

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang dan Masalah

Energi listrik mempunyai peranan yang sangat penting dalam kehidupan manusia, terutama sebagai pendukung kegiatan ekonomi nasional untuk mencapai tujuan sosial, ekonomi, dan lingkungan. Listrik saat ini masih bergantung pada bahan bakar fosil dan minyak bumi. Semakin tingginya penggunaan energi fosil akan menyebabkan kenaikan emisi gas rumah kaca. Iklim menjadi tidak stabil dan meningkatnya suhu bumi dan permukaan air laut sehingga menyebabkan pemanasan global. Emisi karbon pada tahun 1750 sampai 2005 berkontribusi besar terhadap perubahan iklim (Luo & Wu, 2016). Energi fosil perlu diperbaharui agar tidak habis, sehingga mendorong para peneliti untuk mencari sumber energi baru dan terbarukan seperti biomassa, pembangkit listrik energi surya, pembangkit listrik energi air, energi angin, dan lain-lain.

Energi baru dan terbarukan merupakan jenis energi yang dihasilkan dari sumber yang terus menerus yang berasal dari alam dan tidak akan habis. Energi terbarukan yang paling potensial untuk diterapkan di wilayah Indonesia adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). PLTS atau *Solar Photovoltaic System* adalah salah satu aplikasi pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi listrik yang memanfaatkan sel surya untuk mengubah energi matahari menjadi listrik berdasarkan prinsip efek *photovoltaic*.

Pasar *photovoltaic* yang terus berkembang pesat sangat penting untuk dilakukan analisa kinerja lingkungan dari teknologi *photovoltaic* dari perspektif yang lebih luas. Analisis tersebut tidak hanya memberikan informasi berharga bagi pembuat kebijakan dan investor energi, tetapi juga merupakan alat pengoptimalan produk yang baik bagi produsen *photovoltaic*. *Life Cycle Assessment* (LCA) merupakan teknik untuk menilai dampak lingkungan dari suatu produk atau proses dari awal hingga akhir dengan mempertimbangkan aliran material dan energi di semua tahap produksi produk atau proses (Frischknecht et al., 2015).

Penilaian siklus hidup perlu dilakukan untuk menentukan apakah *photovoltaic* lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan pembangkit listrik konvensional yang ada. Selain itu, analisis ini bertujuan untuk memperhitungkan aspek lingkungan dan potensi pengaruh yang terkait dengan suatu produk dengan memeriksa daftar *input* dan *output* dari seluruh sistem, efek lingkungan yang terkait dengan *input* dan *output* tersebut dan menentukan keberlanjutan produk. *Life Cycle Assessment* (LCA) menggunakan standar ISO 14040 sebagai standar untuk analisis lingkungan. Analisis lingkungan ini dilakukan untuk waktu siklus hidup suatu produk atau disebut juga *cradle to grave*, mulai dari pemilihan material hingga pembuangan (Murphy & McDonnell, 2017).

Banyak penelitian telah menghitung dan membandingkan LCA emisi karbon dari sistem *photovoltaic* surya dengan pembangkit bahan bakar konvensional. Namun demikian, LCA nilai emisi karbon dipengaruhi oleh banyak hal faktor yang bergantung pada lokasi dan teknologi. Studi menunjukkan bahwa *photovoltaic* emisi gas rumah kaca 37,3 - 64,3 gCO₂eq/kWh jauh lebih rendah dari intensitas emisi saat ini sektor ketenagalistrikan Indonesia. Sebagai kebutuhan listrik terus meningkat, PV berpotensi menurunkan emisi tahunan sebesar 631 - 654 MtCO₂eq pada tahun 2050 dan membantu Indonesia mencapai emisi nol bersih pada tahun 2060 (Gandhi et al., 2022).

Dalam penelitian ini, penulis melakukan analisis LCA dari *photovoltaic system* di Indonesia dengan menghitung nilai emisi karbon yang dihasilkan panel surya selama panel tersebut digunakan. Studi ini berfokus pada penilaian siklus hidup produksi panel surya *polycrystalline* di Indonesia dengan kapasitas 1.838 Wp dianggap sebagai unit fungsional.

Berdasarkan uraian di atas, pokok permasalahan yang akan dibahas pada tugas akhir ini adalah bagaimana proses *Life Cycle Assesment* (LCA) pada *photovoltaic* di Indonesia dan berapa emisi karbon yang dihasilkan panel surya jenis *polycrystalline* selama panel digunakan.

1.2 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui proses *Life Cycle Assessment* (LCA) pada *photovoltaic* jenis *polycrystalline* di Indonesia.
2. Mengetahui besaran emisi karbon yang dihasilkan panel surya jenis *polycrystalline* selama panel digunakan.

1.3 Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran dalam studi kasus ini adalah proses *Life Cycle Assessment* (LCA) pada *photovoltaic* dan mengetahui besaran emisi karbon yang dihasilkan panel surya selama panel tersebut digunakan. Produksi *photovoltaic* mengkonsumsi sumber daya energi dan menghasilkan dampak lingkungan berupa emisi. Oleh karena itu, diperlukan metode penilaian dampak lingkungan dan analisis efisiensi penggunaan energi dari produk *photovoltaic*, sehingga dapat diidentifikasi peluang dan penyusunan rekomendasi skenario perbaikannya. Jumlah besaran dampak yang dihasilkan sesuai dengan jumlah *input* yang digunakan dalam memproduksi suatu produk. Data *input* dan *output* diinventarisasi pada setiap masukan dan keluaran dari produk untuk dilakukan analisis penilaian dampak.

Penilaian dampak suatu produk dapat dihitung menggunakan metode *Life Cycle Assessment*. LCA merupakan metode yang mampu memberikan gambaran dampak lingkungan yang dapat ditimbulkan dari suatu siklus hidup produk dan menghasilkan alternatif atau rekomendasi usulan perbaikan berdasarkan hasil dari analisis inventori dan analisis dampak lingkungan. Interpretasi hasil LCA dijadikan sebagai acuan untuk menyusun skenario alternatif perbaikan untuk menurunkan dampak lingkungan dari *photovoltaic*. Hal tersebut dapat membantu mewujudkan *photovoltaic* yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Penulis mengacu pada beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan studi kasus yang sedang dilakukan. Menurut penelitian sebelumnya Hsu, et al. (2012) dan Gandhi, et al. (2022), total pembangkit energi *photovoltaic* 1 kWp dengan iradiasi 1700 kWh/m² tahun selama 30 tahun masa pakai yang diasumsikan dengan degradasi tahunan 0,5%. Oleh karena itu, nilai emisi siklus hidup yang dihasilkan sebesar 37,3 - 64,3 gCO₂eq/kWh. Menurut Luo, et al.

