



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS LINGKUNGAN PADA PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA SURYA DI INDONESIA**

SKRIPSI

WENTY EKA SEPTIA

0806338134

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA TEKNIK INDUSTRI
DEPOK
JUNI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS LINGKUNGAN PADA PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA SURYA DI INDONESIA**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

WENTY EKA SEPTIA

0806338134

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA TEKNIK INDUSTRI
DEPOK
JUNI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar

Nama : Wenty Eka Septia
NPM : 0806338134

Tanda Tangan : 

Tanggal : 20 Juni 2012



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Wenty Eka Septia
NPM : 0806338134
Program Studi : Teknik Industri
Judul Skripsi : Analisis Lingkungan pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Indonesia

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Farizal, Ph.D.
Penguji : Dr. Akhmad Hidayatno, ST., MBT.
Penguji : Armand Omar Moeis, ST., M.Sc.
Penguji : Ir. Boy Nurtjahyo, MSIE.

(Farizal)
(Akhmad Hidayatno)
(Armand Omar Moeis)
(Ir. Boy Nurtjahyo)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 20 Juni 2012

KATA PENGANTAR

Tiada kata terindah yang dapat diucapkan selain rasa syukur kepada Tuhan Yesus, karena atas kasih-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Skripsi ini dibuat dalam rangka untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Industri di Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa selama masa perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, doa, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

- 1) Farizal, Ph.D selaku dosen pembimbing penulis yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk berdiskusi, mengarahkan penulis selama masa bimbingan skripsi ini;
- 2) Seluruh Dosen Penguji, selaku dosen yang telah memberi saran, kritikan, dan arahan yang sangat berguna kepada penulis.
- 3) Mas Ade Irawan dari PT Azet Surya Lestari dan Pak Yudhistira dari PT Surya Energi Indotama dan rekan-rekan lainnya dari pihak perusahaan yang telah membantu dalam usaha memperoleh data dan informasi yang saya butuhkan;
- 4) Arian Dhini, S.T., M.T selaku Pembimbing Akademis dan dosen Teknik Industri lainnya yang telah membimbing penulis selama 4 tahun;
- 5) Dr. Akhmad Hidayatno, ST, MBT, atas perhatian dan bimbingan selama penyusunan skripsi ini;
- 6) Keluarga penulis Papa, Mama, Tambi, adek-adekku (Inggrid, Olin, Evan), terima kasih atas cinta kasih, doa dan semangat yang diberikan. Rasa syukur kepada-Nya sebagai ungkapan terima kasih yang tiada terkira karena telah memiliki keluarga yang luar biasa, yang selalu memotivasi, mendoakan, kapan pun dan dimana pun berada.;
- 7) Teman-teman seperguruan Patty, Harumi, Indah, Ifu, Dede, Fitri Y, Lilis atas kebersamaan dan dukungan yang menyenangkan;
- 8) Jessica, Stefanipuni, Upi, Berli, Yunika, Gaby, Ana, Friska, Jonas, Ade, dan rekan-rekan TI08 yang telah banyak memberikan dukungan kepada penulis dan selalu bersama-sama di saat suka dan duka selama 4 tahun;

- 9) PPG-ers. Mas Iwan, Pak Jun, Gita, Novi, Dwi, Visky, Nita, Sarahi dll. Banyak cerita yang telah kita ukir, tawa, tangis, suka duka bersama . Terimakasih banyak atas bantuannya selama 4 tahun ini;
- 10) Sahabat hingga detik ini dari SMP Vindi, Seanne, Ivana dan sahabat SMA Indah, Ratih, Bunga. Terima kasih untuk semangat, saran, komentar, inspirasi, dan kisah yang indah. Semangat selalu, *my best friend!* ☺
- 11) Mbak Hesti terima kasih sudah mau meminjamkan buku – buku . Sabar dan menjadi teman bercerita.
- 12) Kerabat, rekan dan seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah memberikan semangat dan dukungan kepada penulis;

Oleh karena keterbatasan yang ada, penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini tentunya masih kurang dari sempurna. Penulis sangat mengharapkan suatu kritik dan saran yang dapat membangun demi penyempurnaan laporan ini. Penulis juga berharap semoga skripsi ini dapat berguna bagi pihak yang memerlukan dan terutama bagi penulis sendiri di masa yang akan datang.

Depok, 12 Juni 2012

Penulis

LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN
PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Wenty Eka Septia
NPM : 0806338134
Program Studi : Teknik Industri
Departemen : Teknik Industri
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Analisis Lingkungan Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Indonesia

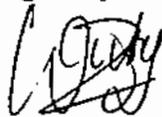
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 12 Juni 2012

Yang menyatakan



(Wenty Eka Septia)

ABSTRAK

Nama : Wenty Eka Septia
Program Studi : Teknik Industri
Judul : Analisis Lingkungan Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Indonesia

Skripsi ini mempelajari dampak lingkungan dari penggunaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang diyakini tidak menghasilkan emisi selama memproduksi listrik. Metode *Life Cycle Assessment* (LCA) digunakan untuk menghitung dampak lingkungan dari sistem PLTS *off grid* menggunakan *back-up* (menggunakan baterai) dan sistem *on-grid* tanpa baterai. Emisi yang dipancarkan oleh PLTS dibandingkan dengan tiga pembangkit listrik bertenaga konvensional batubara, diesel, dan gas. Hasil penelitian menyebutkan baterai memberikan kontribusi terbesar terhadap potensi dampak lingkungan. *Energy Pay Back time* (EPBT) sistem PLTS adalah 1,64 tahun. Rekomendasi untuk perbaikan profil lingkungan dari sistem PLTS juga dibahas.

Kata kunci : *Life Cycle Assessment*, dampak lingkungan, EPBT, mitigasi CO₂, pembangkit listrik tenaga surya

ABSTRACT

Name : Wenty Eka Septia
Study Program : Industrial Engineering
Title : Environmental Evaluation of Photovoltaics System in Indonesia

In this study the environmental impacts of photovoltaic solar energy systems which is believed has zero emission while generating electricity are investigated. Using Life Cycle Assessment (LCA) the environmental impacts of Solar Off Grid with back-up systems (using battery) are compared to On-Grid system without battery. Emissions emitted by Photovoltaic systems are also compared with three conventional supply options namely coal, fuel dan LNG gas power supply. Study results show that batteries give the biggest contribution to potential environmental impact. Energy Pay Back Time (EPBT) of photovoltaic system is 1.64 years. Recommendation for improvement of the environmental profile of photovoltaic systems are also investigated.

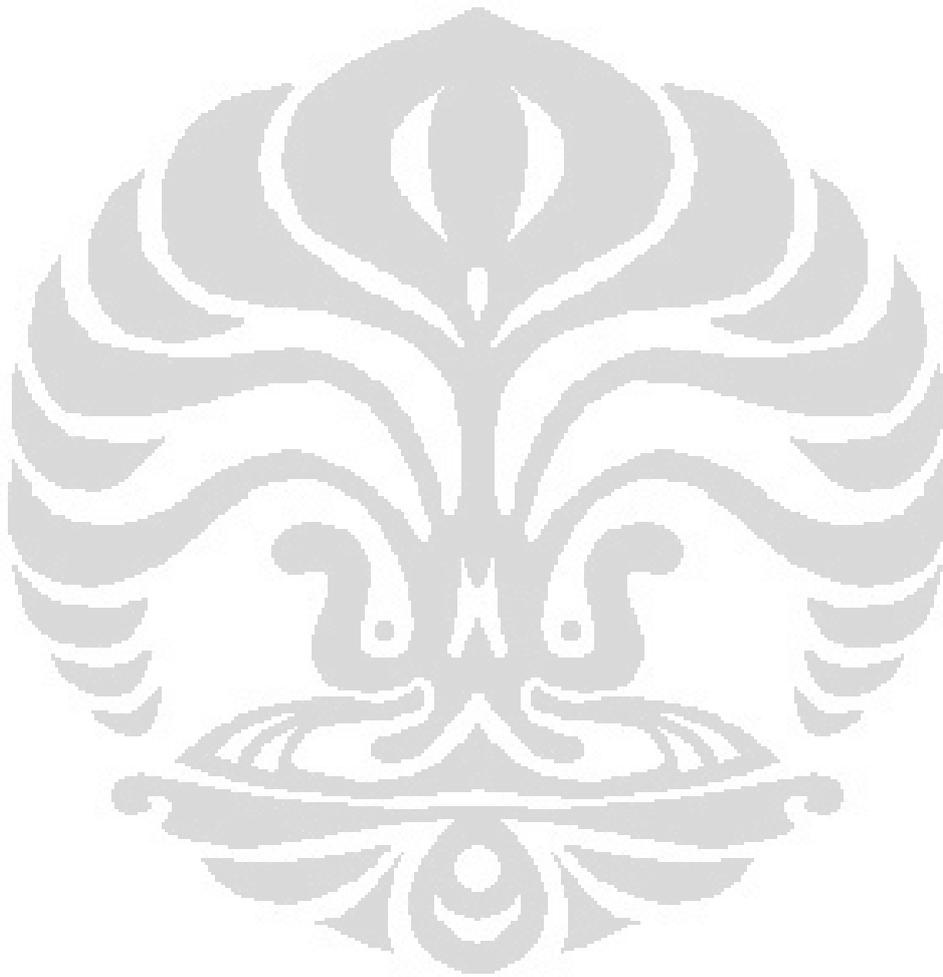
Keywords : Life Cycle Assessment, environmental impacts, EPBT, CO₂ mitigation, photovoltaic systems

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vii
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR RUMUS	xvi
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang Permasalahan.....	1
1.1.1. Perkembangan Perubahan Iklim Global.....	1
1.1.2. Kondisi Ketersediaan Tenaga Listrik di Indonesia.....	4
1.1.3. Potensi Pengembangan Sel Surya.....	5
1.2. Diagram Keterkaitan Masalah.....	9
1.3. Rumusan Permasalahan.....	10
1.4. Tujuan Penelitian.....	10
1.5. Ruang Lingkup Penelitian.....	10
1.6. Metodologi Penelitian.....	10
1.7. Sistematika Penulisan.....	13
2. TINJAUAN PUSTAKA	15
2.1. Fotovoltaik.....	15
2.1.1. Polysilicone.....	16
2.1.2. Wafer Surya.....	16
2.1.3. Sel Surya.....	16
2.1.4. Modul Surya.....	17
2.2. Komponen Sistem Sel Surya.....	17
2.2.1. Sistem Sel Surya Terhubung Grid (<i>Grid connected PV System</i>).....	18
2.2.2. Sistem Sel Surya <i>Stand-alone</i>	19
2.2.3. Inverter.....	20
2.2.4. Baterei.....	20
2.3. Life Cycle Assessment.....	21
2.3.1. Karakteristik Umum dari LCA.....	21
2.3.1.1. Definisi LCA.....	21
2.3.1.2. Batasan dari LCA.....	22
2.3.2. Metodologi.....	23
2.3.2.1. Pendefinisian Tujuan dan Ruang Lingkup.....	23
2.3.2.2. Analisis Inventori.....	24
2.3.2.3. Pengukuran Dampak.....	26
2.3.2.4. Interpretasi.....	39
2.4. NER dan EPBT.....	40
3. PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA.....	43
3.1. Pengumpulan Data.....	43
3.1.1. Rencana Produksi Listrik PLTS.....	44

3.1.2.	Data Umum Proses Produksi Komponen PLTS	45
3.1.3.	Data Umum Komponen Instalasi PLTS.....	48
3.1.4.	Daur Ulang Sistem Sel Surya.....	50
3.1.5.	Data Konsumsi Listrik	50
3.1.6.	Data Emisi Pembangkit Listrik Konvensional.....	50
3.2.	Pengolahan Data	51
3.2.1.	Pemilihan Kategori Dampak.....	51
3.2.2.	Pemilihan Metode Karakterisasi: Indikator kategori, Model Karakterisasi, dan Karakterisasi.....	52
3.2.3.	Klasifikasi	52
3.2.4.	Karakterisasi.....	53
3.2.5.	Pengukuran Dampak Penipisan Sumber Daya Abiotik	53
3.2.6.	Pengukuran Dampak Perubahan Iklim.....	55
3.2.7.	Pengukuran Dampak Bahan Beracun terhadap Manusia.....	55
3.2.8.	Pengukuran Dampak Beracun pada Ekosistem Air Tawar.....	56
3.2.9.	Pengukuran Dampak Beracun pada Ekosistem Air Laut.....	57
3.2.10.	Pengukuran Dampak Beracun pada Ekosistem Terrestrial	59
3.2.11.	Pengukuran Dampak Pembentukan <i>Photo-Oxidant</i>	60
3.2.12.	Pengukuran Dampak Pengasaman/ <i>Acidification</i>	61
3.2.13.	Pengukuran Dampak <i>Eutrophication</i>	62
3.2.14.	Pengukuran Dampak Bau / <i>Odour</i>	62
3.2.15.	Hasil Pengolahan Data Agregat	63
3.2.16.	Normalisasi	66
3.2.17.	Hasil Perhitungan <i>Energy Pay Back Time</i> (EPBT).....	69
3.2.18.	Hasil Pengolahan dengan Beberapa Skenario.....	70
3.2.18.1.	Perbandingan Emisi Dengan Pembangkit Listrik Konvensional	70
3.2.18.2.	Perbandingan Dengan Dan Tanpa Menggunakan Baterai.....	71
3.2.18.3.	Skenario Daur Ulang Baterai.....	72
4.	ANALISIS HASIL.....	74
4.1.	Analisis Kategori Dampak	74
4.2.	Analisis Dampak Lingkungan Input <i>Baseline</i>	77
4.2.1.	Analisis Dampak Lingkungan per Unit Proses	77
4.2.1.1	Analisis Dampak Lingkungan pada Proses Pembentukan <i>Polychrystalline Silicone</i>	78
4.2.1.2	Analisis Dampak Lingkungan pada Proses Pembentukan <i>Multi-Wafer</i>	78
4.2.1.3	Analisis Dampak Lingkungan pada Baterai.....	79
4.2.2.	Analisis Dampak Lingkungan per Kategori Dampak	80
4.2.2.1	Analisis Dampak Penipisan Sumber Daya Alam	81
4.2.2.2	Analisis Dampak Bahan Beracun pada Manusia/ <i>Human Toxicity</i>	84
4.2.2.3	Analisis Dampak Bahan Beracun pada Ekosistem Terrestrial / <i>Terrestrial Ecotoxicity</i>	86
4.2.2.4	Analisis Dampak Bau / <i>Maladuous Air</i>	87
4.3.	Analisis Hasil <i>Energy Pay Back Time</i> (EPBT).....	88
4.4.	Analisis Perbandingan Emisi dengan Pembangkit Listrik Konvensional..	89
4.5.	Analisis Dampak Lingkungan Dengan atau Tanpa Baterai.....	90

4.6. Analisis Dampak Lingkungan dengan Baterai Daur Ulang.....	93
5. KESIMPULAN DAN SARAN	97
5.1. Kesimpulan	97
5.2. Saran	98
6. DAFTAR REFERENSI	99

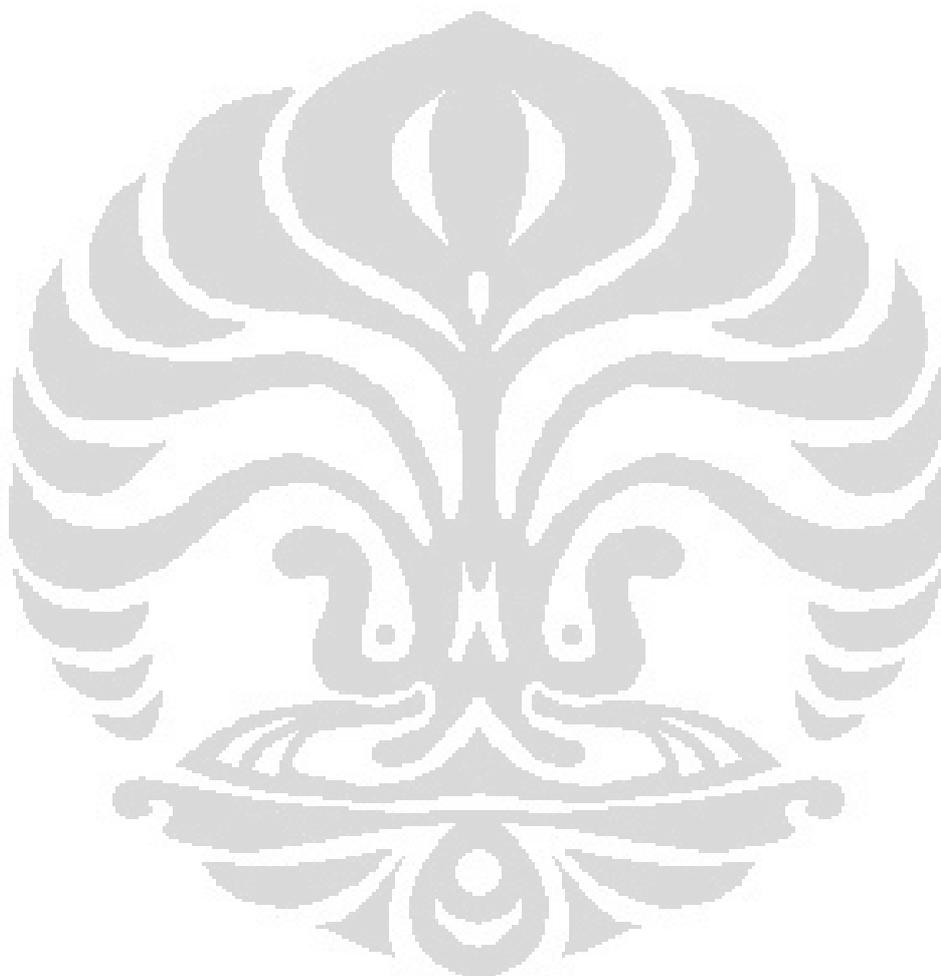


DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Intensitas Radiasi Matahari Indonesia	6
Tabel 1.2 Potensi Sumber Energi Non-Fosil 2008	7
Tabel 2.1 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Penipisan Sumber Daya Abiotik.....	28
Tabel 2.2 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Persaingan Lahan.....	29
Tabel 2.3 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Perubahan Iklim.....	30
Tabel 2.4 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Penipisan Lapisan Ozon Stratosfer	31
Tabel 2.5 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Bahan Beracun pada manusia.....	32
Tabel 2.6 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Bahan Beracun pada Ekosistem Air Tawar	33
Tabel 2.7 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Bahan Beracun pada Ekosistem Air Laut.....	34
Tabel 2.8 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Bahan Beracun pada Ekosistem Terrestrial	35
Tabel 2.9 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Pembentukan <i>Photo- Oxidant</i>	36
Tabel 2.10 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Pengasaman	37
Tabel 2.11 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak <i>Eutrophication</i>	38
Tabel 2.12 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Bau/ <i>Malodourous Air</i>	39
Tabel 2.13 EPBT dan ERF di beberapa lokasi PLTS berbeda.....	42
Tabel 3.1 Proyeksi Pasokan Produksi Listrik PLTS	44
Tabel 3.2 Kebutuhan material pembuatan <i>Polycrystalline</i>	45
Tabel 3.3 Kebutuhan material pembuatan <i>Multi Wafers</i>	46
Tabel 3.4 Kebutuhan material pembuatan Sel Surya.....	47
Tabel 3.5 Kebutuhan material pembuatan Modul Surya	48
Tabel 3.6 Kebutuhan material pembuatan Inverter.....	49
Tabel 3.7 Kebutuhan material pembuatan Baterai.....	49
Tabel 3.8 Kebutuhan Konsumsi listrik	50
Tabel 3.9 Emisi per kWh pembangkit listrik konvensional.....	51
Tabel 3.10 Perhitungan Dampak Penipisan Sumber Daya Abiotik / <i>Abiotic Depletion Potential</i>	54
Tabel 3.11 Perhitungan Dampak Perubahan Iklim / <i>Climate Change</i>	55
Tabel 3.12 Perhitungan Dampak Bahan Beracun terhadap Manusia/ <i>Human Toxicity</i>	56
Tabel 3.13 Perhitungan Dampak Bahan Beracun Ekosistem Air Tawar / <i>Fresh Water Ecotoxicity</i>	57

Tabel 3.14 Perhitungan Dampak Beracun pada Ekosistem Air Laut/ <i>Marine Water Ecotoxicity</i>	58
Tabel 3.15 Pengukuran Dampak Beracun pada Ekosistem Terrestrial / <i>Terrestrial Ecotoxicity</i>	59
Tabel 3.16 Perhitungan Dampak Pembentukan <i>Photo-Oxidant</i>	60
Tabel 3.17 Perhitungan Dampak Pengasaman/ <i>Acidification</i>	61
Tabel 3.18 Perhitungan Dampak <i>Eutrophication</i>	62
Tabel 3.19 Perhitungan Dampak Bau / <i>Odour</i>	62
Tabel 3.20 Jumlah Modul Terpasang 2013 - 2038	63
Tabel 3.21 Menunjukkan Jumlah Baterai Yang Digunakan Dari Tahun 2013-2038	65
Tabel 3.22 Faktor Normalisasi Kategori Dampak Dasar untuk <i>World</i> tahun 2005	66
Tabel 3.23 Hasil Normalisasi Dampak per Kategori per 1 Modul Surya	67
Tabel 3.24 Hasil Normalisasi Dampak Penipisan Sumber Daya Abiotik	68
Tabel 3.25 Hasil Perhitungan Dampak per Kategori	69
Tabel 3.26 Hasil Perhitungan Emisi Pembangkit Listrik Konvensional	71
Tabel 3.27 Hasil Perhitungan Dampak per Kategori dengan Skenario Baterai	72
Tabel 3.28 Skenario Manajemen Limbah Baterai	72
Tabel 3.29 Hasil Perhitungan Skenario Daur Ulang Baterai	73
Tabel 4.1 Persentase Kontribusi per Unit Proses terhadap Dampak Lingkungan	77
Tabel 4.2 Dampak Lingkungan pada Proses Pembentukan <i>Polychrystalline Silicone</i>	78
Tabel 4.3 Dampak Lingkungan pada Proses Pembentukan <i>Multi Wafer</i>	78
Tabel 4.4 Dampak Lingkungan pada unit Baterai	79
Tabel 4.5 Dampak Lingkungan per Kategori Dampak	80
Tabel 4.6 Sumber Dampak Penipisan Sumber Daya Alam	82
Tabel 4.7 Dampak Penipisan Sumber Daya Alam per Unit Proses	83
Tabel 4.8 Kontribusi Aktivitas Tahunan pada Dampak Penipisan Sumber Alam	83
Tabel 4.9 Dampak Bahan Beracun pada Manusia/ <i>Human Toxicity</i> per Unit Proses	84
Tabel 4.10 Kontribusi Unit Proses terhadap Dampak Penipisan Bahan Beracun terhadap Manusia.	84
Tabel 4.11 Kontribusi Aktivitas Tahunan terhadap Dampak Penipisan Bahan Beracun terhadap Manusia.	85
Tabel 4.12 Dampak Bahan Beracun pada Ekosistem Terrestrial per Unit Proses	86
Tabel 4.13 Kontribusi Dampak Bahan Beracun pada Ekosistem Terrestrial per Unit Proses	86

Tabel 4.14 Kontribusi Aktivitas Tahunan Dampak Bahan Beracun pada Ekosistem Terrestrial per Unit Proses.....	87
Tabel 4.15 Dampak Bahan Beracun pada Bau (<i>Maladuous Air</i>).....	88
Tabel 4.16 Kontribusi emisi CO ₂ per Pembangkit Listrik	90
Tabel 4.17 Hasil Perhitungan Dampak Lingkungan Skenario tanpa Baterai	91
Tabel 4.18 Hasil Perhitungan Dampak Lingkungan Skenario Baterai Daur Ulang	94



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Grafik emisi CO ₂ dari bahan bakar fosil	1
Gambar 1.2 Grafik Suplai Energi Primer	2
Gambar 1.3 Indeks Suplai Energi Baru dan Terbarukan	3
Gambar 1.4 Wilayah Kekurangan Pasokan Listrik.....	4
Gambar 1.5 Peta Iradiasi Matahari Indonesia.....	6
Gambar 1.6 Diagram Keterkaitan Masalah.....	9
Gambar 1.7 Diagram Alir Metodologi Penelitian.....	12
Gambar 1.8 Diagram Alir Metodologi Penelitian (Sambungan).....	13
Gambar 2.1 Komponen Utama sistem sel surya.....	18
Gambar 2.2 Diagram sistem PV terhubung Grid.....	19
Gambar 2.3 Diagram sistem sel surya <i>stand-alone</i> dengan baterai	20
Gambar 3.1 Batasan Studi LCA.....	44
Gambar 4.1 Grafik Dampak Lingkungan terhadap unit terkait	77
Gambar 4.2 Dampak Lingkungan per Kategori Dampak	81
Gambar 4.3 Grafik emisi CO ₂ per Pembangkit Listrik	90
Gambar 4.4 Grafik Dampak Penipisan Sumber Daya Alam dengan menggunakan baterai dan tanpa baterai.....	92
Gambar 4.5 Grafik Hasil perhitungan Dampak Lingkungan dengan menggunakan baterai dan tanpa baterai.....	92
Gambar 4.6 Grafik Hasil perhitungan Dampak Lingkungan Bahan Beracun pada Manusia dengan menggunakan baterai dan tanpa baterai.....	93
Gambar 4.7 Grafik Hasil perhitungan Dampak Lingkungan <i>Eutrophication</i> dan <i>Acidification</i> dengan menggunakan baterai dan tanpa baterai.....	93
Gambar 4.8 Grafik Dampak Penipisan Sumber Daya Alam dengan skenario baterai daur ulang	95
Gambar 4.9 Grafik Dampak Lingkungan dengan skenario baterai daur ulang	95
Gambar 4.10 Grafik Dampak Bahan Beracun Pada Ekosistem Terrestrial Dengan Skenario Baterai Daur Ulang	96

DAFTAR RUMUS

(2.1) Rumus <i>Net Energy Ratio</i> (NER)	41
(2.2) Rumus <i>Energy Pay Back Time</i> (EPBT)	41
(2.3) Rumus <i>Life Cycle Energy Out</i> (LCE _{out})	41
(2.4) Rumus Radiasi Surya	41
(2.5) Rumus <i>Net Energy Ratio</i> (NER)	41
(2.6) Rumus <i>Energy Pay Back Time</i> (EPBT)	41
(3.1) Rumus <i>Abiotic Depletion</i> / Dampak Penipisan Sumber Daya Alam	53
(3.2) Rumus <i>Climate Change</i> / Dampak Perubahan Iklim	55
(3.3) Rumus <i>Human Toxicity</i> / Dampak Bahan Beracun terhadap Manusia	55
(3.4) Rumus <i>Freshwater Aquatic Ecotoxicity</i> / Dampak Bahan Beracun pada Ekosistem Air Tawar	56
(3.5) Rumus <i>Marine Aquatic Ecotoxicity</i> / Pengukuran Dampak Beracun pada Ekosistem Air Laut	57
(3.6) Rumus <i>Terrestrial Ecotoxicity</i> / Dampak Beracun pada Ekosistem Terrestrial	59
(3.7) Rumus Dampak Pembentukan <i>Photo-Oxidant</i>	60
(3.8) Rumus <i>Acidification</i> / Dampak Pengasaman	61
(3.9) Rumus <i>Eutrophication</i>	62
(3.10) Rumus <i>Maladourous Air</i> / Dampak Bau	62

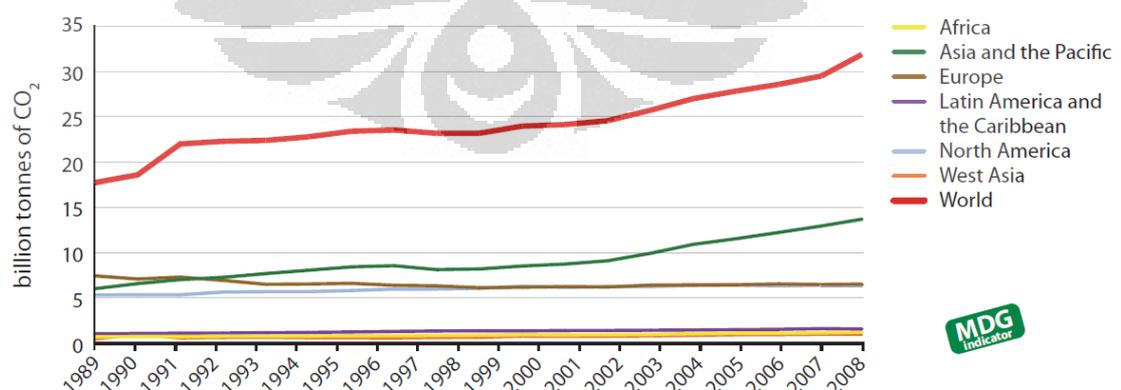
BAB 1 PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Permasalahan

1.1.1. Perkembangan Perubahan Iklim Global

Emisi gas efek rumah kaca yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil telah meningkat secara ekstensif selama dua dekade terakhir. Pembakaran bahan bakar fosil memberikan kontribusi 80% terhadap konsumsi energi di dunia (UNFCCC, 2008). Pembakaran bahan bakar fosil menghasilkan gas rumah kaca menjadi penyebab pemanasan global. Perkembangan pemanasan global yang cukup pesat telah memberikan dampak yang negatif bagi bumi, salah satunya perubahan iklim.

