampak *endpoint*.

Potensi hujan asam muncul pada fase konstruksi atau pada saat pengeboran. Pada Yu et al., 2017 menunjukkan hasil dari potensi hujan asam dari PLTP kapasitas 110 MW sebesar 1,62 x 10⁻⁶ kg SO₂ eq/kWh. Studi kasus lain PLTP di negara Cina menunjukkan nilai indikator *acidification* sebesar 2,5 x 10⁻⁴ kg SO₂ eq (Wang et al., 2020).

4. Potensi *Eutrophication*

Eutrophication merupakan konsentrasi nutrient kimia yang ada di ekosistem yang dapat memicu pertumbuhan alga secara berlebihan. Emisi yang dapat mempengaruhi dampak ini seperti amonia, nitrat, nitrogen oksida dan fosfor yang ada di udara maupun di air yang dapat menyebabkan eutrofikasi di air. Metode karakterisasi yang digunakan berasal dari *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. *Eutrofication* termasuk kedalam kategori dampak lingkungan yang merusak ekosistem, kerusakannya dinyatakan dalam satuan kg PO₄ eq sebagai dampak *midpoint*, dan satuan *potentially disappeared fraction (PAF)*m²*years/kg emission* sebagai dampak *endpoint*.

Potensi eutrofikasi muncul pada fase konstruksi atau pada saat pengeboran. Pada Yu et al., 2017 menunjukkan hasil dari potensi eutrofikasi dari PLTP kapasitas 110 MW sebesar 3,46 x 10⁻⁵ kg PO₄ eq. Studi kasus lain PLTP di negara Cina menunjukkan nilai indikator *eutrophication* sebesar 3,25 x 10⁻⁵ kg PO₄ eq (Wang et al., 2020).

kategori dampak sekunder yang mungkin dikaji pada aktivitas PLTP meliputi:

1. Potensi *Photochemical Oxidant*

Kategori dampak ini terbentuk dari reaksi antara *volatile organic compounds* (VOC) dan nitrogen oksida yang terkena panas dan sinar matahari. Hal ini biasa disebut juga dengan *summer smog*. *Summer smog* merupakan polusi udara yang biasa ditemui di kawasan industri dan juga pada polusi kendaraan. Pada kasus *summer smog* yang ringan dapat menyebabkan sesak nafas pada penderita asma. Sedangkan pada kasus *summer smog* yang berat manusia sehat (bukan penderita asma) dapat menderita iritasi pernafasan, batuk dan susah bernafas. Karakteristik ini dilakukan dengan menggunakan *United Nations Economic Commission for Europe* (UNECE).

Potensi *photochemical oxidant* muncul pada fase konstruksi atau pada saat pengeboran serta pada tahap operasional. Pada Yu et al., 2017 menunjukkan hasil dari potensi *photochemical oxidant* dari PLTP kapasitas 110 MW sebesar $8,97 \times 10^{-5}$ kg C₂H₄ eq.

2. Potensi *Abiotic Depletion (Fossil dan Non-fossil)*

Potensi penurunan abiotik baik fosil maupun non fosil dapat disebabkan karena penurunan jumlah material anorganik akibat proses ekstraksi berbagai material anorganik seperti air, logam, gambut, batubara, dll.

Potensi *abiotic depletion* (fosil dan non fosil) muncul pada fase konstruksi atau pada saat pengeboran. Pada Yu et al., 2017 menunjukkan hasil dari potensi *abiotic depletion* dari PLTP kapasitas 110 MW sebesar $4,03 \times 10^{-9}$ MJ untuk fosil dan $1,49 \times 10^{-3}$ Sb untuk non fosil.