(2018) membandingkan teknologi *photovoltaic* silikon multi - kristal (multi - Si) yang berbeda untuk kasus Singapura dan diperoleh nilai LCA sebesar 20,9 - 30,2 gCO₂eq/kWh. Peneliti menyatakan bahwa mengganti modul *photovoltaic* standar dengan modul *aluminium double - glazed* tanpa bingkai dapat mengurangi emisi lebih lanjut.

1.4 Hipotesis

Hipotesis dari penelitian ini tentang analisa *life cycle assesment* emisi karbon pada *photovoltaic* yang dapat dihitung berdasarkan data nilai iradiasi matahari, rasio kinerja, efisiensi modul, masa pakai sistem dan total area modul. Hasil dari perhitungan tersebut akan menghasilkan nilai emisi karbon yang lebih rendah yang dihasilkan dari suatu kepingan modul surya. Penelitian ini menggunakan pendekatan *cradle to grave* yang artinya siklus hidup modul *photovoltaic* dimulai dari *raw material* sampai pengoperasian produk.

1.5 Kontribusi

Adapun kontribusi pada penelitian ini yaitu dapat mengetahui proses analisis *life cycle assesment* emisi karbon pada *photovoltaic* dan dapat menghitung emisi karbon yang dihasilkan panel surya dengan studi literatur dari berbagai referensi penelitian sebelumnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan suatu pembangkit untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik berdasarkan prinsip efek *photovoltaic*. Cahaya matahari yang ditangkap oleh panel surya diubah menjadi energi listrik karena adanya radiasi cahaya yang membebaskan elektron-elektron sehingga mengalir pada sambungan semikonduktor tipe n dan p yang kemudian menghasilkan arus listrik (Nurjaman & Purnama, 2022).

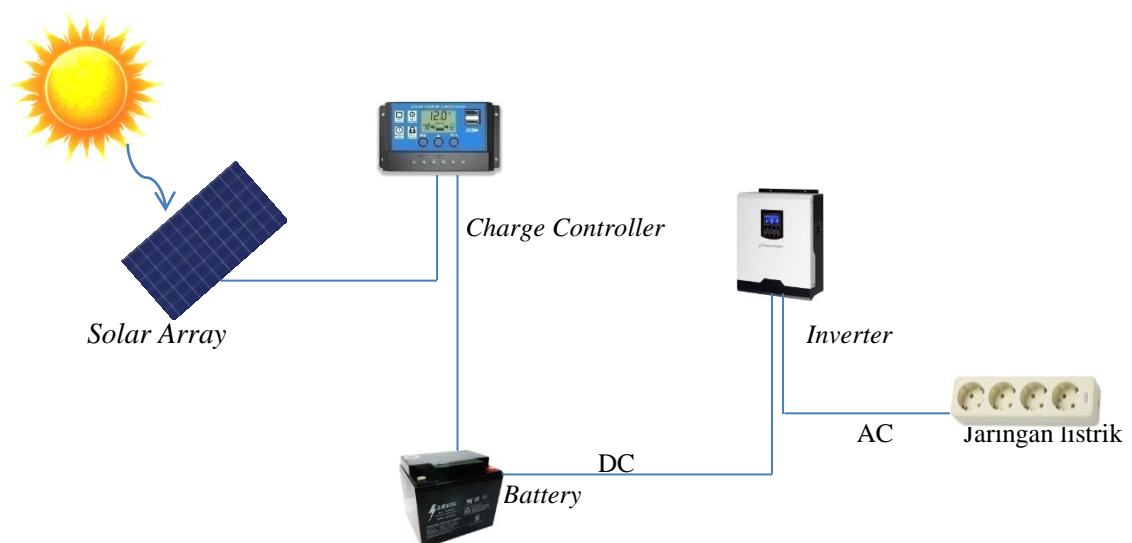
PLTS memanfaatkan radiasi matahari untuk menghasilkan listrik DC yang dapat diubah menjadi listrik AC apabila diperlukan. Meskipun cuaca mendung dan masih terdapat cahaya matahari, maka PLTS tetap dapat menghasilkan listrik. PLTS pada dasarnya adalah sumber energi dan dapat dirancang untuk memenuhi kebutuhan listrik yang kecil hingga besar, baik secara mandiri, *hybrid*, metode desentralisasi (satu rumah satu pembangkit) maupun dengan metode sentralisasi (listrik didistribusikan dengan jaringan kabel) (Rahmawati & Sujito, 2019). PLTS memiliki komponen utama, yaitu modul surya, *Solar Charge Controller*, Inverter, dan Baterai (Sukandarrumidi & Djoko, 2013).

2.2 Prinsip Kerja PLTS

Pada siang hari, sinar matahari menghasilkan radiasi ditangkap oleh panel surya, maka elektron - elektron yang ada pada sel surya bergerak dari N ke P sehingga pada terminal keluaran panel berbeda - beda tergantung dari jumlah sel surya yang terhubung di dalam panel surya. Sinar matahari terdiri dari partikel yang sangat kecil (foton). Ketika terkena sinar matahari, foton menghantam atom semikonduktor silikon sel surya sehingga menghasilkan energi yang cukup besar untuk memisahkan elektron dari struktur atomnya. Elektron yang terpisah dan bermuatan negatif (-) akan bebas bergerak pada daerah pita konduksi dari bahan semikonduktor. Atom yang kehilangan elektron tersebut akan terjadi kekosongan pada strukturnya, kekosongan tersebut dinamakan dengan "*hole*" dengan muatan positif (+).

Daerah semikonduktor dengan elektron bebas bersifat negatif dan bertindak sebagai pendonor elektron (*N-type*), sedangkan daerah semikonduktor dengan *hole* bersifat positif dan bertindak sebagai penerima elektron (*P-type*). Pertemuan daerah positif dan negatif (*PN Junction*) akan menghasilkan energi yang mendorong elektron dan *hole* untuk bergerak ke arah yang berlawanan. Elektron akan bergerak menjauhi daerah negatif sedangkan *hole* akan bergerak menjauhi daerah positif. Ketika diberikan sebuah beban berupa lampu maupun perangkat listrik lainnya di persimpangan positif dan negatif (*PN Junction*) ini, maka akan menimbulkan arus listrik (Afrida et al., 2021).

Keluaran dari panel surya berupa arus DC yang besar tegangan keluarannya tergantung pada jumlah sel surya yang dipasang di panel surya dan jumlah sinar matahari yang menyinari panel surya. Keluaran dari panel surya ini dapat digunakan langsung untuk konsumen membutuhkan sumber tegangan DC dengan konsumsi energi yang rendah. Sistem Instalasi menggunakan *solar cell* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem Instalasi menggunakan *solar cell*

Pada malam hari kondisi panel surya tidak terkena sinar matahari, maka keluaran dari panel surya harus dihubungkan ke media penyimpanan yaitu baterai. Namun, tidak langsung dihubungkan ke baterai, tetapi harus terhubung ke rangkaian *Solar Charge Controller*, dimana didalam rangkaian tersebut terdapat rangkaian pengisi baterai otomatis (Sutarno, 2013).