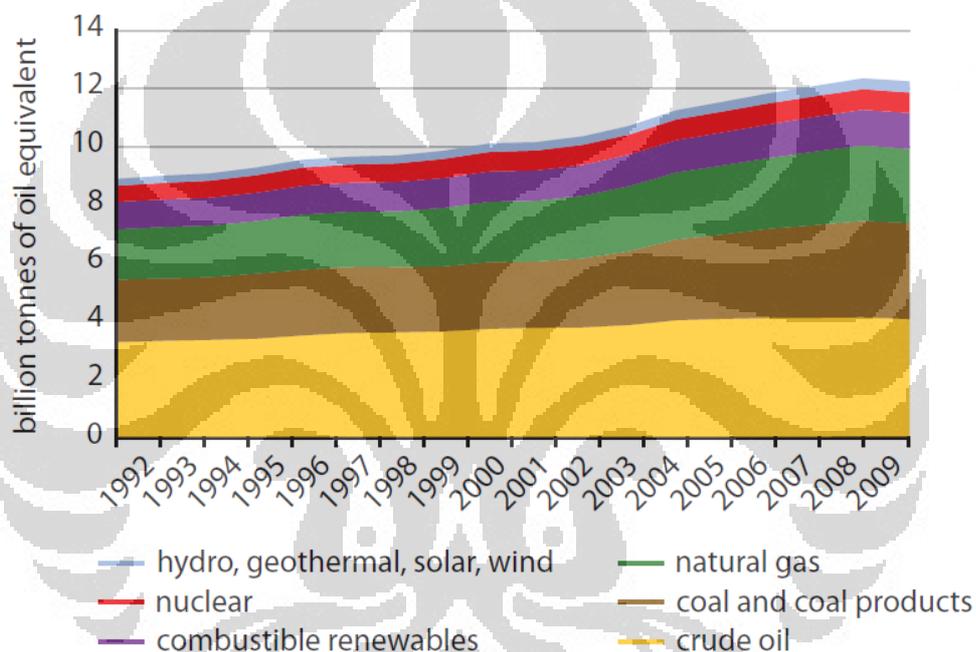
Pada tahun 2010, tingkat gas rumah kaca merupakan yang tertinggi yang tercatat sejak zaman industrialisasi (WMO 2011). Sejak tahun 2009 banyak negara berkomitmen untuk mengurangi emisi gas rumah kaca pada tahun 2020, dengan tujuan untuk menghambat laju pemanasan global (UNEP 2011). Untuk mengurangi emisi, negara-negara perlu menggeser sistem energi dengan meningkatkan penggunaan sumber energi terbarukan yang rendah karbon dan meningkatkan efisiensi energi tersebut. Kebijakan itu sifatnya domestik atau regional dilaksanakan untuk mengurangi emisi, terutama kebijakan yang berkaitan dengan produksi listrik, industri, transportasi, kehutanan dan pertanian.



Gambar 1.1 Grafik emisi CO2 dari bahan bakar fosil

(Sumber : UNEP, 2012)

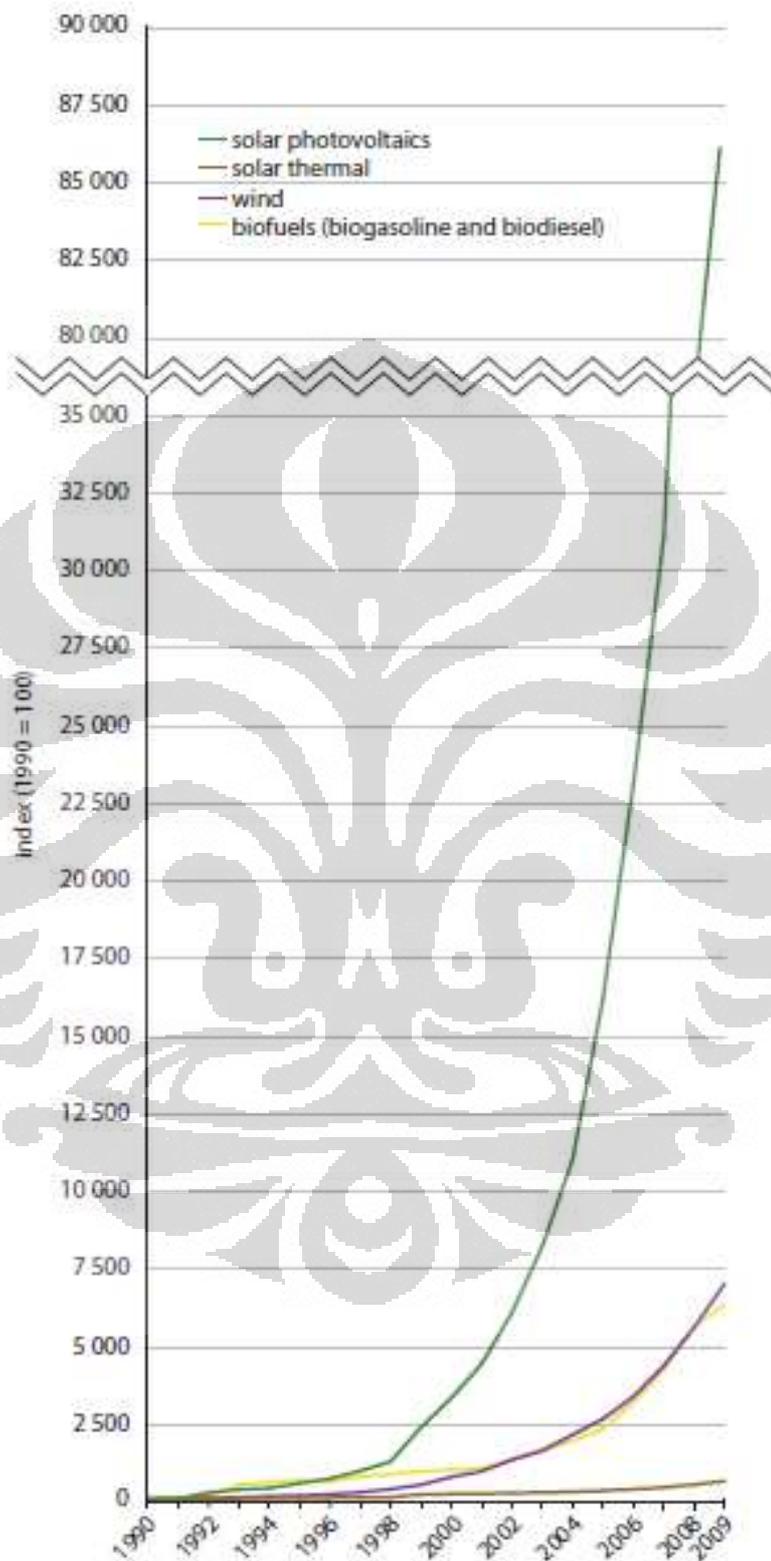
Hasil pembakaran bahan bakar fosil, CO₂ merupakan penyumbang utama perubahan iklim. Emisi per kapita CO₂ terus menjadi tertinggi di Amerika Utara, diikuti oleh Asia Barat dan Eropa, dan terendah di Afrika (Gambar 3). Emisi CO₂ global terus meningkat, mencapai 32,1 milyar ton metrik pada tahun 2008, meningkat 2,4 persen dibandingkan dengan tahun sebelumnya dan 42 persen dibandingkan dengan 1990. Tingkat emisi CO₂ sangat berbeda antar daerah dan negara. Seiring dengan kebangkitan industri dan perekonomian di kawasan Asia dan Pasifik, pada dekade terakhir telah meningkat paling signifikan.



Gambar 1.2 Grafik Suplai Energi Primer

(Sumber : UNEP, 2012)

Bahan bakar fosil seperti minyak, batubara dan gas terus mendominasi konsumsi energi dunia. Total penggunaan bahan bakar fosil saat ini mencapai sekitar 80 persen dari pasokan energi primer meskipun porsi dan efisiensi penggunaan energi baru dan terbarukan juga meningkat. Investasi global dalam energi baru terbarukan tumbuh tajam. Tercatat sebesar US \$ 211 miliar (seribu juta) pada tahun 2010, lebih dari lima kali jumlah tersebut pada tahun 2004. Porsi penggunaan energi baru dan terbarukan dunia saat ini hanya lebih dari 13 persen, dimana telah terjadi peningkatan spektakuler dalam penggunaan energi surya dan angin, serta biofuel, dalam beberapa tahun terakhir.



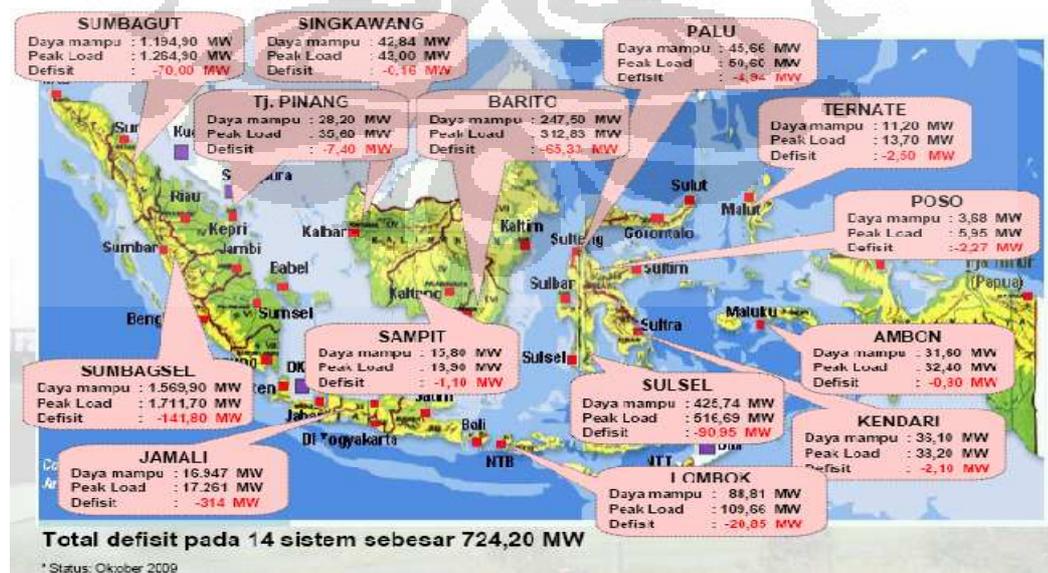
Gambar 1.3 Indeks Suplai Energi Baru dan Terbarukan

(Sumber: UNEP, 2012)

1.1.2. Kondisi Ketersediaan Tenaga Listrik di Indonesia

Kebutuhan listrik akan terus meningkat sejalan dengan pertumbuhan penduduk dan membaiknya pendapatan masyarakat. Hasil proyeksi kebutuhan energi menggunakan laju pertumbuhan ekonomi dan penambahan penduduk, menunjukkan jumlah kebutuhan energi listrik diproyeksikan meningkat dari kisaran 148 TWh tahun 2010 menjadi sebesar 710 s.d. 910 TWh pada tahun 2030 dan sebesar 2100 s.d. 2710 TWh pada tahun 2050 atau tumbuh rata-rata sebesar 8,2% per tahun untuk periode 2010 sampai dengan 2030 dan rata-rata sebesar 5,8% pada periode 2030 sampai dengan 2050.

Peranan energi listrik vital sebagai kebutuhan primer yang menggerakkan ekonomi masyarakat. Dalam usaha untuk memenuhi kebutuhan permintaan tenaga listrik tersebut pemerintah melalui PT PLN (Persero) selaku Pemegang Kuasa Usaha Ketenagalistrikan (PKUK) sesuai Undang-Undang no 15 Tahun 1985 berkewajiban untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik di seluruh Indonesia. Indikasi terjadinya krisis pasokan listrik terlihat jelas dari menurunnya selisih antara daya tersedia dan beban puncak. Laju pertumbuhan konsumsi listrik pada periode 2005-2008 rata-rata sebesar 7,2% per tahun, sedangkan kapasitas pembangkit listrik pada periode yang sama hanya tumbuh rata-rata sebesar 5,1% pertahun.



Gambar 1.4 Wilayah Kekurangan Pasokan Listrik

(Sumber :BATAN, 2009)

Saat ini hampir semua wilayah di Indonesia masih mengalami krisis pasokan tenaga listrik. Secara rata-rata rasio elektrifikasi (ukuran tingkat ketersediaan listrik di suatu wilayah) Indonesia adalah 66.51% pada akhir tahun 2010 (ARPLN, 2010). Rasio elektrifikasi yang baru mencapai 66% merupakan indikasi dari keterbatasan infrastruktur listrik yang ada pada saat ini.

1.1.3. Potensi Pengembangan Sel Surya

Indonesia terletak di garis katulistiwa, sehingga mempunyai sumber energi surya yang berlimpah dengan intensitas radiasi matahari rata-rata sekitar 4.8 kWh/m² per hari di seluruh wilayah Indonesia. Dengan berlimpahnya sumber energi surya yang belum dimanfaatkan secara optimal, sedangkan di sisi lain ada sebagian wilayah Indonesia yang belum memiliki akses tenaga listrik karena tidak terjangkau oleh jaringan listrik PLN, sehingga Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan sistemnya yang modular dan mudah dipindahkan merupakan salah satu solusi yang dapat dipertimbangkan sebagai salah satu pembangkit listrik alternatif. Sayangnya biaya pembangkitan PLTS masih lebih mahal apabila dibandingkan dengan biaya pembangkitan pembangkit listrik tenaga konvensional, karena sampai saat ini piranti utama untuk mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik (modul fotovoltaik) masih merupakan piranti yang didatangkan dari luar negeri.

Walaupun pemanfaatan PLTS belum optimal, tetapi sudah cukup banyak dimanfaatkan pada perumahan atau sering disebut *Solar Home System* (SHS), pompa air, televisi, komunikasi, dan lemari pendingin di PUSKESMAS di beberapa wilayah Indonesia, khususnya di wilayah terpencil yang jauh dari jaringan listrik PLN. PLTS merupakan teknologi yang ramah lingkungan karena tidak melepaskan polutan seperti halnya pembangkit listrik tenaga fosil.

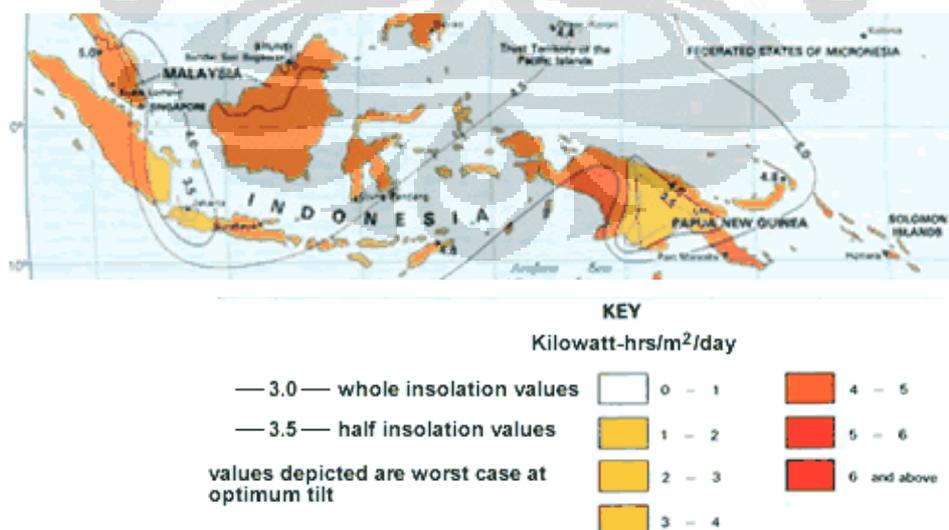
Indonesia mempunyai intensitas radiasi yang berpotensi untuk membangkitkan energi listrik, dengan rata-rata daya radiasi matahari di Indonesia sebesar 1000 Watt/m². Data hasil pengukuran intensitas radiasi tenaga surya di seluruh Indonesia yang sebagian besar dilakukan oleh BPPT dan sisanya oleh BMG dari tahun 1965 hingga 1995 ditunjukkan pada Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Intensitas Radiasi Matahari Indonesia

Propinsi	Lokasi	Tahun Pengukuran	Posisi Geografis	Intensitas Radiasi (Wh/m ²)
NAD	Pidie	1980	4°15' LS; 96°52' BT	4.097
SumSel	Ogan Komering Ulu	1979-1981	3°10' LS; 104°42' BT	4.951
Lampung	Kab. Lampung Selatan	1972-1979	4°28' LS; 105°48' BT	5.234
DKI Jakarta	Jakarta Utara	1965- 1981	6°11' LS; 106°05' BT	4.187
Banten	Tangerang	1980	6°07' LS; 106°30' BT	4.324
	Lebak	1991 - 1995	6°11' LS; 106°30' BT	4.446
Jawa Barat	Bogor	1980	6°11' LS; 106°39' BT	2.558
	Bandung	1980	6°56' LS; 107°38' BT	4.149
Jawa Tengah	Semarang	1979-1981	6°59' LS; 110°23' BT	5.488
DI Yogyakarta	Yogyakarta	1980	7°37' LS; 110°01' BT	4.500
Jawa Timur	Pacitan	1980	7°18' LS; 112°42' BT	4.300
KalBar	Pontianak	1991-1993	4°36' LS; 9°11' BT	4.552
KalTim	Kabupaten Berau	1991-1995	0°32' LU; 117°52' BT	4.172
		1979 - 1981	3°27' LS; 114°50' BT	4.796
		1991 - 1995	3°25' LS; 114°41' BT	4.573
Gorontalo	Gorontalo	1991-1995	1°32' LU; 124°55' BT	4.911
SulTeng	Donggala	1991-1994	0°57' LS; 120°0' BT	5.512
Papua	Jayapura	1992-1994	8°37' LS; 122°12' BT	5.720
Bali	Denpasar	1977- 1979	8°40' LS ; 115°13' BT	5.263
NTB	Kabupaten Sumbawa	1991-1995	9°37' LS; 120°16' BT	5.747
NTT	Ngada	1975-1978	10°9' LS; 123°36' BT	5.117

(Sumber : BPPT, BMG)

Pada Tabel 1.1 terlihat bahwa Nusa Tenggara Barat dan Papua mempunyai intensitas radiasi matahari paling tinggi di seluruh wilayah Indonesia, sedangkan Bogor mempunyai intensitas radiasi matahari paling rendah di seluruh wilayah Indonesia. Dalam penelitian potensi PLTS di Indonesia ini, semua wilayah baik yang mempunyai intensitas radiasi matahari paling tinggi maupun paling rendah dipertimbangkan.



Gambar 1.5 Peta Iradiasi Matahari Indonesia

(Sumber: <http://aussiervproducts.com.au>, diakses pada tanggal 10 Maret 2012)

Tabel 1.2 Potensi Sumber Energi Non-Fosil 2008

No	Energi Non Fosil	Sumber Daya (SD)	Kapasitas Terpasang (KT)	Rasio KT/SD
	1	2	3	4 = 3/2
1	Tenaga Air	75.670 MWe	4.200 MWe	5,55
2	Panas Bumi	28.170 MWe	1.189 MWe	4,22
3	Mini / MikroHidro	500 MWe	86,1 MWe	17,22
4	Biomass	49.810 MWe	445 MWe	0,89
5	Tenaga Surya	4,80 kWh/m ² /hari	12,1 MWe	
6	Tenaga Angin	9.290 MWe	1, 1 MWe	0,01

(Sumber : KEN, 2010)

Dari Tabel 1.2 terlihat bahwa sumber energi baru dan terbarukan relatif masih belum dimanfaatkan secara optimal. Hal ini terlihat dari rasio kapasitas terpasang terhadap sumber daya yang masih sangat kecil, kecuali mini/mikrohidro. Dari tabel tersebut juga terlihat bahwa kapasitas terpasang pembangkit yang menggunakan sumber energi non-fosil yang paling besar adalah tenaga air (4.200 MWe) diikuti panas bumi (1.189 MWe).

Pemerintah Indonesia berkomitmen untuk menurunkan emisi GRK sebesar 26% pada tahun 2020 dengan upaya sendiri dan sebesar 41% dengan dukungan internasional dimana kontribusi sektor energi dan transportasi di dalam target penurunan tersebut adalah sebesar 5,13% atau setara dengan 0,038 GTon-CO₂. Sasaran inilah yang kemudian dijabarkan dalam langkah yang lebih detil ke dalam Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (RAN-GRK) dan Rencana Aksi Daerah Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (RAD-GRK).

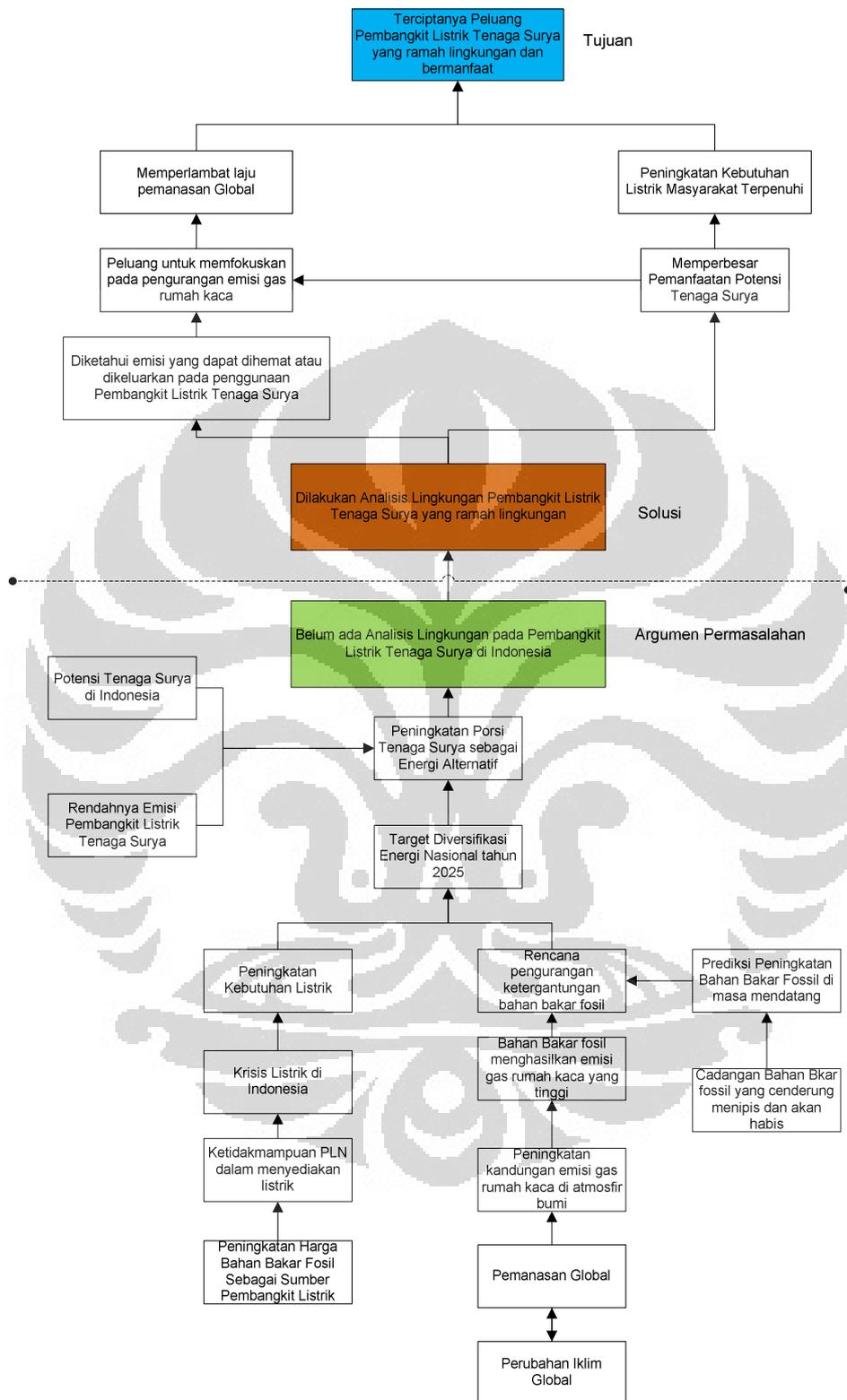
Perpres No. 61 Tahun 2011 menjabarkan pelaksanaan penurunan emisi gas rumah kaca, yang meliputi menjabarkan target penurunan Rencana Aksi Nasional-gas rumah kaca (RAN-GRK) ke dalam 5 (lima) sektor utama, yaitu sektor kehutanan dan lahan gambut; sektor pertanian; sektor energi dan transportasi; sektor industri; dan sektor pengelolaan limbah. Kedua, mengidentifikasi kegiatan yang akan dilakukan untuk menurunkan gas rumah kaca, baik berupa kegiatan inti maupun kegiatan pendukung yang akan dilaksanakan oleh sekitar 20

Kementerian/Lembaga (K/L). Maka dari itu komitmen dan langkah pelaksanaan untuk mencapai target komitmen penurunan emisi GRK telah diurusutamakan dalam pembangunan nasional.

Dalam Kebijakan Energi Nasional, (KEN), disebutkan bahwa pemanfaatan energi baru dan sumberdaya energi terbarukan, seperti tenaga air termasuk minihidro, panasbumi, biomasa, angin, gelombang, dan matahari sebagai bahan bakar yang “ramah lingkungan” perlu mendapat perhatian lebih agar pemanfaatannya dapat maksimal. Sejauh ini, penggunaan energi baru dan sumberdaya energi terbarukan relatif terbatas, apalagi biaya pembangkitan listrik berbahan bakar energi tersebut relatif lebih mahal dibanding penggunaan energi fosil. Namun, sejalan dengan timbulnya isu lingkungan baik yang bersifat global maupun global dan meningkatnya harga bahan bakar energi fosil (batubara, BBM, dan gas), menyebabkan prospek pemanfaatan energi baru dan terbarukan menjadi terbuka.

Dalam upaya mendorong pemanfaatan energi baru dan terbarukan, KEN menetapkan target pemanfaatan energi baru dan terbarukan sebagai bahan bakar pembangkit listrik pada tahun 2025 adalah sebesar 5% terhadap total produksi listrik nasional. Hal ini menjadi tantangan tersendiri karena pada sektor ketenagalistrikan, penggunaan energi fosil mencapai 91% dari total penggunaan bahan bakar, dimana 28% diantaranya berupa BBM. Sementara itu penggunaan energi baru dan terbarukan masih kecil, hanya mencapai 9%.

1.2. Diagram Keterkaitan Masalah



Gambar 1.6 Diagram Keterkaitan Masalah

1.3. Rumusan Permasalahan

Berdasarkan latar belakang dan diagram keterkaitan masalah yang telah dibahas pada poin-poin sebelumnya maka pokok permasalahan yang akan dibahas pada skripsi ini adalah terjadinya peningkatan emisi CO₂ di dunia, menipisnya cadangan energi fosil, serta kebutuhan untuk meningkatkan kapasitas pembangkit listrik sehingga diperlukannya solusi energi alternatif yang ramah lingkungan.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menghitung EPBT (*Energy Pay Back Time*) dari PLTS di Indonesia.
2. Menghitung peluang penghematan emisi CO₂ sektor energi listrik.
3. Mengidentifikasi profil lingkungan penggunaan PLTS di Indonesia.

1.5. Ruang Lingkup Penelitian

Ruang Lingkup dalam penelitian ini adalah :

1. Pendefinisian model pengembangan PLTS berdasarkan satu siklus hidup.
2. Diasumsikan PLTS berada di Indonesia dan seluruh proses produksi sel surya, perakitan module, dan instalasi dilakukan di Indonesia.
3. Skenario dalam penelitian ini meliputi :
 - a. Perbandingan emisi dengan pembangkit listrik tenaga konvensional.
 - b. Perbandingan dampak lingkungan yang dihasilkan PLTS tanpa menggunakan baterai.
 - c. Perbandingan dampak lingkungan yang dihasilkan PLTS dengan menggunakan baterai daur ulang.
4. Evaluasi lingkungan dilakukan untuk jangka waktu selama 25 tahun.

1.6. Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui lima tahapan utama, yaitu:

1. Perumusan Masalah

Pada tahap pertama ini penulis memperhatikan isu permasalahan terkini yang sedang berkembang di kehidupan nyata yang memerlukan solusi dan kemudian mendiskusikannya dengan dosen pembimbing.

2. Penyusunan Dasar Teori

Pada tahap ini, Peneliti menentukan dan menyusun dasar teori yang digunakan untuk mendukung penelitian yang akan dilakukan. Dasar teori yang dibahas adalah teori *life cycle assessment*, *energy pay back time* (EPBT), energi surya dan sistem kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya.

3. Pengumpulan dan Pengolahan Data

Untuk tahap ini, Peneliti mencari data-data dan informasi yang dibutuhkan secara:

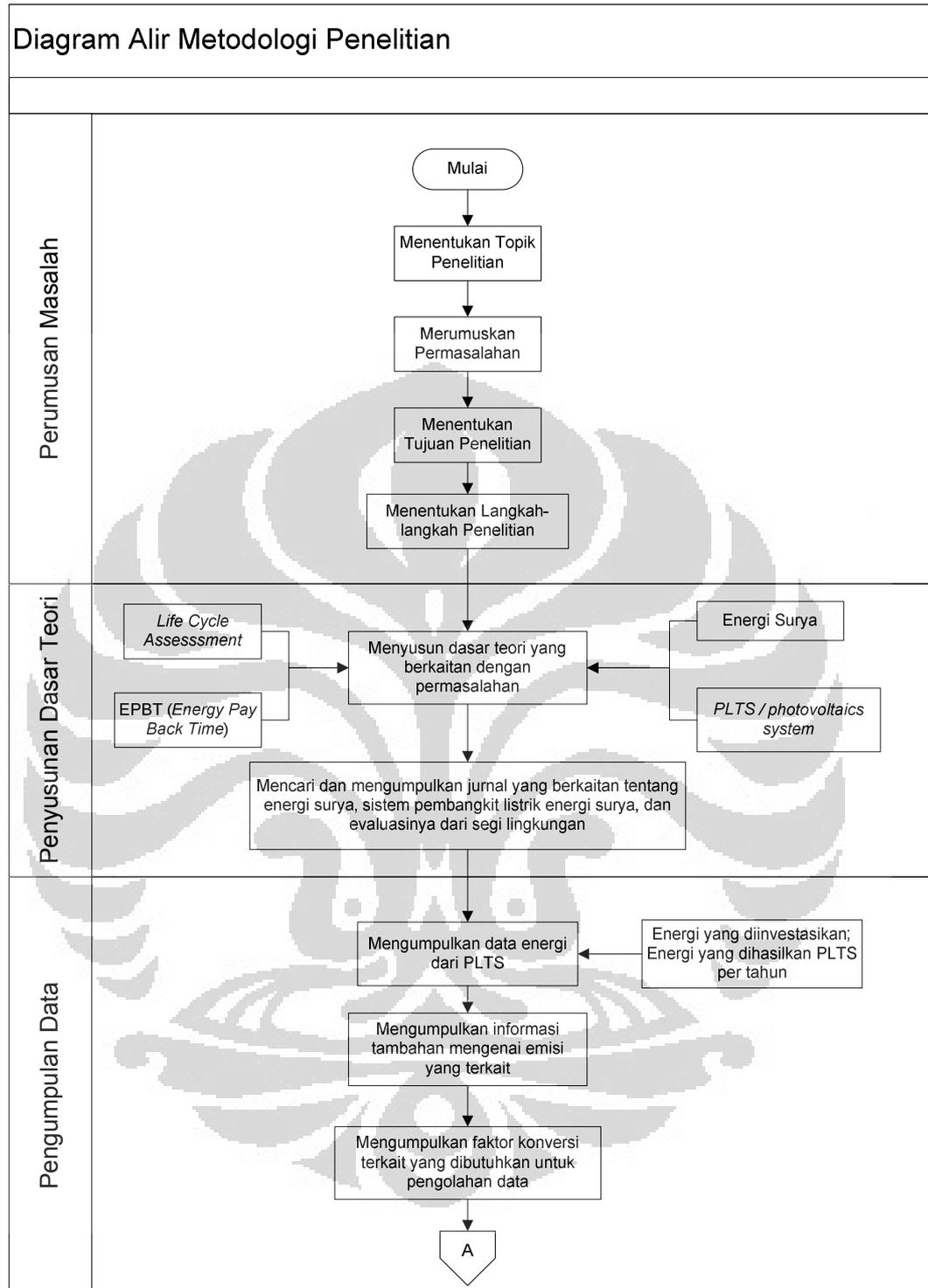
- Kuantitatif, yaitu dengan menggunakan data sekunder. Data dan informasi yang diambil menggunakan metode ini dilakukan dengan membaca referensi dari jurnal, artikel, dan buku yang berhubungan dengan objek penelitian dan pengumpulan data dari perusahaan yang terkait.
- Kualitatif, yaitu dengan menggunakan data primer. Data dan informasi yang diambil melalui metode ini dengan menggunakan wawancara dengan pihak-pihak yang terkait dengan objek penelitian.

