



Life Cycle Assessment pada Solar Photovoltaics. Review

James Parulian Manurung*, Mohamad Sidik Boedoyo

Program Studi Ketahanan Energi Fakultas Manajemen Pertahanan, Universitas Pertahanan RI. Kawasan IPSC Sentul, Sukahati, Kec. Citeureup, Kabupaten Bogor, Jawa Barat 16810

Keywords:

Life cycle analysis, photovoltaic, renewable energy.

Article history:

Received: 21 March 2022

Revised: 29 April 2022

Accepted: 30 April 2022

Abstract. One of the most important needs of everyone is electricity, from households to industries. In recent years, electricity sources are still dependent on fossil fuels and energy sources from fossils will continue to decrease for several years to come. This condition requires us to look for renewable energy to support our daily lives. One of the well-known sources of renewable energy is from the sun, which can be utilized by energy conversion devices called solar cells. Countries located on the equator such as Indonesia are blessed with abundant sunshine throughout the year. Therefore, the application of solar cells with photovoltaic (PV) technology utilizes sunlight to be converted into electricity. Although this technology is emerging very quickly, there are still drawbacks due to the current use of PV technology, its environmental impact, and economic feasibility. Life cycle assessment is a method or way to analyze and evaluate the sustainability of a PV system and its environmental impact. This paper presents a literature study of 'PV systems from cradle to gate', starting with material selection (from the first generation and possibly fourth generation), manufacturing process, implementation, and ending with after-life effects. of the PV module. The result of this study is to show insight into the application of PV systems in Indonesia, starting from the best materials, the best application methods, energy return times, and finally the possibility of recycling PV materials after their lifetime. starting with the choice of material (from the first generation and possibly the fourth generation), the manufacturing process, implementation, and ending with the life effect of the PV module.

PENDAHULUAN

Pada zaman saat ini untuk meningkatkan kehidupan yang lebih modern yaitu menjadikan listrik sebagai kebutuhan dasar setiap orang. Meskipun tidak semua orang di negara berkembang atau negara dunia ketiga dapat memiliki sambungan listrik di rumah mereka. Listrik saat ini sangat bergantung pada bahan bakar fosil yang berkontribusi besar terhadap emisi gas rumah kaca, sehingga lebih mendorong pemanasan global. Fakta lain adalah bahwa sumber sel fosil akan berkurang dalam waktu sekitar 50 tahun (Chen, 2011). Kondisi yang tidak menguntungkan ini telah mendorong para ilmuwan untuk mencari sumber energi baru dan terbarukan.

Energi terbarukan adalah jenis energi yang dihasilkan dari sumber yang terus menerus dan berulang di alam/lingkungan. Pembangkitan energi terbarukan dapat pada tingkat penggunaannya yang sama. Energi terbarukan dapat berasal dari udara, air, bumi, dan matahari.

Pemanfaatan sinar matahari untuk pemanasan telah dilakukan oleh bangsa Romawi pada sekitar abad pertama sampai keempat (US Department of Energy, 2015). Edmond Becquerel pada tahun 1839 menemukan efek *photovoltaic* (PV), namun tahun 1954 dianggap sebagai masa lahirnya teknologi *photovoltaic*, karena pada hari itu, Daryl Chapin, Gerald Pearson, dan Calvin Fuller membuat sel *photovoltaic* yang terbuat dari silikon dan direkam

* Corresponding email: jamesparulianm@gmail.com

sebagai sel surya pertama yang memiliki kemampuan untuk mengubah sinar matahari menjadi listrik yang dapat menggerakkan peralatan listrik di Bell Labs, dan sejak inovasi ini, aplikasi sistem PV telah meningkat pesat (Dewi T.dkk 2016). Setiap hari, matahari mengirimkan energi yang sangat besar untuk semua makhluk hidup di bumi, dan dalam satu jam energi yang disediakan oleh matahari dapat memasok listrik yang cukup untuk satu tahun. Efek *photovoltaic* adalah konversi energi yang dipanen dari matahari menjadi listrik secara langsung. Jenis energi terbarukan ini merupakan alternatif yang menarik untuk menggantikan bahan bakar fosil karena dianggap lebih aman, bebas polusi, andal, bebas perawatan dan masa pakai yang lama sekitar 20-30 tahun.