Modul surya dengan kapasitas tertentu dapat menghasilkan jumlah listrik yang berbeda-beda. Cara kerja PLTS sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu faktor lingkungan, temperatur *photovoltaic*, kondisi cuaca lingkungan dan intensitas cahaya matahari. Sel surya bekerja berdasarkan prinsip p-n *junction*, yaitu sambungan antara semikonduktor tipe-p dan tipe-n. Semikonduktor terdiri dari ikatan-ikatan atom yang terdapat elektron sebagai komponen dasar. Semikonduktor tipe-n memiliki kelebihan elektron bermuatan negatif, sedangkan semikonduktor tipe-p mempunyai kelebihan *hole* bermuatan positif dalam struktur atomnya (Sutarno, 2013).

2.3 Macam-macam PLTS

Berdasarkan aplikasi dan konfigurasinya, PLTS secara umum diklarifikasikan menjadi tiga, yaitu sistem PLTS yang tidak terhubung dengan jaringan (*off-grid*), sistem PLTS terhubung dengan jaringan (*grid-connected* atau *on-grid*), dan PLTS yang digabung dengan jenis pembangkit listrik lain disebut sistem *hybrid*.

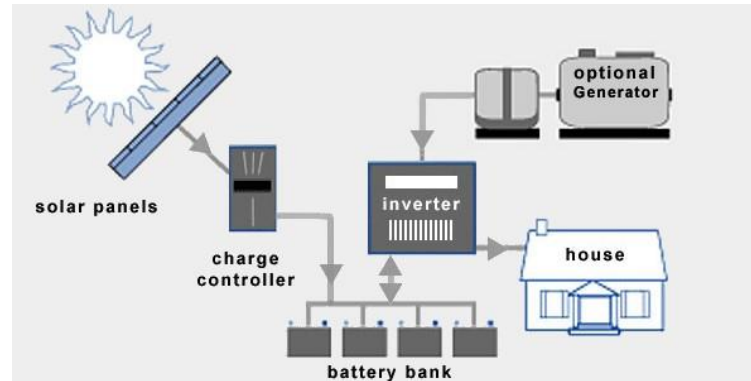
2.3.1 PLTS terpusat (*off-grid*)

Sistem pembangkit listrik tenaga surya terpusat (*off-grid*) adalah sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan radiasi matahari tanpa terhubung dengan jaringan PLN atau sumber listriknya hanya menggunakan radiasi matahari dengan bantuan panel surya. Sistem PLTS *off-grid* dimanfaatkan untuk daerah yang tidak terjangkau oleh listrik dari PLN seperti daerah pedesaan (Hasanah et al., 2018).

PLTS *off-grid* disebut sistem PLTS berdiri sendiri (*stand-alone*) karena beroperasi secara independen tanpa terhubung dengan jaringan listrik PLN (Ramadhani, 2018). Selain itu, sistem PLTS ini menggunakan baterai sebagai tempat penyimpanan energi yang telah dihasilkan oleh panel surya. Pada siang hari, modul surya bekerja sebagai suplai daya utama ke beban, sedangkan kelebihan daya yang dihasilkan oleh modul surya akan dimasukkan ke baterai dan disimpan sebagai daya cadangan dan baterai tersebut digunakan pada malam hari atau ketika modul surya tidak bekerja.

Sistem PLTS *off-grid* memiliki kelebihan yaitu ketika modul surya tidak bekerja dan jaringan listrik PLN terjadi pemadaman listrik, maka baterai akan bekerja untuk menyuplai beban. Namun PLTS jenis ini memiliki biaya instalasi

yang lebih mahal dibanding jenis PLTS on-grid. Skema sistem PLTS *off-grid* ditunjukkan pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Sistem *Off-grid*
(Sumber: SolarReview)

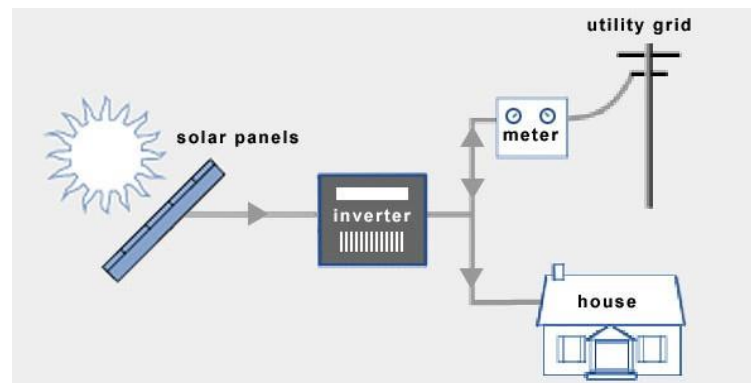
Sinar matahari ditangkap oleh panel surya mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik. Arus pada panel surya masih berupa arus DC dan energi listrik harus dikontrol arus dan tegangannya menggunakan SCC (*Solar Charge Controller*), kemudian energi listrik di-charge atau diisikan ke baterai. Pada baterai masih arus DC kemudian diubah ke arus AC menggunakan inverter sebelum digunakan ke alat elektronik rumah.

2.3.2 PLTS terinterkoneksi (*On-Grid*)

PLTS *on-grid* adalah pembangkit listrik yang tidak hanya menggunakan energi matahari sebagai sumber energi untuk menyuplai daya ke beban tetapi juga menggunakan jaringan listrik eksisting atau sistem PLTS yang terhubung dengan jaringan PLN. PLTS jenis ini adalah solusi *green energy* bagi penduduk perkotaan baik perumahan ataupun perkantoran serta dapat mengurangi tagihan listrik rumah tangga dan memberikan nilai tambah pada pemiliknya.

Pada sistem *on-grid*, PLTS ini tidak menggunakan baterai sebagai tempat penyimpanan energi yang telah dihasilkan oleh panel surya. Pada siang hari, modul surya bekerja sebagai suplai daya utama ke beban dan pembangkitan berlebih akan masuk ke jaringan distribusi, sedangkan pada saat modul surya tidak bekerja dan pada malam hari, daya disuplai oleh listrik PLN. Hal ini dimungkinkan karena sistem *on-grid* tetap terkoneksi dengan jaringan PLN (Learnsolarblog, 2017).

Sistem *on-grid* memiliki keuntungan yaitu biaya instalasi yang relatif murah karena tidak menggunakan komponen penyimpanan daya seperti baterai. Namun, sistem ini memiliki kekurangan yaitu ketika modul surya tidak bekerja dan jaringan listrik PLN padam, maka tidak ada daya yang tersuplai ke beban. Gambar 3 di bawah ini menunjukkan skema sistem PLTS *on-grid*.