3. *Toxicity*

Emisi yang mempengaruhi kategori dampak ini seperti logam berat yang dapat berdampak di ekosistem. Dampak *toxicity* dapat berasal dari elemen fluida panas bumi seperti arsenik, boron, mangan, aluminium, dll. Konsentrasi dan distribusi elemen ini dapat menyebabkan dampak toksisitas (Bargagli et al., 1997). Namun demikian elemen ini dapat ditemukan pada aktivitas manusia lain (Davraz et al., 2017). Potensi kategori dampak toksisitas ini dihitung berdasarkan indeks yang menunjukkan potensi bahan kimia yang dapat merusak lingkungan. Potensi toksisitas seperti *marine aquatic eco toxicity*, *human toxicity*, *fresh water aquatic eco toxicity*, *terrestrial eco toxicity* muncul pada fase konstruksi atau pada saat pengeboran. Pada Yu et al., 2017 menunjukkan hasil dari potensi *toxicity* dari PLTP kapasitas 110 MW sebesar $1,97 \times 10^{-}$

¹¹ kg 1,4-DB eq untuk *marine aquatic eco toxicity*, $5,2 \times 10^{-8}$ kg 1,4-DB eq untuk *human toxicity*, $1,27 \times 10^{-7}$ kg 1,4-DB eq untuk *fresh water aquatic eco toxicity*, dan $1,73 \times 10^{-6}$ Sb untuk *terrestrial eco toxicity*.

4. Water Footprint

Water footprint adalah perhitungan total volume setiap jenis air yang digunakan pada proses produksi suatu produk. Dengan menghitung jejak air dapat diketahui volume air yang digunakan dan kontaminasi air yang terbentuk pada produksi dari setiap unit produk. *Water footprint* dapat dilakukan dengan perhitungan jumlah volume penggunaan air yang berasal dari mata air (*blue water footprint*), jumlah volume penggunaan air yang berasal dari air hujan (*green water footprint*) dan jumlah volume air yang digunakan untuk mengasimilasi atau melarutkan polutan (*grey water footprint*) pada setiap proses produksi.

Pada tahap operasional masing-masing tipe PLTP memiliki dampak *water footprint* 0,29-0,72 gal/kWh untuk *Enhanced Geothermal System (EGS)*, 0,27 untuk *binary plant*, dan 0,01 gal/kWh untuk sistem *flash*. Pada sistem *flash* akumulasi kehilangan air akibat evaporasi dan blowdown sebesar 2,7 gal/kWh. Tahap konstruksi memiliki dampak *water footprint* yang lebih kecil, yaitu 0,001 gal/kWh untuk sistem *binary* dan *flash* serta 0,01 gal/kWh untuk EGS (Clark et al., 2010). Pada studi lain menunjukkan intensitas pemakaian air pada kegiatan PLTP sebesar 20 L/MWh (Anderson & Rezaie, 2019).

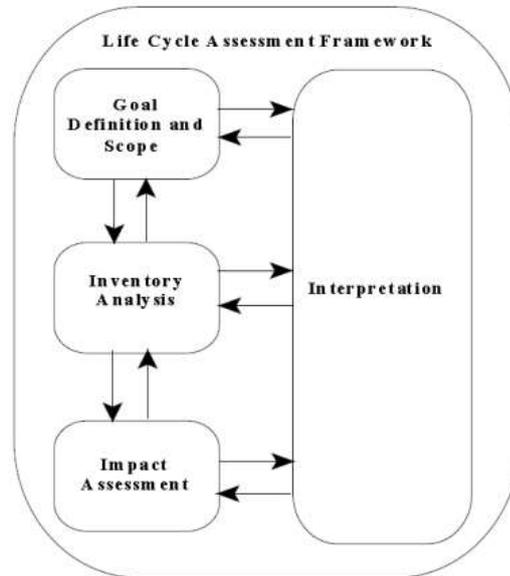
5. Land Use Change

Dampak kategori ini merupakan dampak terhadap lahan yang digunakan untuk agrikultur, pemukiman antropogenik dan pengambilan sumber daya alam. Dampak dari *land use* adalah hilangnya kesempatan bagi hewan dan tumbuhan dalam memanfaatkan lingkungan sebagai tempat tinggal dan mencari makan. Penyebab dampak lingkungan *land use* adalah pembukaan lahan baru, alih fungsi lahan, serta kerusakan hutan. Kerusakan akibat *land use* dinyatakan dalam *potentially disappeared fraction (PAF)*m² *years* yang berarti potensial kehilangan spesies per m² tiap tahunnya. Metode karakteristik berdasarkan UNEP/SETAC *land use assessment framework*. Potensi dampak penggunaan lahan dari PLTP adalah sebesar 404 m² /GWh (Anderson & Rezaie, 2019).