4. Analisis Hasil

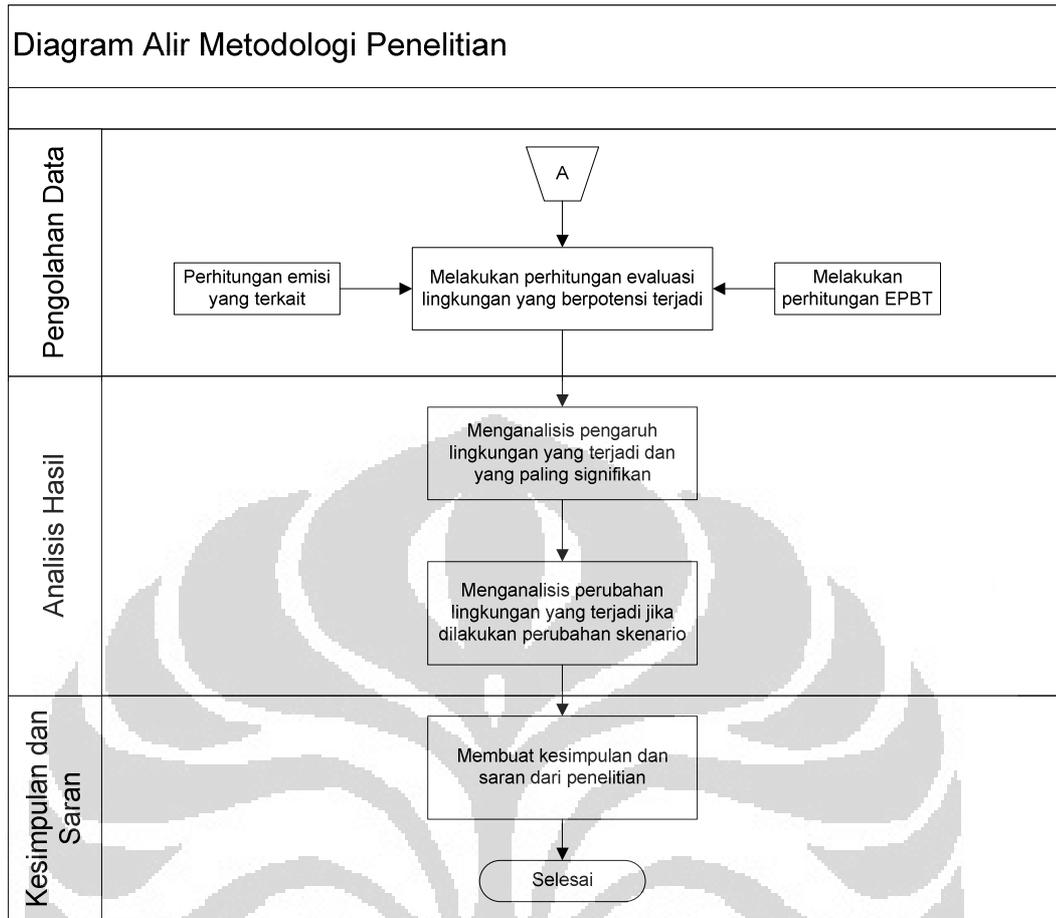
Pada tahap ini, Peneliti melakukan analisis terhadap hasil evaluasi dari seluruh perhitungan yang dilakukan. Analisis hasil dari beberapa skenario untuk melihat perbedaan pengaruh yang dihasilkan terhadap lingkungan.

5. Kesimpulan dan Saran

Pada tahap ini penulis menarik kesimpulan dari hasil pengolahan data dan analisis yang telah dilakukan serta memberikan saran terkait dengan hasil penelitian



Gambar 1.7 Diagram Alir Metodologi Penelitian



Gambar 1.8 Diagram Alir Metodologi Penelitian (Sambungan)

1.7. Sistematika Penulisan

Secara umum, sistematika penulisan yang digunakan pada penelitian ini mengikuti aturan standar baku pedoman teknis penulisan tugas akhir mahasiswa. Penulisan tugas akhir ini terdiri dari lima bab yang memberikan gambaran sistematis dari awal hingga akhir tercapainya tujuan penelitian.

Bab pertama merupakan pendahuluan yang berisikan latar belakang permasalahan, diagram keterkaitan masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup atau batasan penelitian, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.

Bab kedua adalah tinjauan pustaka yang berisikan dasar teori yang berkaitan dengan penelitian ini. Adapun tinjauan pustaka yang akan dibahas meliputi energi surya, PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya), *energy pay back*

time, dan *life cycle assessment*. Dasar teori ini diperoleh melalui literatur, artikel, jurnal, skripsi, tesis, disertasi yang terkait dengan objek dan metode penelitian.

Bab ketiga berisi metode penelitian yang menyajikan pengumpulan dan pengolahan data. Data yang dikumpulkan berupa data primer yang diperoleh dengan tinjauan langsung ke lapangan dan data sekunder yang berasal dari sumber lain. Pengumpulan data dilakukan dengan mencari data yang menunjukkan kumpulan input dan output energi yang terkait rantai suplai PLTS dan nilai-nilai konversi dalam perhitungan *life cycle assessment*. Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan metode *life cycle assessment* untuk mencari EPBT dan kontaminasi emisi yang dapat dihindari.

Bab keempat berisi tentang analisis dari hasil pengolahan data. Pada bab ini dilakukan analisis dan evaluasi PLTS serta pengaruhnya terhadap lingkungan. Pembahasan berikutnya mengenai analisis hasil dari beberapa skenario untuk melihat perbedaan pengaruh yang dihasilkan terhadap lingkungan.

Bab kelima yang merupakan bagian terakhir merupakan kesimpulan dan saran yang dihasilkan dari keseluruhan penelitian ini. Kesimpulan yang diambil akan meliputi keseluruhan hasil pengolahan data dan menjawab dari tujuan penelitian. Saran berisikan saran aplikatif terkait hasil penelitian dan juga saran mengenai penelitian lanjutan.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab dua ini akan dijelaskan beberapa tinjauan pustaka yang berhubungan dengan penelitian yang akan digunakan dalam tugas akhir ini.

2.1. Fotovoltaik

Fotovoltaik adalah sebuah piranti yang dapat mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik. Konversi langsung radiasi matahari menjadi energi listrik adalah cara paling aman dalam pemanfaatan energi matahari. Keuntungan dari menggunakan efek fotovoltaik (*photovoltaic/PV*) untuk menghasilkan energi listrik adalah tidak memproduksi polutan selama operasi, tidak menimbulkan suara/hening, usia pakai dalam waktu lama dan pemeliharaan yang rendah. Selain itu, energi matahari berlimpah, bebas, bersih, dan tidak ada habisnya.

Sel Surya tersusun dari bermacam bahan semikonduktor yang akan mengonduksikan listrik ketika terkena panas atau cahaya. Sebagian solar sel terbuat dari silikon (Si) yang tersedia dalam jumlah yang banyak dan tidak menimbulkan kerusakan pada lingkungan. Sampai saat ini, solar sel yang ada memiliki efisiensi kurang lebih 17% - 31%.

Teknologi PV digunakan untuk menghasilkan energi listrik di daerah-daerah yang tidak dijangkau saluran transmisi. Di negara yang berkembang, teknologi PV meningkatkan kualitas hidup di daerah kota utamanya dalam hal kesehatan, pendidikan, dan pertanian. Dalam negara industri, teknologi sel surya telah digunakan dalam jumlah yang besar dan terintegrasi dengan grid.

Rangkaian sistem panel surya pada umumnya diletakkan pada posisi yang tetap dan diarahkan ke arah Selatan untuk mendapat sinar matahari secara optimum pada siang hari. Orientasi panel yang tetap harus dipilih secara tepat sehingga dapat menangkap energi maksimum dalam sepanjang musim atau tahun panel surya memiliki titik operasi optimum.

Berikut adalah unit – unit komponen pembentuk sistem sel surya yang terdiri dari empat komponen utama yaitu *polysilicone*, wafer surya, sel surya, dan modul surya.

2.1.1. Polysilicone

Silikon merupakan titik awal dari siklus produksi sel surya. Silikon berasal dari ekstraksi pasir silikon dioksida. Sebagai elemen kedua kerak bumi yang paling umum, silikon memiliki pasokan hampir tak terbatas. Silikon polikristalin atau *polysilicone* memiliki struktur kristal yang banyak satu sama lain selama proses solidifikasi.

Proses pembentukan *polysilicone* berasal dari purifikasi silikon metalurgi dengan tingkat kemurnian tinggi (*metal grade silicone*) yang juga berasal dari pasir silika. *Polysilicone* juga biasa digunakan pada perangkat semi konduktor lainnya seperti IC (*Integrated Circuit*).

2.1.2. Wafer Surya

Setelah itu, pada langkah produksi kedua, polysilikon yang sangat murni dilebur ke dalam cetakan balok dalam suhu 1.410 derajat Celcius kemudian mengeras. Blok ini selanjutnya dibentuk menjadi kolom persegi yang dipotong menjadi irisan tipis atau wafer dengan menggunakan teknologi pemotongan kawat. Setelah pembersihan dan pengujian akhir menyeluruh, terbentuk wafer polikristalin dan wafer monocrystalline sebagai dasar dalam produksi sel surya.

Selama proses produksi wafer monocrystalline, hanya kristal tunggal yang dikeluarkan dari massa silikon cair. Sedangkan Dalam produksi wafer polikristalin, massa silikon cair mengeras dan ribuan crystallines kecil yang dibentuk menjadi blok.

2.1.3. Sel Surya

Pada tahap produksi ketiga wafer diproses lebih lanjut dibentuk menjadi sel surya yang merupakan elemen dasar dari modul surya. Sel-sel surya telah memiliki semua atribut teknis yang diperlukan untuk menghasilkan listrik dari sinar matahari. Muatan positif dan negatif yang dilepaskan dalam sel melalui radiasi cahaya menyebabkan arus listrik (arus searah) mengalir.

Sel surya dihasilkan dengan mengubah *polysilicon* menjadi ingot silinder silikon *polycrystalline*, yang kemudian dibentuk dan diiris menjadi wafer tipis. Selanjutnya, pola bertekstur diberikan ke permukaan wafer untuk mengoptimalkan penyerapan dan pemantulan cahaya. Wafer ini kemudian

mengalami suhu tinggi dengan adanya fosfor oksiklorida untuk menciptakan sifat fisik yang diperlukan menghasilkan listrik. Berikutnya lapisan anti-reflektif silikon nitrida diterapkan pada permukaan atas sel untuk meminimalkan refleksi dan meningkatkan efisiensi penyerapan cahaya. Akhirnya, konduktor listrik logam dicetak ke permukaan layar wafer untuk memfasilitasi perpindahan listrik dari sel. Produksi sel surya berpusat di Jepang, Eropa dan Amerika Serikat, yang saat ini mencapai lebih dari 80% dari produksi global.

2.1.4. Modul Surya

Sel surya kemudian dirakit menjadi unit yang lebih besar yaitu modul surya. Modul-modul surya adalah produk akhir dari solar dan siap untuk menghasilkan tenaga. Sinar matahari diubah menjadi energi listrik di modul. Arus listrik searah langsung diproduksi dan diubah menjadi arus bolak-balik oleh inverter sehingga dapat dimasukkan ke dalam jaringan umum atau dapat digunakan secara langsung di rumah.

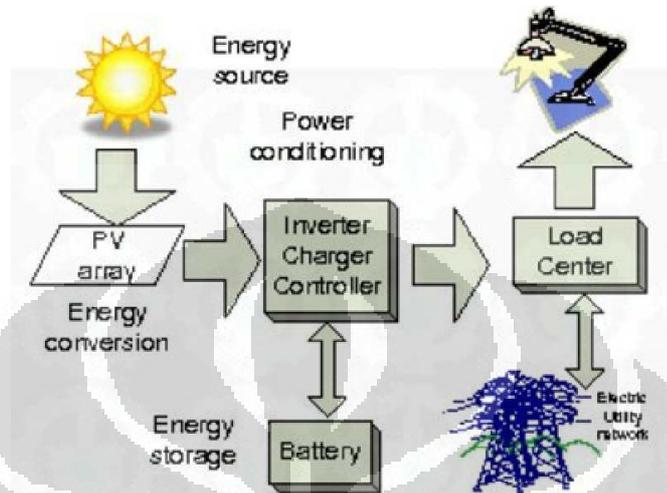
Sel-sel surya dirangkai menjadi sebuah modul surya dalam proses automasi penuh. Pertama sel surya tersebut disolder ke dalam rantai sel selama proses perakitan. Rangkaian tersebut terhubung dengan matriks berisian 60 sel.

Berikutnya, matriks ini diintegrasikan ke dalam urutan lapisan terbuat dari kaca surya dan tiga film yang dilaminasi menjadi satu kesatuan yang cuaca-bukti dan kedap air dan udara dalam oven vakum pada 160 derajat Celcius. Selanjutnya modul ditempatkan dalam bingkai aluminium yang stabil.

2.2. Komponen Sistem Sel Surya

Beberapa komponen lain dibutuhkan untuk melakukan kontrol, perubahan (*convert*), distribusi, dan menyimpan energi yang dihasilkan oleh array sehingga dapat bekerja secara efisien. Beberapa komponen dapat berbeda bergantung pada operasional dan fungsional yang menjadi kebutuhan sistem. Komponen yang dibutuhkan dapat berupa *battery bank*, *controller*, *dc-ac inverter*, beberapa peralatan lainnya mungkin dapat ditambahkan antara lain seperti pengaman arus berlebih (*overcurrent*), *surge protection*, dan peralatan lainnya. Gambar 2.1 menunjukkan diagram dasar dari sistem PV dan hubungannya dengan setiap komponen.

Sistem sel surya dapat diklasifikasikan menjadi dua : sistem sel surya terhubung dengan grid (*utility grid-connected PV system*) dan stand alone PV system.



Gambar 2.1 Komponen Utama sistem sel surya

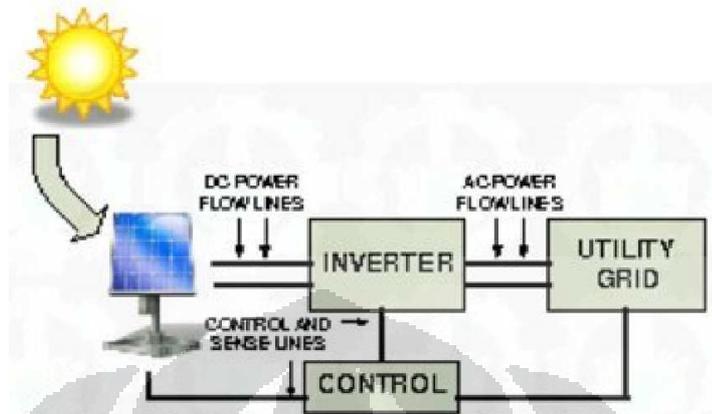
(Sumber : Christian, Aron, 2011)

2.2.1. Sistem Sel Surya Terhubung Grid (*Grid connected PV System*)

Sistem sel surya terhubung dengan grid dirancang untuk bekerja secara paralel dengan *electric utility grid*. Terdapat dua tipe pada umumnya dari sistem kelistrikan untuk sistem sel surya : sistem yang berhubungan dengan grid dan tidak memiliki kemampuan pendukung batere dan sistem yang berhubungan dan memiliki pendukung batere. Pada sistem dengan menggunakan pendukung penyimpan energi dalam bentuk batere digunakan untuk menanggung beban penting selama jaringan tidak mampu menanggungnya. Ketika kegagalan terjadi, unit terpisah dari jaringan dan menyuplai beberapa beban. Jika kegagalan terjadi pada siang hari, PV array dapat menanggung beban. Komponen utama di kedua sistem adalah DC-AC inverter atau juga disebut *power conditioning system* (PCS). Gambar 2.2 menunjukkan blok diagram pada hubungan ini.

Inverter digunakan untuk mengubah energi DC dari sel surya menjadi energi AC. Inverter adalah kunci kesuksesan sistem mampu bekerja tetap juga merupakan peralatan yang paling kompleks. Syarat paling penting dari karakteristik inverter adalah : dapat bekerja pada variasi tegangan dan arus yang

lebar, mengatur tegangan dan frekuensi output selain itu dapat menyediakan daya AC dengan kualitas daya yang baik.



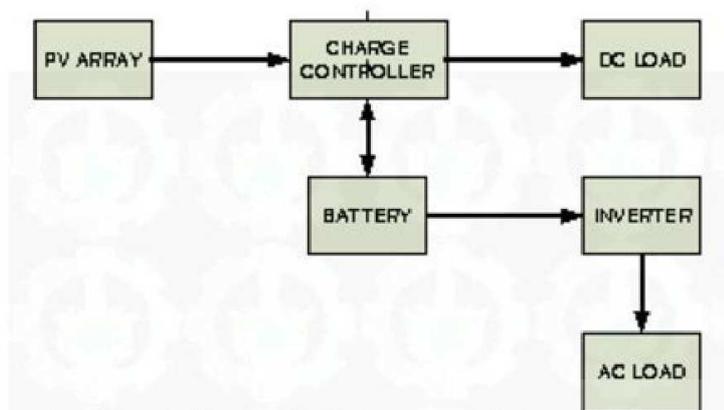
Gambar 2.2 Diagram sistem PV terhubung Grid

(Sumber : Christian, Aron. 2011)

Selama 20 tahun terakhir, peneliti telah bekerja untuk mengembangkan topologi inverter yang berbeda untuk memenuhi kebutuhan yang ada. Evolusi dan peralatan *solid state* seperti MOSFET, IGBT, *microprocessor*, *integrated PWM circuit* telah meningkatkan kinerja inverter.

2.2.2. Sistem Sel Surya *Stand-alone*

Sistem sel surya *Stand-alone* digunakan sebagai pengganti sumber energi listrik. Sistem ini pada umumnya memiliki *solar charging* module, storage battery, dan *control/regulator* seperti ditunjukkan Gambar 2.3. Sistem sel surya diletakkan pada atap ataupun di atas tanah dan jika diinginkan daya 120/40 volt AC sebuah DC-AC inverter juga akan dibutuhkan. Sistem ini biasanya digunakan utamanya pada daerah yang terpencil yang tidak terhubung dengan jaringan listrik utama. Pada sebagian besar sistem sel surya *stand-alone* digunakan baterai sebagai media penyimpan energi. Sebuah *charge controller* kemudian digunakan untuk mengatur keseluruhan sistem dan mencegah baterai dari pengisian berlebih (*overcharging*) dan pemakaian berlebih (*overdischarging*). Modul sel surya mengisi baterai sepanjang hari dan menyuplai daya pada beban saat dibutuhkan.



Gambar 2.3 Diagram sistem sel surya *stand-alone* dengan baterai

(Sumber : Christian, Aron, 2011)

2.2.3. Inverter

Inverter adalah sebuah konverter yang mampu mengubah tegangan input DC menjadi tegangan output AC dengan besar magnitude frekuensi dan fasa yang dapat diatur sesuai dengan yang diinginkan. Tegangan outputnya dapat diatur dengan mengatur tegangan input DC atau dengan mengubah switching dari inverter. Bentuk gelombang tegangan output inverter ideal adalah sinus. Tetapi kenyataannya bentuk gelombang tegangan output inverter tidaklah sinus dan mengandung harmonisa tertentu. Untuk simetri ataupun tidak simetri masih dapat digunakan gelombang sinus dengan sedikit distorsi. Dengan kemampuan piranti semikonduktor daya kecepatan tinggi yang tersedia, kandungan harmonisa dalam bentuk gelombang output bisa dikurangi dengan teknik penyakelaran (*switching*).

Inverter pada umumnya dibedakan menjadi dua macam berdasarkan tipe dari bentuk gelombang AC pada output yaitu :

1. *Voltage-source inverter* (VSI) dimana AC output yang tidak perlu dikontrol adalah bentuk gelombang tegangannya.
2. *Current-source inverter* (CSI), dimana AC output yang tidak perlu dikontrol adalah bentuk gelombang arusnya.

2.2.4. Baterai

Baterai digunakan untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan solar array. Sistem penyimpanan baterai menyediakan sumber independen dari daya.

Hal ini penting bagi sistem off-grid berjalan di mana penyimpanan baterai memegang semua energi yang dihasilkan oleh sistem sel surya.

Pembangkit Listrik Tenaga Surya tidak secara otomatis menyediakan pasokan listrik, jika grid turun maka akan kehilangan pasokan sepenuhnya. Selain itu daya yang digunakan PLTS adalah *real time* dimana jika terdapat kelebihan daya yang dihasilkan akan hilang seluruhnya. Namun, opsi penyimpanan baterai dapat digunakan agar catu daya tak terputus. Sebuah pilihan baterai cadangan akan memberikan daya cukup untuk menjalankan lemari es / freezer / lampu dan TV selama sehari, tergantung insolasi matahari saat itu.

Baterai yang umumnya digunakan pada sistem sel surya berjenis asam plumbun (*lead acid*) dengan berbentuk gel. Baterai gel tidak memerlukan pemeliharaan selama generator cadangan terhubung untuk menjaga tingkat tinggi ketika baterai surya tidak menjaga pasokan ini.

2.3. Life Cycle Assessment

LCA merupakan suatu metode analisis aspek lingkungan dan kemungkinan dampak lingkungan yang dihasilkan dan berhubungan dengan sebuah produk, proses atau jasa.

2.3.1. Karakteristik Umum dari LCA

Pada bagian ini akan dibahas mengenai definisi LCA, aplikasi dari LCA serta batasan-batasannya.

2.3.1.1 Definisi LCA

ISO 14040 mendefinisikan LCA sebagai kumpulan dan evaluasi dari *input* dan *output* serta potensi dampak lingkungan dari siklus hidup sebuah sistem 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, entah dengan digunakan kembali, didaur ulang atau dibuang (berlaku dari *cradle to grave*). Keseluruhan sistem dari unit yang di proses yang termasuk

di dalam siklus hidup sebuah produk disebut sistem produk, dimana produk dapat berupa barang fisik atau jasa.

Efek lingkungan mencakup berbagai jenis dari dampak bagi lingkungan, termasuk ekstraksi dari berbagai jenis sumber daya, emisi bahan berbahaya dan penggunaan lahan dengan tipe yang berbeda. LCA harus diusahakan untuk memiliki nilai kuantitatif, sehingga semua dampak lingkungan yang dihasilkan dapat dilaporkan selengkap mungkin.

Analisis *cradle to grave* menggunakan sebuah pendekatan holistik (analisis secara keseluruhan) dimana analisis ini akan mendeteksi dampak-dampak yang telah terjadi atau akan terjadi dimana pun dan kapan pun. Selain itu, dengan analisis *cradle to grave* ini, akan menghindari terjadinya *problem shifting*. Di dalam *eco-design* memindahkan masalah ke tahap lain dalam siklus hidup produk bukanlah merupakan solusi dari suatu masalah lingkungan.

- Menganalisis sumber masalah yang berkaitan dengan produk tertentu
- Membandingkan rencana perbaikan dari sebuah produk
- Merancang produk baru
- Memilih produk terbaik di antara beberapa produk setara

Aplikasi yang sama dapat digunakan dalam level yang berkaitan dengan kebijakan pemerintah dan strategi bisnis.

2.3.1.2 Batasan LCA

Karakteristik utama dari LCA adalah sifat analisis secara keseluruhannya yang menjadi kekuatan utama dan juga pada waktu yang bersamaan, merupakan keterbatasannya. Jangkauannya yang luas dalam melaksanakan LCA yang lengkap dari sebuah produk hanya dapat dicapai dengan menyederhanakan aspek – aspek lainnya.

LCA tidak dapat mengukur suatu dampak lokal. LCA tidak menyediakan kerangka untuk sebuah studi penilaian resiko lokal yang mengidentifikasi dampak mana yang dihasilkan oleh fungsi dari sebuah fasilitas di tempat yang spesifik. Begitu pula dengan aspek waktu, LCA secara khas merupakan keadaan yang tetap, dan bukan sebuah pendekatan dinamis, maksudnya untuk studi selama

batasan waktu, semua kondisi termasuk teknologi dianggap tetap dan tidak berkembang.

Model LCA befokus pada karakteristisik fisik dari aktivitas industri dan proses ekonomi lainnya, dan tidak termasuk mekanisme pasar, atau efek lain dalam pengembangan teknologi. Secara umum, LCA menganggap semua proses bersifat linear baik dalam ekonomi dan dalam lingkungan. LCA merupakan sebuah alat bantu berdasarkan pemodelan linear.

LCA berfokus pada aspek lingkungan dari produk dan tidak berkaitan dengan karakteristik ekonomi, sosial, dan lainnya. Dampak lingkungan sering didefinisikan sebagai dampak yang potensial, karena dampak lingkungan tidak ditetapkan dalam waktu dan tempat dan berkaitan dengan satuan fungsional yang telah didefinisikan.

Meskipun LCA bertujuan untuk menjadi dasar yang bersifat ilmu pengetahuan, LCA tetap menggunakan beberapa asumsi yang bersifat teknis dan terpilih. Proses standarisasi ISO dalam melaksanakan LCA ini dilakukan untuk mencegah terjadinya kesewenangan. Tujuan penting adalah untuk menggunakan asumsi dan pilihan ini setransparan mungkin.

Yang terakhir, sebuah karakteristik yang sangat penting dan berkaitan dengan sifat dasar dari LCA sebagai sebuah alat analitis. LCA membantu menyediakan informasi untuk mendukung keputusan namun LCA tidak dapat menggantikan proses pengambilan keputusan itu sendiri.

2.3.2. Metodologi

Metodologi dalam LCA terdiri dari empat fase utama :

- Pendefinisian tujuan dan ruang lingkup
- Analisis Inventory
- Pengukuran Dampak
- Interpretasi

2.3.2.1 Pendefinisian Tujuan dan Ruang Lingkup

Pendefinisian tujuan dan ruang lingkup merupakan suatu fase untuk menentukan sebuah rencana kerja dari sebuah keseluruhan LCA. Fase ini terdiri atas tiga tahap :

- Tahap pendefinisian tujuan
- Tahap pendefinisian lingkup, pendefinisian fungsi
- Tahap pendefinisian fungsi, unit fungsional, alternatif, aliran referensi

Tahap pendefinisian tujuan terdiri atas penancangan dan penyesuaian tujuan dari studi LCA, penjelasan tujuan dari studi dan penentuan penggunaan hasil oleh inisiator, paktisi, pemegang saham seta penentuan target dari hasil studi.

Pada tahap pendefinisian lingkup, ditetapkan karakteistik utama dari studi LCA yang mencakup masalah seperti batasan temporal, geogafis, dan teknologi, jenis dari analisis dan level keseluruhan dari kecanggihan dari studi ini.

Tahap terakhir dalam fase ini adalah pendefinisian fungsi, unit fungsional, altenatif dan aliran referensi. Unit fungsional mendeskripsikan fungsi utama dari sebuah sistem produk. Contoh sebuah fungsi adalah pengecatan dinding. Contoh dari unit fungsional untuk sebuah pengecatan dinding dapat didefinsikan dalam bentuk :

- Luas area yang aus dicat
- Tipe dari dinding
- Kualitas hasil cat

Dalam dunia nyata, unit fungsional dari sebuah pengecatan dinding dapat beupa “pengecatan dinding seluas 20m²” dengan ketahanan termal sebesar 2m² K/W, dengan kualitas warna permukaan 98% dan tidak membutuhkan pengecatan untuk lima tahun ke depan.

Dengan mendasar dari unit fungsional tersebut, dapat disusun bebeapa altenatif dari sistem poduk yang ekuivalen. Altenatif ini dapat berupa berbagai pilihan cara atau bahan yuang digunakan untuk dapat memenuhi fungsi dan unit fungsional yang telah ditetapkan. Setelah disusun alternatif, kemudian disusun aliran referensi untuk sistem sistem ini. Alian referensi merupakan sebuah ukuran dari output yang dihasilkan oleh proses dalam setiap altenatif sistem produk, yang dibutuhkan untuk memenuhi fungsi yang ditunjukkan oleh unit fungsional.

2.3.2.2 Analisis Inventori

Analisis Inventori meupakan fase dimana sistem podruk didefinisikan. Fase ini terdiri atas bebeapa tahap :

- Pendefinisian batasan sistem ekonomi dan lingkungan
- Pendefinisian diagram aliran
- Penentuan format dan kategori data
- Pengumpulan data
- Validasi data
- Peniadaan dan estimasi data
- Pengambilan keputusan berkaitan dengan *multifunctionality* dan alokasi
- Perhitungan

Dalam LCA, semua masukan dan keluaran ekonomi pada semua aliran diterjemahkan menjadi intervensi lingkungan. Intervensi lingkungan berhubungan dengan aliran yang memasuki sistem produk yang terlihat dari lingkungan tanpa transformasi manusia atau aliran material yang meninggalkan sistem produk yang dibuang ke lingkungan tanpa transformasi manusia. Untuk membuat batasan yang jelas mengenai sistem produk dan lingkungan dan antara aliran utama dan aliran lainnya, batasan ekonomi dan lingkungan harus didefinisikan secara eksplisit.

Kegiatan pendefinisian diagram aliran menggambarkan garis besar dari semua proses unit utama yang dimodelkan termasuk hubungannya. Hal ini sangat membantu dalam memahami dan menyelesaikan sebuah sistem untuk mendeskripsikan sistem dengan menggunakan diagram aliran proses.

Kunci utama dalam fase inventori adalah pengumpulan data. Hal ini biasanya berkaitan dengan jumlah data sekunder. Untuk menerjemahkan perbandingan ini secara konsisten, sebuah format data standar harus dikembangkan. Pengumpulan data sesuai dengan format yang sudah ditentukan, dilakukan untuk mengkuantifikasikan semua aliran yang berkaitan dengan proses. Proses ini dilanjutkan dengan pengecekan validitas dari data yang telah dikumpulkan. Berbagai alat bantu seperti keseimbangan masa, keseimbangan energi dan perbandingan data dari sumber lain dapat digunakan.