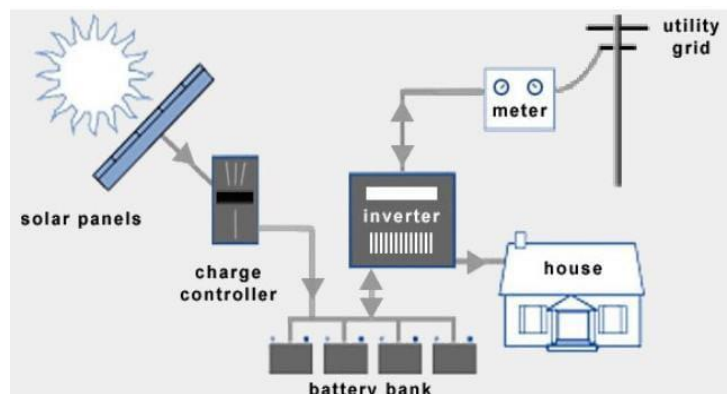


Gambar 3. Sistem *On-grid*
(Sumber: SolarReview)

Panel surya mendapat pencahayaan sehingga menghasilkan energi listrik. Listrik DC dari panel surya diubah menjadi listrik arus AC seperti listrik PLN melalui inverter. Listrik gelombang sinus yang di hasilkan inverter langsung masuk ke jaringan PLN sehingga dapat mengurangi tagihan bahkan bisa ekspor hasil listrik ke PLN. PLN juga menyediakan ekspor kWh sehingga PLN dapat mengekspor dan membeli kelebihan listrik dari panel surya. Jika listrik PLN mati, maka PLTS juga ikut mati karena tidak menggunakan baterai.

2.3.3 PLTS Hybrid

PLTS *hybrid* merupakan sistem *photovoltaic* yang terhubung ke jaringan PLN dengan baterai cadangan jika terjadi gangguan PLN. PLTS *hybrid* tidak hanya dapat mengurangi konsumsi daya listrik PLN, tetapi memiliki baterai yang memberikan daya cadangan ke beban - beban kritis jika terjadi pemadaman listrik PLN. Selain itu, PLTS *hybrid* merupakan pembangkit listrik yang menggabungkan sumber energi surya dengan sumber energi lainnya. Listrik yang dihasilkan PLN tidak hanya dari PLTA saja, melainkan dari PLTG, PLTD, PLTB, dan lain-lain. Gambar 4 di bawah ini menunjukkan skema sistem PLTS *hybrid*.



Gambar 4. Sistem *Hybrid*
(Sumber: SolarReview)

Listrik yang dihasilkan oleh sistem PLTS *hybrid* akan disimpan ke dalam baterai cadangan, seperti pada PLTS *off-grid*. Namun perbedaannya, jika di tipe *off-grid*, kekurangan cadangan listrik dari baterai diatasi oleh genset sedangkan untuk tipe *hybrid* secara otomatis akan dicadangkan oleh listrik dari PLN.

2.4 *Photovoltaic*

Photovoltaic atau modul surya merupakan teknologi yang berfungsi untuk mengkonversi radiasi matahari menjadi energi listrik secara langsung yang terbuat dari bahan semikonduktor dengan bahan silikon dan dilapisi dengan bahan khusus. *Photovoltaic* biasanya dikemas dalam suatu unit yang disebut modul. Modul surya terdiri dari beberapa sel surya yang dapat disusun secara seri atau paralel. Biasanya, satu keping sel surya mempunyai ketebalan 3 mm dan tersusun dari kutub positif dan negatif yang terbuat dari wafer bahan semikonduktor. Prinsip kerja sel surya adalah memanfaatkan efek *photovoltaic* yaitu suatu efek yang dapat mengubah secara langsung cahaya matahari menjadi suatu energi listrik (Sutarno, 2013).

Sinar matahari yang telah diterima oleh panel surya (elektron) akan terlepas dari atom silikon dan mengalir membentuk sirkuit listrik sehingga energi listrik dapat dihasilkan (Usman, 2020). Efisiensi kinerja panel surya tergantung dari berapa besarnya intensitas sinar matahari yang ditangkap oleh panel surya. Semakin tinggi intensitas sinar matahari yang ditangkap maka efisiensi energi listrik yang dihasilkan akan lebih baik.

Ada berbagai jenis modul surya yang dapat digunakan misalnya, panel *monocrystalline*, *polycrystalline*, *multi junction*, polimer, dan lain-lain. Setiap jenis memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Semakin tinggi efisiensinya, maka semakin tinggi energi listrik yang dihasilkan per satuan luas. Hal ini akan mengurangi luasan PLTS sehingga akan mengurangi biaya lahan. Nilai tertinggi dari efisiensi sel surya adalah efisiensi sebesar 44% yang menggunakan sel tipe *multi junction* (Usman, 2020).

2.4.1 Monocrystalline

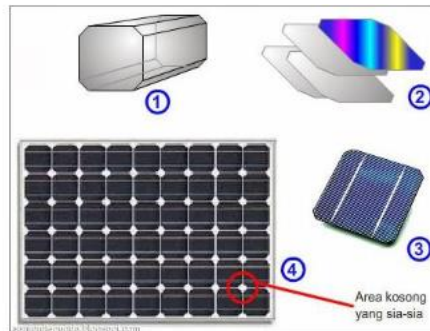
Monocrystalline merupakan modul yang paling efisien yang dihasilkan dengan teknologi terbaru dan menghasilkan daya listrik persatuan luas tertinggi. *Monocrystalline* dirancang untuk aplikasi yang membutuhkan konsumsi daya tinggi di tempat yang beriklim ekstrim. *Monocrystalline* mempunyai nilai efisiensi sebesar 15% pada suhu 25°C dan akan mengalami penurunan nilai efisiensi pada suhu 50°C sebesar 12 - 15%. Modul jenis ini dapat menghemat biaya per watt rasio puncak dengan menerapkan struktur perangkat cahaya. Contohnya adalah *Canadian Solar MaxPower CS6U-340M*, *Canadian Solar All-Black CS6K-290MS*, dan lainnya.

Monocrystalline terbuat dari batang silikon tunggal berbentuk silinder yang kemudian diiris tipis menjadi bentuk wafer dengan ketebalan sekitar 200 - 250 μm dengan permukaan atasnya dibuat *microgrooves* yang bertujuan meminimalkan rugi-rugi refleksi atau pantulan. Gambar 5 di bawah ini merupakan jenis *monocrystalline*.