II.3 Penilaian Daur Hidup

Perhitungan daur hidup berasal dari analisa rantai proses. Tahapan daur hidup pada aktivitas PLTP adalah dari kegiatan eksplorasi produksi uap panas bumi, konstruksi lapangan uap dan

pembangkit, kegiatan operasional, serta sampai pasca operasional. Batasan sistem yang dikaji untuk kajian daur hidup harus ditetapkan terlebih dahulu seperti pada aktivitas PLTP. Batasan sistem dari kajian yang dilakukan adalah daur hidup produk kwh listrik yang dihasilkan dari PLTP (Sullivan et al, 2010).



Gambar II.3 Kerangka Kajian Daur Hidup
Sumber: (AIA, 2010)

Analisis dampak yang terjadi dari setiap kegiatan yang dianalisis maka digunakan metode kajian daur hidup. Analisis yang akan dilakukan mencakup data bahan bakar, bahan baku, bahan kimia, produk, dan emisi yang dihasilkan dalam kegiatan suatu industri. Kajian daur hidup terdiri dari empat tahap utama. Tahap pertama yang dilakukan menentukan tujuan ruang lingkup atau *goals & scope*. Tahap kedua adalah inventori daur hidup (*life cycle inventory*) yang memuat siklus produk beserta masukkan dan luaran ke lingkungan. Tahap ketiga adalah *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) untuk menganalisa dampak lingkungan yang relevan dari siklus produk. Tahap terakhir adalah interpretasi studi (Goedkoop et al., 2016).

- **Goals & Scope (Tujuan dan Ruang Lingkup)**

Langkah awal adalah menentukan tujuan dari penelitian ini. Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan dampak lingkungan yang ditimbulkan dari kegiatan proses maupun produk suatu industri. Tujuan dari penelitian ini juga didukung dengan penentuan batasan-batasan dan ruang lingkup penelitian.

Penentuan tujuan dan ruang lingkup ada beberapa cara (Goedkoop et al., 2016), diantaranya:

- a. *Text field*, untuk menginput data pemilik, komentar, alasan, dan tujuan melakukan penelitian LCA.

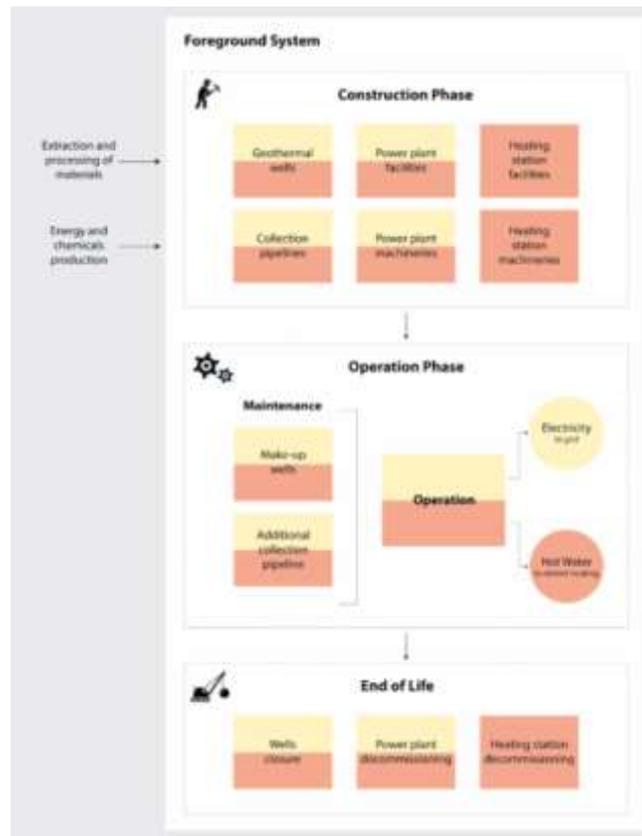
- b. Pemilihan *libraries*, untuk memilih metode-metode apa yang paling sesuai dengan penelitian.

