lontar digital

EKOLOGI INDUSTRI

Strategi Menuju Industri Berkelanjutan

Emelia Sari
Astri Rinanti
Indah Permata Sari
Tiena Gustina Amran
Wawan Kurniawan
Annisa Dewi Akbari

EKOLOGI INDUSTRI

Strategi Menuju Industri Berkelanjutan

Emelia Sari
Astri Rinanti
Indah Permata Sari
Tiena Gustina Amran
Wawan Kurniawan
Annisa Dewi Akbari

PT. Lontar Digital Asia

EKOLOGI INDUSTRI

Strategi Menuju Industri Berkelanjutan

Penulis:
Emelia Sari, Astri Rinanti, Indah Permata Sari
Tiena Gustina Amran, Wawan Kurniawan, Annisa Dewi Akbari

Editor:
Rizky Tifa Amalia, Anita Khairunnisa

Desain Sampul dan Tata Letak:
Athalia Zahra

Diterbitkan oleh:
PT Lontar Digital Asia
www.bitread.co.id
admbitreada@gmail.com

ISBN: 978-623-224-816-8
ISBN-E: 978-623-224-817-5
Surel: info@bitread.id
Facebook: BitreadID
Twiter: BITREAD_ID
Instagram: bitread_id

Anggota IKAPI No. 556/DKI/2018

Hak Cipta dilindungi oleh Undang-Undang.
Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit.

Daftar Isi

BAB 1 TRANSFORMASI TEKNOLOGI DAN KEBERLANJUTAN DARI REVOLUSI INDUSTRI KE *SOCIETY* 5.0 **1**
Rencana Pembelajaran 1
1.1 Sejarah dan Perkembangan Teknologi 2
1.2 Pengertian dan Konsep *Sustainable Development Goals* (SDGs) 6
1.3 Pengaruh Teknologi Terhadap Ekonomi, Sosial, dan Lingkungan 18
1.5 Pertanyaan Konsep dan Studi Kasus 28
Referensi 31

BAB 2 PERANCANGAN PRODUK BERKELANJUTAN (*SUSTAINABLE PRODUCT DESIGN*) **35**
Rencana Pembelajaran 35
2.1 Hubungan *Sustainable Development* dengan *Product Design* 36
2.2 Konsep *Sustainable Product Design* 38
2.3 Faktor Pendorong (*Drivers*) dan Penghambat (*Barriers*) Sustainable *Product Design* 44
2.4 *Green Society* 46
2.5 Studi Kasus *Sustainable Product Design* 50
2.6 Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Terkait *Sustainable Product Design* 59
2.7 Pertanyaan Konsep dan Studi Kasus 64
Referensi 68

BAB 3 *MATERIAL FLOW ANALYSIS* (ANALISIS BAHAN ALIRAN) **71**
Rencana Pembelajaran 71
3.1 Definisi dan Konsep Analisis Aliran Material 72
3.2 Sejarah dan Perkembangan MFA 75
3.3 Tujuan Penerapan MFA dalam Industri 78
3.4 Manfaat Penerapan MFA dalam Industri 79
3.5 Konsep Dasar *Material Flow* 80
3.6 Tahapan-tahapan MFA 86
3.7 Membangun Model MFA dengan STAN 93
3.8 Studi Kasus MFA di Industri 108
Referensi 116

BAB 4 *LIFE CYCLE ASSESSMENT* **119**
Rencana Pembelajaran 119
4.1 Sejarah Singkat *Life Cycle Assessment* 120
4.2 Konsep Dasar *Life Cycle Assessment* 122
4.3 Peran LCA di Berbagai Sektor Industri 134
4.4 Membangun Model LCA dengan Simapro: Studi Kasus 151
4.5 Contoh Studi LCA di Berbagai Industri 163
Referensi 183
BAB 5 ISO 14000 **187**
Rencana Pembelajaran 187
5.1 Permasalahan Lingkungan Dunia 188
5.2 Organisasi ISO 191
5.3 Perbedaan ISO 14000 dan ISO 14001 193
5.4 ISO 14000 dan *Siklus Plan, Do, Check, Action* (PDCA) 198
5.5 Perbandingan Klausal ISO 14001:2004 dan 2015 201
5.6 Tahapan Penerapan ISO 14001:2015 205
5.7 Keterkaitan ISO 14001 dan *Life Cycle Assesment* (LCA) 207
5.8 Integrasi ISO 14001, ISO 14001, dan HACCP 209
Referensi 214