Gambar 5. Jenis *Monocrystalline*
(Sumber: Sallu & Khodijah, 2015)

Kelemahannya *monocrystalline* adalah jika disusun membentuk panel surya akan menyisakan banyak ruangan yang kosong karena sel surya seperti ini umumnya berbentuk segi enam atau bulat, tergantung dari bentuk batangan kristal silikonnya, seperti terlihat pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Bagian-bagian batangan kristal silikon
(Sumber: Sallu & Khodijah, 2015)

Keterangan gambar:

1. Batangan kristal silikon murni
2. Irisan kristal silikon yang sangat tipis
3. Sel surya *monocrystalline* yang sudah jadi
4. Panel surya *monocrystalline* yang berisi susunan sel surya *monocrystalline*.
Nampak area kosong yang tidak tertutup karena bentuk sel surya jenis ini.

Adapun keunggulan, kelemahan dan cara pembuatan sel surya *monocrystalline* yaitu:

a. Keunggulan sel surya *monocrystalline*

- Monocrystalline kegunaannya dapat tahan lama hingga 30 tahun.
- *Monocrystalline* memiliki performa yang lebih baik dari *polycrystalline* pada saat cuaca mendung, membuat sel jenis ini cocok untuk daerah yang sering dilanda hujan.
- *Monocrystalline* memiliki tingkat efisiensi tertinggi pada 15 - 20%.
- *Monocrystalline* memerlukan lebih sedikit ruang dibandingkan dengan jenis lain karena memiliki efisiensi yang tinggi.

b. Kelemahan sel surya *monocrystalline*

- Terdapat banyak limbah ketika sel silikon dipotong selama proses pembuatan.

- *Monocrystalline* merupakan jenis sel surya yang paling mahal di pasar.
- Tingkat kinerja cenderung menurun saat peningkatan suhu ekstrim atau tidak akan berfungsi baik di daerah dengan sedikit cahaya matahari (teduh). Hal ini mengakibatkan efisiensi panel surya akan turun drastis dalam cuaca berawan

c. Cara pembuatan *monocrystalline*

Monocrystalline dan *polycrystalline* keduanya terbuat dari silikon. Namun, proses produksi *monocrystalline* membutuhkan proses yang jauh lebih rumit. *Monocrystalline* dibuat menggunakan proses *Czochralski*. Proses ini terdiri dari memutar kristal biji silikon padat sambil perlahan mengekstraknya dari kolam silikon cair dengan menciptakan blok silikon murni yang terbuat dari hanya satu kristal. Blok ini atau ingot (batangan) kemudian dipotong menjadi persegi sehingga menciptakan banyak silikon yang terbuang. Kuadrat silikon kemudian diiris menjadi wafer berwarna seragam dan dirangkai menjadi pola panel surya monokristalin yang khas (Purwoto et al., 2018).

2.4.2 Polycrystalline

Polycrystalline adalah salah satu jenis panel surya yang memiliki susunan kristal acak karena dibuat dengan proses pengecoran. Jenis panel ini memerlukan luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan jenis panel *monocrystalline* untuk menghasilkan daya listrik yang sama. *Polycrystalline* memiliki efisiensi lebih rendah yaitu sebesar 12 - 14% dibandingkan tipe monokristalin, sehingga memiliki harga yang cenderung lebih murah (Purwoto et al., 2018).

Polycrystalline terbuat dari batang silikon yang dihasilkan dengan cara dilelehkan dan dicetak oleh pipa paralel, kemudian wafer sel surya biasanya berbentuk persegi dengan ketebalan 180 - 300 μm . Contoh modul surya yang digunakan adalah *CanadianSolar Standard CS6P - 260* (Pradana & Mubarok, 2018). Gambar 7 di bawah ini merupakan jenis *polycrystalline*.



Gambar 7. Jenis *Polycrystalline*
(Sumber: Sallu & Khodijah, 2015)

Adapun kelebihan, kelemahan dan cara pembuatan sel surya *polycrystalline* yaitu:

a. Kelebihan *polycrystalline*

- Proses pembuatan *polycrystalline* lebih sederhana dan tidak rumit,
- Harga *polycrystalline* lebih murah dan jumlah limbah silikon yang dihasilkan juga lebih sedikit dibandingkan dengan *monocrystalline*.

b. Kelemahan *polycrystalline*

- Panel surya *polycrystalline* memiliki toleransi panas sedikit lebih rendah daripada panel surya *monocrystalline*, sehingga *polycrystalline* memiliki performa sedikit lebih buruk daripada panel surya *monocrystalline* pada suhu tinggi.
- Panel surya *monocrystalline* cenderung tampil lebih estetik karena memiliki tampilan yang lebih seragam dibandingkan dengan warna biru *polycrystalline* yang berbintik-bintik.
- Efisiensi panel surya berbasis *polycrystalline* biasanya 13 - 16% karena kemurnian silikon yang lebih rendah, sehingga panel surya *polycrystalline* tidak seefisien panel surya *monocrystalline*.

c. Cara pembuatan *polycrystalline*

Proses pembuatan *polycrystalline* relatif lebih sederhana. Biji kristal silikon tunggal dan silikon cair dimasukkan ke dalam cetakan persegi dan dibiarkan beberapa saat. Silikon kemudian mendingin dengan rentang yang berbeda saat bagian luar mendingin lebih cepat. Pengaturan yang tidak merata menghasilkan banyak kristal yang berbeda yang memberi penampilan panel gemerlap dan beraneka warna (Purwoto et al., 2018).

2.4.3 *Thin Film Solar Cell* (TFSC)

Sel surya *Thin Film Solar Cell* merupakan jenis sel surya yang dibuat dengan menambahkan beberapa lapisan bahan sel surya yang tipis ke lapisan dasar. Bentuknya yang sangat tipis sehingga kondisi fisiknya ringan dan mudah dibengkokkan sehingga sering disebut *Thin Film Photovoltaic* (Santosa, 2017). Selain itu, sel surya *Thin Film Solar Cell* terdapat struktur lapisan tipis *mikrokristal-silicon* dan *amorphous* dengan efisiensi modul hingga 8.5% sehingga untuk luas permukaan yang diperlukan per watt daya yang dihasilkan lebih besar daripada *monocrystalline* dan *polycrystalline*. Inovasi baru panel modul ini adalah *Thin Film Triple Junction Photovoltaic* (dengan tiga lapisan) yang sangat efisien dalam udara berawan dan dapat menghasilkan daya listrik sampai 45% lebih tinggi dari panel jenis lain dengan daya yang ditera sama (Purwoto et al., 2018).