Photovoltaic (PV) adalah salah satu teknologi terbarukan yang semakin penting secara global dalam dekade terakhir. Badan Energi Internasional (IEA) memperkirakan total daya terpasang PV sekitar 136,5 GW pada akhir 2015 (IEA, 2014). Di antara teknologi yang berbeda, teknologi PV kristal-silikon masih mendominasi pasar, menyumbang 85-90% dari pangsa teknologi (IEA,2014). Eropa masih memegang kapasitas terpasang PV terbesar, mewakili 70% dari total kapasitas terpasang di seluruh dunia (IEA, 2013).

Pasar *photovoltaic* surya (PV) untuk pembangkit listrik telah bertumbuh pesat dalam beberapa tahun terakhir. bersumber pada data terakhir yang dipublikasikan, 102,4 GW panel PV yang terhubung ke jaringan dipasang secara global pada tahun 2018, dan nilai ini sesuai dengan total kapasitas PV yang tersedia di dunia pada tahun 2012 (100,9 GW). Hasil ini mengarah pada total kapasitas tenaga surya global lebih dari 500 GW pada tahun 2018 (kapasitas terpasang tenaga surya dunia telah mencapai 400 GW pada tahun 2017). Kontribusi utama diberikan oleh China, Amerika Serikat, India, dan Jepang. Dengan pengecualian Amerika Serikat, di mana kapasitas terpasang solar baru stabil (10,6% pada 2017 dan 2018), kontributor utama lainnya terpasang kurang dari tahun sebelumnya: Cina 44 GW (16% lebih rendah dari 2017), India 8,3 GW (16% lebih rendah dari 2017), dan Jepang 6,6 GW (8% lebih rendah dari 2017).(Schmela, 2018 & 2019).

Sistem PV dapat dipasang di mana saja di mana sinar matahari dapat mencapainya, dan untuk negara dengan banyak sinar matahari, ini adalah sumber energi yang sempurna. Namun, sistem PV juga memiliki kelemahan, matahari hanya bersinar di siang hari, oleh karena itu diperlukan baterai untuk mendukungnya, dan baterai menyimpan masa pakai yang lebih pendek dibanding dengan masa pakai PV, dan mereka berkontribusi pada tempat pembuangan sampah dan limbah beracun. Faktanya adalah tidak semua sinar matahari dapat diubah menjadi listrik, hanya yang memiliki energi lebih tinggi dari energi celah pita yang dapat diubah. Material yang digunakan untuk membuat modul PV juga merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi efisiensi sistem PV (IEA, 2014)

Analisis siklus hidup (LCA) merupakan analisis untukmemperhitungkan aspek lingkungan dan potensi pengaruh yang terkait dengan suatu produk dengan memeriksa inventaris input dan output dari keseluruhan sistem, dampak lingkungan yang terkait dengan input dan output tersebut dan akhirnya menentukan keberlanjutannya. produk. LCA mengambil ISO 14040 sebagai standar untuk analisis lingkungan. Analisis lingkungan ini diambil untuk waktu siklus hidup suatu produk atau disebut juga *cradle to grave*, mulai dari pemilihan material hingga pembuangan. (Akarslan, 2012 & Murphy, 2017)