Pada prinsipnya, sebuah LCA harus menelusuri semua proses yang berkaitan dalam siklus hidup pada sistem produk yang diberikan, dari *cradle to grave*. Namun pada praktiknya, hal ini nampaknya tidak mungkin bagaimana pun juga, biasanya beberapa aliran ditiadakan dan diabaikan karena ukuran tersedianya data yang siap diakses.

Pada umumnya, proses produksi bersifat *multifunctional*, dimana output yang dihasilkan secara umum terdiri dari lebih dari satu produk dan ada kemungkinan salah satu input bahan baku yang terdiri atas produk buangan. Oleh karena itu dibutuhkan suatu keputusan untuk menentukan aliran ekonomi dan intervensi lingkungan mana yang akan dihubungkan dengan sistem produk.

Pada tahap terakhir dilakukan proses perhitungan sebagai sebuah tindakan yang secara kuantitatif menghubungkan proses satu sama lain.

2.3.2.3 Pengukuran Dampak

Pada fase pengukuran dampak, hasil dari Analisis Inventori diproses dan diinterpretasikan dalam rangka dampak lingkungan. Pada fase ini terdiri atas tujuh tahap sebagai berikut :

- Pemilihan kategori dampak
- Pemilihan metode karakteristik: indikator kategori, model karakterisasi, dan faktor karakterisasi
- Klasifikasi
- Karakterisasi
- Normalisasi
- Pengelompokkan
- Pembobotan

Pada fase pengukuran dampak, hasil dari analisis inventori diterjemahkan pada kontribusi bagi kategori dampak yang relevan seperti penipisan sumber daya abiotik, perubahan iklim, pengasaman, dan seterusnya. Ada tiga kelompok kategori dampak yang berbeda yang dapat dipilih berdasarkan kepentingan atas lingkungan dalam hubungannya dengan LCA dan ketersediaan metode karakterisasi. Pada kelompok pertama, kategori dampak dasar/ *baseline impact categories*, terdiri atas 11 (sebelas) dampak :

- Penipisan sumber daya alam
- Dampak dari penggunaan lahan (persaingan lahan)
- Perubahan iklim/ *Climate Change*
- Penipisan lapisan ozon stratosfer/ *Stratospheric Ozone Depletion*
- Dampak bahan beracun pada manusia/ *Human Toxicity*
- Dampak bahan beracun pada ekosistem / *Ecotoxicity*

Terdiri atas tiga dampak, yaitu dampak bahan beracun pada ekosistem air tawar/ *freshwater aquatic ecotoxicity*, dampak bahan beracun pada ekosistem air laut / *marine aquatic ecotoxicity*, dampak bahan beracun pada terestrial / *terrestrial ecotoxicity*.

- Pembentukan *photo-oxidant*
- Pengasaman / *Acidification*
- *Eutrophication*

Pada kelompok kedua, kategori dampak yang spesifik sesuai pembelajaran/ *study specific impact categories*, terdiri atas 9 dampak, yaitu

- Dampak dari penggunaan lahan (kerugian atas fungsi pendukung kehidupan, kerugian keanekaragaman hewan dan tumbuhan)
- Dampak bahan beracun pada ekosistem / *Ecotoxicity*.

Terdiri atas dua bagian; dampak bahan beracun pada endapan di ekosistem air tawar dan air laut

- Dampak dari radiasi ion
- Bau (*Maladourous air*)
- Kebisingan
- Pemborosan energi panas
- Hubungan sebab akibat

Pada kelompok ketiga, kelompok kategori lainnya, terdiri atas tiga dampak dan dapat ditambahkan sesuai kebutuhan:

- Penipisan sumber daya abiotik
- Pengawetan melalui proses pengeringan
- Bau (*Maladourous air*)

Intervensi yang dicatat pada hasil analisis inventori dikuantifikasikan dalam indikator umum. Untuk sebuah kategori dampak, sebuah metode karakteristik terdiri atas sebuah indikator kategori, model karakterisasi, dan faktor karakterisasi.

Berikut adalah metode karakterisasi dasar yang dikembangkan oleh Guinee et al. (2001) yang digunakan pada semua kategori pada *baseline impact categories* adalah sebagai berikut :

- Penipisan sumber daya abiotik / *Depletion of Abiotic Resources*

Sumber daya abiotik adalah sumber daya alam (termasuk sumber daya energi) seperti bijih besi, minyak mentah, dan energi angin yang tergolong tidak hidup. Penipisan sumber daya abiotik merupakan salah satu dari kategori dampak yang paling sering didiskusikan dan tersedia banyak variasi metode yang dapat digunakan untuk mengkarakteristikan kontribusi pada kategori ini.

Tabel 2.1 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Penipisan Sumber Daya Abiotik

Kategori Dampak :	Penipisan Sumber Daya Abiotik
Hasil LCI :	Ekstraksi mineral dan minyak bumi (dalam kg)
Model Karakterisasi :	<i>Concentration-based reserves</i> dan pendekatan <i>rate of de-accumulation</i>
Indikator Kategori :	Penipisan dari cadangan terakhir berkaitan dengan penggunaan tahunan
Faktor Karakterisasi :	<i>Abiotic Depletion Potential</i> (ADP) untuk setiap ekstraksi dari mineral dan bahan bakar fosil (dalam kg antimony eq/kg ekstraksi)
Satuan dari hasil Indikator:	Kg (antimony eq)

(sumber : Guinee et al., 2001)

- Dampak dari penggunaan lahan (persaingan lahan)/ *Impacts of land use (land competition)*

Kategori ini berhubungan dengan bekurangny lahan sebagai sumber daya alam, sehingga untuk sementara waktu tidak dapat digunakan.

Tabel 2.2 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Persaingan Lahan

Kategori Dampak :	Persaingan Lahan
Hasil LCI :	Penggunaan lahan (dalam m ² per tahun)
Model Karakterisasi :	Pengumpulan tanpa pembobotan/ <i>Unweighted aggregation</i>
Indikator Kategori :	Penggunaan lahan
Faktor Karakterisasi :	1 (tanpa dimensi)
Satuan dari hasil Indikator:	m ² per tahun

(sumber : Guinee et al., 2001)

- Perubahan iklim / *Climate Change*

Perubahan iklim didefinisikan sebagai dampak dari emisi manusia pada *radiative forcing* (contoh : penyerapan radiasi panas) pada atmosfer. Kebanyakan dari emisi ini meningkatkan *radiative forcing* dan meningkatkan suhu permukaan bumi. Hal ini dikenal sebagai efek gas rumah kaca.

Tabel 2.3 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Perubahan Iklim

Kategori Dampak :	Perubahan Iklim
Hasil LCI :	Emisi gas rumah kaca ke udara (dalam kg)
Model Karakterisasi :	Model yang dikembangkan oleh <i>Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)</i> yang mendefinisikan potensi pemanasan global dari gas rumah kaca yang berbeda
Indikator Kategori :	<i>Infrared Radiative Forcing (W/m²)</i>
Faktor Karakterisasi :	Potensi pemanasan global untuk jangka waktu 100 tahun mendatang (GWP100) untuk setiap emisi gas rumah kaca ke udara (dalam kg CO ₂ eq/kg emisi)
Satuan dari hasil Indikator:	Kg (CO ₂ eq)

(sumber : Guinee et al., 2001)

- Penipisan lapisan ozon stratosfer/ *Stratospheric Ozone Depletion*

Penipisan lapisan ozon stratosfer ini berkaitan pada penipisan lapisan ozon stratosfer sebagai hasil dari emisi yang disebabkan oleh manusia/*anthropogenic*. Hal ini menyebabkan semakin besarnya fraksi dari radiasi solar UV-B yang mencapai permukaan bumi, dan hal ini berpotensi pada dampak buruk pada kesehatan manusia, kesehatan hewan, ekosistem terestrial, ekosistem akuatik, siklus biokimia, dan material.

Tabel 2.4 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Penipisan Lapisan Ozon Stratosfer

Kategori Dampak :	Penipisan Lapisan Ozon Stratosfer
Hasil LCI :	Emisi gas yang berdampak pada penipisan ozon ke udara
Model Karakterisasi :	Model yang dikembangkan oleh <i>World Meteorological Organization (WMO)</i> , yang mendefinisikan potensi penipisan ozon dari beberapa gas berbeda
Indikator Kategori :	Perusakan lapisan ozon
Faktor Karakterisasi :	Potensi penipisan ozon di keadaan tetap (<i>ODP steady state</i>) untuk setiap emisi ke udara (dalam kg CFC-11 eq/kg emisi)
Satuan dari hasil Indikator:	Kg (CFC-11 eq)

(sumber : Guinee et al., 2001)

- Dampak bahan beracun pada manusia/ *Human Toxicity*

Kategori dampak ini berkaitan dengan dampak pada kesehatan manusia dari bahan-bahan berbahaya yang ada pada lingkungan.

Tabel 2.5 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Bahan Beracun pada manusia

Kategori Dampak :	Dampak Bahan Beracun pada Manusia
Hasil LCI :	Emisi bahan berbahaya ke udara, air, dan tanah (dalam kg)
Model Karakterisasi :	USES 2.0 model yang dikembangkan pada RVIM, yang mendeskripsikan <i>fate</i> , <i>exposure</i> , dan efek dari zat berbahaya yang diadaptasikan untuk LCA
Indikator Kategori :	Penyerapan harian bahan beracun yang dapat diterima
Faktor Karakterisasi :	Potensi <i>Human Toxicity</i> (HTP) untuk setiap emisi dari bahan beracun ke udara, air, dan atau tanah (dalam kg 1,4- <i>dichlorobenzene eq</i> / kg emisi)
Satuan dari hasil Indikator:	Kg (1,4- <i>dichlorobenzene eq</i>)

(sumber : Guinee et al., 2001)

- Dampak bahan beracun pada ekosistem / *Ecotoxicity*

Kategori ini berhubungan dengan dampak dari bahan berbahaya pada ekosistem air tawar, air laut, dan terestrial. Area yang dilindungi adalah lingkungan dan sumber daya alam. Berikut adalah metode karakterisasi dasar untuk dampak bahan beracun pada ekosistem air tawar.

Tabel 2.6 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Bahan Beracun pada Ekosistem Air Tawar

Kategori Dampak :	Dampak Bahan Beracun pada ekosistem air tawar
Hasil LCI :	Emisi dari bahan beracun pada udara, air, dan tanah (kg)
Model Karakterisasi :	USES 2.0 model yang dikembangkan pada RVIM, yang mendeskripsikan <i>fate</i> , <i>exposure</i> , dan efek dari zat berbahaya yang diadaptasikan untuk LCA
Indikator Kategori :	Prediksi konsentrasi lingkungan / prediksi konsentrasi yang tidak berefek
Faktor Karakterisasi :	<i>Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential (FAETP)</i> untuk setiap emisi dai bahan beracun ke udara, air, dan tanah (dalam kg 1,4- <i>dichlorobenzene eq</i> / kg emisi)
Satuan dari hasil Indikator:	kg (1,4- <i>dichlorobenzene eq</i>)

(sumber : Guinee et al., 2001)

Tabel berikut menunjukkan metode karakterisasi dasar untuk dampak bahan beracun pada ekosistem air laut.

Tabel 2.7 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Bahan Beracun pada Ekosistem Air Laut

Kategori Dampak :	Dampak Bahan Beracun pada ekosistem air laut
Hasil LCI :	Emisi dari bahan beracun pada udara, air, dan tanah (kg)
Model Karakterisasi :	USES 2.0 model yang dikembangkan pada RVIM, yang mendeskripsikan <i>fate</i> , <i>exposure</i> , dan efek dari zat berbahaya yang diadaptasikan untuk LCA
Indikator Kategori :	Prediksi konsentrasi lingkungan / prediksi konsentrasi yang tidak berefek
Faktor Karakterisasi :	<i>Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential (FAETP)</i> untuk setiap emisi dai bahan beracun ke udara, air, dan tanah (dalam kg 1,4- <i>dichlorobenzene eq/ kg</i> emisi)
Satuan dari hasil Indikator:	Kg (1,4- <i>dichlorobenzene eq</i>)

(sumber : Guinee et al., 2001)

Tabel berikut menunjukkan metode karakterisasi dasar untuk dampak bahan beracun pada ekosistem terestrial.

Tabel 2.8 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Bahan Beracun pada Ekosistem Terestrial

Kategori Dampak :	Dampak Bahan Beracun pada ekosistem terestrial
Hasil LCI :	Emisi dari bahan beracun pada udara, air, dan tanah (kg)
Model Karakterisasi :	USES 2.0 model yang dikembangkan pada RVIM, yang mendeskripsikan <i>fate</i> , <i>exposure</i> , dan efek dari zat berbahaya yang diadaptasikan untuk LCA
Indikator Kategori :	Prediksi konsentrasi lingkungan / prediksi konsentrasi yang tidak berefek
Faktor Karakterisasi :	<i>Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential (FAETP)</i> untuk setiap emisi dai bahan beracun ke udara, air, dan tanah (dalam kg 1,4- <i>dichlorobenzene eq</i> / kg emisi)
Satuan dari hasil Indikator:	Kg (1,4- <i>dichlorobenzene eq</i>)

(sumber : Guinee et al., 2001)

- Pembentukan *Photo-Oxidant*

Pembentukan *photo-oxidant* adalah pembentukan dari senyawa kimia reaktif (seperti ozon) akibat sinar matahari, dengan sumber utama yaitu polusi udara primer tertentu. Senyawa reaktif ini dapat melukai manusia dan ekosistem dan dapat membahayakan tanaman pangan. *Photo-oxidant* dapat terbentuk pada lapisan troposfer dalam pengaruh sinar ultraviolet melalui proses oksidasi *photochemical* dari *Volatile Organic Compounds* (VOCs) dan karbon monoksida (CO) dengan adanya nitrogen oksida (NO_x)

Tabel 2.9 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Pembentukan *Photo-Oxidant*

Kategori Dampak :	Pembentukan <i>Photo-Oxidant</i>
Hasil LCI :	Emisi dari zat (VOC,CO) ke udara (dalam kg)
Model Karakterisasi :	Model UNECE <i>Trajectory</i>
Indikator Kategori :	Pembentukan lapisan ozon troposfer
Faktor Karakterisasi :	<i>Photochemical Ozone Creation Potential (POCP)</i> untuk setiap emisi dari VOC atau CO ke udara (dalam kg <i>ethylene eq./kg</i> emisi)
Satuan dari hasil Indikator:	Kg (<i>ethylene eq</i>)

(sumber : Guinee et al., 2001)

- Pengasaman / *Acidification*

Polusi yang bersifat mengasamkan memiliki banyak dampak pada tanah, air bawah tanah, air di permukaan tanah, organisme biologi, ekosistem, dan material. Polusi yang bersifat mengasamkan yang paling utama adalah SO_2 , NO_x , dan NH_x .

Tabel 2.10 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Pengasaman

Kategori Dampak :	Pengasaman
Hasil LCI :	Emisi dari polusi yang mengasamkan ke udara (dalam kg)
Model Karakterisasi :	<i>RAINS10</i> model yang dikembangkan pada HASA yang mendeskripsikan <i>fate, deposition</i> dari zat yang bersifat mengasamkan yang diadaptasikan untuk LCA
Indikator Kategori :	Beban kritis pengasaman
Faktor Karakterisasi :	<i>Acidification Potential (AP)</i> untuk setiap emisi yang bersifat mengasamkan ke udara (dalam kg SO_4 eq./kg emisi)
Satuan dari hasil Indikator:	Kg (SO_4 eq.)

(sumber : Guinee et al., 2001)

- *Eutrophication*

Eutrophication mencakup semua dampak yang potensial pada tingkat nutrisi makro lingkungan yang berlebihan, seperti Nitrogen (N) dan Fosforus (P). Jumlah nutrisi yang berlebihan dapat menyebabkan pertukaran komposisi spesies yang tidak diinginkan dan peningkatan produksi biomass pada ekosistem air dan terestrial. Konsentrasi nutrisi yang tinggi dapat menyebabkan air di permukaan tidak dapat digunakan sebagai sumber air minum. Pada ekosistem air, peningkatan produksi biomassa dapat berakibat pada tingkat oksigen yang rendah, karena adanya tambahan konsumsi oksigen dalam dekomposisi biomassa (yang diukur sebagai BOD, *biological oxygen demand*).

Tabel 2.11 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak *Eutrophication*

Kategori Dampak :	<i>Eutrophication</i>
Hasil LCI :	Emisi dari bahan gizi ke udara, air, dan tanah (dalam kg)
Model Karakterisasi :	Prosedur stokiometri yang mengidentifikasi keseimbangan antara N dan P untuk sistem terestrial dan akuatik
Indikator Kategori :	Endapan keseimbangan N/P dalam biomassa
Faktor Karakterisasi :	<i>Eutrophication Potential (EP)</i> untuk setiap <i>eutrophyng emission</i> ke udara, air, dan tanah (dalam kg PO ₄ ³⁻ eq./kg emisi)
Satuan dari hasil Indikator:	Kg (PO ₄ ³⁻ eq.)

(sumber : Guinee et al., 2001)

Pada tahap klasifikasi, hasil analisis inventori diklasifikasikan pada kategori dampak yang sesuai. Pada tahap karakterisasi, dilakukan perhitungan antara setiap hasil inventori dengan faktor karakterisasi yang sesuai pada kategori tersebut dan kemudian perhitungan diolah untuk menghasilkan sebuah skor: hasil indikator. Sebuah kumpulan yang lengkap dari hasil kategori indikator menghasilkan sebuah profil lingkungan.

ISO14042 mendefinisikan normalisasi sebagai perhitungan dari besarnya hasil indikator relatif terhadap informasi referensi. Tujuan utama dari menormalkan

hasil kategori indikator adalah untuk pemahaman yang lebih baik mengenai kepentingan relatif dan besarnya hasil kepentingan terhadap setiap sistem produk dalam studi ini.

Dua tahap terakhir dalam fase ini, yaitu tahap pengelompokkan dan pembobotan merupakan tahap yang optimal. Tahap pengelompokkan merupakan sebuah tahap yang menyatukan kategori dampak menjadi satu atau lebih kelompok, sedangkan tahap pembobotan menentukan faktor numerikal untuk setiap kategori dampak yang dinilai menurut kepentingan relatifnya.

- *Malodourous Air / Bau*

Bau menjadi masalah ketika konsentrasi diberikan zat yg berbau baik dialami sebagai tidak menyenangkan. Apakah bau dialami sebagai bau busuk akan tergantung pada individu tertentu terkena. Di atas tingkat emisi tertentu, bagaimanapun, setiap individu akan mengalami seperti itu. Di sini, bau jangka akan digunakan untuk efek. Bidang perlindungan kesehatan manusia.

Tabel 2.12 Metode Karakterisasi Dasar untuk Dampak Bau/*Malodourous Air*

Kategori Dampak :	<i>Malodourous Air / Bau</i>
Hasil LCI :	Emisi dari substansi berbau ke udara (dalam kg)
Model Karakterisasi :	Resiprokal nilai ambang bau ke dalam udara
Indikator Kategori :	Volume udara yang masuk ke dalam nilai ambang bau.
Faktor Karakterisasi :	Resiprokal dari nilai ambang bau (1/OTV, dalam m ³ /kg)
Satuan dari hasil Indikator:	m ³ (udara)

(sumber : Guinee et al., 2001)

2.3.2.4 Interpretasi

Elemen utama dari fase ini adalah evaluasi hasil dan formulasi dari kesimpulan dan rekomendasi dari studi ini. Fase ini terdiri dari beberapa tahap:

- Pengecekan mengenai konsistensi dengan tujuan untuk menentukan apakah asumsi, metode, model dan data konsisten terhadap tujuan dan lingkup studi mengenai siklus hidup produk dan opsi lainnya.

- Pengecekan mengenai kelengkapan dengan tujuan untuk memastikan semua informasi yang relevan dan data yang dibutuhkan untuk fase interpretasi sudah tersedia lengkap.
- Analisis kontribusi dimana terjadi perhitungan kontribusi keseluruhan pada hasil dari berbagai faktor. Analisis ini menjawab pertanyaan tentang kontribusi dari aliran lingkungan, proses, dan dampak yang spesifik terhadap nilai akhir.
- Analisis gangguan yang mempelajari efek dari perubahan kecil di dalam sistem dari hasil LCA.
- Analisis sensitivitas dan ketidakpastian

Elemen ini menilai pengaruh dari hasil variasi dalam data proses, pemilihan model, dan variabel lainnya. Penarikan kesimpulan dan rekomendasi dilakukan berdasarkan hasil

2.4. NER dan EPBT

NER merupakan kepanjangan dari *Net Energy Ratio* sedangkan EPBT merupakan *Energy Pay Back Time*. Sergio Pacca melalui jurnalnya yang berjudul “*Parameters Affecting The Life Cycle Performance Of PV Technologies And Systems*” menjelaskan NER dan EPBT merupakan salah satu parameter yang memengaruhi performa siklus hidup sistem pembangkit listrik tenaga sel surya.

NER mempertimbangkan output dari siklus hidup energi (LCE_{out}) dan input siklus hidup energi primer (LCE_{in}). Dalam kaitannya dengan teknologi sel surya, hasil LCE_{in} dari sistem LCA tidak memperhitungkan radiasi surya yang berarti energi utama surya yang diubah menjadi energi listrik sebagai input dalam perhitungan energi. NER juga menunjukkan kapasitas sumber energi tersebut karena menghitung jumlah energi terbarukan yang diperoleh melalui konsumsi bahan bakar fosil, yang merupakan input energi terbesar dalam pembuatan sistem energi terbarukan. Sebaliknya, EPBT mengukur periode waktu yang dibutuhkan sistem pembangkit listrik untuk mengimbangi jumlah input energi primer dalam sistem. Persamaan (2.1) - (2.4) memperlihatkan hubungan antara NER dan EPBT.

$$NER = \frac{LCE_{out}}{LCE_{in}} \quad (2.1)$$

$$EPBT = \frac{LCE_{in}}{AEO} (=) years \quad (2.2)$$

dimana LCE_{out} adalah siklus hidup energi output dan LCE_{in} adalah siklus hidup energi input primer, dan AEO adalah output energi tahunan;

$$LCE_{out} = \frac{R \times A \times \theta \times (1 - (1 - \delta)^p) \times \eta_{t,l}}{\delta} \quad (2.3)$$

dimana R adalah radiasi surya per unit areal dan waktu (tahun), A adalah luas modul, θ adalah efisiensi konversi energi modul, δ adalah penurunan performa modul, p energi efisiensi konversi, yang tergantung pada teknologi yang digunakan, p adalah periode analisis dalam tahun, dan η adalah efisiensi inverter, yang merupakan fungsi dari faktor beban (*load factor*):

$$R = f(L, air, \lambda, d) \quad (2.4)$$

di mana L adalah lintang tempat pemasangan, *air* adalah massa udara, λ adalah sudut datang sinar matahari, dan d merupakan sebaran radiasi matahari. Estimasi nilai matahari rata-rata (R) radiasi tergantung pada model kompleks fungsi dari parameter pada persamaan (2.4).. NER dan EPBT dapat dicari dengan menggunakan persamaan ;

$$NER = \frac{R \times A \times \theta \times (1 - (1 - \delta_t)^p) \times \eta_{t,l}}{\delta_t \times LCE_{in}} \quad (2.5)$$

$$EPBT = \frac{\ln\left(1 - \frac{\delta_t \times LCE_{in}}{R \times A \times \theta \times \eta_{t,l}}\right)}{\ln(1 - \delta_t)} \quad (2.6)$$

Siklus hidup energi input primer (LCE_{in}) adalah jumlah dari energi yang dikonsumsi selama proses pembuatan modul sel surya, energi yang dikonsumsi pada produksi bahan yang digunakan dalam pembuatan modul sel surya, dan energi yang digunakan dalam pembuatan inverter dan atau baterai dan energi selama instalasi.

Tabel 2.13 EPBT dan ERF di beberapa lokasi PLTS berbeda

Negara	Radiasi Surya (kWh/m ²)	Produksi Listrik Tahunan (kWh)	EPBT (tahun)	ERF
Australia	1614	1319	3.728	7.5
Austria	1108	906	5.428	5.2
Belgia	946	788	6.241	4.5
Kanada	1377	1188	4.140	6.8
Republik Ceko	1000	818	6.012	4.7
Denmark	985	850	5.786	4.8
Finlandia	956	825	5.961	4.7
Prancis	1540	1317	3.734	7.5
Jerman	1143	960	5.123	5.5
Yunani	1563	1278	3.848	7.3
Hungaria	1198	988	4.978	5.6
Irlandia	948	811	6.046	4.6
Italia	1552	1315	3.740	7.5
Jepang	1168	955	5.150	5.4
Korea	1215	1002	4.908	5.7
Luxemburg	1035	862	5.705	4.9
Belanda	1045	886	5.551	5.0
Selandia Baru	1412	1175	4.185	6.7
Norwegia	967	870	5.653	5.0
Portugal	1682	1388	3.543	7.9
Spanyol	1754	1460	3.368	8.3
Swedia	980	869	5.718	4.9
Swiss	1117	922	5.334	5.2
Turki	1697	1400	3.513	8.0
Inggris	955	788	6.241	4.5
Amerika Serikat	1487	1249	3.937	7.1

(Sumber : Stoppato, 2006)

Tabel 2.13 memperlihatkan hasil EPBT di berbagai lokasi negara berbeda. ini diperkirakan cukup pendek dari masa pengoperasian panel bahkan dalam kondisi terburuk. Tabel 2.13 juga memberikan nilai dari faktor energi kembali (*Energi Return Factor/ERF*), yang didefinisikan sebagai rasio antara masa hidup panel yang diharapkan (28 tahun) dan EPBT. Rasio ini mewakili berapa kali sebuah PLTS dapat membayar kembali energi yang dibutuhkan untuk memproduksi listriknya. Nilai terbaik pada PLTS dapat menghasilkan 8 kali dari energi yang dibutuhkan.

BAB 3 PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

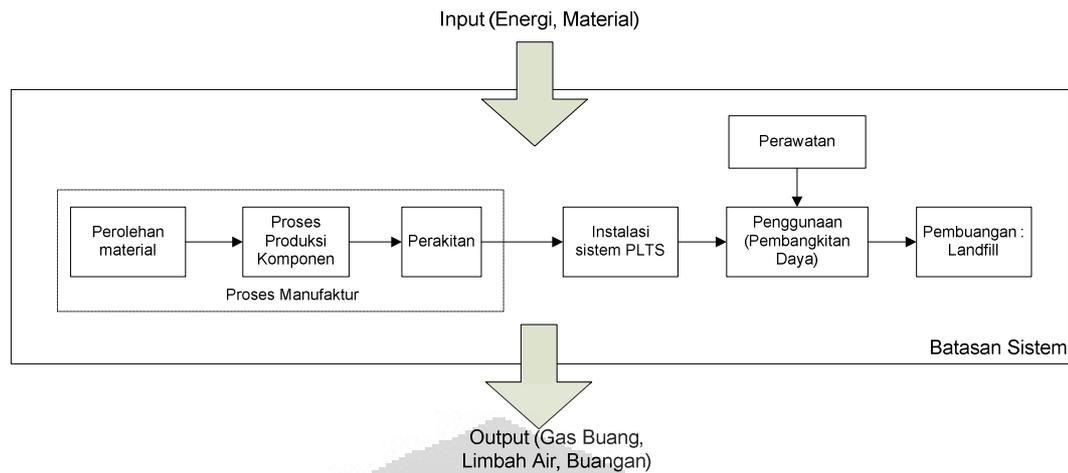
Pada bab tiga ini akan dijelaskan langkah pengumpulan dan pengolahan data yang berhubungan dengan penelitian yang akan digunakan dalam tugas akhir ini. Pada bagian pengumpulan data akan dipaparkan data-data utama untuk perhitungan serta data pelengkap untuk mendukung proses konversi. Pada bagian pengolahan data dibahas langkah-langkah pengolahan data serta hasil pengolahan data yang akan dibahas pada bab selanjutnya.

3.1. Pengumpulan Data

Tahap pengumpulan data merupakan fase kedua dalam metodologi *Life Cycle Assessment* dimana setiap komponen produk didefinisikan. Di dalam LCA, setiap aliran masuk dan aliran keluar dalam satu sistem produk diterjemahkan ke dalam indikator-indikator lingkungan. Fase ini disebut *Life Cycle Inventory* (LCI). Pengumpulan data dilakukan untuk setiap proses dalam rantai siklus hidup sel Surya yaitu proses produksi, instalasi sistem PLTS, dan pembuangan dari sistem PLTS. Data merupakan data sekunder yang dikumpulkan dari jurnal, hasil penelitian, serta buku yang berkaitan. Secara umum, berikut ini merupakan data yang akan dikumpulkan:

- Rencana Produksi listrik PLTS dari tahun 2013-2038.
- *Life Cycle Inventory* proses produksi sel surya (pembuatan *Poly Silicon, multiwafers*, Sel Surya, Modul Surya).
- *Life Cycle Inventory* instalasi sistem PLTS (Inverter, Kabel, Baterai)
- Data umum transportasi dari lokasi penambangan (Lampung) ke lokasi manufaktur (Bandung).

Pada unit proses produksi, dikumpulkan data umum input – output pada pembuatan pembuatan *Poly Silicon, multiwafers*, Sel Surya, perakitan modul surya. Pada LCI instalasi sistem PLTS dikumpulkan data input-output kebutuhan pembuatan inverter, kabel, dan baterai. Jenis sel surya yang digunakan pada sistem PLTS dan tugas akhir merupakan sel surya *polycrystalline* yang umum - digunakan di Indonesia.



Gambar 3.1 Batasan Studi LCA

3.1.1. Rencana Produksi Listrik PLTS

Berdasarkan data yang diperoleh dari Dirjen EBTKE (Energi Baru dan Terbarukan), peningkatan produksi listrik PLTS akan terus meningkat kedepannya. Hal ini diimbangi dengan penambahan kapasitas PLTS yang dicanangkan untuk mencapai target Bauran Energi Nasional pada tahun 2025. Berikut adalah data proyeksi produksi listrik PLTS dari tahun 2011-2050.