Teknologi pembuatan panel lapisan tipis ini bertujuan untuk mengurangi biaya pembuatan modul surya dan hanya menggunakan kurang dari 1% dari bahan baku silikon jika dibandingkan dengan bahan baku untuk tipe silikon wafer. Metode yang paling sering digunakan dalam pembuatan film tipis jenis ini adalah dengan *Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition* (PEVCD) dari gas silane dan hidrogen. Lapisan yang dibuat dengan metode ini menghasilkan silikon yang tidak memiliki arah orientasi kristal atau yang dikenal sebagai silikon amorf atau non kristal. Selain menggunakan silikon, sel surya lapisan tipis juga dibuat dari bahan semikonduktor lainnya yang memiliki efisiensi solar sel tinggi seperti *Cadmium Telluride* (CdTe), *Amorphous Silicon* (a-Si), *Cadmium Sulfide* (CdS), *Gallium Arsenide* (GaAs), *CopperIndium 19*, *Selenide* (CIS), dan *Copper Indium Gallium Selenide* (CIGS).

Efisiensi tertinggi saat ini yang dapat dihasilkan sel surya lapisan tipis adalah sebesar 19,5% yang berasal dari sel surya CIGS. Keuntungan lainnya dengan menggunakan tipe lapisan tipis adalah semikonduktor sebagai lapisan sel surya yang dapat diendapkan pada substrat yang lentur sehingga menghasilkan *device* sel surya yang fleksibel. Gambar 8 di bawah ini merupakan jenis *Thin Film*.



Gambar 8. Jenis *Thin Film*
(Sumber: Sallu & Khodijah, 2015)

Jenis sel surya *Thin Film* diproduksi dengan cara penambahan satu atau beberapa lapisan material sel surya yang tipis ke dalam lapisan dasar. *Thin Film* sangat tipis sehingga sangat ringan dan fleksibel. Jenis ini dikenal juga dengan nama TFPV (*Thin Film Photovoltaic*). Berdasarkan materialnya, sel surya *thin film* ini digolongkan menjadi:

a. *Amorphous Silicon (a-Si) Solar Cells*

Sel surya dengan bahan silikon amorf ini awalnya banyak diterapkan pada kalkulator dan jam tangan. Namun seiring dengan perkembangan teknologi pembuatannya penerapannya menjadi semakin luas. Dengan teknik produksi yang disebut *stacking* (susun lapis), dimana beberapa lapis silikon amorf ditumpuk membentuk sel surya akan memberikan efisiensi yang lebih baik antara 6% - 8%.

b. *Cadmium Telluride (CdTe) Solar Cells*

Sel surya jenis ini mengandung bahan *Cadmium Telluride* yang memiliki efisiensi lebih tinggi dari sel surya *Amorphous Silicon*, yaitu sekitar: 9% - 11%.

c. *Copper Indium Gallium Selenide (CIGS) Solar Cells*

Dibandingkan kedua jenis sel surya *thin film* di atas, CIGS sel surya memiliki efisiensi paling baik yaitu sekitar 10% - 12%. Selain itu jenis ini tidak mengandung bahan berbahaya Cadmium seperti pada sel surya CdTe.

Teknologi produksi *thin film* masih baru dan masih banyak kemungkinan di masa mendatang. Ongkos produksi yang murah serta bentuknya yang tipis, ringan dan fleksibel sehingga dapat dilekatkan pada berbagai bentuk permukaan seperti kaca, dinding gedung dan genteng rumah (Purwoto et al., 2018).

2.5 Emisi Karbon

Emisi karbon merupakan proses pelepasan gas-gas yang mengandung karbon ke atmosfer karena adanya proses pembakaran terhadap karbon baik dalam bentuk senyawa maupun tunggal. Berdasarkan sumbernya, emisi karbon atau gas rumah kaca dibedakan menjadi dua, yaitu gas rumah kaca industri dan gas rumah kaca alami (Hilmi et al., 2020). Senyawa karbon dapat berasal dari tumbuhan, hewan, batubara, gas alam dan minyak bumi. Senyawa karbon digolongkan menjadi dua, yaitu karbon organik (misalnya lemak, karbohidrat dan protein) dan karbon anorganik (misalnya karbonat, karbon monoksida dan karbon dioksida).

Karbon dioksida (CO_2) dan ozon (O_3) adalah salah satu gas yang dapat menyebabkan pemanasan global atau *global warming*. Pemanasan global terjadi karena peningkatan konsentrasi gas rumah kaca akibat emisi ke atmosfer yang menyebabkan semakin banyak panas yang terperangkap, dimana komponen utama dari gas rumah kaca adalah CO_2 . Gas rumah kaca dari emisi antropogenik berasal dari sektor energi pemanfaatan bahan bakar fosil secara berlebihan seperti minyak bumi, batu bara dan gas yang menyebabkan emisi gas rumah kaca ke atmosfer. Penggunaan alat elektronik seperti AC, komputer, TV, penggunaan kendaraan bermotor, kegiatan perkantoran dan industri adalah contoh kegiatan manusia yang meningkatkan emisi GRK di atmosfer (Hermawan et al., 2013).

Gas rumah kaca (GRK) adalah gas yang terperangkap di atmosfer. Proses terjadinya gas rumah kaca menyebabkan bocornya lapisan atmosfer di bumi, yang di hasilkan oleh CO_2 yang berlebihan. Ada tiga jenis GRK yaitu karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4) dan dinitrogen oksida (N_2O). Gas CO_2 merupakan gas yang paling pesat laju peningkatannya dan masa hidupnya paling panjang, walaupun kemampuan radiasinya lebih rendah dari pada kedua gas lainnya. Secara umum terbentuknya gas CO adalah melalui proses berikut:

- a. Pembakaran bahan bakar fosil dengan udara yang reaksinya tidak stoikiometris adalah pada harga $ER > 1$
- b. Pada suhu tinggi terjadi reaksi antara karbon dioksida (CO_2) dengan karbon (C) yang menghasilkan gas CO
- c. Pada suhu tinggi, CO_2 dapat terurai kembali menjadi CO dan oksigen.

Pada pembakaran dengan harga $ER > 1$, bahan bakar yang digunakan lebih dari udara. Hal ini memungkinkan terjadinya gas CO. Reaksinya adalah sebagai berikut:



Jika jumlah udara (oksigen) cukup atau stoikiometris maka akan terjadi reaksi lanjutannya, yaitu:



Reaksi pembentukan CO lebih cepat dari pada reaksi pembentukan CO₂, sehingga pada hasil akhir pembakaran masih mungkin terdapat gas CO. Apabila pencampuran bahan bakar dan udara tidak rata, maka masih ada bahan bakar (karbon) yang tidak berhubungan dengan oksigen dan keadaan ini menambah kemungkinan terbentuknya gas CO yang terjadi pada suhu tinggi dengan mengikuti reaksi berikut ini:



Selain dari pada itu, pada reaksi pembakaran yang menghasilkan panas dengan suhu tinggi akan membantu terjadinya penguraian (disosiasi) gas CO₂ menjadi gas CO mengikuti reaksi berikut ini:



Semakin tinggi suhu hasil pembakaran maka jumlah gas CO₂ yang terdisosiasi menjadi CO dan O akan semakin banyak. Suhu tinggi merupakan pemicu terjadinya gas CO. Penyebaran gas CO di udara tergantung pada keadaan lingkungan. Untuk daerah perkotaan yang banyak kegiatan industrinya dan lalu-lintasnya padat, udaranya sudah banyak tercemar oleh gas CO. Sedangkan daerah pinggiran kota atau desa, cemaran CO di udara relatif sedikit. Ternyata tanah yang masih terbuka dimana belum ada bangunan di atasnya, dapat membantu penyerapan gas CO. Hal ini disebabkan mikroorganisme yang ada di dalam tanah mampu menyerap gas CO yang terdapat di udara. Angin dapat mengurangi konsentrasi gas CO pada suatu tempat karena dipindahkan ke tempat lain (Wardhana, 2004).