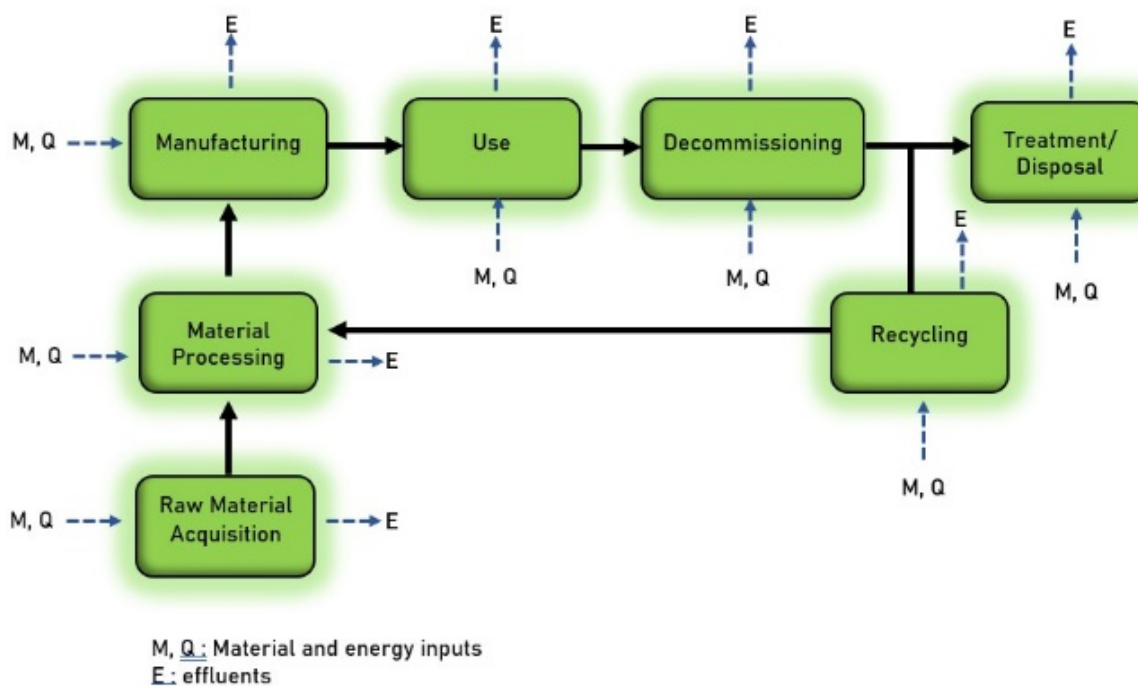
Sistem PV sebagai energi terbarukan yang baru muncul harus melalui analisis LCA untuk mendapatkan gambaran keseluruhan, termasuk dampaknya terhadap lingkungan, kelayakan dan keberlanjutan. Makalah ini membahas tentang analisis LCA sistem PV dari pemilihan material, proses manufaktur, implementasi, dan pembuangan atau akhirat. Analisis *cradle to gate* dan *cradle to grave* akan dilakukan melalui studi literatur. Hasil dari penelitian ini akan menjadi tampilan wawasan penerapan sistem PV di Indonesia, dari pilihan material terbaik, metode aplikasi, waktu pengembalian energi dan metode terbaik untuk membuang modul.

METODOLOGI LCA

Metodologi LCA menilai secara sistematis aspek dan dampak lingkungan dari suatu produk, dimulai dari proses memperoleh bahan mentah hingga pengelolaan limbah, sebanding dengan tujuan dan ruang lingkup yang telah ditetapkan (ISO 14040, 2006). Panduan umum penyelenggaraan LCA diberikan di dalam ISO 14040 tentang Prinsip dan Kerangka Kerja LCA dan ISO 14044 tentang Persyaratan dan Pedoman LCA (ISO 14040, 2006). Terdapat empat tahapan dalam penyelenggaraan LCA, yaitu: 1) tingkat definisi tujuan dan ruang lingkup; 2) tingkat analisis persediaan (LCI); 3) tingkat penilaian dampak; dan 4) tingkat interpretasi (ISO 14040, 2006). Pada tahap pertama dilangsungkan pendefinisian tujuan dan ruang lingkup penelitian sebagai rencana awal untuk melakukan tahap inventarisasi siklus hidup (LCI) dalam LCA [ISO 14040, 2006]. Di tahap kedua, LCI, siklus hidup penuh dari suatu produk diuraikan kedalam beberapa langkah dasar, dilengkapi dengan

input dan output-nya (Gerbinet dkk & Maranghi dkk, 2019). Sedangkan seluruh dampak lingkungannya dievaluasi pada tahap ketiga, LCIA, dimana setiap aliran LCI dievaluasi dan diberi faktor karakterisasi sesuai dengan kategori tertentu (Maranghi dkk, 2019). Pada tahap terakhir, dilakukan interpretasi hasil seta penguraian kesimpulan dan rekomendasi terkait penelitian yang telah dilakukan (Maranghi dkk, 2019).