Tabel 3.1 Proyeksi Pasokan Produksi Listrik PLTS

Tahun	Pasokan Energi Primer Surya (Juta SBM)	Produksi Listrik PLTS (GWh)
2011	0.014	23.36
2012	0.021	35.04
2013	0.136	221.92
2014	1.43	2341.84
2015	3.71	6056.08
2020	14.82	24129.924
2025	29.64	48259.848
2030	44.46	72389.772
2040	103.74	168909.468
2050	133.38	217169.316

(sumber : EBTKE,2012)

3.1.2. Data Umum Proses Produksi Komponen PLTS

Sebuah studi pada *Environmental Impacts of PV Electricity Generation - A Critical Comparison of Energy Supply Options, 21th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, oleh E.A. Alsema, M.J. de Wild-Scholten, dan V.M. Fthenakis di Dresden, Jerman, pada tanggal 4-8 September 2006 mengkompilasi sebuah inventory dari input dan output yang relevan dari proses produksi komponen PLTS dengan sel surya berjenis *polychristalline*. Pada tabel input dan output, material dan energi dinormalisasikan untuk 1 unit modul sel surya. Data untuk komponen PTS disajikan sebagai berikut :

Polycrystalline silicon merupakan bahan dasar dari pembuatan sel surya yang berasal dari pasir silikon dengan kemurnian tinggi. Berikut adalah kompilasi material dan bahan untuk memproduksi *polycrystalline silicon*.

Tabel 3.2 Kebutuhan material pembuatan *Polycrystalline*

Produk	Unit	Nilai	Keterangan
Polycrystalline silicon	kg	1.00	Kemurnian tinggi sebagai bahan dasar sel surya
Materials			
MG-silicon	kg	1.13	metallurgical grade silicon
Kimia Anorganik	kg	2.00	NaOH, HCl and H ₂
Panas dari gas alam	MJ	185	Untuk proses panas

(Sumber : Alsema, 2006)

Wafer silikon untuk sel surya merupakan sebuah lempengan bujur sangkar pipih. Wafer silikon dibuat melalui proses pembuatan wafer silikon dengan memanfaatkan silikon berkadar kemurnian tinggi sebelumnya (*semiconductor grade silicon*). Berikut adalah kompilasi material dan bahan untuk memproduksi *Multi-wafers*.

Tabel 3.3 Kebutuhan material pembuatan *Multi Wafers*

Produk	Unit	Jumlah	Keterangan
multi-Si wafer	m ²	1.00	Luas :156x156 mm ² (0.0243 m ²), rata-rata ketebalan 240 um
Material			
Padat			
poly-Si	kg	1.30	Total Silikon yang dibutuhkan
silicon carbide (SiC),	kg	2.63	
Gas			
nitrogen (N ₂)	kg	0.05	
argon (Ar)	kg	0.30	
helium (He)	kg	1.362E-04	
Cairan			
polyethylene glycol (PEG), murni	kg	2.71	Untuk memotong
dipropylene glycol monomethyl ether (DPM)	kg	0.30	Pembersihan air
ethyl asetat (C ₄ H ₈ O ₂)	Kg	2.00E-03	
cyano (C N)	Kg	2.00E-03	
tenside (Sodium Sulfate concentrated)	Kg	0.24	Pembersihan air
Sodium hydroxide,	Kg	0.01	Pembersihan air
Asam Hydrochlorida	Kg	0.0027	Pembersihan air
Asam Asetat	Kg	0.039	Pembersihan air

(Sumber : Alsema, 2006)

Berikut adalah komponen material dan bahan untuk menyusun sel surya berjenis *polycrystalline*:

Tabel 3.4 Kebutuhan material pembuatan Sel Surya

Produk	Unit	Jumlah	Keterangan
multiSi sel (243 cm ²)	P	1.00	Luas sel 156 cm ² , typical thickness 270-300 um
Material			
PADAT			
multi/mono-Si wafer (156 cm ²)	p	1.06E+00	+ 6% cell loss
polystyrene,	kg	6.36E-06	untuk pengemasan
GAS			
nitrogen (N ₂)	kg	2.89E-02	
oxygen (O ₂)	kg	1.59E-03	
argon (Ar)	kg	4.01E-04	
Fluorinated compound mix (CF ₄ , C ₂ F ₆)	kg	4.93E-05	Nilai agregat
ammoniak (NH ₃)	kg	1.05E-04	Untuk deposisi silikon nitrida
silane (SiH ₄)	kg	1.89E-05	Untuk deposisi silikon nitrida
CAIR			
sodium hydroxide,(NaOH)	kg	2.45E-03	
Asam asetat(CH ₃ COOH)	kg	4.42E-05	
Asam hydrochloric , (HCl)	kg	7.12E-04	
hydrogen fluoride (HF) 100%	kg	5.89E-04	
Asam nitric (HNO ₃)	kg	4.17E-04	
POCl ₃ phosphoryl chloride	kg	3.39E-06	Pembentukan emitter
phosphoric acid (H ₃ PO ₄)	kg	1.19E-04	Pembentukan emitter
sodium silicate	kg	1.17E-03	
calcium chloride (CaCl ₂)	kg	3.37E-04	
tetraisopropyltitanate (TPT.)	liter	2.22E-08	
Isopropanol	kg	1.23E-03	
Ethanol	Kg	9.98E-06	

(Sumber : Alsema, 2006)

Modul Surya yang digunakan sebagai *baseline* pada perhitungan LCA memiliki spesifikasi dengan modul berjenis *multicrystalline* memiliki efisiensi sebesar 14.7%, berukuran 1.25 m² dan daya maksimum yang dapat dihasilkan adalah 165 Wp. Berikut adalah kompilasi komponen material dan bahan untuk menyusun modul surya:

Tabel 3.5 Kebutuhan material pembuatan Modul Surya

Produk	Unit	Jumlah	Keterangan
Modul, m-Si	p	1	
Material			
Sel Surya	p	61.2	+2% sel hilang
Aluminium profile	kg	4.2	Sebagai frame
Polyphenylenoxid	kg	0.3	Kotak Junction
Ethyl Vinyl Acetate	kg	1.6	Konsumsi EVA 0.96 kg/m^2 , +6% lebih dari luas kaca
Tembaga	kg	0.18	Pita tembaga sebagai interkoneksi sel
Tin	kg	0.009	$\text{Sn}^{60} \text{Pb}^{40}$ melapisi material etiket, Sn melapisi interconnect/terminal ribbons
Timah	kg	0.005	$\text{Sn}^{60} \text{Pb}^{40}$ $\text{Sn}^{60} \text{Pb}^{40}$ melapisi material etiket,
Nikel	kg	0.00026	Ni melapisi interconnect/terminal ribbons
Soldering flux	kg	0.0130	soldering flux, 95% propanol, bebas halogen
Cleaning fluid	kg	0.0207	Cairan pembersih 13 ml/m^2
Silicone	kg	0.0038	Sebagai diapragma laminator
Silicone kit	kg	0.191	Perlengkapan untuk memasang frame dan kotak junction
Cardboard	kg	1.75	Bahan pengemas kira-kira: 2 modul per kotak cardboard, 1 kg/m^2 board, 2.2 m^2 board per m^2 modul

(Sumber : Alsema, 2006)

3.1.3. Data Umum Komponen Instalasi PLTS

Untuk instalasi tenaga surya sebagai pembangkit listrik, diperlukan komponen seperti Inverter dan juga baterai. Berikut adalah kompilasi komponen material dan bahan untuk menyusun inverter:

Tabel 3.6 Kebutuhan material pembuatan Inverter

Produk	Unit	Jumlah	Keterangan
Inverter	p	1.00	Nominal output 2500 W AC
Materials			
Aluminium	g	682	Casing
Polycarbonate	g	68	Casing
ABS	g	148	Casing
Poly Ethylene	g	1.4	
PVC	g	2	kabel
SAN (Styrene acrylonitrile)	g	2	kabel
Tembaga	g	2	kabel
besi	g	78	Mur dan baut
Printed Circuit Board	cm ²	596	double layered board, without components, weight 100 g

(Sumber : Alsema, 2006)

Baterai yang biasa digunakan pada sistem sel surya merupakan baterai berjenis *lead acid* (PbA) dengan tegangan 2 volt per sel baterai dimana dalam satu baterai berisi 6 sel. Perkiraan umur baterai umumnya 4 tahun. Berikut adalah kompilasi komponen material dan bahan untuk menyusun baterai:

Tabel 3.7 Kebutuhan material pembuatan Baterai

Products	Unit	Amount
12 Volt Lead Battery	p	1
	kg	24.5
Materials/fuels		
Lead	kg	6.125
Lead oxides	kg	8.575
Polypropylene	kg	2.45
Sulfuric acid	kg	2.45
Water	kg	3.92
Kaca	kg	0.49

(Sumber : Sullivan, J.L., & Gaines, L,2010).

3.1.4. Daur Ulang Sistem Sel Surya

Alsema pada penelitiannya yang berjudul “*Environmental Life-Cycle Assessment of Multicrystalline Silicon Solar Cell Modules*” menerangkan masalah utama dalam daur ulang modul adalah sulitnya memisahkan laminasi modul menjadi komponen-komponennya. Namun, silikon wafer masih dapat digunakan.

Daur ulang lembaran modul kaca memerlukan penghapusan lapisan EVA dengan cara hasil peleburan kembali. Daur ulang kaca modul terkontaminasi plastik dapat dibuat. Polimer EVA dalam sebuah modul tidak didaur ulang sama sekali karena berbentuk *cross-linked*.

Bingkai aluminium merupakan bagian yang mudah didaur ulang. Energi yang diperoleh dengan daur ulang frame tergantung pada jumlah energi yang dibutuhkan untuk meng-upgrade materi sekunder dan pada sebagian kecil yang digunakan dalam produksi bingkai.

Mengingat pengetahuan yang terbatas tentang kemungkinan daur ulang sistem sel surya (kecuali bingkai Al), energi dan kebutuhan bahan dan efek lingkungan maka daur ulang tidak dapat diperhitungkan dalam skripsi ini. Oleh karena itu modul setelah selesai masa penggunaan dibuang sebagai limbah padat.

3.1.5. Data Konsumsi Listrik

Berikut adalah data kebutuhan konsumsi listrik pada setiap unit proses :

Tabel 3.8 Kebutuhan Konsumsi listrik

No	Proses	Unit	Jumlah per unit	Jumlah (dalam KWh)
1	Perakitan Modul	p	1	8.3
2	Sel Surya	p	61.2	47.4344279
3	Multi Wafer	m ²	1.489	57.90721
4	Poly-Si	kg	1.9537	212.927
	TOTAL			318.2686379

(Sumber : Alsema, 2006 “telah diolah kembali”)

3.1.6. Data Emisi Pembangkit Listrik Konvensional

Informasi berikut berisi informasi emisi per kWh dari pembangkit listrik konvensional (bahan bakar fosil) yang berbeda.

Tabel 3.9 Emisi per kWh pembangkit listrik konvensional

	Batu Bara (dlm gC/kWh)	Minyak (dlm gC/kWh)	Gas LNG (dlm gC/kWh)
Operasi dan Perawatan	9.80	7.33	32.67
Bahan Bakar	246.32	188.42	128.86
Total	256.94	196.44	162.18

(sumber : Yamada, 1995)

3.2. Pengolahan Data

Pada pengolahan data ini, bahan dasar dari sel surya, pasir silika berasal dari Bangka Belitung dan disalurkan pada pabrik pembuatan sel surya yang diasumsikan berada di Bandung untuk diolah menjadi sel surya serta komponen-komponen pendukung sel surya. Proses pengolahan data akan menggunakan data yang berasal dari '*Environmental life cycle inventory of crystalline silicon photovoltaic module production*'. Untuk proses pengolahan data sebagai dasar input *baseline* menggunakan satuan per 1 modul surya.

3.2.1. Pemilihan Kategori Dampak

Kategori dampak yang digunakan merupakan dampak *baseline* yang umumnya digunakan untuk mengukur dampak pada metode LCA.

Kategori dampak dasar / *baseline impact categories* terdiri dari :

- Penipisan sumber daya alam
- Dampak dari penggunaan lahan
- Perubahan iklim / *climate change*
- Dampak bahan beracun terhadap manusia / *Human toxicity*
- Dampak bahan beracun pada ekosistem air tawar / *freshwater aquatic ecotoxicity*
- Dampak bahan beracun pada ekosistem air laut / *marine aquatic ecotoxicity*
- Dampak bahan beracun pada ekosistem terestrial / *terrestrial ecotoxicity*

- Pembentukan *photo-oxidant*
- Pengasaman / *acidification*
- *Eutrophication* , dan
- Bau / *odour*

3.2.2. Pemilihan Metode Karakterisasi: Indikator kategori, Model Karakterisasi, dan Karakterisasi

Metode karakterisasi yang dipilih adalah metode karakterisasi dasar yang dikembangkan oleh Guinee et al. (2001) yang digunakan pada semua kategori pada *baseline impact categories*, kecuali untuk dampak pengasaman/ *acidification* yang menggunakan metode alternatif berkaitan dengan kurang sesuainya metode/faktor karakterisasi *baseline* yang merupakan *average European AP*. Metode alternatif memberikan metode/faktor karakterisasi *generic AP*.

3.2.3. Klasifikasi

Pada tahap klasifikasi, intervensi lingkungan yang merupakan hasil dari analisis inventori diterjemahkan ke dalam berbagai kategori dampak yang sesuai. Berikut adalah hasil klasifikasi pada unit proses pembuatan sel surya.

Tahap klasifikasi tentu saja dilakukan pada unit proses produksi modul surya lainnya serta komponen instalasi PLTS. Hasil klasifikasi menunjukkan bahwa dampak yang dapat diukur dari hasil pengumpulan data adalah :

- Penipisan sumber daya alam
- Perubahan iklim / *climate change*
- Dampak bahan beracun terhadap manusia / *Human toxicity*
- Dampak bahan beracun pada ekosistem air tawar / *freshwater aquatic ecotoxicity*
- Dampak bahan beracun pada ekosistem air laut / *marine aquatic ecotoxicity*
- Dampak bahan beracun pada ekosistem terestrial / *terrestrial ecotoxicity*
- Pembentukan *photo-oxidant*
- Pengasaman / *acidification*

- *Eutrophication* , dan
- Bau / *odour*

3.2.4. Karakterisasi

Pada tahap karakterisasi dilakukan perhitungan antara setiap hasil inventori dengan faktor karakterisasi yang sesuai pada kategori tersebut, dan kemudian diperhitungkan diolah untuk menghasilkan sebuah skor : hasil indikator. Sebuah kumpulan yang lengkap dari hasil kategori indikator menghasilkan sebuah profil lingkungan.

3.2.5. Pengukuran Dampak Penipisan Sumber Daya Abiotik

Berdasarkan tahap klasifikasi diketahui bahwa penggunaan sumber daya alam yang mempengaruhi dampak ini adalah sebagai berikut:

Abiotic Depletion dihitung dengan menggunakan rumus di bawah ini

$$abiotic\ depletion = \sum_i ADP_i \times m_i \quad (3.1)$$

Dengan satuan kg dari sumber referensi yaitu antimony. ADP_i adalah *abiotic depletion potential* dari i sedangkan m_i adalah kuantitas (dalam kg) dari sumber alam i yang digunakan (kecuali untuk gas alam dan bahan bakar fosil)

Tabel 3.10 Perhitungan Dampak Penipisan Sumber Daya Abiotik / *Abiotic Depletion Potential*

Komponen	Substansi	Jumlah	Unit	MR	ADP (dalam exergy kJ/mol)	ADP (dalam kJ)	Total
Polycrystalline silicone	NaOH	2	kg	39.997	74.9	3745.2809	9.71E+03
	HCl	2	kg	34.461	84.6	4909.8981	
	H ₂ O	2	kg	18	9.5	1055.5556	
Multi wafer	Silicon Carbide (SiC)	3.91607	kg	40.097	1202	117393.2249	2.08E+05
	polyethylene glycol (PEG)	4.03519	kg	62.069	1207.3	78488.2129	
	dipropylene glycol monomethyl ether (DPM)	4.51E-01	kg	76.096	1803	10689.8405	
	Adhesive						
	ethyl acetate (C ₄ H ₈ O ₂)	2.98E-03	kg	88107	2269.6	0.0767	
	cyano (C N)	2.98E-03	kg	26.018	845	96.7180	
	tenside (Sodium Sulfate concentrated)	3.52E-01	kg	142.041	21.4	53.0609	
	Sodium hydroxide, 50% in H ₂ O	1.49E-02	kg	39.9997	74.9	27.8347	
	Hydrochloric acid, (ClHO)	4.05E-03	kg	52.46	102	7.8663	
Acetic acid (C ₂ H ₄ O ₂)	5.81E-02	kg	52.46	919	1017.5658		
Sel Surya	Sodium Silicate (Na ₂ O ₅ Si ₂)	7.16E-02	kg	182.149	67.6	26.5740	3.45E+03
	Calcium Chloride (CaCl ₂)	3.21E-02	kg	110.986	87.9	25.447	
	Isopropanol (C ₃ H ₈ O)	7.53E-02	kg	60.097	2004	2510.160	
	Ethanol (C ₂ H ₆ O)	9.55E-04	kg	46.07	1357.7	28.136	
	Silane (H ₄ Si)	1.74E-03	kg	62.22	2545	71.343	
	Ammonia (NH ₃)	6.43E-03	kg	17.031	337.9	127.494	
	NaOH	0.23256	kg	39.997	74.9	435.5013	
	Hydrogen Fluoride (HF)	5.62E-02	kg	20.006	80	224.659	
Baterei	Polypropylene	2.45	kg	42.081	2003.9	116669.1619	1.61E+05
	Lead Oxides (PbO)	8.575	kg	223.189	47	40720.12074	
	Sulfuric Acid (H ₂ O ₄ S)	2.45	kg	98.078	163.4	4081.751259	
	Total						3.82E+05

3.2.6. Pengukuran Dampak Perubahan Iklim

Perubahan iklim dihitung dengan menggunakan rumus di bawah ini

$$climate\ change = \sum_i GWP_{a,i} \times m_i \quad (3.2)$$

Dengan satuan kg dari zat referensi yaitu CO₂. GWP_{a,i} adalah *global warming potential* untuk zat i yang diintegrasikan selama a tahun sedangkan m_i adalah kuantitas emisi yang dikeluarkan oleh zat m_i. Berdasarkan tahap klasifikasi diketahui bahwa dampak perubahan iklim dipengaruhi oleh emisi dari proses produksi sel surya yaitu substansi *perfluoroethane* (C₂F₆) dan *tetrafluoromethane* (CF₄) berikut ini :

Tabel 3.11 Perhitungan Dampak Perubahan Iklim / *Climate Change*

No	Substansi	Jumlah	Unit	GWP500 (dlm kg CO ₂ eq. /kg)	GWP500 (dlm kg CO ₂ eq.)
1	Perfluoroethane (C ₂ F ₆)	1.48E-03	kg	14000	2.07E+01
2	Tetrafluoromethane (CF ₄)	1.48E-03	kg	10000	1.48E+01
	TOTAL				3.55E+01

3.2.7. Pengukuran Dampak Bahan Beracun terhadap Manusia

Bahwa dampak bahan beracun terhadap manusia dihitung dengan menggunakan rumus di bawah ini :

$$climate\ change = \sum_i \sum_{ecom} HTP_{ecom,i} \times m_{ecom,i} \quad (3.3)$$

Dengan satuan kg dari zat referensi yaitu CO₂. GWP_{a,i} adalah *global warming potential* untuk zat i yang diintegrasikan selama a tahun sedangkan m_i adalah kuantitas emisi yang dikeluarkan oleh zat m_i. Berdasarkan tahap klasifikasi diketahui bahwa dampak bahan beracun terhadap manusia berikut ini :

Tabel 3.12 Perhitungan Dampak Bahan Beracun terhadap Manusia/ *Human Toxicity*

Komponen	Substansi	Jumlah	Unit	HTP (kg 1,4-DCB eq/kg)	HTP (kg 1,4-DCB eq)
Cell	Hydrogen Chloride	1.01E+00	kg	5.00E-01	5.03E-01
	Hydrogen Fluoride	3.53E-02	kg	1.01E+04	3.57E+02
Module	Copper (Cu)	2.20E-01	kg	4.40E+03	9.69E+02
	tin (Sn)	9.00E-03	kg	2.48E+00	2.23E-02
	Lead	6.13E+00	kg	3.84E+04	2.35E+05
	Nikel	2.60E-04	kg	3.84E+04	9.97E+00
Inverter	Copper (Cu)	2.00E-03	kg	4.40E+03	8.81E+00
Baterei	Lead	6.125	kg	3.84E+04	2.35E+05
	TOTAL				4.71E+05

3.2.8. Pengukuran Dampak Beracun pada Ekosistem Air Tawar

Berdasarkan tahap klasifikasi diketahui bahwa dampak bahan beracun pada ekosistem air tawar adalah *copper*, *tin*, *nickel*, dan *lead* sebagai input pada proses produksi sel surya. Pengukuran dampak bahan beracun pada ekosistem air tawar dihitung dengan menggunakan rumus dibawah ini

$$\text{fresh water ecotoxicity} = \sum_i \sum_{ecom} FAETP_{ecom,i} \times m_{ecom,i} \quad (3.4)$$

Hasil perhitungan ditunjukkan dalam satuan kg *1,4-dichlorobenzene equivalent* $FAETP_{ecom,i}$ adalah *fresh water aquatic ecotoxicity potential* untuk zat *i* yang dilepaskan ke kompartemen emisi (*ecom*) yaitu udara, air tawar, air laut, air tanah pertanian, atau tanah industri dengan $m_{ecom,i}$ adalah emisis zat *i* pada media *ecom*.

Penggunaan bahan – bahan tersebut akan berdampak ke udara karena sistem PLTS yang dipasang di atas tanah atau diatas atap serta dalam tanah setelah perangkat sel surya dibuang (*landfilled*). Oleh karena itu media kompartemen yang dipilih adalah tanah industri.

Tabel 3.13 Perhitungan Dampak Bahan Beracun Ekosistem Air Tawar / *Fresh Water Ecotoxicity*

Komponen	Substansi	Kompartemen	Jumlah	Unit	FAETP (dlm 1,4-DCB eq/kg)	FAETP (dlm 1,4-DCB eq)
Module	Copper (Cu)	Tanah Industri	2.20E-01	kg	5.90E+02	1.30E+02
	tin (Sn)	Tanah Industri	9.00E-03	kg	6.9	6.21E-02
	Lead	Tanah Industri	6.13E+00	kg	6.50E+00	3.98E+01
	Nickel	Tanah Industri	2.60E-04	kg	1.70E+03	4.42E-01
Inverter	Copper (Cu)	Tanah Industri	2.00E-03	kg	5.90E+02	1.18E+00
Baterai	Lead	Tanah Industri	6.125	kg	6.50E+00	3.98E+01
	Total					2.11E+02

3.2.9. Pengukuran Dampak Beracun pada Ekosistem Air Laut

Berdasarkan tahap klasifikasi diketahui bahwa dampak bahan beracun pada ekosistem air laut adalah *copper*, *tin*, *nickel*, dan *lead* sebagai input pada proses produksi sel surya. Pengukuran dampak bahan beracun pada ekosistem air laut dihitung dengan menggunakan rumus dibawah ini

$$fresh\ aquatic\ ecotoxicity = \sum_i \sum_{ecom} MAETP_{ecom_i} \times m_{ecom,i} \quad (3.5)$$

Hasil perhitungan ditunjukkan dalam satuan kg *1,4-dichlorobenzene equivalent* $MAETP_{ecom,i}$ adalah *marine water aquatic ecotoxicity potential* untuk zat *i* yang dilepaskan ke kompartemen emisi (ecom) yaitu udara, air tawar, air laut, air tanah pertanian, atau tanah industri dengan $m_{ecom,i}$ adalah emisiss zat *i* pada media ecom.

Penggunaan bahan – bahan tersebut akan berdampak ke udara karena sistem PLTS yang dipasang di atas tanah atau diatas atap serta dalam tanah setelah perangkat sel surya dibuang (*landfilled*). Oleh karena itu media kompartemen yang dipilih adalah tanah industri.

Tabel 3.14 Perhitungan Dampak Beracun pada Ekosistem Air Laut/ *Marine Water Ecotoxicity*

Komponen	Substansi	Kompartemen	Jumlah	Unit	MATP (dlm 1,4-DCB eq/kg)	MATP (dalam 1,4-DCB eq)
Module	Copper (Cu)	Tanah Industri	2.20E-01	Kg	1.20E+05	2.64E+04
	tin (Sn)	Tanah Industri	9.00E-03	Kg	8.30E+02	7.47E+00
	Lead	Tanah Industri	6.13E+00	Kg	7.50E+02	4.60E+03
	Nickel	Tanah Industri	2.60E-04	Kg	1.20E+03	3.12E-01
Inverter	Copper (Cu)	Tanah Industri	2.00E-03	Kg	1.20E+05	2.40E+02
Baterei	Lead	Tanah Industri	6.125	Kg	7.50E+02	4.59E+03
Total						3.58E+04

3.2.10. Pengukuran Dampak Beracun pada Ekosistem Terrestrial

Berdasarkan tahap klasifikasi diketahui bahwa dampak bahan beracun pada ekosistem terrestrial adalah *copper*, *tin*, *nickel*, dan *lead* sebagai input pada proses produksi sel surya. Pengukuran dampak bahan beracun pada ekosistem terrestrial dihitung dengan menggunakan rumus dibawah ini

$$\text{terrestrial ecotoxicity} = \sum_i \sum_{ecom} TETP_{ecom,i} \times m_{ecom,i} \quad (3.6)$$

Hasil perhitungan ditunjukkan dalam satuan kg *1,4-dichlorobenzene equivalent* $TETP_{ecom,i}$ adalah *marine water aquatic ecotoxicity potential* untuk zat *i* yang dilepaskan ke kompartemen emisi (*ecom*) yaitu udara, air tawar, air laut, air tanah pertanian, atau tanah industri dengan $m_{ecom,i}$ emisitas zat *i* pada media *ecom*.

Penggunaan bahan – bahan tersebut akan berdampak ke udara karena sistem PLTS yang dipasang di atas tanah atau diatas atap serta dalam tanah setelah perangkat sel surya dibuang (*landfilled*). Oleh karena itu media kompartemen yang dipilih adalah tanah industri.

Tabel 3.15 Pengukuran Dampak Beracun pada Ekosistem Terrestrial / *Terrestrial Ecotoxicity*

Komponen	Substansi	Kompartemen	Jumlah	Unit	TETP (dlm 1,4-DCB eq/kg)	TETP (dlm 1,4-DCB eq)
Module	Copper (Cu)	Tanah Industri	2.20E-01	Kg	5.90E+02	1.30E+02
	tin (Sn)	Tanah Industri	9.00E-03	Kg	6.9	6.21E-02
	Lead	Tanah Industri	6.13E+00	Kg	3.30E+01	2.02E+02
	Nickel	Tanah Industri	2.60E-04	Kg	2.10E+02	5.46E-02
Inverter	Copper (Cu)	Tanah Industri	2.00E-03	Kg	5.90E+02	1.18E+00
Baterei	Lead	Tanah Industri	6.125	Kg	3.30E+01	2.02E+02
	Total					5.36E+02

3.2.11. Pengukuran Dampak Pembentukan *Photo-Oxidant*

Berdasarkan tahap klasifikasi diketahui bahwa dampak pembentukan *photo-oxidant* disebabkan oleh substansi yang di tampilkan di bawah:

Tabel 3.16 Perhitungan Dampak Pembentukan *Photo-Oxidant*

Komponen	Substansi	Jumlah	Unit	POCP (dlm kg etylene eq./kg)	POCP (dlm kg etylene eq.)
<i>Multi Wafers</i>	Polyethylene Glycol (PEG)	4.0351	kg	0.373	1.505092
	Dipropylene Glycol Monomethyl Ether (DPM)	4.51E-01	kg	0.457	0.206107
	Ethyl Acetate (C ₄ H ₈ O ₂)	2.98E-03	kg	0.209	0.000623
	Acetic Acid (C ₂ H ₄ O ₂)	5.81E-02	kg	0.097	0.005636
<i>Cells</i>	Isopropanol	0.001916	kg	0.188	0.00036
	Ethanol	1.56E-05	kg	0.399	6.2E-06
	TOTAL				1.717824

Dampak pembentukan *photo oxidant* dihitung dengan menggunakan rumus dibawah ini.

$$\text{oxidant formation} = \sum_i \text{POCP}_i \times m_i \quad (3.7)$$

Hasil perhitungan diekspresikan dalam satuan kg zat referensi yaitu *ethylene*. POCP adalah *photochemical ozon creation potential* untuk zat *i* sedangkan *m_i* adalah kuantitas yang dikeluarkan oleh zat *i*.

3.2.12. Pengukuran Dampak Pengasaman/*Acidification*

Berdasarkan tahap klasifikasi diketahui bahwa dampak pembentukan pengasaman/ *acidification* disebabkan oleh emisi dari *hydrogen chloride*, *hydrogen fluoride*, *ammoniak*, *asam nitrik* pada proses produksi sel surya.

Dampak pengasaman / *acidification* dihitung dengan menggunakan rumus di bawah berikut:

$$acidification = \sum_i AP_i \times m_i \quad (3.8)$$

Hasil perhitungan diekspresikan dalam satuan kg SO₂ equivalent. AP_i adalah *acidification potential* untuk zat i yang dilepaskan ke udara sedangkan m_i adalah kuantitas yang dikeluarkan oleh zat i ke udara.

Tabel 3.17 Perhitungan Dampak Pengasaman/*Acidification*

Komponen	Substansi	Jumlah	Unit	AP (dalam kg SO ₂ ⁻ eq/ kg)	AP (dalam kg SO ₂ ⁻ eq)
Poly Si	hydrogen chloride	3.87E+00	Kg	0.88	3.41E+00
Cells	hydrogen chloride	6.73E-02	Kg	0.88	5.92E-02
	hydrogen fluoride	5.62E-02	Kg	1.60	8.99E-02
	ammoniak (NH ₃)	1.00E-02	Kg	1.88	1.88E-02
	nitric acid (HNO ₃)	3.97E-02	Kg	0.51	2.03E-02
	Total				1.88E-01

3.2.13. Pengukuran Dampak *Eutrophication*

Berdasarkan tahap klasifikasi diketahui bahwa dampak *eutrophication* dipengaruhi oleh input/output berikut ini :

Tabel 3.18 Perhitungan Dampak *Eutrophication*

No	Substansi	Jumlah	Unit	EP (dlm kg PO ₄ ³⁻ eq/kg)	EP (dlm kg PO ₄ ³⁻ eq)
Multi Wafer	Nitrogen (N ₂)	7.45E-02	kg	0.42	3.13E-02
Cells	Nitrogen (N ₂)	2.76E+00	kg	0.42	1.16E+00
	Oxygen (O ₂)	1.52E-01	kg	0.022	3.33E-03
	TOTAL				1.19E+00

Dampak *eutrophication* dihitung dengan menggunakan rumus di bawah berikut:

$$eutrophication = \sum_i EP_i \times m_i \quad (3.9)$$

Hasil perhitungan diekspresikan dalam satuan kg PO₄³⁻ equivalent. EP_i adalah *eutrophication potential* untuk zat i yang dilepaskan ke udara sedangkan m_i adalah kuantitas yang dikeluarkan oleh zat i ke udara.