2.6 *Life Cycle Assesment (LCA)*

2.6.1 *Pengertian Life Cycle Assesment (LCA)*

LCA adalah suatu metode untuk menganalisis aspek lingkungan dan potensi dampak lingkungan yang dihasilkan dan berhubungan dengan suatu produk, proses atau jasa. Menurut ISO 14040 mendefinisikan LCA sebagai penilaian siklus hidup untuk mencatat dan menilai potensi dampak lingkungan dari *input* dan *output* serta sistem siklus hidup produk. LCA merupakan alat bantu untuk menganalisis efek pada lingkungan dari setiap tahap dalam siklus hidup sebuah produk, mulai dari ekstraksi sumber daya, produksi material, produksi komponen hingga produksi produk akhir tersebut, dan kegunaan produk bagi manajemen setelah produk tersebut sudah selesai diproduksi, baik itu dengan digunakan kembali, didaur ulang atau dibuang (berlaku dari *cradle to grave*).

Dampak lingkungan mencakup berbagai jenis dampak bagi lingkungan, termasuk ekstraksi dari berbagai jenis sumber daya, emisi zat berbahaya dan berbagai penggunaan lahan. Penilaian siklus hidup harus diusahakan untuk memiliki nilai kuantitatif, sehingga semua dampak lingkungan yang dihasilkan dapat dilaporkan selengkap mungkin.

Metodologi LCA muncul pada tahun 1960 ketika kekurangan bahan baku dan konsumsi energi yang lebih besar menyebabkan masalah lingkungan. Selama 30 tahun terakhir, LCA telah digunakan dalam organisasi dan perusahaan untuk menilai dampak lingkungan dari produk atau proses dalam penggunaan internal dan eksternal.

LCA merupakan metode yang digunakan untuk mengidentifikasi dan menghitung penggunaan energi, penggunaan sumber daya alam, pembuangan pada lingkungan, serta mengevaluasi dan menerapkan kemungkinan perbaikan lingkungan. Oleh karena itu, LCA membantu strategi dalam pembuatan keputusan, untuk meningkatkan kualitas produk dan proses serta mempelajari aspek lingkungan dari suatu produk. Fase tahapan dari LCA adalah *goal and scope*, *life cycle inventory (LCI)*, *life cycle impact assesment (LCIA)*, dan *interpretation*. Fase-fase ini diatur dalam standar ISO, meliputi ISO:14040 tentang prinsip umum LCA, ISO:14041 tentang inventori dan *goal and scope*,

ISO:14040 tentang *impact assesment* serta ISO:14043 tentang interpretasi dari LCA (Pringgajaya et al., 2012).

2.6.2 Metodologi *Life Cycle Assesment* (LCA)

Terdapat beberapa tahapan untuk melakukan identifikasi dan evaluasi produk menggunakan LCA. Berikut adalah tahapannya:

2.6.2.1 *Goal and scope*

Pada langkah pertama, tentukan tujuan utama proyek dan produk atau layanan yang akan dievaluasi. Tahap ini merupakan petunjuk yang dapat membantu konsistensi dari penelitian LCA. Penting juga untuk menetapkan batasan pada sistem analisis untuk memahami bahan dan proses yang perlu dipertimbangkan. Pada langkah ini, tingkat detail yang diperlukan ditentukan untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik dari hasil akhir dan unit fungsional yang dipilih. Definisi unit fungsional merupakan langkah penting karena meningkatkan akurasi analisis dan memungkinkan perbandingan antara produk atau layanan (Hermawan et al., 2013). Penentuan tujuan dan ruang lingkup merupakan tahapan awal dalam melakukan analisis LCA. Tujuan dari kajian LCA yaitu menentukan dampak lingkungan yang dihasilkan dari suatu produk (Zuhria et al., 2021).

2.6.2.2 *Life Cycle Inventory* (LCI)

Tahap kedua yaitu melakukan analisis inventaris yang meliputi pengumpulan data dan deskripsi semua *input* dan *output* yang berhubungan dengan ruang lingkup studi. Tahapan pengumpulan data dimulai dari proses produksi, bahan baku dan kebutuhan energi material. Analisis inventori lebih terfokus pada data dari proses produksi secara industri. Langkah ini memerlukan perangkat lunak dan basis data yang terhubung ke produk dan memproses *database* secara langsung. Perangkat lunak ini dapat didasarkan pada *spreadsheet* atau perangkat lunak yang lebih canggih. *Database* LCI memperhitungkan konsumsi energi dan emisi yang dilepaskan ke atmosfer untuk produk dan proses yang paling umum. Biasanya data yang ada dalam *database* LCI mencakup ekstraksi bahan

baku, transportasi, proses manufaktur dan distribusi. (Pringgajaya et al., 2012).