Ruang lingkup pada LCA dapat dibagi menjadi empat macam ruang lingkup (AIA, 2010) yaitu:

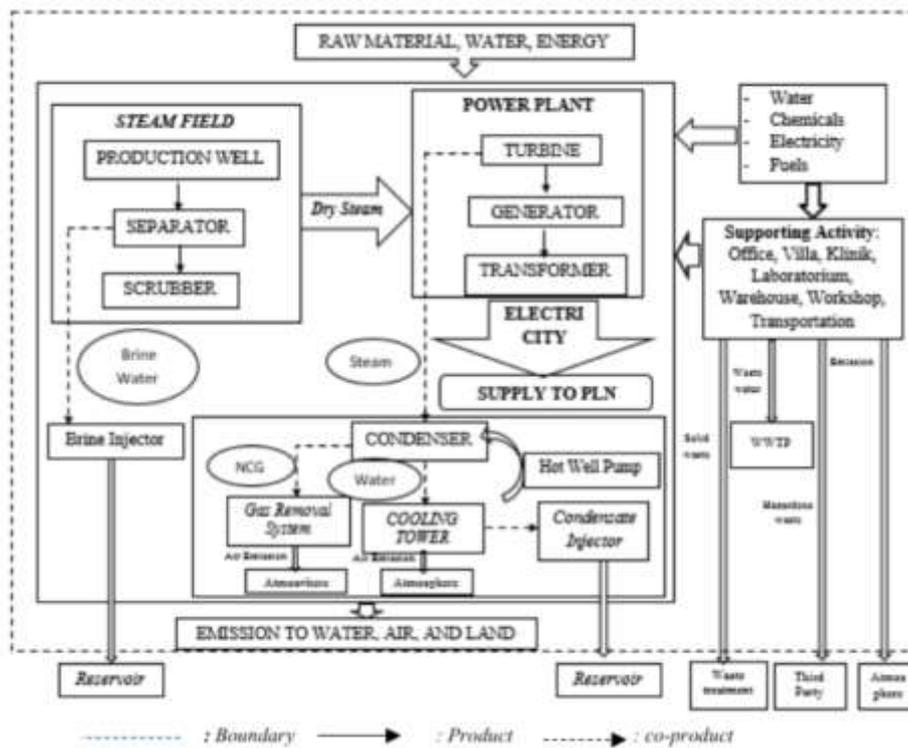
- a. *Cradle to grave*, ruang lingkup pada bagian ini dimulai dari raw material sampai pada pengoperasian produk dan produk selesai dikonsumsi.
- b. *Cradle to gate*, ruang lingkup pada analisis daur hidup dimulai dari raw material sampai ke gate sebelum proses operasi.
- c. *Gate to gate* merupakan ruang lingkup pada analisis daur hidup yang terpendek karena hanya meninjau kegiatan yang terdekat.
- d. *Cradle to cradle* merupakan bagian dari analisis daur hidup yang menunjukkan ruang lingkup dari raw material sampai pada daur ulang material.

Ada empat pilihan utama untuk menentukan batas-batas sistem yang digunakan berdasarkan *standard* ISO 14044 didalam sebuah studi LCA: (1) *Cradle to grave*: termasuk bahan dan rantai produksi energi semua proses dari ekstraksi bahan baku melalui tahap produksi, transportasi dan penggunaan hingga produk akhir dalam siklus hidupnya. (2) *Cradle to gate*: meliputi semua proses dari ekstraksi bahan baku melalui tahap produksi (proses dalam pabrik), digunakan untuk menentukan dampak lingkungan dari suatu produksi sebuah produk. (3) *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. (4) *Gate to gate*: meliputi proses dari tahap produksi saja, digunakan untuk menentukan dampak lingkungan dari langkah produksi atau proses.