Analisis LCA untuk PV dilakukan dengan dua pendekatan, yaitu *cradle to gate* dan *cradle to grave*. Pendekatan *cradle to gate* berhubungan dengan *upstream process* yaitu pemilihan bahan baku hingga proses produksi modul PV. Sedangkan pendekatan *cradle to grave* meliputi siklus hidup modul PV secara menyeluruh dari *upstream process*, *operational process*, hingga *downstream process* (pembuangan dan pembongkaran modul PV) (Yudha dkk 2018). Skema pelaksanaan LCA pada modul PV dapat dilihat pada gambar 1 (Yudha dkk 2018). Paper ini akan membahas Analisis LCA pada modul PV berdasarkan beberapa penelitian selama 10 tahun terakhir



Gambar 1. Skema LCA pada modul PV pendekatan *cradle to grave*.

Teknologi PV

Teknologi PV akhir-akhir ini mengalami perkembangan yang cukup signifikan. Hal ini

berkaitan dengan semakin populernya EBT sebagai salah satu cara untuk mencapai target *Net Zero Emission* (NZE). Tujuan dari pengembangan teknologi PV adalah untuk menaikkan kinerja cell PV dan menurunkan harga modul di pasaran, dan

mengoptimalkan kecepatan dan biaya dari proses produksinya (Muteri 2020). Teknologi PV saat ini terbagi ke dalam 3 generasi (Yudha dkk 2018 & Muteri 2020):

- Generasi pertama: termasuk kedalamnya adalah panel tradisional dengan struktur dasar *crystalline silicon* (c-Si) dan sel *multi-crystalline silicon* (mc-Si).
- Generasi kedua: mengacu pada sel surya lapis tipis, yang termasuk ke dalamnya adalah copper indium gallium selenide (CIGS)/copper indium selenide (CIS), cadmium telluride (CdTe), amorphous silicon (a-Si), cadmium sulfide (CdS), gallium

arsenide (GaAs) and modul tandem/multi-junctions berdasarkan Si.

- Generasi ketiga, disebut juga generasi selanjutnya: meliputi teknologi non silicon dan peralatan baru yang mengambil konsep organik/semi organik panel PV (OPV) sel quantum dot (QD), sel dye-sensitized solar (DSSC), sel perovskite solar (PSC), dan concentrated PV (CPV).

Perbandingan efisiensi dari beberapa teknologi PV dari tiga generasi yang berbeda disajikan pada tabel 1 (Muteri 2020):

Tabel 1. Efisiensi beberapa teknologi PV

| Generasi I | | Generasi II | | Generasi III | |
|--------------|--------------------------------------|-----------------------------|-------------|--------------|--|
| Tipe | Efisiensi | Tipe | Efisiensi | Tipe | Efisiensi |
| <i>Sc-Si</i> | 16-22% 17.5% [Wu Peishi dkk 2017] | <i>a-Si</i> | 4-8% | <i>DSSC</i> | Sekitar 10% |
| <i>Mc-Si</i> | | <i>CdTe</i> | 10-15% | <i>QDs</i> | Sekitar 1.9% Sekitar 35% (Stolarska. Dkk, 2021) |
| | | <i>CIGS</i> | 23% [19] | <i>CPV</i> | |
| | | <i>CIS</i> | 10-13% | | |
| | | <i>Hybrid (a-Si - c-Si)</i> | sekitar 21% | | |
| | | Tipe | Efisiensi | | |

Sistem Photovoltaic (PV)

Sistem *Photovoltaic* (PV) mengonversikan sinar matahari menjadi listrik untuk dipergunakan dalam sehari-hari. *Photovoltaic* ialah teknologi yang berlaku untuk menjadikan, mengkonversikan radiasi matahari sebagai energi listrik secara langsung. *Photovoltaic* lazimnya dirangkai dalam sebuah segmen yang disebut modul. Modul surya mencakup banyak sel surya yang bisa dirangkai secara seri maupun paralel. Sedangkan sel surya ialah sebuah segmen semi konduktor yang dapat mengkonversi energi surya membentuk energi listrik atas dasar efek *photovoltaic*. *Solar cell* atau sel surya mulai dikenal akhir-akhir ini, selain mulai berkurang cadangan energi fosil dan isu *global warming*. energi yang

diwujudkan juga sangat murah karena sumber energi (matahari) bisa diperoleh secara gratis.