3.2.14. Pengukuran Dampak Bau / *Malodourous Air*

Berdasarkan tahap klasifikasi diketahui bahwa dampak *Malodourous Air* dipengaruhi oleh input/output berikut ini :

Tabel 3.19 Perhitungan Dampak Bau / *Malodourous Air*

No	Substansi	Jumlah	Unit	1/OTV (dlm m ³ /kg)	1/OTV (dalam m ³)
1	Acetic acid (C ₂ H ₄ O ₂)	5.81E-02	kg	1.64E+07	9.53E+05
2	ammoniak (NH ₃)	6.30E-03	kg	1.00E+06	6.30E+03
	TOTAL				9.59E+05

Dampak *Malodourous Air* dihitung dengan menggunakan rumus di bawah berikut:

$$odour = \sum_i 1/OTV_i \times m_i \quad (3.10)$$

Hasil perhitungan diekspresikan dalam satuan kg m^3 . OTV adalah *odour threshold value* dimana $1/OTV_i$ merupakan faktor karakterisasi untuk zat i yang dilepaskan ke udara sedangkan m_i adalah kuantitas dikeluarkan zat i ke udara.

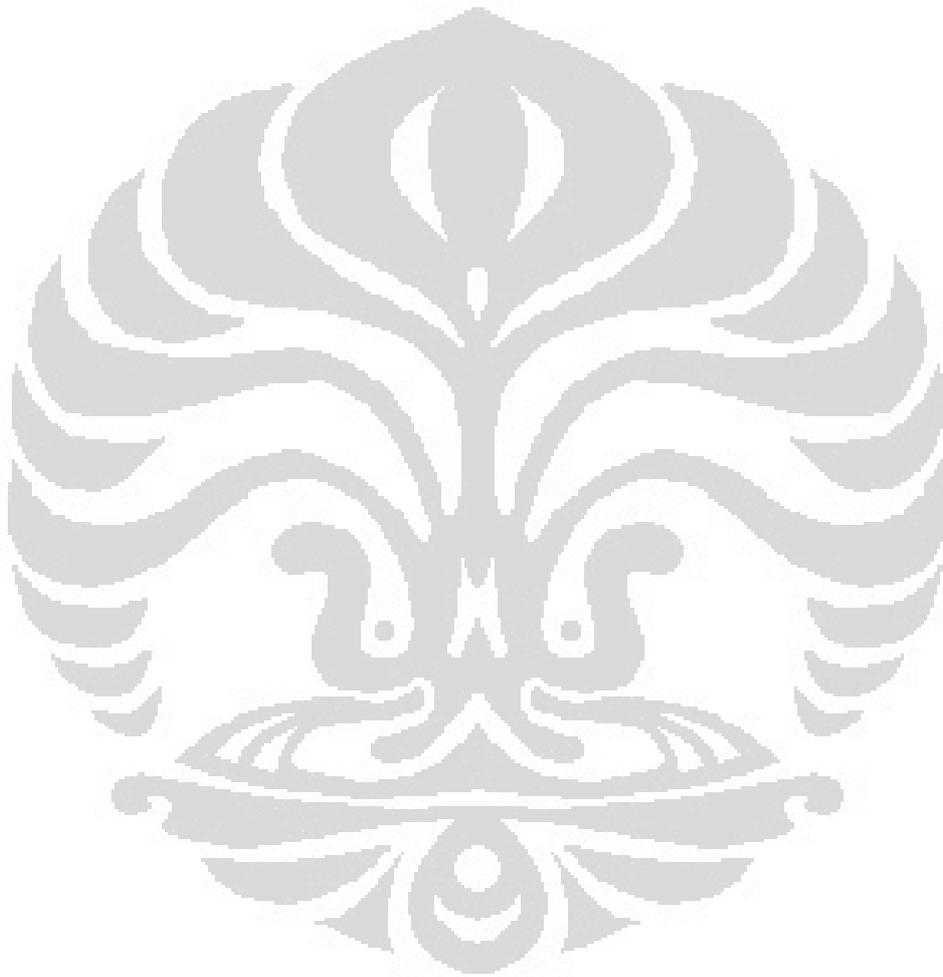
3.2.15. Hasil Pengolahan Data Agregat

Tabel berikut menunjukkan jumlah modul yang digunakan dan terpasang selama 25 tahun.

Tabel 3.20 Jumlah Modul Terpasang 2013 - 2038

Tahun	Produksi Listrik PLTS (GWh)	Kapasitas Terpasang PLTS (MW)	Jumlah modul terpasang (p)	Akumulasi Modul Terpasang (p)
2013	2.22E+02	1.90E+02	1.15E+06	1.15E+06
2014	2.34E+03	2.01E+03	1.10E+07	1.22E+07
2015	6.06E+03	5.19E+03	1.93E+07	3.14E+07
2016	9.67E+03	8.28E+03	1.88E+07	5.02E+07
2017	1.33E+04	1.14E+04	1.88E+07	6.89E+07
2018	1.69E+04	1.45E+04	1.88E+07	8.77E+07
2019	2.05E+04	1.76E+04	1.88E+07	1.06E+08
2020	2.41E+04	2.07E+04	1.88E+07	1.25E+08
2021	2.90E+04	2.48E+04	2.50E+07	1.50E+08
2022	3.38E+04	2.89E+04	2.50E+07	1.75E+08
2023	3.86E+04	3.31E+04	2.50E+07	2.00E+08
2024	4.34E+04	3.72E+04	2.50E+07	2.25E+08
2025	4.83E+04	4.13E+04	2.50E+07	2.50E+08
2026	5.31E+04	4.55E+04	2.50E+07	2.75E+08
2027	5.79E+04	4.96E+04	2.50E+07	3.00E+08
2028	6.27E+04	5.37E+04	2.50E+07	3.26E+08
2029	6.76E+04	5.78E+04	2.50E+07	3.51E+08
2030	7.24E+04	6.20E+04	2.50E+07	3.76E+08
2031	8.20E+04	7.02E+04	5.01E+07	4.26E+08
2032	9.17E+04	7.85E+04	5.01E+07	4.76E+08
2033	1.01E+05	8.68E+04	5.01E+07	5.26E+08
2034	1.11E+05	9.50E+04	5.01E+07	5.76E+08
2035	1.21E+05	1.03E+05	5.01E+07	6.26E+08
2036	1.30E+05	1.12E+05	5.01E+07	6.76E+08
2037	1.40E+05	1.20E+05	5.01E+07	7.26E+08
2038	1.50E+05	1.28E+05	5.01E+07	7.76E+08

Sedangkan untuk komponen baterai, baterai yang digunakan pada sistem pembangkit listrik bertenaga surya memiliki usia ekonomis selama 4 tahun yang berarti setiap 4 tahun perlu dilakukan penggantian baterai.



Tabel berikut menunjukkan jumlah baterai yang digunakan selama 25 tahun.

Tabel 3.21 Menunjukkan Jumlah Baterai Yang Digunakan Dari Tahun 2013-2038

Tahun	Jumlah modul terpasang (p)	Jumlah Baterai									Total	
2013	1.15E+06	1.15E+06	0	0	0	0	0	0	0	0	1.15E+06	
2014	1.10E+07	1.10E+07	0	0	0	0	0	0	0	0	1.10E+07	
2015	1.93E+07	1.93E+07	0	0	0	0	0	0	0	0	1.93E+07	
2016	1.88E+07	1.88E+07	1.15E+06	0	0	0	0	0	0	0	1.99E+07	
2017	1.88E+07	1.88E+07	1.10E+07	0	0	0	0	0	0	0	2.98E+07	
2018	1.88E+07	1.88E+07	1.93E+07	0	0	0	0	0	0	0	3.80E+07	
2019	1.88E+07	1.88E+07	1.88E+07	1.15E+06	0	0	0	0	0	0	3.87E+07	
2020	1.88E+07	1.88E+07	1.88E+07	1.10E+07	0	0	0	0	0	0	4.85E+07	
2021	2.50E+07	2.50E+07	1.88E+07	1.93E+07	0	0	0	0	0	0	6.31E+07	
2022	2.50E+07	2.50E+07	1.88E+07	1.88E+07	1.15E+06	0	0	0	0	0	6.37E+07	
2023	2.50E+07	2.50E+07	1.88E+07	1.88E+07	1.10E+07	0	0	0	0	0	7.36E+07	
2024	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	1.88E+07	1.93E+07	0	0	0	0	0	8.81E+07	
2025	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	1.88E+07	1.88E+07	1.15E+06	0	0	0	0	8.87E+07	
2026	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	1.88E+07	1.88E+07	1.10E+07	0	0	0	0	9.86E+07	
2027	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	1.88E+07	1.93E+07	0	0	0	0	1.13E+08	
2028	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	1.88E+07	1.88E+07	1.15E+06	0	0	0	1.14E+08	
2029	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	1.88E+07	1.88E+07	1.10E+07	0	0	0	1.24E+08	
2030	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	1.88E+07	1.93E+07	0	0	0	1.38E+08	
2031	5.01E+07	5.01E+07	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	1.88E+07	1.88E+07	1.15E+06	0	0	1.64E+08	
2032	5.01E+07	5.01E+07	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	1.88E+07	1.88E+07	1.10E+07	0	0	1.74E+08	
2033	5.01E+07	5.01E+07	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	1.88E+07	1.93E+07	0	0	1.88E+08	
2034	5.01E+07	5.01E+07	5.01E+07	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	1.88E+07	1.88E+07	1.15E+06	0	2.14E+08	
2035	5.01E+07	5.01E+07	5.01E+07	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	1.88E+07	1.88E+07	1.10E+07	0	2.24E+08	
2036	5.01E+07	5.01E+07	5.01E+07	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	1.88E+07	1.93E+07	0	2.38E+08	
2037	5.01E+07	5.01E+07	5.01E+07	5.01E+07	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	1.88E+07	1.88E+07	0	2.63E+08	
2038	5.01E+07	5.01E+07	5.01E+07	5.01E+07	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07	1.88E+07	1.88E+07	0	2.63E+08	
											TOTAL :	2.90E+09

3.2.16. Normalisasi

Menurut ISO 14042, normalisasi merupakan sebuah perhitungan besarnya hasil indikator relatif terhadap informasi referensi. Tujuan utama dari menormalkan hasil kategori indikator adalah pemahama yang lebih baik mengenai kepentingan relatif dan besarnya hasil kepentingan terhadap setiap sistem produk dalam studi ini. Perhitungan normalisasi dilakukan dengan rumus sebagai berikut :

$$\text{normalised indicator result} = \frac{\text{indicator result cat}}{\text{indicator result cat,ref}} \quad (3.9)$$

indicator result cat menyatakan hasil perhitungan masing-masing dampak yang sudah dilakukan pada tahap sebelumnya dan $\text{indicator result}_{\text{cat,ref}}$ menyatakan faktor normalisasi untuk setiap dampak cat dan sistem referensi ref. *Normalised indicator result* dinyatakan dalam satuan yr. (tahun).

Tabel 3.22 Faktor Normalisasi Kategori Dampak Dasar untuk *World* tahun 2005

Dampak	Faktor normalisasi
Penipisan sumber daya abiotik	1.57E+11 kg (antimony eq)/yr
Perubahan iklim	3.86E+13 kg (CO ₂ eq)/yr
Dampak bahan beracun terhadap manusia	4.98E+13 kg (1,4 DCB eq)/yr
Dampak bahan beracun pada ekosistem air tawar	2.03E+12 kg (1,4 DCB eq)/yr
Dampak bahan beracun pada ekosistem air laut	5.12E+14 kg (1,4 DCB eq)/yr
Dampak bahan beracun pada ekosistem <i>terrestrial</i>	2.68E+11 kg (1,4 DCB eq)/yr
Pembentukan <i>photo oxidant</i>	4.55E+10 kg (C ₂ H ₄ eq)/yr
Pengasaman / <i>acidification</i>	2.99E+11 kg (SO ₂ eq)/yr
<i>Eutrophication</i>	1.29E+11 kg (PO ₄ ³⁻ eq)/yr
Bau / <i>Odour</i>	-

(sumber : Guinee et al.,2001)

Berikut adalah tabel hasil normalisasi dampak per kategori yang dihasilkan oleh 1 modul surya.

Tabel 3.23 Hasil Normalisasi Dampak per Kategori per 1 Modul Surya

Dampak	Total	Total (yr)
Penipisan sumber daya alam	3.82E+05 kg (antimony eq)	2.44E-06
Perubahan iklim / <i>climate change</i>	1.84E+00 kg (CO ₂ eq)	4.77E-12
Dampak bahan beracun terhadap manusia / <i>Human toxicity</i>	4.71E+05 kg (1,4 DCB eq)	9.46E-07
Dampak bahan beracun pada ekosistem air tawar / <i>freshwater aquatic ecotoxicity</i>	2.11E+02 kg (1,4 DCB eq)	1.04E-10
Dampak bahan beracun pada ekosistem air laut / <i>marine aquatic ecotoxicity</i>	3.58E+04 kg (1,4 DCB eq)	7.00E-11
Dampak bahan beracun pada ekosistem terestrial / <i>terrestrial ecotoxicity</i>	5.36E+02 kg (1,4 DCB eq)	2.00E-09
Pembentukan <i>photo-oxidant</i>	1.33E+09 kg (C ₂ H ₄ eq)	2.93E-02
Pengasaman / <i>acidification</i>	7.53E+08 kg (SO ₂ eq)	2.52E-03
<i>Eutrophication</i> , dan	9.09E+08 kg (PO ₄ ³⁻ eq)	7.05E-03
Bau / <i>odour</i>	7.44E+14 m ³ (1/OTV)	-

Hasil perhitungan normalisasi untuk dampak kategori penipisan sumber daya abiotik / *abiotic depletion potential* ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 3.24 Hasil Normalisasi Dampak Penipisan Sumber Daya Abiotik

Tahun	<i>Polycrystalline silicone</i>	Multi wafer	Sel Surya	Baterai	Total (yr)
2013	7.12E-02	1.52E+00	2.53E-02	1.18E+00	2.80E+00
2014	6.80E-01	1.46E+01	2.42E-01	1.13E+01	2.68E+01
2015	1.19E+00	2.55E+01	4.23E-01	1.98E+01	4.69E+01
2016	1.16E+00	2.48E+01	4.12E-01	2.05E+01	4.69E+01
2017	1.16E+00	2.48E+01	4.12E-01	3.06E+01	5.70E+01
2018	1.16E+00	2.48E+01	4.12E-01	3.91E+01	6.55E+01
2019	1.16E+00	2.48E+01	4.12E-01	3.98E+01	6.62E+01
2020	1.16E+00	2.48E+01	4.12E-01	4.99E+01	7.63E+01
2021	1.55E+00	3.31E+01	5.50E-01	6.49E+01	1.00E+02
2022	1.55E+00	3.31E+01	5.50E-01	6.55E+01	1.01E+02
2023	1.55E+00	3.31E+01	5.50E-01	7.56E+01	1.11E+02
2024	1.55E+00	3.31E+01	5.50E-01	9.06E+01	1.26E+02
2025	1.55E+00	3.31E+01	5.50E-01	9.13E+01	1.27E+02
2026	1.55E+00	3.31E+01	5.50E-01	1.01E+02	1.37E+02
2027	1.55E+00	3.31E+01	5.50E-01	1.16E+02	1.52E+02
2028	1.55E+00	3.31E+01	5.50E-01	1.17E+02	1.52E+02
2029	1.55E+00	3.31E+01	5.50E-01	1.27E+02	1.62E+02
2030	1.55E+00	3.31E+01	5.50E-01	1.42E+02	1.77E+02
2031	3.10E+00	6.63E+01	1.10E+00	1.69E+02	2.39E+02
2032	3.10E+00	6.63E+01	1.10E+00	1.79E+02	2.49E+02
2033	3.10E+00	6.63E+01	1.10E+00	1.94E+02	2.64E+02
2034	3.10E+00	6.63E+01	1.10E+00	2.20E+02	2.91E+02
2035	3.10E+00	6.63E+01	1.10E+00	2.30E+02	3.01E+02
2036	3.10E+00	6.63E+01	1.10E+00	2.45E+02	3.16E+02
2037	3.10E+00	6.63E+01	1.10E+00	2.70E+02	3.41E+02
2038	3.10E+00	6.63E+01	1.10E+00	2.70E+02	3.41E+02
Total	4.80E+01	1.03E+03	1.71E+01	2.98E+03	4.07E+03

Hasil perhitungan normalisasi untuk total dampak per kategori ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 3.25 Hasil Perhitungan Dampak per Kategori

No	Dampak	Total (yr)
1	Penipisan sumber daya alam	4.07E+03
2	Perubahan iklim / <i>climate change</i>	7.14E-02
3	Dampak bahan beracun terhadap manusia / <i>Human toxicity</i>	1.74E+01
4	Dampak bahan beracun pada ekosistem air tawar / <i>freshwater aquatic ecotoxicity</i>	1.37E-01
5	Dampak bahan beracun pada ekosistem air laut / <i>marine aquatic ecotoxicity</i>	7.34E-02
6	Dampak bahan beracun pada ekosistem terestrial / <i>terrestrial ecotoxicity</i>	3.15E+00
7	Pembentukan <i>photo-oxidant</i>	5.86E-02
8	Pengasaman / <i>acidification</i>	9.33E-03
9	<i>Eutrophication</i> , dan	7.17E-03
10	Bau / <i>odour</i>	-

3.2.17. Hasil Perhitungan *Energy Pay Back Time* (EPBT)

EPBT dicari dengan menggunakan persamaan 2.2, $EPBT = \frac{LCE_{in}}{AEO}$ (=)years, dimana LCE_{in} didapat dari penjumlahan *abiotic depletion potential* dan penggunaan listrik.

$$LCE_{in} = total ADP + kebutuhan listrik \quad (3.10)$$

$$= 3.82E+05 \text{ kJ} \times 0.000277778 + 318.26864 \text{ kWh} \\ = 106.1112 \text{ kWh} + 318.26866 \text{ kWh} = 424.3798 \text{ kWh}$$

AEO dapat dihasilkan melalui persamaan 3.11. Berdasarkan literatur didapat radiasi matahari (R) di Indonesia sebesar 4.8 kWh/m²/hari, A adalah luas modul dengan 1.25 m², θ efisiensi modul sebesar 13.2 % , η adalah *load factor* dari sistem sebesar 90% dan t merupakan lama penyinaran dalam 1 tahun yaitu 365 hari. Maka, perhitungan dari *annual energy output* sebagai berikut :

$$AEO = R \times A \times \theta \times \eta \times t \quad (3.11)$$

$$AEO = 4.8 \times 1.25 \times 0.132 \times 0.9 \times 365 = 260.172 \text{ kWh}$$

Sehingga didapatkan nilai EPBT sebesar :

$$EPBT = \frac{LCE_{in}}{AEO} = \frac{424.3798}{260.172} = 1.63 \text{ tahun}$$

3.2.18. Hasil Pengolahan dengan Beberapa Skenario

Dalam pengolahan data ini skenario dapat berupa:

- Perbandingan dengan pembangkit listrik tenaga konvensional
- Perbandingan dengan dan tanpa menggunakan baterai
- Perbandingan penggunaan Baterai daur ulang

3.2.18.1 Perbandingan Emisi Dengan Pembangkit Listrik Konvensional

Dalam mengukur perbandingan emisi, sangat dibutuhkan untuk dapat menganalisis dampak yang dihasilkan melalui output yang berdampak buruk terhadap lingkungan. Salah satu indikator lingkungan yang dianggap paling signifikan memiliki pengaruh penting adalah *Global Warming Potential* yang diwakilkan dengan satuan CO₂ eq. saat ini. Sebuah jurnal yang berjudul “*Evaluation of Photovoltaic Energy Systems in Terms of Economics, Energy and Co, Emissions*” oleh Yamada, Yoichi tahun 1995 memberikan informasi tentang emisi yang dihasilkan setiap 1 kWh pada pembangkit listrik batu bara, minyak, dan gas LNG .

Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya, data emisi yang terkandung diambil dari hasil perhitungan dampak lingkungan indikator perubahan iklim untuk 1 modul surya sebesar 3.55E+01 kgC. Hasil tersebut kemudian di-agregatkan dengan jumlah kapasitas modul terpasang sepanjang tahun 2013-2018. Kandungan emisi PLTS hanya terjadi pada proses manufaktur sementara selama masa operasi dan perawatan tidak menghasilkan emisi CO₂ seperti yang telah diketahui sebelumnya,

Tabel 3.26 Hasil Perhitungan Emisi Pembangkit Listrik Konvensional

Tahun	Produksi Listrik PLTS (GWh)	Batu Bara (dlm kgC)	Minyak (dlm kgC)	Gas LNG (dlm kgC)	PLTS (dlm kgC)
2013	2.22E+02	5.70E+07	4.36E+07	3.60E+07	4.09E+07
2014	2.34E+03	6.02E+08	4.60E+08	3.80E+08	3.91E+08
2015	6.06E+03	1.56E+09	1.19E+09	9.82E+08	6.84E+08
2016	9.67E+03	2.48E+09	1.90E+09	1.57E+09	6.66E+08
2017	1.33E+04	3.41E+09	2.61E+09	2.15E+09	6.66E+08
2018	1.69E+04	4.34E+09	3.32E+09	2.74E+09	6.66E+08
2019	2.05E+04	5.27E+09	4.03E+09	3.33E+09	6.66E+08
2020	2.41E+04	6.20E+09	4.74E+09	3.91E+09	6.66E+08
2021	2.90E+04	7.44E+09	5.69E+09	4.70E+09	8.89E+08
2022	3.38E+04	8.68E+09	6.64E+09	5.48E+09	8.89E+08
2023	3.86E+04	9.92E+09	7.58E+09	6.26E+09	8.89E+08
2024	4.34E+04	1.12E+10	8.53E+09	7.04E+09	8.89E+08
2025	4.83E+04	1.24E+10	9.48E+09	7.83E+09	8.89E+08
2026	5.31E+04	1.36E+10	1.04E+10	8.61E+09	8.89E+08
2027	5.79E+04	1.49E+10	1.14E+10	9.39E+09	8.89E+08
2028	6.27E+04	1.61E+10	1.23E+10	1.02E+10	8.89E+08
2029	6.76E+04	1.74E+10	1.33E+10	1.10E+10	8.89E+08
2030	7.24E+04	1.86E+10	1.42E+10	1.17E+10	8.89E+08
2031	8.20E+04	2.11E+10	1.61E+10	1.33E+10	1.78E+09
2032	9.17E+04	2.36E+10	1.80E+10	1.49E+10	1.78E+09
2033	1.01E+05	2.60E+10	1.99E+10	1.64E+10	1.78E+09
2034	1.11E+05	2.85E+10	2.18E+10	1.80E+10	1.78E+09
2035	1.21E+05	3.10E+10	2.37E+10	1.96E+10	1.78E+09
2036	1.30E+05	3.35E+10	2.56E+10	2.11E+10	1.78E+09
2037	1.40E+05	3.60E+10	2.75E+10	2.27E+10	1.78E+09
2038	1.50E+05	3.84E+10	2.94E+10	2.43E+10	1.78E+09
	Total	3.92E+11	3.00E+11	2.48E+11	2.76E+10

3.2.18.2 Perbandingan Dengan Dan Tanpa Menggunakan Baterai

Pada pengolahan data ini diberlakukan untuk skenario penggunaan PLTS dengan menggunakan *system backup* (baterai) dan tidak menggunakan baterai, sedangkan untuk data input lainnya merupakan data yang sama.

Tabel berikut menunjukkan hasil pengolahan data analisis dampak lingkungan dengan perbandingan penggunaan baterai atau tidak menggunakan baterai.

Tabel 3.27 Hasil Perhitungan Dampak per Kategori dengan Skenario Baterai

No	Dampak	Total Dampak (yr)	
		Dengan Baterai	Tanpa Baterai
1	Penipisan sumber daya alam	4.07E+03	1.09E+03
2	Perubahan iklim / <i>climate change</i>	7.14E-02	7.14E-02
3	Dampak bahan beracun terhadap manusia / <i>Human toxicity</i>	1.74E+01	3.69E+00
4	Dampak bahan beracun pada ekosistem air tawar / <i>freshwater aquatic ecotoxicity</i>	1.37E-01	8.03E-02
5	Dampak bahan beracun pada ekosistem air laut / <i>marine aquatic ecotoxicity</i>	7.34E-02	4.74E-02
6	Dampak bahan beracun pada ekosistem terestrial / <i>terrestrial ecotoxicity</i>	3.15E+00	9.66E-01
7	Pembentukan <i>photo-oxidant</i>	5.86E-02	5.86E-02
8	Pengasaman / <i>acidification</i>	9.33E-03	9.33E-03
9	<i>Eutrophication</i>	7.17E-03	7.17E-03

3.2.18.3 Skenario Daur Ulang Baterai

Data proses dan tingkat daur ulang menggunakan data Amerika Serikat yang disajikan dalam jurnal “*Environmental Life Cycle Assesment of Solar Home System*” yang ditulis oleh E.A. Alsema.

Limbah baterai yang tidak dapat diproses diasumsikan dibuang di TPA (*landfilled*), sehingga relatif memberikan sedikit kontribusi terhadap dampak lingkungan. Asumsi ini merupakan model optimis untuk kondisi pembuangan nyata. Pengaruh lingkungan dari baterai yang tidak di proses kembali tidak dipertimbangkan dalam skenario ini.

Tabel 3.28 Skenario Manajemen Limbah Baterai

	Skenario 90%	Skenario 0%
Tingkat Pengumpulan	90%	0%
Baterai yang dibuang (<i>landfill</i>)	10%	100%
Tingkat Recovery Komponen <i>lead</i>	95%	-
Tingkat Recovery Komponen <i>lead</i>	90%	-

(Sumber : Alsema, 2000)

Hasil perhitungan normalisasi skenario daur ulang baterai untuk total dampak per kategori ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 3.29 Hasil Perhitungan Skenario Daur Ulang Baterai

No	Dampak	Total Dampak (yr)	
		90% Daur Ulang	0% Daur Ulang
1	Penipisan sumber daya alam	1.96E+03	4.07E+03
2	Perubahan iklim / <i>climate change</i>	7.14E-02	7.14E-02
3	Dampak bahan beracun terhadap manusia / <i>Human toxicity</i>	7.67E+00	1.74E+01
4	Dampak bahan beracun pada ekosistem air tawar / <i>freshwater aquatic ecotoxicity</i>	9.68E-02	1.37E-01
5	Dampak bahan beracun pada ekosistem air laut / <i>marine aquatic ecotoxicity</i>	5.49E-02	7.34E-02
6	Dampak bahan beracun pada ekosistem terestrial / <i>terrestrial ecotoxicity</i>	4.12E+00	3.15E+00
7	Pembentukan <i>photo-oxidant</i>	5.86E-02	5.86E-02
8	Pengasaman / <i>acidification</i>	9.33E-03	9.33E-03
9	<i>Eutrophication</i>	7.17E-03	7.17E-03

BAB 4 ANALISIS HASIL

Bab empat berisikan pembahasan dan analisis hasil dan pengolahan data. Analisis akan membahas perhitungan potensi dampak lingkungan dari setiap indikator. Analisis dari setiap dampak akan dilakukan untuk melihat seberapa besar ancaman lingkungan yang berpotensi untuk dibandingkan dengan yang dampak lainnya

4.1. Analisis Kategori Dampak

Pada tahap pemilihan kategori dampak lingkungan, dipilih dua kelompok kategori dampak. Pertama adalah kategori dampak dasar / *baseline impact categories* yang bersifat global, terdiri atas 11 (sebelas) dampak yaitu :

- Penipisan sumber daya alam
- Dampak dari penggunaan lahan (persaingan lahan)
- Perubahan iklim/ *Climate Change*
- Penipisan lapisan ozon stratosfer/ *Stratospheric Ozone Depletion*
- Dampak bahan beracun pada manusia/ *Human Toxicity*
- Dampak bahan beracun pada ekosistem / *Ecotoxicity*

Terdiri atas tiga dampak, yaitu dampak bahan beracun pada ekosistem air tawar/ *freshwater aquatic ecotoxicity*, dampak bahan beracun pada ekosistem air laut / *marine aquatic ecotoxicity*, dampak bahan beracun pada terestrial / *terrestrial ecotoxicity*.

- Pembentukan *photo-oxidant*
- Pengasaman / *Acidification*
- *Eutrophication*

Kedua adalah kelompok ketiga, terdiri atas tiga dampak:

- Penipisan sumber daya biotik
- Pengawetan melalui proses pengeringan
- Bau (*Maladourous air*)

Kelompok kedua ini menghasilkan dampak lingkungan yang bersifat lokal.

Setelah pengumpulan dan pengolahan data dilakukan, ternyata hanya 10 data yang dapat terukur yaitu :

- Penipisan sumber daya alam
- Dampak dari penggunaan lahan (persaingan lahan)
- Perubahan iklim/ *Climate Change*
- Penipisan lapisan ozon stratosfer/ *Stratospheric Ozone Depletion*
- Dampak bahan beracun pada manusia/ *Human Toxicity*
- Dampak bahan beracun pada ekosistem / *Ecotoxicity* Dampak bahan beracun pada ekosistem / *Ecotoxicity* yaitu dampak bahan beracun pada ekosistem air tawar/ *freshwater aquatic ecotoxicity*, dampak bahan beracun pada ekosistem air laut / *marine aquatic ecotoxicity*, dampak bahan beracun pada terrestrial / *terrestrial ecotoxicity*.
- Pembentukan *photo-oxidant*
- Pengasaman / *Acidification*
- *Eutrophication*, dan
- Bau (*Maladourous air*)

Dengan demikian terdapat dua dampak dari kategori dampak dasar yang tidak dapat terukur dan dua dampak dari kategori kedua yang juga tidak dapat terukur karena data yang dibutuhkan tidak tersedia. Pada kategori dampak dasar, dua dampak yang tidak dapat terukur adalah dampak penipisan lapisan ozon stratosfer / *stratospheric ozone depletion* dan dampak penggunaan lahan. Sedangkan pada dampak yang bersifat lokal, dua dampak yang tidak dapat diukur adalah dampak penipisan sumber daya biotik dan dampak pengawetan melalui proses pengeringan.

Pada dampak penggunaan lahan, indikator dari dampak ini adalah jumlah luas lahan yang digunakan selama rentang tahun evaluasi (dalam $m^2.yr$). Data yang dapat dikumpulkan adalah luas dari modul surya dan komponen-komponen PLTS lainnya namun data mengenai luas lahan yang dibutuhkan untuk pabrik memproduksi sel surya dan luas lahan pemasangan PLTS itu sendiri tidak terdapat. Untuk luas lahan pemasangan PLTS bergantung dari rancangan sistem desain dari instalasi PLTS. Tidak dapat terukur nya dampak penggunaan lahan tidak akan memengaruhi hasil penelitian secara signifikan karena dampak penggunaan lahan tidak memiliki faktor normalisasi sehingga tidak dapat dibandingkan dengan dampak lainnya.