Tujuan kajian daur hidup untuk PLTP adalah untuk menyusun kerangka daur hidup PLTP, penerapan analisis inventori daur hidup dan mengkaji dampak dari aktivitas konstruksi, pengeboran, dan operasional, serta membandingkan pemilihan teknologi PLTP. Ruang lingkup daur hidup untuk PLTP yaitu *system function & unit* dan batasan (*boundaries*) sistem. Fungsi dan unit sistem merupakan satuan dampak yang ditetapkan setiap produk yang dihasilkan. Pada PLTP fungsi unit yang ditetapkan adalah produksi listrik (kWh). Batasan sistem yang dapat ditetapkan pada kajian daur hidup adalah neraca energi dan bahan baku yang dipakai untuk kegiatan konstruksi, operasi, dan pasca operasi (Yu et al., 2017) (Paulillo et al., 2019).



Gambar II.4 Batasan Sistem *Combine Cycle Power Plant*
(Sumber: Paulillo et al., 2019)

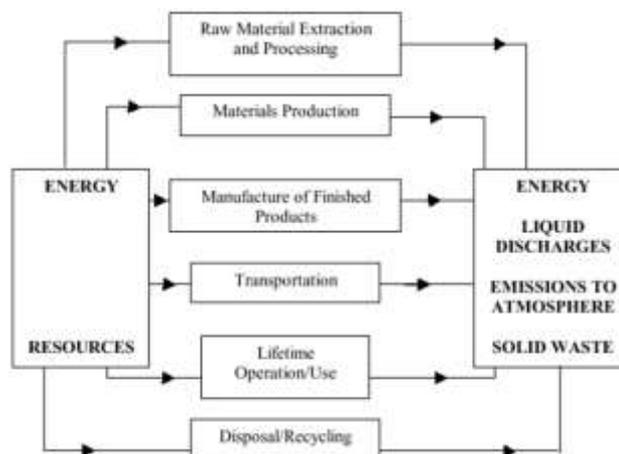


Gambar II.5 Batasan Sistem PLTP di Indonesia
Sumber:(Annisa & Rahardyan, 2018)

Pada batasan sistem kajian daur hidup PLTP, batasan sistem *cradle to grave* yang dimaksud adalah dimulai pada saat eksplorasi sampai kepada penutupan fasilitas sumur. Gambar II.4 menunjukkan kajian daur hidup yang dilakukan dapat dimulai dari fase pembangunan sumur panas bumi dan pembangkit sebagai tahapan *cradle* pada kajian. Tahapan *gate to gate* pada saat operasional serta pemeliharaan. Tahapan *grave* atau *end of life* PLTP pada saat penutupan sumur dan pembangkit. Detil dari batasan sistem *gate to gate* atau operasional PLTP dapat dilihat pada gambar II.5. Pada gambar II.5 menunjukkan batasan sistem operasional PLTP mencakup lapangan uap, pembangkit listrik, reinjeksi air, sampai kepada aktivitas pendukung seperti kantor.

- ***Life Cycle Inventory (LCI)***

Pada tahap inventori daur hidup dilakukan rekapitulasi data bahan bakar, bahan baku, dan bahan kimia yang digunakan pada setiap unit proses serta produk, produk samping, dan emisi yang dihasilkan dari setiap unit proses. Inventori daur hidup pada kegiatan konstruksi PLTP terdiri dari material yang digunakan untuk pengeboran sumur, konstruksi pipa, dan konstruksi mesin, elektrikal, instrumen, dan sipil PLTP. Pada tahap operasional inventori yang dilakukan pada emisi udara seperti CO₂ dan H₂S dan emisi ke air yang berasal dari air terproduksi PLTP. Pada tahap pasca operasi inventori yang dipertimbangkan adalah material yang dipakai untuk penutupan PLTP (Yu et al., 2017).