Sistem PV menghasilkan listrik *Direct Current* (DC) oleh karena itu apabila kita pakai untuk menyalakan semua perangkat yang membutuhkan listrik *Alternating Current* (AC), sistem ini membutuhkan alat inverter untuk mengubah listrik DC ke AC. Salah satu kendala pembangkitan listrik dengan sistem PV adalah ketergantungan pada ketersediaan sinar matahari, dan pada malam hari atau hari berawan, pasokan sinar matahari tidak akan cukup untuk menyalakan beban, oleh karena itu untuk sistem *standalone* diperlukan baterai, dan pengontrol pengisian daya diperlukan untuk memastikan sistem berhenti mengisi daya baterai setelah baterai penuh. Ada tiga jenis sistem PV yang saat ini dipakai yaitu:

1. Sistem Standalone (*off grid*). *Standalone* adalah jenis sistem PV yang tidak bergantung pada sumber listrik pemerintah.
2. Sistem *Grid-connected*. *Grid-connected* adalah sistem PV yang terhubung dengan sumber listrik pemerintah
3. Sistem *Hybrid*. Sistem. *Hybrid* adalah sistem yang tidak hanya bergantung pada sistem PV tetapi juga dengan jenis lainnya. pembangkit listrik seperti turbin angin dan lainnya.

Perbandingan beberapa sitem PV yang berbeda dapat dilihat pada tabel 2 (APEC, 2019)

energi terbarukan untuk menghasilkan jumlah energi sesuai dengan jumlah yang diperlukan untuk menghasilkan sistem tersebut (*Stolarska, 2021*). EPBT banyak digunakan dalam penelitian LCA untuk perangkat produksi energi. EPBT pada PV sistem sangat bergantung pada lokasi geografis nya. Dimana EPBT untuk wilayah Eropa Utara sebesar 2.5 tahun. Sedangkan, wilayah bagian selatan memerlukan waktu yang lebih pendek yaitu sekitar 1.5 atau bahkan lebih cepat. Selain itu, teknologi yang digunakan dalam sistem PV juga mempengaruhi EPBT (APEC, 2019). Tabel 2. Menyajikan perhitungan EPBT dan beberapa parameter pendukung yang diperlukan untuk beberapa system dan wilayah berbeda (APEC, 2019):

Waktu Pengembalian Energi (EPBT)

Waktu Pengembalian Energi (EPBT) adalah jangka waktu yang diperlukan untuk suatu sistem

Tabel 2. Perbandingan beberapa sistem PV dan nilai EPBT terhitung (APEC, 2019)

| Lokasi | Tipe | Konsumsi Energi | Produksi Energi | Efisien-si modul | Rasi-o Kine-rja | Area Efektif PV | Iradiasi Surya | Degra-dasi/ta-hun | EPBT |
|------------|---|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|----------|
| Mala ysia | <i>Solar stand alone PV system (SAPV)</i> | 430985.1 Mj | 3348.13 kWh/th | 15% | 0.75 | 19.44 m2 | 1573.15 kWh/m2/th | 0.59% | 36.1 th |
| | <i>Solar rooftop PV system (SRPV)</i> | 8639518.71 Mj | 73000 kWh/th | 15% | 0.75 | 2138.4 m2 | 1685.39 kWh/m2/th | 0.23% | 32.9 th |
| | <i>Solar farm PV system (SFPV)</i> | 9677450 12.6 MJ | 10120000 kWh/th | 15% | 0.75 | 47129 m2 | 1573.15 kWh/m2/th | 0.59% | 26.6 th |
| Thail and | <i>Solar stand alone PV system (SAPV)</i> | 1435291 7.2 Mj | 266450 kWh/th | 15% | 0.7 | 4548.96 m2 | 1772 kWh/m2/th | 0.30% | 15 th |
| | <i>Solar rooftop PV system (SRPV)</i> | 289760.5 8 Mj | 10290.61 kWh/th | 15% | 0.7 | 51.84 m2 | 1772 kWh/m2/th | 0.46% | 7.8 4 th |
| Indo nesia | <i>Solar farm PV system (SFPV)</i> | 2896075 89.8 Mj | 2970720 kWh/th | 15% | 0.75 | 13880.1 6 m2 | 1826 kWh/m2/th | 0.20% | 27.1 th |