Dampak penipisan ozon stratosfer mengacu pada aktivitas penipisan lapisan ozon stratosfer sebagai akibat dari emisi antropogenik. Penipisan lapisan ozon stratosfer menyebabkan sebagian besar dari radiasi matahari UV-B mencapai permukaan bumi, dengan berpotensi membahayakan kesehatan manusia, hewan, ekosistem darat dan air, siklus biokimia dan siklus bahan material. Penipisan ozon stratosfer dapat memengaruhi empat bidang perlindungan: kesehatan manusia, kesehatan lingkungan, alam, dan sumber daya alam. Berikut adalah gas yang berpotensi menyebabkan penipisan lapisan ozon stratosfer ini :

- 1,1,1-trichloroethane
- CFC
- HBFC
- HCFC
- Metil Bromida
- Metil Klorida
- Tetrachloromedha

Dengan tidak tersedianya data yang berhubungan dengan lapisan ozon stratosfer, maka tidak dapat dilakukan pengukuran terhadap dampak kategori ini.

Pengeringan merupakan masalah lingkungan yang terkait disebabkan karena kekurangan air karena ekstraksi air tanah untuk pasokan air industri dan air minum. Hal ini dapat menyebabkan permukaan air turun, rembesan berkurang, pembauran air dari daerah lain yang dapat menyebabkan perubahan vegetasi alam. Dengan tidak tersedianya data yang berhubungan dengan dampak pengawetan karena pengeringan, maka tidak dapat dilakukan pengukuran terhadap dampak kategori ini.

Dampak penipisan sumber daya biotik disebabkan karena adanya materi sumber daya yang dianggap hidup, misalnya hutan hujan, gajah. Kategori ini memiliki dampak sumber daya alam, atau sumber daya alam antara lain kesehatan manusia, alam, dan lingkungan sebagai daerah perlindungan. Oleh karena tidak tersedianya data yang berhubungan dengan gas penipisan sumber daya biotik, maka tidak dapat dilakukan pengukuran terhadap dampak kategori ini.

4.2. Analisis Dampak Lingkungan Input *Baseline*

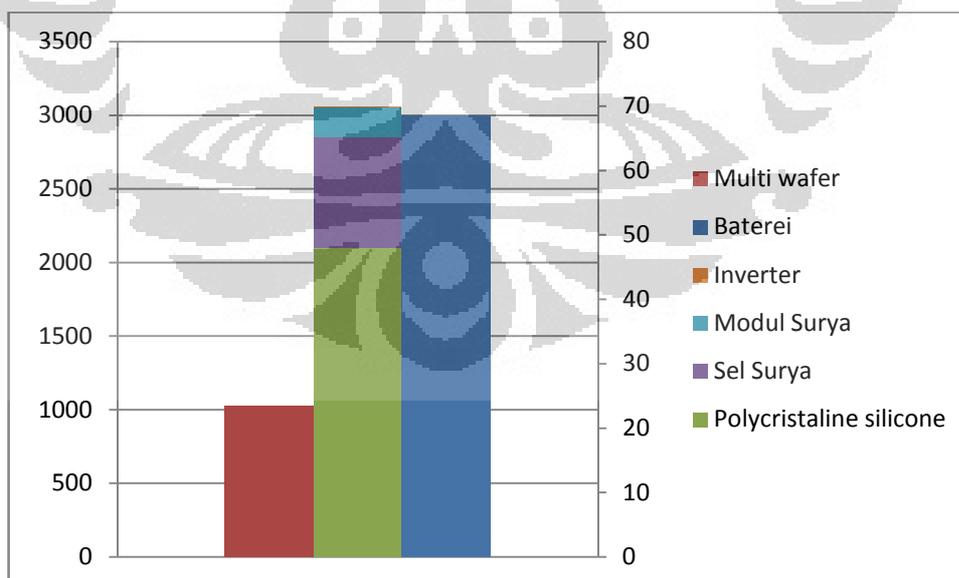
4.2.1. Analisis Dampak Lingkungan per Unit Proses

Hasil pengolahan dampak lingkungan per unit bisnis selama 25 tahun masa operasi menunjukkan hasil seperti yang terlihat pada Tabel 4.1 sebagai berikut :

Tabel 4.1 Persentase Kontribusi per Unit Proses terhadap Dampak Lingkungan

No	Unit Proses	Total (yr)	% Grand Total
1	<i>Polycrystalline silicone</i>	48.0234	1.17%
2	Multi wafer	1027.37	25.09%
3	Sel Surya	17.1395	0.42%
4	Modul Surya	4.75412	0.12%
5	Baterei	2997.11	73.20%
6	Inverter	0.01914	0.00%
	Total	4094.41	100%

Baterei memberikan kontribusi paling besar kepada keseluruhan dampak lingkungan yaitu sebesar 73.20%.



Gambar 4.1 Grafik Dampak Lingkungan terhadap unit terkait

Dengan melihat grafik diatas dapat diambil kesimpulan bahwa baterai merupakan unit dalam sistem pembangkit listrik tenaga surya yang menyumbang dampak lingkungan yang paling besar, diikuti oleh proses produksi multi wafer dan proses produksi menghasilkan *polychristaline silicone*.

4.2.1.1 Analisis Dampak Lingkungan pada Proses Pembentukan *Polychristalline Silicone*.

Hasil pengolahan dampak lingkungan untuk unit *Polychristalline Silicone* ditampilkan pada Tabel 4.2 sebagai berikut:

Tabel 4.2 Dampak Lingkungan pada Proses Pembentukan *Polychristalline Silicone*.

No	Dampak	Total (yr)	% Grand Total
1	Penipisan sumber daya alam	4.80E+01	99.982%
2	Pengasaman / <i>acidification</i>	8.85E-03	0.018%
	Grand Total	4.80E+01	100%

4.2.1.2 Analisis Dampak Lingkungan pada Proses Pembentukan *Multi-Wafer*

Hasil pengolahan dampak lingkungan untuk unit *Multi-Wafer* ditampilkan pada Tabel 4.3 sebagai berikut:

Tabel 4.3 Dampak Lingkungan pada Proses Pembentukan *Multi Wafer*

No	Dampak	Total (yr)	% Grand Total
1	Penipisan sumber daya alam	1.03E+03	99.997%
2	Pembentukan <i>photo-oxidant</i>	2.93E-02	0.003%
3	<i>Eutrophication</i>	1.88E-04	0.000%
	Grand Total	1.03E+03	100%

4.2.1.3 Analisis Dampak Lingkungan pada Baterai

Hasil pengolahan dampak lingkungan untuk unit baterai menunjukkan hasil sebagai berikut:

Tabel 4.4 Dampak Lingkungan pada unit Baterai

No	Dampak	Total (yr)	% Grand Total
1	Penipisan sumber daya alam	2.98E+03	99.468%
2	Dampak bahan beracun terhadap manusia / <i>Human toxicity</i>	1.37E+01	0.456%
3	Dampak bahan beracun pada ekosistem air tawar / <i>freshwater aquatic ecotoxicity</i>	5.68E-02	0.002%
4	Dampak bahan beracun pada ekosistem air laut / <i>marine aquatic ecotoxicity</i>	2.60E-02	0.001%
5	Dampak bahan beracun pada ekosistem terestrial / <i>terrestrial ecotoxicity</i>	2.19E+00	0.073%
	Grand Total	3.00E+03	100%

Dari hasil diatas dapat dilihat bahwa baterai memiliki kontribusi yang sangat besar pada dampak penipisan sumber daya alam. Sebesar 99% dari total dampak lingkungan yang dihasilkan baterai berupa dampak penipisan sumber daya alam. Hal ini di akibatkan kandungan akan timah dari baterai yang cukup besar.

Penggunaan baterai dengan jumlah yang cukup besar juga memberikan dampak bahan beracun terhadap manusia, hal ini dikarenakan kandungan batu baterai yang memiliki unsur bahan beracun berbahaya (B3) dimana umumnya baterai mengandung plumbun, mangan dan kadmiun.

Komponen-komponen penyusun baterai ini akan berdampak negatif bila mencemari lingkungan dan membahayakan kesehatan manusia jika dalam jumlah banyak. Substansi yang paling dominan pada baterai adalah timbal. Timbal dan senyawanya mempengaruhi sistem pusat syaraf dengan ciri-ciri keracunan, yaitu pusing, anemia, lemah dan yang paling berbahaya adalah pengaruhnya terhadap sel darah merah. Timbal dapat mengubah ukuran dan bentuk sel darah merah.

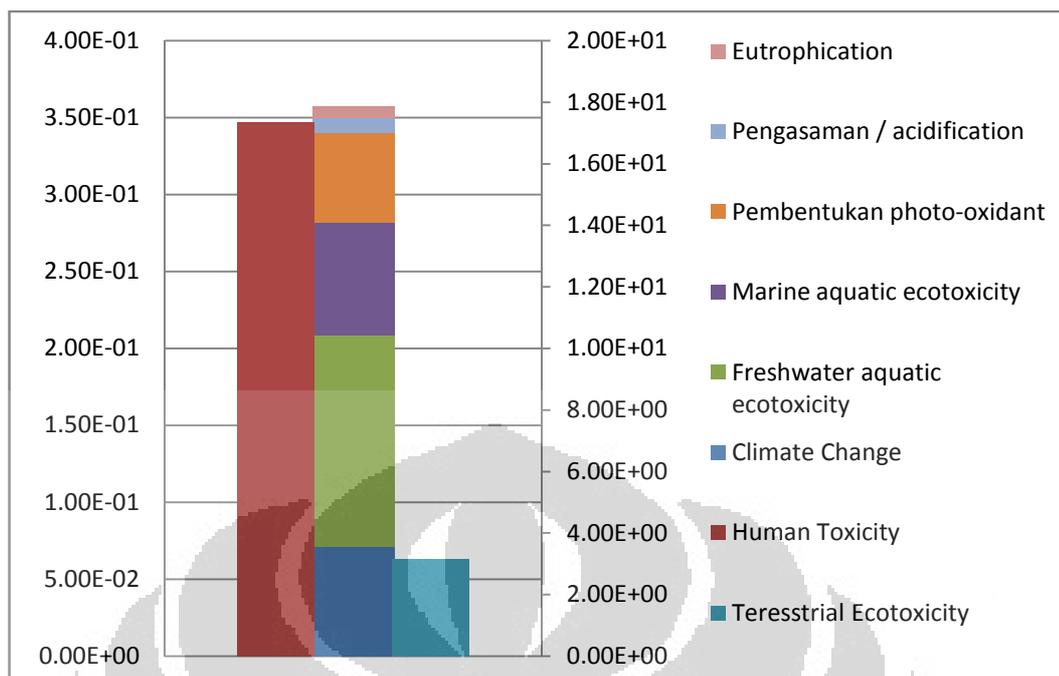
Kenaikan konsentrasi kadmium dalam tanah akan memperbesar penangkapan unsur tersebut oleh tanaman dan selanjutnya memasuki rantai makanan. Dari seluruh logam kadmium yang masuk ke dalam tubuh manusia, sebesar 6% melalui makanan. Dampak yang muncul apabila keracunan logam kadmium adalah tekanan darah tinggi, kerusakan ginjal, kehilangan sel darah merah, gangguan lambung serta kerapuhan tulang. Mangan dalam jumlah yang besar dapat menyebabkan keracunan dan kerusakan saraf pada manusia. Gejala keracunan mangan adalah halusinasi, pelupa serta keracunan saraf. Mangan juga dapat menyebabkan parkinson, emboli paru-paru dan brokitis. Dalam jangka panjang kelebihan mangan dapat mengakibatkan impoten. (Suharto, 2011)

4.2.2. Analisis Dampak Lingkungan per Kategori Dampak

Hasil pengolahan dampak lingkungan untuk per kategori dampak menunjukkan hasil sebagai berikut:

Tabel 4.5 Dampak Lingkungan per Kategori Dampak

No	Dampak	Total (yr)	% Grand Total
1	Penipisan sumber daya alam	4.07E+03	99.490%
2	Perubahan iklim / <i>climate change</i>	7.14E-02	0.002%
3	Dampak bahan beracun terhadap manusia / <i>Human toxicity</i>	1.74E+01	0.424%
4	Dampak bahan beracun pada ekosistem air tawar / <i>freshwater aquatic ecotoxicity</i>	1.37E-01	0.003%
5	Dampak bahan beracun pada ekosistem air laut / <i>marine aquatic ecotoxicity</i>	7.34E-02	0.002%
6	Dampak bahan beracun pada ekosistem terestrial / <i>terrestrial ecotoxicity</i>	3.15E+00	0.077%
7	Pembentukan <i>photo-oxidant</i>	5.86E-02	0.001%
8	Pengasaman / <i>acidification</i>	9.33E-03	0.000%
9	<i>Eutrophication</i> , dan	7.17E-03	0.000%
10	Bau / <i>odour</i>	-	
	Grand Total	4.09E+03	100%



Gambar 4.2 Dampak Lingkungan per Kategori Dampak

Dari hasil tabel dan grafik yang dihasilkan dapat dilihat bahwa terdapat tiga dampak yang secara signifikan pada keseluruhan proses dari rantai suplai industri biodiesel ini, yaitu :

- Penipisan sumber daya alam
- Dampak bahan beracun terhadap manusia / *Human toxicity*
- Dampak bahan beracun pada ekosistem terestrial / *terrestrial ecotoxicity*

4.2.2.1 Analisis Dampak Penipisan Sumber Daya Alam

Penipisan sumberdaya alam yang dieksploitasi dan kerusakan lingkungan mengancam keberadaan cadangan dari sumber daya alam, menurunnya tingkat keanekaragaman hayati (*biodiversity*), menurunnya kualitas dari sumber daya alam dan melemahnya batas toleransi (*resilience capacity*).

Dari hasil pengolahan data, didapatkan bahwa sumber dari dampak penipisan sumber daya alam seperti ditampilkan pada Tabel 4.6 sebagai berikut :

Tabel 4.6 Sumber Dampak Penipisan Sumber Daya Alam

Komponen	Substansi
<i>Polycrystalline silicone</i>	NaOH
	HCl
	H ₂ O
Multi wafer	Silicon Carbide (SiC)
	polyethylene glycol (PEG)
	dipropylene glycol monomethyl ether (DPM)
	adhesive
	ethyl acetate (C ₄ H ₈ O ₂)
	cyano (C N)
	tenside (Sodium Sulfate concentrated)
	Sodium hydroxide, 50% in H ₂ O
	Hydrochloric acid, (ClHO)
	Acetic acid (C ₂ H ₄ O ₂)
Sel Surya	Sodium Silicate (Na ₂ O ₅ Si ₂)
	Calcium Chloride (CaCl ₂)
	Isopropanol (C ₃ H ₈ O)
	Ethanol (C ₂ H ₆ O)
	Silane (H ₄ Si)
	Ammonia (NH ₃)
	NaOH
	Hydrogen Fluoride (HF)
Baterei	Polypropylene
	Lead Oxides (PbO)
	Sulfuric Acid (H ₂ O ₄ S)

Kontribusi Unit Proses terhadap Dampak Penipisan Sumber Daya Alam ditampilkan pada Tabel 4.7 sebagai berikut

Tabel 4.7 Dampak Penipisan Sumber Daya Alam per Unit Proses

Unit	Dampak Penipisan Sumber Daya Alam	%
Polycrystalline silicone	4.80E+01	1.18%
Multi Wafer	1.03E+03	25.22%
Sel Surya	1.71E+01	0.42%
Baterei	2.98E+03	73.18%
Total	4.07E+03	100%

Tabel 4.8 Kontribusi Aktivitas Tahunan pada Dampak Penipisan Sumber Alam

Tahun	<i>Polycrystalline silicone</i>	Multi wafer	Sel Surya	Baterei	Total (yr)	Normalized Impact
2013	7.12E-02	1.52E+00	2.53E-02	1.18E+00	2.80E+00	0.07%
2014	6.80E-01	1.46E+01	2.42E-01	1.13E+01	2.68E+01	0.66%
2015	1.19E+00	2.55E+01	4.23E-01	1.98E+01	4.69E+01	1.15%
2016	1.16E+00	2.48E+01	4.12E-01	2.05E+01	4.69E+01	1.15%
2017	1.16E+00	2.48E+01	4.12E-01	3.06E+01	5.70E+01	1.40%
2018	1.16E+00	2.48E+01	4.12E-01	3.91E+01	6.55E+01	1.61%
2019	1.16E+00	2.48E+01	4.12E-01	3.98E+01	6.62E+01	1.62%
2020	1.16E+00	2.48E+01	4.12E-01	4.99E+01	7.63E+01	1.87%
2021	1.55E+00	3.31E+01	5.50E-01	6.49E+01	1.00E+02	2.46%
2022	1.55E+00	3.31E+01	5.50E-01	6.55E+01	1.01E+02	2.47%
2023	1.55E+00	3.31E+01	5.50E-01	7.56E+01	1.11E+02	2.72%
2024	1.55E+00	3.31E+01	5.50E-01	9.06E+01	1.26E+02	3.09%
2025	1.55E+00	3.31E+01	5.50E-01	9.13E+01	1.27E+02	3.11%
2026	1.55E+00	3.31E+01	5.50E-01	1.01E+02	1.37E+02	3.35%
2027	1.55E+00	3.31E+01	5.50E-01	1.16E+02	1.52E+02	3.72%
2028	1.55E+00	3.31E+01	5.50E-01	1.17E+02	1.52E+02	3.74%
2029	1.55E+00	3.31E+01	5.50E-01	1.27E+02	1.62E+02	3.99%
2030	1.55E+00	3.31E+01	5.50E-01	1.42E+02	1.77E+02	4.35%
2031	3.10E+00	6.63E+01	1.10E+00	1.69E+02	2.39E+02	5.87%
2032	3.10E+00	6.63E+01	1.10E+00	1.79E+02	2.49E+02	6.12%
2033	3.10E+00	6.63E+01	1.10E+00	1.94E+02	2.64E+02	6.48%
2034	3.10E+00	6.63E+01	1.10E+00	2.20E+02	2.91E+02	7.13%
2035	3.10E+00	6.63E+01	1.10E+00	2.30E+02	3.01E+02	7.38%
2036	3.10E+00	6.63E+01	1.10E+00	2.45E+02	3.16E+02	7.75%
2037	3.10E+00	6.63E+01	1.10E+00	2.70E+02	3.41E+02	8.37%
2038	3.10E+00	6.63E+01	1.10E+00	2.70E+02	3.41E+02	8.37%
Total	4.80E+01	1.03E+03	1.71E+01	2.98E+03	4.07E+03	100%

Dari tabel diatas dapat dilihat penyebab utama dari penipisan sumber daya alam terdapat pada tahun 2036, 2037 dan 2038 dimana pada tahun ini jumlah baterai yang digunakan banyak dan menyumbang dampak lingkungan terbesar.

4.2.2.2 Analisis Dampak Bahan Beracun pada Manusia/ *Human Toxicity*

Dari hasil pengolahan data, didapatkan bahwa sumber dari dampak Bahan Beracun pada Manusia adalah sebagai berikut :

Tabel 4.9 Dampak Bahan Beracun pada Manusia/ *Human Toxicity* per Unit Proses

Komponen	Substansi
<i>Cell</i>	Hydrogen Chloride
	Hydrogen Fluoride
Module	Copper (Cu)
	tin (Sn)
	Lead
Inverter	Nikel
	Copper (Cu)
Baterai	Lead

Kontribusi Unit Proses terhadap Dampak Bahan Beracun pada Manusia adalah sebagai berikut

Tabel 4.10 Kontribusi Unit Proses terhadap Dampak Penipisan Bahan Beracun terhadap Manusia.

Unit	Dampak <i>Human Toxicity</i>	%
<i>Cell</i>	5.57E-03	0.03%
Module	3.68E+00	21.20%
Inverter	1.37E-04	0.00%
Baterai	1.37E+01	78.77%
Total	1.74E+01	100%

Tabel 4.11 Kontribusi Aktivitas Tahunan terhadap Dampak Penipisan Bahan Beracun terhadap Manusia.

Tahun	Cell	Module	Inverter	Baterei	Total	Normalized Impact
2013	8.26E-06	5.46E-03	2.04E-07	5.43E-03	1.09E-02	0%
2014	7.90E-05	5.21E-02	1.94E-06	5.19E-02	1.04E-01	1%
2015	1.38E-04	9.14E-02	3.41E-06	9.09E-02	1.82E-01	1%
2016	1.35E-04	8.89E-02	3.32E-06	9.39E-02	1.83E-01	1%
2017	1.35E-04	8.89E-02	3.32E-06	1.40E-01	2.29E-01	1%
2018	1.35E-04	8.89E-02	3.32E-06	1.79E-01	2.68E-01	2%
2019	1.35E-04	8.89E-02	3.32E-06	1.82E-01	2.71E-01	2%
2020	1.35E-04	8.89E-02	3.32E-06	2.29E-01	3.18E-01	2%
2021	1.80E-04	1.19E-01	4.43E-06	2.97E-01	4.16E-01	2%
2022	1.80E-04	1.19E-01	4.43E-06	3.00E-01	4.19E-01	2%
2023	1.80E-04	1.19E-01	4.43E-06	3.47E-01	4.66E-01	3%
2024	1.80E-04	1.19E-01	4.43E-06	4.16E-01	5.34E-01	3%
2025	1.80E-04	1.19E-01	4.43E-06	4.19E-01	5.37E-01	3%
2026	1.80E-04	1.19E-01	4.43E-06	4.65E-01	5.84E-01	3%
2027	1.80E-04	1.19E-01	4.43E-06	5.34E-01	6.53E-01	4%
2028	1.80E-04	1.19E-01	4.43E-06	5.37E-01	6.56E-01	4%
2029	1.80E-04	1.19E-01	4.43E-06	5.83E-01	7.02E-01	4%
2030	1.80E-04	1.19E-01	4.43E-06	6.52E-01	7.71E-01	4%
2031	3.59E-04	2.37E-01	8.86E-06	7.73E-01	1.01E+00	6%
2032	3.59E-04	2.37E-01	8.86E-06	8.19E-01	1.06E+00	6%
2033	3.59E-04	2.37E-01	8.86E-06	8.88E-01	1.13E+00	6%
2034	3.59E-04	2.37E-01	8.86E-06	1.01E+00	1.25E+00	7%
2035	3.59E-04	2.37E-01	8.86E-06	1.06E+00	1.29E+00	7%
2036	3.59E-04	2.37E-01	8.86E-06	1.12E+00	1.36E+00	8%
2037	3.59E-04	2.37E-01	8.86E-06	1.24E+00	1.48E+00	9%
2038	3.59E-04	2.37E-01	8.86E-06	1.24E+00	1.48E+00	9%
Total	5.57E-03	3.68E+00	1.37E-04	1.37E+01	1.74E+01	100%

Dari tabel diatas dapat dilihat penyebab utama dari dampak bahan beracun terhadap manusia terdapat pada tahun 2037 dan 2038 dimana pada tahun ini jumlah baterai yang digunakan besar dan menyumbang dampak lingkungan terbesar.

4.2.2.3 Analisis Dampak Bahan Beracun pada Ekosistem Terrestrial / *Terrestrial Ecotoxicity*

Dari hasil pengolahan data, didapatkan bahwa sumber dari dampak Beracun pada Ekosistem Terrestrial ditampilkan pada Tabel 4.12, Tabel 4.13 dan Tabel 4.14 sebagai berikut.

Tabel 4.12 Dampak Bahan Beracun pada Ekosistem Terrestrial per Unit Proses

Komponen	Substansi
Module	Copper (Cu)
	tin (Sn)
	Lead
	Nickel
Inverter	Copper (Cu)
Baterai	Lead

Tabel 4.13 Kontribusi Dampak Bahan Beracun pada Ekosistem Terrestrial per Unit Proses

Unit	Dampak <i>Terrestrial Ecotoxicity</i>	%
Modul Surya	9.62E-01	30.53%
Inverter	3.42E-03	0.11%
Baterai	2.19E+00	69.36%
Total	3.15E+00	100.00%

Dampak Bahan beracun pada ekosistem terrestrial disebabkan oleh 3 unit komponen yaitu Baterai (69.36%), diikuti oleh modul surya (30.53%) dan inverter berkontribusi sebesar 0.11% terhadap dampak lingkungan yang dihasilkan sistem PLTS pada ekosistem terrestrial.

Tabel 4.14 Kontribusi Aktivitas Tahunan Dampak Bahan Beracun pada Ekosistem Terrestrial per Unit Proses

Tahun	Module	Inverter	Baterei	Total	Normalized Impact
2013	1.43E-03	5.07E-06	8.68E-04	2.30E-03	0.07%
2014	1.36E-02	4.84E-05	8.30E-03	2.20E-02	0.70%
2015	2.39E-02	8.49E-05	1.45E-02	3.85E-02	1.22%
2016	2.33E-02	8.26E-05	1.50E-02	3.83E-02	1.22%
2017	2.33E-02	8.26E-05	2.24E-02	4.58E-02	1.45%
2018	2.33E-02	8.26E-05	2.87E-02	5.20E-02	1.65%
2019	2.33E-02	8.26E-05	2.92E-02	5.25E-02	1.67%
2020	2.33E-02	8.26E-05	3.66E-02	5.99E-02	1.90%
2021	3.10E-02	1.10E-04	4.76E-02	7.87E-02	2.50%
2022	3.10E-02	1.10E-04	4.80E-02	7.92E-02	2.51%
2023	3.10E-02	1.10E-04	5.55E-02	8.66E-02	2.75%
2024	3.10E-02	1.10E-04	6.65E-02	9.76E-02	3.10%
2025	3.10E-02	1.10E-04	6.69E-02	9.81E-02	3.11%
2026	3.10E-02	1.10E-04	7.44E-02	1.06E-01	3.35%
2027	3.10E-02	1.10E-04	8.53E-02	1.16E-01	3.70%
2028	3.10E-02	1.10E-04	8.58E-02	1.17E-01	3.71%
2029	3.10E-02	1.10E-04	9.32E-02	1.24E-01	3.95%
2030	3.10E-02	1.10E-04	1.04E-01	1.35E-01	4.30%
2031	6.21E-02	2.21E-04	1.24E-01	1.86E-01	5.90%
2032	6.21E-02	2.21E-04	1.31E-01	1.93E-01	6.13%
2033	6.21E-02	2.21E-04	1.42E-01	2.04E-01	6.48%
2034	6.21E-02	2.21E-04	1.61E-01	2.24E-01	7.10%
2035	6.21E-02	2.21E-04	1.69E-01	2.31E-01	7.33%
2036	6.21E-02	2.21E-04	1.80E-01	2.42E-01	7.68%
2037	6.21E-02	2.21E-04	1.98E-01	2.61E-01	8.27%
2038	6.21E-02	2.21E-04	1.98E-01	2.61E-01	8.27%
Total	9.62E-01	3.42E-03	2.19E+00	3.15E+00	100.00%

4.2.2.4 Analisis Dampak Bau / *Maladourous Air*

Dampak bau yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga surya berasal dari pembuatan sel surya. Substansi yang berkontribusi terhadap bau adalah asam asetat dan amoniak. Dampak bau ini sendiri bersifat lokal dan sesaat dan tidak tersedia faktor normalisasi. Oleh karena itu, dampak bau tidak dilanjutkan ke

tahap normalisasi dan tidak dapat dibandingkan dengan dampak lingkungan lainnya. Meskipun begitu dampak bau juga perlu diperhatikan karena dapat mengganggu kesehatan manusia jika tidak diberikan perhatian.

Tabel 4.15 Dampak Bahan Beracun pada Bau (*Maladourous Air*)

	Substansi	Jumlah	Unit	1/OTV (dlm m ³ /kg)	1/OTV (dalam m ³)
1	Acetic acid (C ₂ H ₄ O ₂)	5.81E-02	kg	1.64E+07	9.53E+05
2	ammoniak (NH ₃)	6.30E-03	kg	1.00E+06	6.30E+03
	TOTAL				9.59E+05

4.3. Analisis Hasil *Energy Pay Back Time* (EPBT)

Hasil perhitungan EPBT menunjukkan bahwa selama 25 tahun beroperasi di Indonesia dengan radiasi surya 4.8 kWh/m²/hari,, EPBT yang didapat adalah sebesar 1.63 tahun. Nilai EPBT 1.63 tahun memberikan pengertian dibutuhkan waktu 1.63 tahun PLTS memproduksi listrik untuk mengkompensasikan energi masukan selama siklus hidup PLTS. Hal ini disebabkan karena letak Indonesia yang diuntungkan karena terletak di lintasan khatulistiwa sehingga menyebabkan Indonesia menerima intensitas matahari yang cukup tinggi sebesar 4800 Wh/m²/hari dan cenderung stabil sepanjang tahun. Jadi, dalam kondisi geografis di Indonesia, PLTS akan menghasilkan energi berkali-kali lipat lebih dari energi yang diperlukan untuk memproduksi panel surya dan komponennya.

Pada Tabel 2.13 diperlihatkan nilai EPBT dari PLTS di berbagai kawasan belahan dunia lainnya. Literatur menunjukkan bahwa nilai EPBT yang dihasilkan di Indonesia jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan negara lainnya. Sehingga *Energy Return Ratio* (ERF) yang dihasilkan pun jauh lebih besar dari negara lain. Dengan umur operasi PLTS selama 25 tahun, maka PLTS dapat menghasilkan energi 15x lebih banyak dari yang dibutuhkan.

Perbedaan nilai yang cukup besar dengan literatur juga dapat disebabkan karena perbedaan dalam menghitung energi yang dibutuhkan untuk setiap sistem sel surya. Ketidakpastian yang cukup tinggi dalam penghitungan disebabkan pula

karena sedikitnya data dan rendahnya reliabilitas informasi yang tersedia tentang material komponen yang dibutuhkan untuk memproduksi komponen komponen sistem sel surya.

4.4. Analisis Perbandingan Emisi dengan Pembangkit Listrik Konvensional

Berikut adalah hasil perhitungan emisi pembangkit listrik konvensional (Batu Bara, Minyak, Gas LNG) dibandingkan dengan listrik yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga surya. Emisi CO₂ dari sistem energi sel surya di asumsikan memiliki usia ekonomis 25 tahun begitu juga dengan pembangkit listrik lainnya. Total emisi CO₂ yang dihasilkan PLTS selama 25 tahun pemakaian adalah sebesar 2.76E+10 kg C. Angka tersebut memberikan kontribusi sebesar 2.85% dari total keseluruhan emisi yang dihasilkan. Emisi CO₂ paling banyak dihasilkan oleh pembangkit listrik dengan batu bara sebagai catu daya dimana pembakaran batu bara menghasilkan 3.92E+11 kg C dan berkontribusi sebesar 40.51 % terhadap keseluruhan emisi. Penggunaan PLTS untuk menggantikan pembangkit listrik konvensional akan mengurangi emisi CO₂.