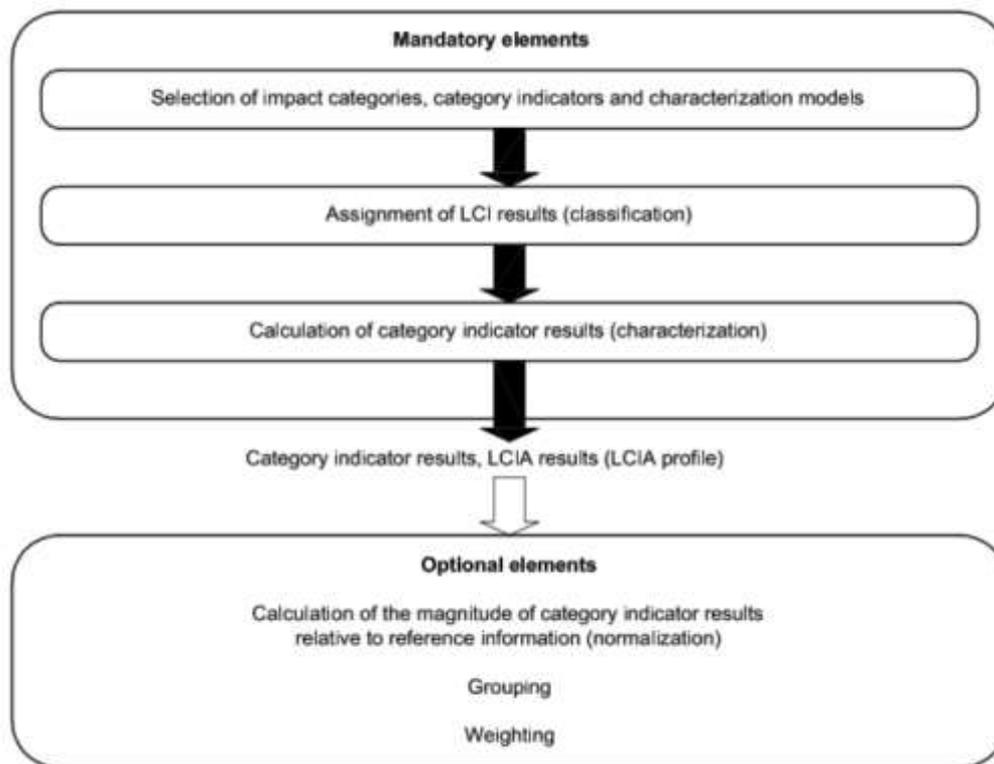
Gambar II.6 Tahapan Analisis Inventori Daur Hidup (AIA, 2010)

Inventori daur hidup merupakan tahapan yang paling penting dalam kajian daur hidup. Inventori data memerlukan unit data yang spesifik namun tidak selalu ada. Kemudian inventori data ini menghabiskan waktu dan biaya yang banyak (Paulillo et al., 2021). Pada tahap inventarisasi, semua data mengenai emisi yang berpotensi timbul dan juga konsumsi bahan baku dikumpulkan. Pada tahap inventarisasi ini terdapat beberapa fase, yaitu:

- a. *Process*, menunjukkan hal-hal yang termasuk dalam proses produksi suatu produk yang membutuhkan penginputan data.
- b. *Product stages*, mendeskripsikan bagaimana suatu produk diproduksi, digunakan, dan dibuang.
- c. *System description*, bagian ini merupakan catatan terpisah yang digunakan untuk mendeskripsikan struktur dari sistem.
- d. *Waste types*, terdapat *waste scenarios* dan *disposal scenarios*. *Waste scenarios* didefinisikan sebagai material yang akan dibuang atau didaur ulang, sedangkan *disposal scenarios* didefinisikan sebagai produk yang akan digunakan kembali.

Untuk satuan yang belum sama, maka dilakukan konversi nilai satuan data pada setiap unit pengolahan dalam satuan yang sama untuk mempermudah penginputan dan pengolahan data pada perangkat lunak (AIA, 2010) (Goedkoop et al., 2016).