Maintenance

Setiap peralatan atau perkakas sudah barang tentu memerlukan *maintenance* (perawatan secara berkala) begitu juga pada peralatan sistem *photovoltaic* dimana perawatan ini mencakup

pengecekan dimana sistem PV ini dapat bertahan 25 hingga 30 tahun pemakaian namun sudah tentu harus di berikan perawatan secara berkala seperti pembersihan permukaan modul dan pengecekan sistem secara berkala, selain itu juga peralatan-pelralatan pendukung seperti halnya baterai yang

lifetime nya maksimal hanya 5 tahun harus dicek juga kinerja serta fungsinya, termasuk perangkat elektronik lainnya dimana peralatan tersebut memiliki *lifetime* yang berbeda-beda, sudah barang tentu memerlukan pemeliharaan serta pergantian perangkat sesuai kebutuhan.

Ketergantungan pada *baterai* juga cukup memakan biaya yang lumayan besar, untuk mengurangi biaya tersebut kita bisa mensiasati

dengan menyambungkan sistem pv ini ke jaringan listrik pemerintah yaitu PLN atau disebut Sistem *Grid-connected*, pada sistem PV jenis ini, penyimpanan sementara tidak diperlukan lagi sehingga keperluan biaya untuk pengadaan dan perawatan baterai sudah tidak ada lagi. Berikut kami sajikan beberapa perawatan minimal untuk sistem PV berbeda di Tabel 3 [APEC (2019)].

Tabel 3. Pemeliharaan beberapa sistem PV [APEC (2019)]

| PV modules | Garansi | Minimal Pemeliharaan | Jumlah Inventer |
|----------------|---------|-------------------------------|---------------------------------|
| SAPV Malaysia | 25 Th | Setiap 3 bulan | 1 Unit (penggantian per 25 th) |
| SAPV Thailand | 25 Th | Setiap 3 bulan | - |
| SRPV Malaysia | 25 Th | Setiap 3 bulan | 8 Unit (penggantian per 25 th) |
| SRPV Thailand | 25 Th | Setiap 3 bulan | 1 Unit (penggantian per 25 th) |
| SFPV Malaysia | 25 Th | Setiap 3 bulan | 10 Unit (penggantian per 10 th) |
| SFPV Indonesia | 20 Th | Frekuensi pemeliharaan rendah | 68 Unit (penggantian per 10 th) |

Penanganan Limbah *Photovoltaic*

Instalasi besar pertama sistem PV adalah pada awal 1990an, oleh karena itu sejumlah besar sistem PV berakhir masa pakainya dimulai pada tahun 2015. Akhir masa pakai modul PV mengarah pada dua pilihan untuk mendaur ulang. Pilihannya harus mempertimbangkan berapa banyak energi yang dicapai dan dikonsumsi selama proses tersebut. Mendaur ulang panel PV tidak mudah karena dirakit dari berbagai bahan termasuk kaca (pada sampul depan panel PV), aluminium (bingkai), bahan sintesis untuk merangkum dan menyegel sel silikon seperti *etilena-vinil asetat* (EVA), *polivinil butiral* (PVB) dan/atau *polivinil florida*, silikon atau bahan lain, dan logam seperti timbal, galium, tembaga, dan kadmium. Jerman dan Belgia adalah di antara yang pertama yang mulai mendaur ulang modul PV akhir masa pakai mereka. Daur ulang utama adalah modul yang terbuat dari *silikon monokristalin*, *polikristalin* dan *amorf*.

Proses daur ulang dimulai dari pembongkaran *BOS* (*balance of system*) dengan langkah termal, bagian plastik, kaca dan bingkai

dilepas, dibongkar, dan disortir. Langkah kedua adalah memisahkan struktur *wafer Silikon* dari modul PV menggunakan proses *etching*. Modul PV yang rusak dibersihkan untuk mendapatkan *Si* murni kembali. *Si* yang diperoleh dari modul PV bekas dilebur kembali menjadi ingot polikristalin dan menghasilkan *wafer silikon* baru. *Wafer Silikon* adalah material tipis bahan semikonduktor yang terbuat dari kristal *silicon* yang dimanfaatkan untuk berbagai hal dalam pembuatan perangkat elektronik