2.6.2.3 Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

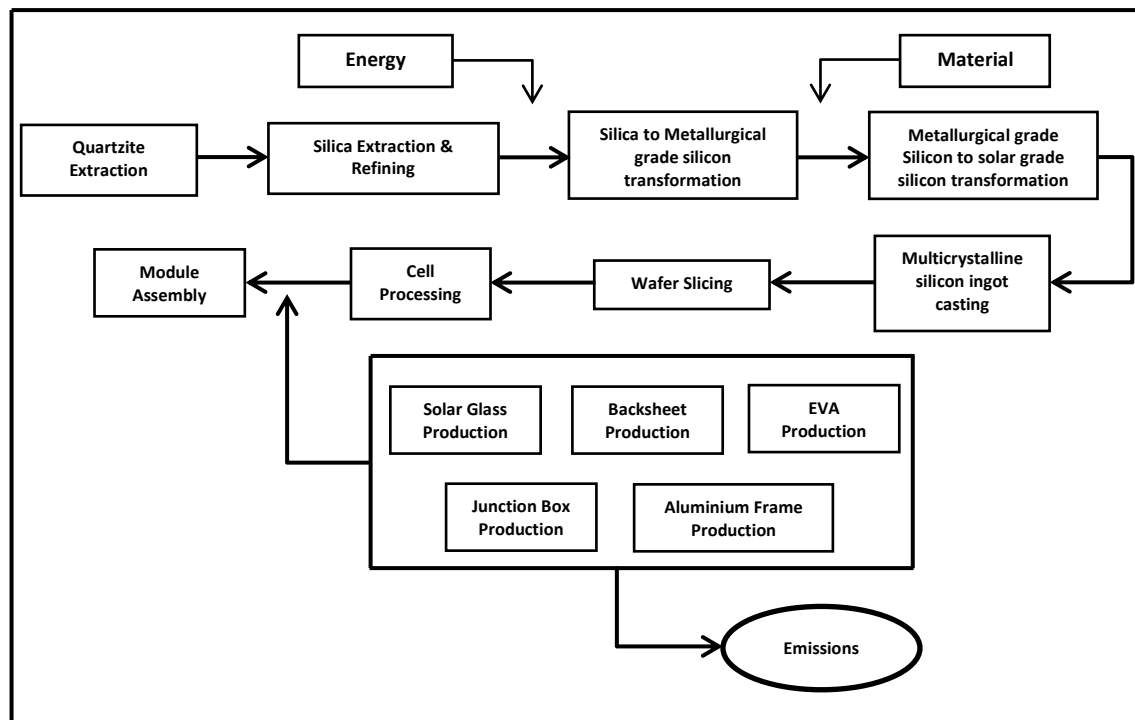
Tahap ketiga yaitu melakukan evaluasi terhadap dampak potensi terhadap lingkungan dengan menggunakan hasil dari *life cycle inventory* dan menyediakan informasi untuk menginterpretasikan pada fase terakhir. Analisis dampak lingkungan meneliti limbah hasil pengolahan material, tingkat kebisingan, emisi gas buang, dan efisiensi biaya produksi (Hermawan et al., 2013).

2.6.2.4 Interpretation

Tahap akhir analisis daur hidup memberikan simpulan, rekomendasi, dan pengambilan keputusan berdasarkan batasan studi yang telah ditetapkan pada tahap pertama. Penting untuk diingat bahwa hasil yang diperoleh hanya merupakan indikasi untuk mendukung dan merekomendasikan keputusan dalam hal yang berkaitan dengan materi atau proses. Sebagai suatu metode pengukuran, LCA memiliki ruang lingkup yang ditetapkan dengan tujuan memberi batasan pengujian. Batasan-batasan tersebut dimaksudkan untuk memudahkan dalam pengelompokan pengujian suatu objek. Terdapat empat ruang lingkup atau pendekatan yang sudah ditetapkan dalam analisis LCA, antara lain :

- a. *Gate to gate*, merupakan ruang lingkup pada analisis daur hidup yang terpendek karena hanya meninjau kegiatan yang terdekat.
- b. *Cradle to gate*, dimulai dari raw material (bahan mentah) sampai batas proses sebelum operasi produk. *Cradle to gate* hanya meninjau proses produksi hingga material siap dijual atau dipakai oleh konsumen.
- c. *Cradle to grave*, dimulai dari *raw material* (bahan mentah) sampai pada pengoperasian produk.
- d. *Cradle to cradle*, bagian dari analisis daur hidup yang menunjukkan ruang lingkup dari *raw material* (bahan mentah) sampai pada daur ulang material (Handoyo et al., 2018).

Alur siklus hidup tersebut dapat dilihat pada Gambar 9 berikut ini (Talebian et al., 2020).



Gambar 9. Life Cycle Assesment Boundary
(Sumber: Talebian et al., 2020)

Alur siklus hidup modul *photovoltaic* dimulai dari *raw material* sampai pada pengoperasian produk dapat dilihat pada gambar 9.

a. Silica extraction

Silika (Silikon dioksida) merupakan bahan utama produksi silikon dalam produksi peralatan listrik. Silika diproduksi oleh pengolahan dan pemurnian kuarsit atau batupasir. Ekstraksi silika dianggap sebagai langkah awal dalam proses produksi sel surya .

b. Produksi silikon metalurgi

Pada tahap ini, Silika diubah menjadi silikon metalurgi. Tahap ini adalah proses yang mahal di mana banyak energi yang dikonsumsi. Silikon yang dihasilkan pada tahap ini memiliki kemurnian sekitar 98%, yang digunakan dalam industri baja dan aluminium. Proses ini dilakukan dengan reaksi reduksi antara bubuk kuarsit dan batubara dalam tanur busur listrik.

c. Produksi silikon kelas surya

Pada tahap ini silikon metalurgi diubah menjadi silikon kelas surya. Tahap ini menggunakan metode Siemens yang dimodifikasi.

d. Ingot silikon polikristalin dan produksi wafer

Pada tahap ini, silikon murni yang dihasilkan pada tahap sebelumnya dilebur dan ingot dengan struktur kristal baru diproduksi. Produksi ingot dapat dilakukan dengan pengecoran atau proses yang dikenal sebagai proses Czochralski. Kemudian batangan tersebut dipotong menjadi lapisan tipis yang disebut wafer.

e. Produksi sel

Selama perlakuan panas dan reaksi kimia, lapisan permukaan wafer yang sangat tipis dihilangkan yang bertujuan untuk memperbaiki kerusakan yang terjadi selama pemotongan. Permukaan abu-abu dari wafer berubah menjadi biru dan pola piramida yang tidak beraturan dibuat pada permukaan wafer untuk menyerap lebih banyak radiasi. Karena silikon adalah semikonduktor dan sifat fenomena *photovoltaic* didasarkan pada transfer elektron bebas di berbagai bagian semikonduktor, dalam proses yang dikenal sebagai Doping beberapa pengotor menembus permukaan wafer pada suhu reaksi 850-900 °C. Doping fosfor dianggap disediakan oleh produsen sel, permukaan sel dilapisi dengan lapisan anti pantulan silikon nitrida.

f. Komponen panel lainnya

Untuk memperbaiki sel surya dan melindunginya dari kerusakan lingkungan, sel surya dienkapsulasi oleh lapisan etilen vinil asetat yang sangat tipis dan transparan, yang disebut Lembaran EVA.

g. Solar Backsheet

Tahap ini adalah lapisan terakhir di bagian bawah panel surya dan biasanya terbuat dari polimer atau kombinasi polimer. Lapisan ini dapat melindungi panel dari kelembaban, kotoran, debu, dan partikel lainnya. Menurut informasi yang diberikan oleh pabrikan, komponen ini terbuat dari tiga lapisan dengan ketebalan yang sama, lapisan tengahnya adalah polietilen tereftalat dan dua lapisan lainnya adalah polivinil fluorida.

h. Bingkai dan Kaca surya tempered anti-Reflektif

Bingkai yang digunakan dalam produksi panel terbuat dari paduan aluminium anodized perak. Kaca surya tempered anti-Reflektif digunakan dalam produksi panel.