- **Life Cycle Impact Assessment (LCIA)**



Gambar II.7 Tahap Life Cycle Impact Assessment (ISO 14044:2006)

Tahap ketiga pada LCA adalah tahap *life cycle impact assessment* (LCIA) atau tahap analisa mengenai jenis dan besarnya nilai tiap kategori dampak yang dihasilkan. Kemudian melakukan pemilihan metode dampak lingkungan yang digunakan dalam penelitian pada *software* SimaPro. Selanjutnya akan didapatkan skenario besaran dampak dari setiap kegiatan

yang dianalisis berupa bagan. Pada tahapan penentuan dampak terdapat beberapa langkah seperti karakterisasi, normalisasi, serta opsional yaitu pembobotan dan pengelompokan:

a. Karakterisasi

Karakterisasi merupakan penilaian kontribusi *input* dan *output* masing-masing unit sesuai dengan kategori dampak. Karakterisasi pada *software* SimaPro yang mana terjadi pengalihan faktor karakterisasi (CF) dengan nilai *damage categories* pada masing-masing unit/system yang dianalisis LCA. Contoh perhitungan konversi dengan CF dapat dilihat pada tabel II.3.

Tabel II.3 Hasil dari Karakterisasi inventori data *elementary flow*

<i>Elementary Flow</i>	<i>Climate Change</i>		<i>Ozone Layer Depletion</i>		<i>Eutrophication</i>	
	<i>CF</i>	<i>Result</i>	<i>CF</i>	<i>Result</i>	<i>CF</i>	<i>Result</i>
<i>1 kg CO₂</i>	1	1				
<i>10 g CH₄</i>	25	0,25				
<i>1 g CFC 142b</i>	2310	2,31	0,07	0,00007		
<i>5 g NO₂</i>					0,56	0,0028
<i>Impact Category</i>		3,56		0,00007		0,0028
<i>Indicator Result</i>						
<i>Unit of Result</i>	<i>Kg CO₂ equivalent</i>		<i>kg CFC 11 equivalent</i>		<i>kg P Equivalent</i>	

(Sumber: Goedkoop et al., 2016).

b. Normalisasi

Normalisasi dilakukan karena masing-masing kategori dampak memiliki satuan yang berbeda-beda. Setelah normalisasi ini maka dapat ditentukan kategori dampak yang terbesar atau masing-masing dapat dibandingkan yang memiliki kontribusi dominan. Metode normalisasi yang pernah digunakan untuk PLTP di Indonesia adalah CML-IA pada Simapro. CML-IA merupakan metode yang berfokus pada mid-point level yang mana ada 11 kategori dampak (Yu et al., 2017).

c. Pembobotan dan Pengelompokan

Pembobotan dan pengelompokan merupakan tahapan opsional (*non-mandatory*) dalam menghitung besaran kategori indikator dari tahap normalisasi. Pengelompokan dilakukan apabila interpretasi data yang dilakukan selanjutnya berdasarkan beberapa kategori dampak. Pengelompokan dimasukkan dalam interpretasi data menjadi beberapa kategori dampak atau *endpoint*. Pembobotan dilakukan apabila kategori dampak dijadikan *single score* dengan memberikan bobot. Pembobotan ini dilakukan apabila interpretasi data dilakukan pada kategori *midpoint*.