Salah satu proses daur ulang disebut *Chevetogne* dari sistem Belgia; proses ini dianggap sebagai pemisahan manual. Di AS, PV *Company* menggunakan sistem daur ulang otomatis di mana semua modul dipecah oleh *shredder*, dan dengan menggunakan *hammer mill*, material yang diparut tersebut dibentuk dalam ukuran 4-5 mm. Dengan menggunakan asam, semua lapisan semikonduktor dihilangkan, dan bagian lain yang lebih besar seperti kaca dipisahkan. Proses ini akan berakhir dengan lembaran yang disaring, dan dipotong menjadi lapisan PV baru. Tabel 4 menyajikan komponen-komponen utama dari sistem PV yang mungkin dan tidak mungkin di daur ulang.

Tabel 4. Komponen-komponen utama sistem PV

| Nama Perangkat | Masa pakai | Keterangan |
|---------------------------------|------------------|--------------------|
| <i>Modul Photovoltaic</i> | 25 s.d. 30 tahun | Bisa didaur ulang |
| Sistem Instrumen Pengisian Daya | 5 Tahun | Tidak didaur ulang |
| <i>Baterai</i> | 5 Tahun | Bisa didaur ulang |
| <i>Inverter</i> | 15 Tahun | Tidak didaur ulang |
| Struktur / konstruksi penyangga | 25 s.d. 30 Tahun | Tidak didaur ulang |

Dari Tabel diatas, dapat kita amati bahwa perangkat untuk sistem PV memiliki masa pakai yang cukup lama yaitu 25 s.d. 30 Tahun, untuk baterai dan system instrumen pengisian daya dengan masa pakai rata-rata 5 Tahun. Baterai mengandung sejumlah bahan kimia beracun dan logam berat dan tanpa perawatan yang tepat dapat mencemari tanah, jika dibuang dalam timbunan tanah. Sebagian perangkat baterai dapat didaur ulang, selain itu juga penerapan baterai dapat dihindari dengan menerapkan sistem PV yang terhubung ke jaringan listrik PLN dengan sistem *grid connected*.

SIMPULAN DAN SARAN

Sistem *Photovoltaic* ialah pilihan energi terbarukan yang tepat untuk saat ini sebagai alternatif bahan bakar fosil yang semakin lama semakin berkurang. Salah satu isu utama energi terbarukan adalah keberlanjutannya. LCA merupakan metode untuk menganalisis sistem secara menyeluruh, mulai dari pemilihan material hingga pembuangan, atau disebut *cradle to grave analysis*. Metode ini menjelaskan betapa bermanfaatnya *system photovoltaic*, membandingkan dari energi yang dihasilkan dan energi yang dikonsumsi selama masa hidup. Setelah melihat secara dekat LCA sistem *Photovoltaic*, maka dapat membandingkan kondisi tersebut dengan kondisi di Indonesia, kelayakan penerapan sistem *Photovoltaic* di Indonesia telah disetujui.

Sistem *Photovoltaic* merupakan salah satu solusi untuk negara kepulauan yang populasinya tersebar antar pulau. Meskipun,

aplikasi saat ini tidak begitu bermanfaat karena masyarakat pedesaan tidak terinformasi dengan baik untuk memahami sistem, dan melihat manfaat jangka panjang dari sistem *Photovoltaic* keuntungannya yaitu harga panel *Photovoltaic* semakin rendah, masyarakat semakin sadar akan kebutuhan energi bersih terbarukan. Dimasa yang akan datang sistem *Photovoltaic* akan lebih banyak dipasang di Indonesia, karena telah menjadi sumber energi alternatif yang sukses di negara-negara berkembang.

Pilihan material yang paling cocok saat ini untuk sistem *Photovoltaic* adalah *monokristalin* untuk efisiensi tertinggi di antara yang lainnya, dan waktu pengembalian energi terpendek. Dalam 20 tahun, diharapkan Indonesia dapat mendaur ulang modul PV bekas menjadi *wafer silikon* baru dan dapat digunakan kembali. Pilihan material yang paling cocok saat ini untuk sistem PV adalah *monokristalin* untuk efisiensi tertinggi di antara yang lain, dan waktu pengembalian energi terpendek. Dalam 20 tahun diharapkan Indonesia dapat mendaur ulang modul *Photovoltaic* bekas menjadi lapisan *photovoltaic* yang baru dan dapat digunakan kembali.