Penggunaan PLTS selama 25 tahun dengan input produksi listrik yang sama dapat menurunkan emisi CO₂ hingga; 93 % jika dibandingkan dengan pembangkit listrik bertenaga batubara, 90% jika dibandingkan dengan pembangkit listrik bertenaga minyak bumi, 89% jika dibandingkan dengan pembangkit listrik bertenaga Gas LNG.

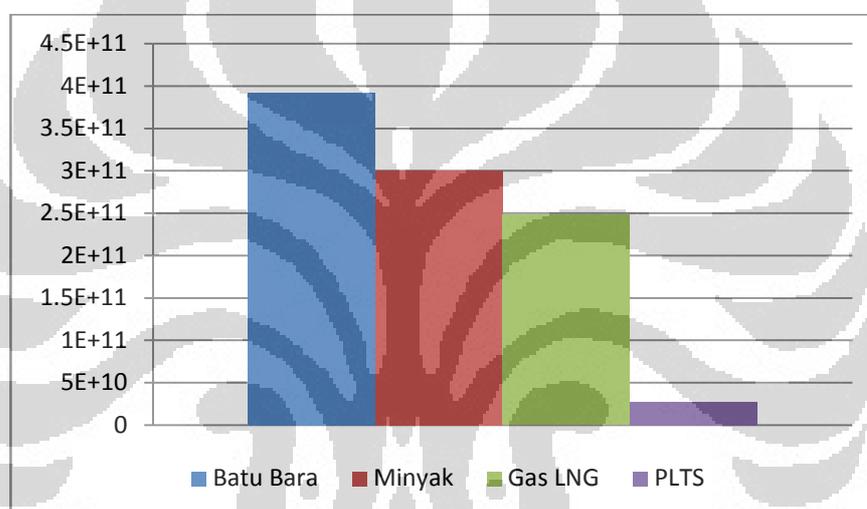
Seiring dengan perkembangan teknologi dan penelitian yang dilakukan mengenai sistem sel surya, maka tingkat efisiensi dari sel surya akan semakin meningkat. Hal tersebut akan mempengaruhi konsumsi CO₂ pada PLTS. Dengan intensifikasi penggunaan PLTS maka hal tersebut dapat membantu upaya pemerintah dalam menurunkan emisi gas rumah kaca dan emisi CO₂ utamanya.

Berikut merupakan hasil perhitungan emisi CO₂ pada pembangkit listrik konvensional seperti yang ditampilkan pada Tabel 4.16 sebagai berikut :

Tabel 4.16 Kontribusi emisi CO₂ per Pembangkit Listrik

Emisi CO ₂ (dlm kgC)	Total	% Grand Total
Batu Bara	3.92E+11	40.51%
Minyak	3E+11	31.00%
Gas LNG	2.48E+11	25.63%
PLTS	2.76E+10	2.85%
Total	9.676E+11	100.00%

Berikut adalah grafik perbandingan emisi CO₂ yang dihasilkan setiap pembangkit listrik selama 25 tahun usia ekonomis.

Gambar 4.3 Grafik emisi CO₂ per Pembangkit Listrik

4.5. Analisis Dampak Lingkungan Dengan atau Tanpa Baterai

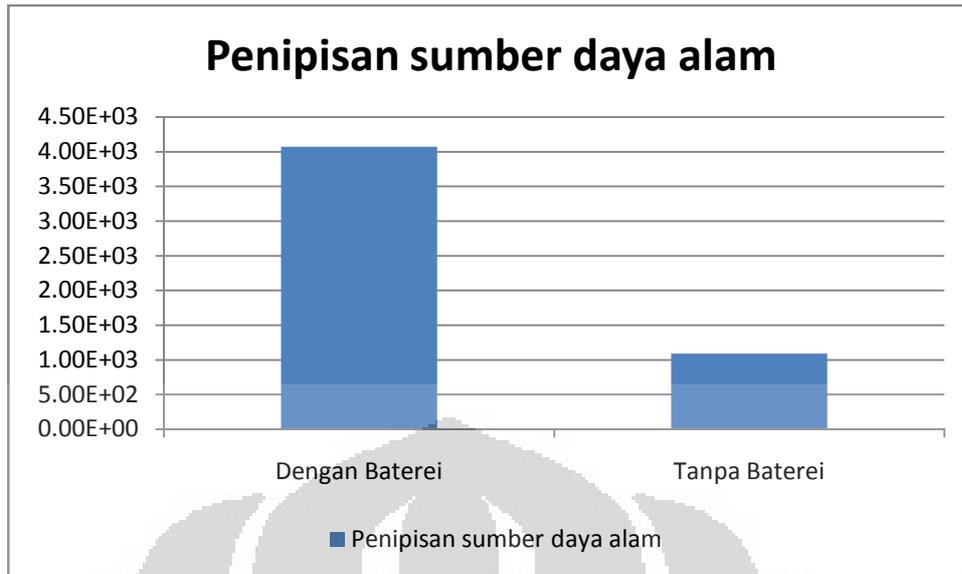
Penggunaan baterai masih menjadi suatu isu dampak lingkungan pada penggunaan PLTS. Hal ini dikarenakan baterai memberikan kontribusi paling besar pada keseluruhan dampak. Umur baterai yang cenderung pendek dan kandungan tinggi akan substansi-substansi tertentu masih menjadi tantangan. Pada Grafik dibawah memperlihatkan bawah penggunaan baterai berpengaruh cukup signifikan pada beberapa dampak. Tujuh dari sembilan indikator dampak lingkungan berubah karena dipengaruhi oleh penggunaan baterai sebagai *back up*

system. Dampak lingkungan yang berubah karena ada atau tidaknya penggunaan baterai adalah sebagai berikut :

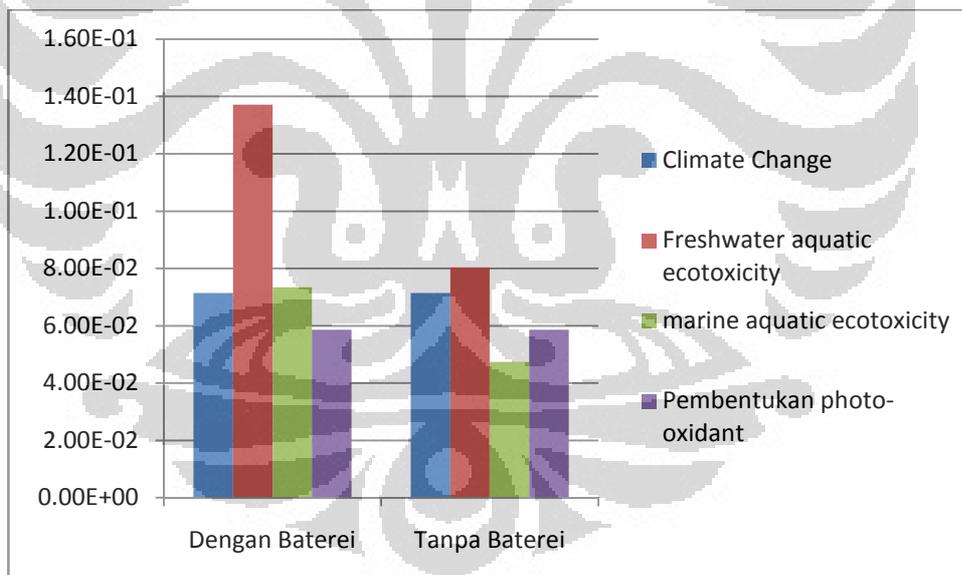
- Dampak penipisan sumber daya alam
- Dampak perubahan iklim
- Dampak Bahan beracun terhadap manusia
- Dampak bahan beracun pada ekosistem air tawar / *freshwater aquatic ecotoxicity*
- Dampak bahan beracun pada ekosistem air laut / *marine aquatic ecotoxicity*
- Dampak bahan beracun pada ekosistem terestrial / *terrestrial ecotoxicity*
- *Eutrophication*

Tabel 4.17 Hasil Perhitungan Dampak Lingkungan Skenario tanpa Baterai

No	Dampak	Total Dampak (yr)	
		Dengan Baterai	Tanpa Baterai
1	Penipisan sumber daya alam	4.07E+03	1.09E+03
2	Perubahan iklim / <i>climate change</i>	7.14E-02	7.14E-02
3	Dampak bahan beracun terhadap manusia / <i>Human toxicity</i>	1.74E+01	3.69E+00
4	Dampak bahan beracun pada ekosistem air tawar / <i>freshwater aquatic ecotoxicity</i>	1.37E-01	8.03E-02
5	Dampak bahan beracun pada ekosistem air laut / <i>marine aquatic ecotoxicity</i>	7.34E-02	4.74E-02
6	Dampak bahan beracun pada ekosistem terestrial / <i>terrestrial ecotoxicity</i>	3.15E+00	9.66E-01
7	Pembentukan <i>photo-oxidant</i>	5.86E-02	5.86E-02
8	Pengasaman / <i>acidification</i>	9.33E-03	9.33E-03
9	<i>Eutrophication</i> , dan	7.17E-03	7.17E-03

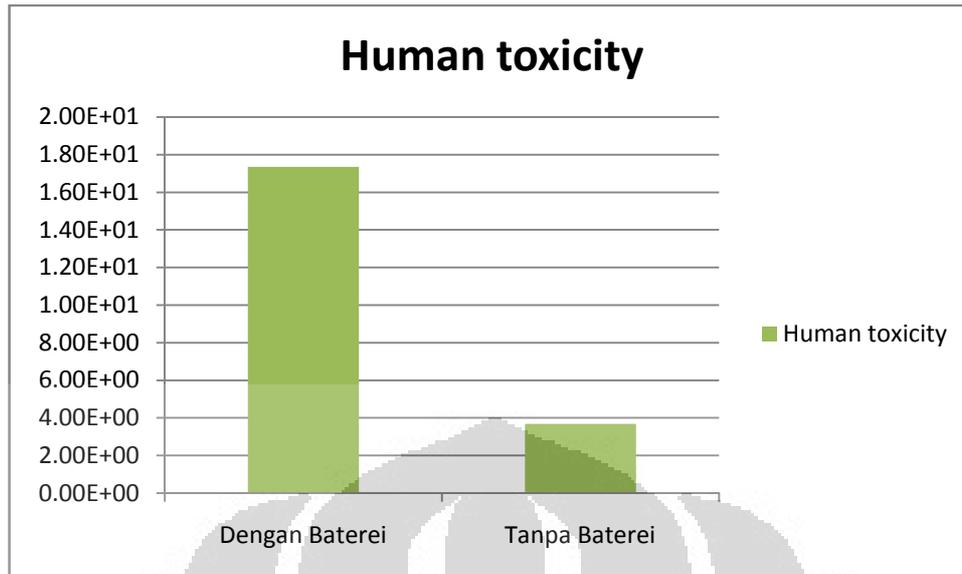


Gambar 4.4 Grafik Dampak Penipisan Sumber Daya Alam dengan menggunakan baterai dan tanpa baterai

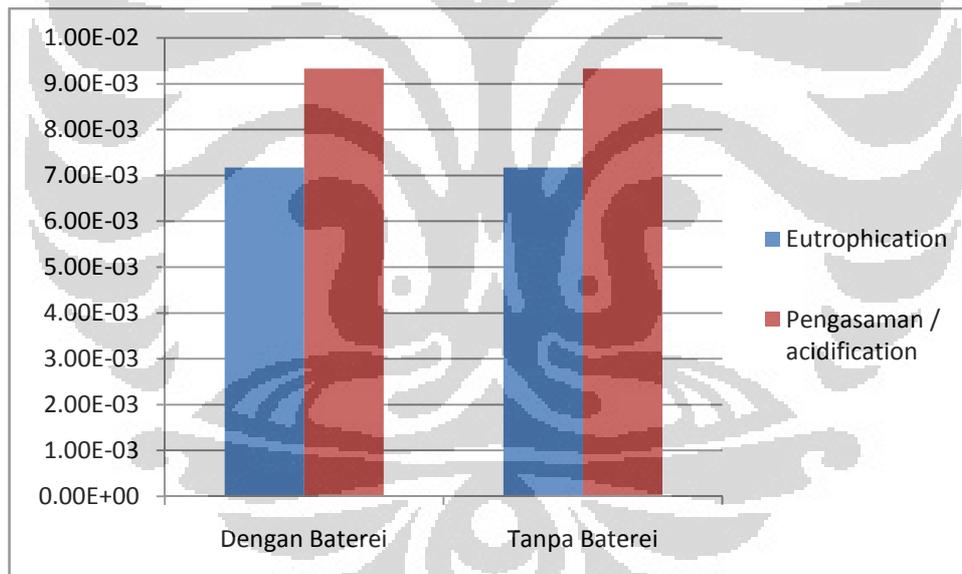


Gambar 4.5 Grafik Hasil perhitungan Dampak Lingkungan dengan menggunakan baterai dan tanpa baterai

Dari hasil grafik diatas, dapat dilihat bahwa penggunaan baterai mempengaruhi hampir semua dampak lingkungan dan berpengaruh signifikan.



Gambar 4.6 Grafik Hasil perhitungan Dampak Lingkungan Bahan Beracun pada Manusia dengan menggunakan baterai dan tanpa baterai



Gambar 4.7 Grafik Hasil perhitungan Dampak Lingkungan *Eutrophication* dan *Acidification* dengan menggunakan baterai dan tanpa baterai

4.6. Analisis Dampak Lingkungan dengan Baterai Daur Ulang

Skenario yang diberlakukan adalah penggunaan baterai daur ulang untuk mengurangi dampak lingkungan yang dihasilkan baterai. Tingkat persentase baterai yang digunakan untuk di proses kembali adalah 90 % dan 0%. Pada

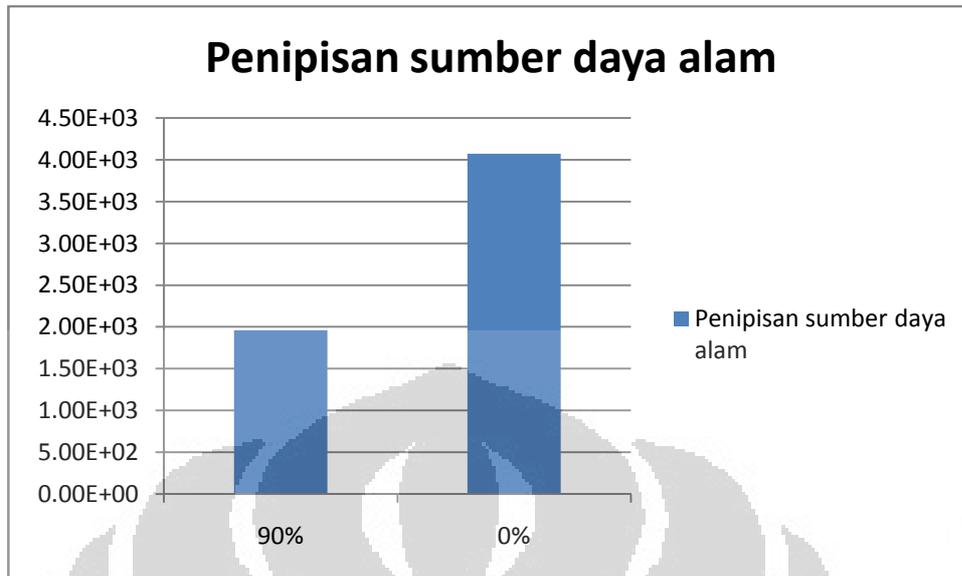
skenario pertama sebanyak 90% dari jumlah baterai akan digunakan kembali untuk siklus berikutnya (setiap 4 tahun usia ekonomis baterai). Hanya 10% dari jumlah kebutuhan baterai yang diperbaharui. Sedangkan untuk 0% merupakan *baseline* model dimana setiap baterai yang habis usia ekonomisnya akan digantikan dengan yang baru dan yang lama dibuang ke TPA (*landfill*).

Jika sistem daur ulang baterai dapat berjalan dengan baik maka hal ini dapat menurunkan tingkat dampak lingkungan yang dihasilkan akibat penggunaan baterai. Terlebih lagi penggunaan baterai sebagai catu daya pendukung sistem PLTS masih banyak digunakan di negara-negara berkembang terutama oleh daerah yang masih memerlukan pasokan listrik. Namun sayang sistem daur ulang di negara berkembang masih belum berjalan sesuai dengan yang diharapkan.

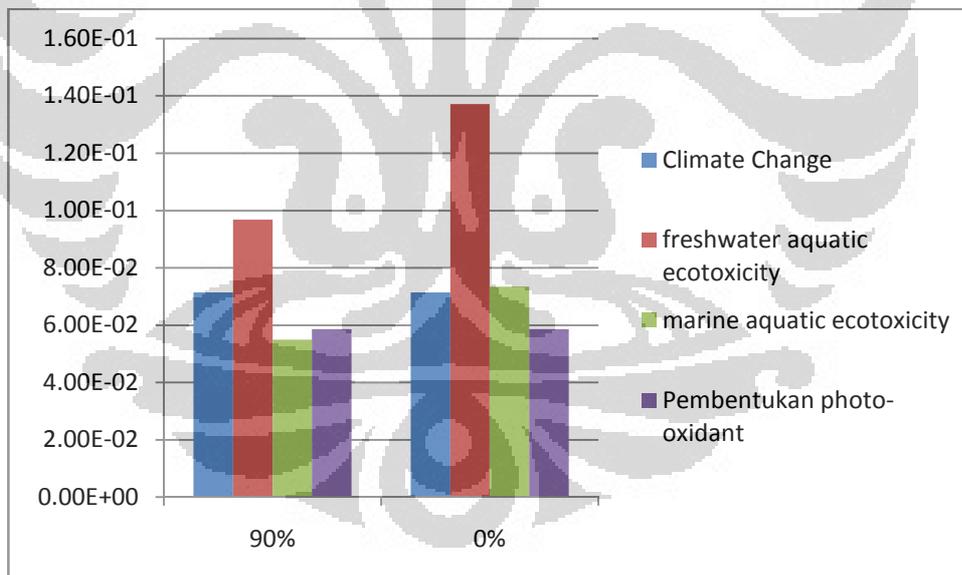
Berikut adalah tabel hasil perhitungan dampak lingkungan Skenario Baterai Daurl Ulang ditampilkan pada Tabel 4.18

Tabel 4.18 Hasil Perhitungan Dampak Lingkungan Skenario Baterai Daurl Ulang

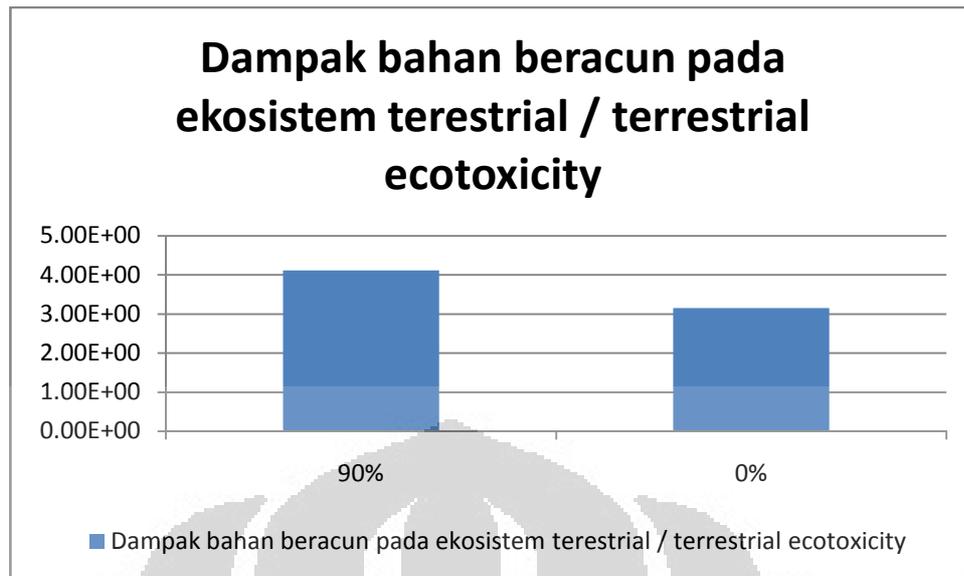
No	Dampak	Total Dampak (yr)	
		90%	0%
1	Penipisan sumber daya alam	1.96E+03	4.07E+03
2	Perubahan iklim / <i>climate change</i>	7.14E-02	7.14E-02
3	Dampak bahan beracun terhadap manusia / <i>Human toxicity</i>	7.67E+00	1.74E+01
4	Dampak bahan beracun pada ekosistem air tawar / <i>freshwater aquatic ecotoxicity</i>	9.68E-02	1.37E-01
5	Dampak bahan beracun pada ekosistem air laut / <i>marine aquatic ecotoxicity</i>	5.49E-02	7.34E-02
6	Dampak bahan beracun pada ekosistem terestrial / <i>terrestrial ecotoxicity</i>	4.12E+00	3.15E+00
7	Pembentukan <i>photo-oxidant</i>	5.86E-02	5.86E-02
8	Pengasaman / <i>acidification</i>	9.33E-03	9.33E-03
9	<i>Eutrophication</i> , dan	7.17E-03	7.17E-03



Gambar 4.8 Grafik Dampak Penipisan Sumber Daya Alam dengan skenario baterai daur ulang



Gambar 4.9 Grafik Dampak Lingkungan dengan skenario baterai daur ulang



Gambar 4.10 Grafik Dampak Bahan Beracun Pada Ekosistem Terestrial Dengan Skenario Baterai Daur Ulang

Bisa dilihat kembali perbedaan antara hasil pengukuran kedua dampak tersebut, hanya dua kategori dampak yang tidak berpengaruh terhadap skenario daur ulang baterai yaitu :

- Perubahan iklim / *climate change*
- Pembentukan *photo oxidant*

Dengan penggunaan baterai daur ulang akan mengurangi penggunaan bahan baku yang baru, mengurangi penggunaan energi, mengurangi polusi, kerusakan lahan, dan emisi gas rumah kaca jika dibandingkan dengan proses pembuatan baterai baru.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Pada perhitungan dampak lingkungan untuk penggunaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya selama 25 tahun dari tahun 2013 – 2038 dengan menggunakan modul surya jenis *polychristaline* didapatkan hasil sebagai berikut :

- a. Baterai merupakan unit proses yang menyumbang dampak lingkungan terbesar pada profil lingkungan penggunaan PLTS sebesar 73.20% diikuti oleh pembuatan multi wafer sebesar 25.09% dan *polycrystalline silicone* sebesar 1.17%..
- b. Dampak yang paling signifikan berpengaruh dan berkontribusi pada dampak lingkungan adalah dampak penipisan sumber daya alam (*abiotic depletion potential*) dengan kontribusi sebesar 99.490%, diikuti dampak bahan beracun pada manusia / *human toxicity* sebesar 0,424%
- c. Dampak penipisan sumber daya alam yang signifikan tersebut disebabkan karena kandungan *lead* yang cukup besar pada baterai
- d. *Energy Pay Back Time* (EPBT) yang dihasilkan oleh PLTS dengan masa operasi 25 tahun adalah sebesar 1.63 tahun dengan *Energy Return Factor* (ERF) sebesar 15.3374 kali.

Dengan beberapa uji skenario terhadap perhitungan dampak lingkungan dan uji perbandingan kandungan emisi dari beberapa pembangkit listrik bertenaga konvensional maka dapat disimpulkan :

- a. Penggunaan PLTS selama 25 tahun dengan input produksi listrik yang sama dapat menurunkan emisi CO₂ hingga; 93 % jika dibandingkan dengan pembangkit listrik bertenaga batubara, 90% jika dibandingkan dengan pembangkit listrik bertenaga minyak bumi, 89% jika dibandingkan dengan pembangkit listrik bertenaga Gas LNG.
- b. Semakin sedikit penggunaan baterai maka dampak lingkungan yang dihasilkan juga semakin kecil

- c. Penggunaan baterai yang didaur ulang juga akan mengurangi dampak lingkungan.

5.2. Saran

Sebagai saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebaiknya peneliti memperhatikan dampak eksternal yang terjadi diakibatkan penggunaan PLTS. Selain itu, pada penelitian ini hanya membahas dampak lingkungan dari penggunaan PLTS, sedangkan pada kenyataannya dalam menganalisis suatu sistem atau produk diperlukan pemikiran dari berbagai perspektif, salah satunya adalah dari sudut pandang keekonomian. Oleh sebab itu, diperlukan penelitian tentang penggunaan PLTS dari sudut pandang keekonomian. Salah satu *tools* yang dapat digunakan adalah *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) yang merupakan pengembangan dari LCA. Selain itu perlu dilakukan perbandingan dampak keseluruhan dari penggunaan PLTS dengan pembangkit listrik tenaga fosil lainnya mengingat keterbatasan dari penelitian ini hanya membandingkan dari sisi emisi yang dikeluarkan.

Berdasarkan pembahasan mengenai analisis dampak lingkungan dari penggunaan pembangkit listrik tenaga surya maka beberapa saran yang dapat diajukan adalah :

- a. Jika ingin menggunakan pembangkit listrik tenaga surya maka sebaiknya menggunakan baterai yang memiliki umur ekonomis tinggi dan menggunakan baterai tersebut dengan benar.
- b. Perlu dilakukannya suatu sistem dan mekanisme daur ulang baterai yang baik sehingga baterai-baterai yang telah habis masa ekonomisnya dapat diproses kembali untuk tetap bisa digunakan.

DAFTAR REFERENSI

- Alsema, E.A. (2000). *Environmental Life Cycle Assessment of Solar Home System*. The Netherlands : Utrecht University.
- Alsema, Erik., & Nieuwlaar, Evert. (Desember, 1997). *Environmental Aspects of PV Power Systems*. IEA PVPS Task 1 Workshop Report no. 97072. Utrecht, The Netherlands
- Alsema, E.A., & Phylipsen, G.J.M. (1995). *Environmental Life-Cycle Assessment of Multicrystalline Silicon Solar Cell Modules*. The Netherlands : Utrecht University.
- Bappenas. (2011). *Pedoman Penyusunan Rencana Aksi Daerah Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca*. Jakarta : BAPPENAS.
- Battisti, Ricardo., & Corrado, Annalisa. (2003). *Evaluation Of Technical Improvements Of Photovoltaic Systems Through Life Cycle Assessment Methodology*. Energy 30 (2005) 952–967. Rome : University of Roma
- Bernal – Augustin, Jose L. (2005). *Economical And Environmental Analysis Of Grid Connected Photovoltaic Systems In Spain*. Zaragoza : University of Zaragoza.
- Christian, Aron. (2011). *Desain Sistem Photovoltaic (PV) Terhubung Dengan Grid Sebagai Filter Aktif*. Surabaya : ITS.
- Curran, Mary Ann. (1996). *Environmental Life Cycle Assessment*. New York : McGraw – Hill.
- Dewan Energi Nasional. (2010). *Naskah Kebijakan Energi Nasional 2010 -2050*. Jakarta : Dewan Energi Nasional.
- EBTKE KESDM. (2012). *Road Map Pengembangan Energi Surya Sampai 2015*. Jakarta : Penulis.
- Fisher, Karen., Wallén, Erika., Paul, Pieter., & Collins, Michael. (2006). *Final Report for Publication : Battery Waste Management Life Cycle Assessment*. Environmental Resources Management Limited,
- Guinee, Jeroen B et al. (2002). *Handbook of Life Cycle Assessment :Operational Guide to The ISO Standards*. The Netherlands : Kluwer Academic Publishers.
- Rydh, Carl Johan., & Sanden, Bjorn A. (2004). *Energy Analysis of Batteries in Photovoltaic Systems. Part I: Performance and Energy Requirements*. *Energy Conversion and Management* 46 (2005) 1957–1979.

- Solar Radiation Map of Australia. <http://aussiervproducts.com.au>, diakses pada tanggal 10 Maret 2012.
- Sherwani,A.F., Usmani J.A., & Varun. (2009). Life Cycle Assessment Of Solar PV Based Electricity Generation Systems: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 540–544*.
- Sullivan, J.L., & Gaines, L.(2010). *A Review of Battery Life-Cycle Analysis: State of Knowledge and Critical Needs*. Illinois : Center for Transportation Research Energy Systems Division, Argonne National Laboratory.
- Kadir, Abdul. (1982). *Energi*. Jakarta : UI Press.
- Moharil, Ravindra M., & Kulkarni, Prakash S. (2007). A Case Study Of Solar Photovoltaic Power System At Sagardeep Island, India.
- Niewlaar, Evert., & Alsema, Erik. (1997, Juni). *Energy Pay-Back Time (EPBT) And CO₂ Mitigation Potential*.
- Nishimura, A., Hayashi, Y., Tanaka, K., Hirota, M., Kato, S., Ito, M., Araki, K., Hu, E.J.. (2009). Life Cycle Assessment and Evaluation of Energy Payback Time on High-Concentration Photovoltaic Power Generation System. *Applied Energy*, 87 (2010) 2797 – 2807.
- Nugroho, Hanan. (2011). *A Mosaic Of Indonesian Energy Policy*. Bogor : IPB Press.
- Pacca, Sergio., Sivaraman, Deepak., & Keoleian, Gregory A. (2007). Parameters Affecting The Life Cycle Performance of PV Technologies and Systems. *Energy Policy 35 (2007) 3316–3326*.
- PLN. (2010). *PLN Statistics 2010*. Jakarta : PLN.
- Putranto, Agung. (2006). *Pengendali Bateri dan Modul Sel Surya untuk Sistem Penyiram Tanaman Otomatis*. Depok : Universitas Indonesia.
- Quansah, David Ato. (2008). *Comparative Study Of Electricity Storage Batteries For Solar Photovoltaic Home Systems*. Kumasi, Ghana : Kwame Nkrumah University of Science And Technology.
- Rahardjo, Irawan. (2005). *Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Di Indonesia*. Jakarta : BPPT.
- Saladin, Isfah. (2009). *Simulasi Pengontrolan Sistem PLTS 50 WP dengan Matlab*. Depok : Universitas Indonesia.
- Stoppato, A. (2006). Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity Generation. *Energy 33 (2008) 224–232*. www.elsevier.com.
- Suharto, Ign. (2011). *Limbah Kimia Dalam Pencemaran Udara dan Air*. Bandung : Penerbit ANDI

UNEP. (2012). *UNEP Year Book 2012 Emerging Issue In Our Global Environment*. Nairobi : UNEP.

Yamada, Yoichi., Komiyama, Hiroshi., Kato, Kazuhiko., & Inaba, Atsushi. (1995). Evaluation of Photovoltaic Energy Systems in Terms of Economics, Energy and Co, Emissions. *Energy Conversion Management Vol. 36, No. 6-9, pp. 819-822*.