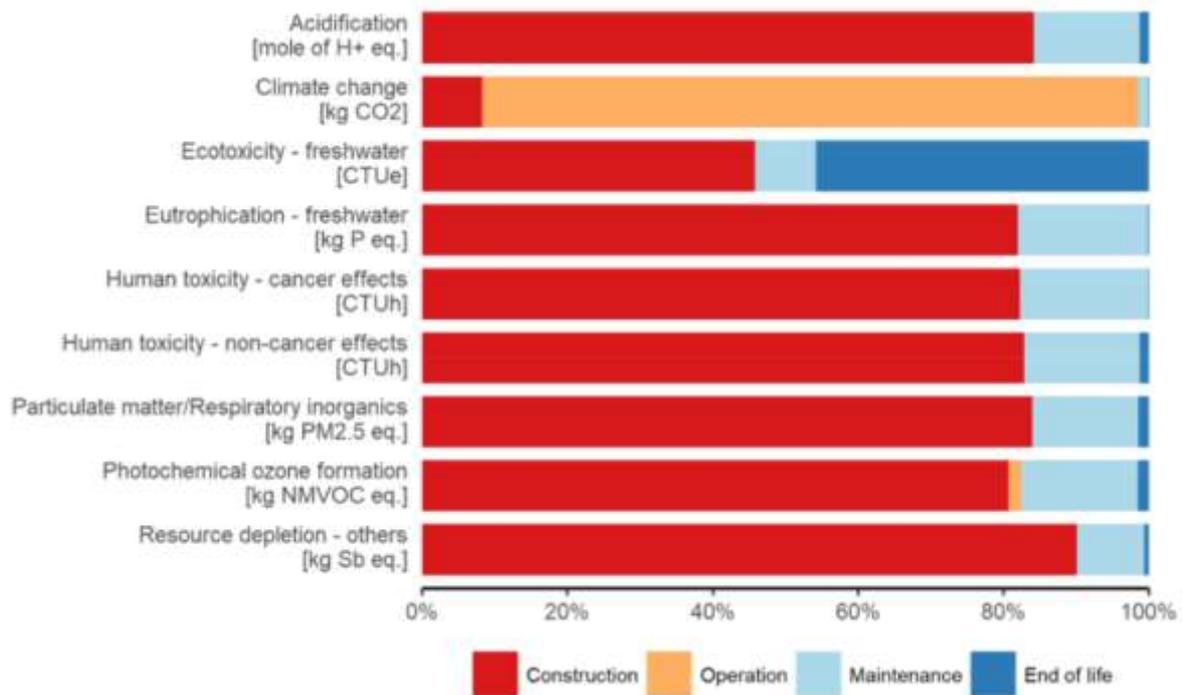


Gambar II.8 Struktur Umum Kategori Dampak (Jolliet et al., 2003)

Dalam proses analisis dampak lingkungan, metode penilaian dampak yang digunakan akan dipilih sesuai dengan penelitian yang dilakukan. Terdapat dua pendekatan kategori analisis dampak, yaitu secara *midpoint* dan *endpoint*. *Midpoint* adalah pendekatan yang lebih berfokus pada masalah lingkungan tunggal, misalnya *global warming*, *ozone layer depletion*, *acidification* dan lain-lain. *Endpoint* adalah pendekatan yang berada pada tingkat pengkategorian yang lebih besar, misal *ecosystem quality (biotic abiotic natural environment)*, *human health, resources*.

- **Interpretasi Data**

Dampak yang muncul dari setiap proses memiliki besaran yang berbeda tergantung pada input material, bahan bakar, energi yang digunakan, emisi yang dikeluarkan serta proses produksi yang terjadi. Berbagai jenis dampak yang muncul perlu dianalisis lebih dalam untuk menafsirkan data pada perangkat lunak dengan data serta proses eksisting pada suatu proses industri. Tujuan hal ini dilakukan untuk mengetahui titik *hotspot* atau titik dengan dampak terbesar dari serangkaian proses suatu industri.



Gambar II.9 Contoh *Hotspot Analysis* Sistem Produk
(Sumber: Paulillo et al., 2019)

Hotspot proses merupakan titik dengan dampak terbesar dari suatu sistem proses. Dampak terbesar ditentukan berdasarkan hasil penilaian dampak (*life cycle impact assessment*) dan input data (*life cycle inventory*) baik berupa bahan baku, bahan bakar, energi listrik, serta emisi pada tahap sebelumnya. Dari tahap *LCIA* (*Life Cycle Impact Assessment*) dapat diketahui kontribusi dampak yang dihasilkan dari proses yang ada. Interpretasi menjadi dasar pemilihan program perbaikan. Rekomendasi berisi alternatif program-program lingkungan sebagai upaya dalam mengurangi dampak lingkungan dari aktivitas proses produksi.