DAFTAR PUSTAKA

- Akarlan F .*Photovoltaic systems and applications Modeling and Optimization of Renewable Energy System ed Sencan Arsu chapter 2 2012: 21-52.*
- Amarakoon S, Vallet C, Curran MA, Haidar P. *Life cycle assessment of photovoltaic manufacturing*

- consortium (PVMC) copper indium gallium (di)selenide (CIGS) modules. Int. J. Life Cycle Asses 2017.*
- Asia-Pacific Economic Corporation[APEC]. *Life Cycle Assessment of Photovoltaic System in the APEC Region. 2019.*
- Badan Energi Internasional (IEA), laporan PVPS – Cuplikan PV Global 1992–2013 – Tren Awal Informasi dari Program PVPS IEA, Laporan IEA-PVPS T1-24: 2014b tersedia di: http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/pvps_report_-_a_snapshot_of_global_pv_-_1992-2013_-_final_3.pdfkan, (diakses 10.12.21).
- Badan Energi Internasional (IEA), Peta Jalan Teknologi – Energi *Photovoltaic* Surya – Edisi 2014, tersedia di: https://www.iea.org/publications/freepublishing/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf, 2014 (diakses 10.12.21).
- Badan Energi Internasional (IEA). Tren 2014 dalam aplikasi *photovoltaic*. Laporan IEAPVPS T1-25:2014 tersedia di: http://www.iea-pvps.org/index.php?id¼3&eID¼damfrontend_push&docID¼2150kan, (diakses 10.12.21).
- Chen F F, *An Indispensable Truth: How Fusion Power Can Save the Planet*, 43 DOI 10.1007/978-1-4419-7820-2_2, © Springer Science+Business Media, LLC 2011
- Dewi T, Risma P, Oktarina Y, Roseno M T, Yudha H M, Handayani AS, and Wijanarko Y, *A Survey on Solar Cell; The Role of Solar Cell in Robotics and Robotics Application in Solar Cell Industry in Proc Forum in Research, Science, and Technology FIRST 2016: C19- C22.*
- Gerbinet S, Belboom S, Leonard A. *Life cycle analysis (LCA) of photovoltaic panels: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014; 38:747-753.*
- ISO 14040, *Environmental Management – Life Cycle Analysis – Principals and Framework. 2006.*
- ISO 14044, *Environmental Management – Life Cycle Analysis – Requirements and Guidelines. 2006.*
- Maranghi S, Parisi ML, Basosi R, Sinicropi A. *Environmental profile of the manufacturing process of perovskite photovoltaics: harmonization of lyfe cycle assessment studies. Energies 2019; 12(3746): 1-19.*
- Murphy F, McDonnell K 2. *A Feasibility Assessment of Photovoltaic Power Systems in Ireland; a Case Study for the Dublin Region. Sustainability 2017, 9: 302-316.*
- Muteri V et al. *Review on life cycle assessment of solar photovoltaic panels. Energies 2020. 13(252):1-38.*
- Schmela, M. *Prospek Pasar Global, Untuk Tenaga Surya/2018–2022; SolarPower Eropa: Brussel, Belgia, 2018; Tersedia secara online:https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2018* (diakses pada 10.12.21).
- Schmela, M. *Prospek Pasar Global, Untuk Tenaga Surya/2019–2023; SolarPower Eropa: Brussel, Belgia, 2019, Tersedia secara online:https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2019* (diakses pada 10.12.21)
- Stolarska AZ, Pietrzak M, Zbincinski I. *Review: application of LCA to determine environmental impact of concentrated photovoltaic solar panels – state-of-the-art. Energies 2021; 14(3143): 1-20.*
- U.S. Department of Energy *The history of solar Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, accessed August 9, 2015.*
- Wu Peishi, Ma Xiaoming, Ji Junping, Ma Yunrong. *Review on life cycle assessment of energy payback of solar photovoltaic systems and a case study. Energy Procedia 2017. 105: 68-74*
- Yudha HM, Dewi T, Risma P, Oktarina Y. *Life cycle analysis for the feasibility of photovoltaic system application in Indonesia. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 2018. 124: 1-10.*