Daftar Gambar

Gambar 1.1 Poin SDGs (United Nations, n.d.) 7
Gambar 1.2 *Short Term* EKC (Prasetyanto and Sari, 2021) 19
Gambar 1.3 *Long Term* EKC (Prasetyanto and Sari, 2021) 19
Gambar 1.4 Integrasi Ekologi Industri dan Ekonomi Sirkular 24
Gambar 2.1 Pendekatan terintegrasi *sustainable product design* 37
Gambar 2.3 Peluang pada tahap desain konseptual untuk meminimalkan akumulasi dampak lingkungan yang bersifat mengikat/*lock-in* (Han *et al.*, 2021) 40
Gambar 2.4 Tahapan Desain dan *Life Cycle* (Gagnon *et al*., 2012) 43
Gambar 2.5 *Proposed Sustainable Wheelchair* (Hosseinpour *and* Peng, 2015) 53
Gambar 2.6 Metrik dan Atribut untuk Mengukur Konsep Desain Produk Berkelanjutan (Han *et al*., 2021) 54
Gambar 2.7 Konsep *Portable blender* (Han *et al*., 2021) 58
Gambar 2.8 Hasil Perbandingan Desain Konsep a dan b (Han *et al*., 2021) 58
Gambar 2.9 *Sustainable HoQ for the eco-bag concept* (Faradilla *et al*., 2022) 60
Gambar 2.10 Pelaksanaan PkM dan Produk yang Dihasilkan 64
(Faradilla *et al*., 2021) 64
Gambar 3.1 Skema prosedur MFA (Brunner & Rechberger, 2004). 87
Gambar 3.2 Tampilan Software STAN versi 2.7 101
Gambar 3.3 Tampilan Edit Unit 102
Gambar 3.4 Tampilan Software STAN untuk membuat *Process* *103*
Gambar 3.5 Tampilan Software STAN untuk Penambahan *Flow* *103*
Gambar 3.7 Tampilan Software STAN untuk Menu Calculation 104
Gambar 3.8 Tampilan Final Software STAN untuk Produk Jendela Kayu 105
Gambar 3.9 Sankey Diagram (Goods) MFA Jendela Kayu 105
Gambar 3.10 Sankey Diagram (Electircity) MFA Jendela Kayu 107
Gambar 3.11 Definisi sistem untuk analisis aliran material aluminium (MFA) di Tiongkok (Li et al., 2021). 109
Gambar 3.12 Arus material aluminium dalam perdagangan internasional Tiongkok dari tahun 2008 hingga 2017 (Import) [Li *et al*., 2021]. 110
Gambar 3.13 Aluminum material flows of China's international trade from 2008 to 2017 (exports) [Li *et al*., 2021]. 112
Gambar 4.1 Tahapan *Life Cycle Assessment* *122*

Gambar 4.2 Tahapan Life Cycle Impact Assessment 128
(Sumber : Klöpffer *et al*., 2015) 128
Gambar 4.3 LCA Explorer: Data Umum 138
Gambar 4.4 LCA Explorer: Pustaka/Library 139
Gambar 4.5 Jendela "Projects" 142
Gambar 4.6 Jendela "Description" 143
Gambar 4.7 Jendela "Libraries" 144
Gambar 4.8 Inventory, Processes dan Product Stages 145
Gambar 4.9 LCA Explorer: Inventori, Proses, Proses: Material, Energi, Transportasi Pengolahan, Penggunaan, Skenario Limbah, Pengolahan Limbah 146
Gambar 4.10 Proses material (tab Input/output) 147
Gambar 4.11 LCA Explorer, Inventori, Tahapan Produk: Perakitan, Siklus Hidup, Skenario Pembuangan, Pembongkaran, Penggunaan Kembali 149
Gambar 4.12 Perakitan (tab Input/output) 150
Gambar 4.13 Proses material (tab input/output) dengan material dan proses untuk rangka aluminium. 155
Gambar 4.14 Proses material (tab input/output) dengan proses pengolahan limbah untuk rangka aluminium. 155
Gambar 4.15 Pengaturan perhitungan untuk rangka aluminium. 156
Gambar 4.16 Analisis rangka aluminium, diagram jaringan. 157
Gambar 4.17 Analisis rangka aluminium, hasil karakterisasi. 158
Gambar 4.18 Analisis rangka aluminium, penilaian kerusakan. 158
Gambar 4.19 Analisis rangka aluminium, hasil normalisasi. 159
Gambar 4.20 Analisis rangka aluminium, hasil normalisasi (kategori kerusakan, tabel). 159
Gambar 4.21 Analisis rangka aluminium, hasil normalisasi (kategori dampak, tabel). 160
Gambar 4.22 Analisis rangka aluminium, hasil pembobotan. 160
Gambar 4.23 Analisis rangka aluminium, hasil skor tunggal. 161
Gambar 4.24 Analisis rangka aluminium, tab kontribusi proses. 161
Gambar 4.25 Analisis rangka aluminium, tab kontribusi proses (grafik) 161
Gambar 4.26 Analisis rangka aluminium, tab Inventaris. 162
Gambar 4.27 Analisis rangka aluminium, tab Checks - Periksa faktor karakterisasi yang hilang. 162

Gambar 4.28 Analisis rangka aluminium, tab gambaran produk. 163
Gambar 4.29 Batasan Sistem Produksi Baja 165
Gambar 4.30 Karakterisasi proses produksi terhadap kategori dampak 168
Gambar 4.31 Distribusi karakterisasi dari materials 168
Gambar 4.32 Diagram alir produksi tahu 169
Gambar 4.33 Persentase GWP setiap tahapan proses produksi tahu 172
Gambar 4.34 Batasan sistem 173
Gambar 4.35 Kontributor potensi pemanasan global 176
Gambar 4.36 Dampak lingkungan proses produksi 1 ton padi 177
Gambar 5.1 Perbandingan suhu permukaan rata-rata selama periode 2011 sampai 2021 dengan suhu rata-rata dari 1956 sampai 1976 189
Gambar 5.2 Perkembangan Sejarah ISO 14001 193
Gambar 5.3 Sampel Sertifikat ISO 14001 195
Gambar 5.4 Siklus PDCA 198
Gambar 5.5 Perbandingan Klausul 14001: 2015 dan 2004 204
Gambar 5.6 Tahapan Penerapan ISO 14001;2015 205
Gambar 5.7 Fokus Sertifikasi Mutu Produk Agribisnis/ Agroindustri 210
Gambar 5.7 Contoh sertifikat untuk ISO 14001:2015; ISO 9001:2015 dan 45001:2018 211

Daftar Tabel

Tabel 1.1 Perbandingan LCA, SROI, dan SR 17
Tabel 1.2 Perbandingan Ekologi Industri dan Ekonomi Sirkular 24
Tabel 1.3 Indikator Keberhasilan Ekologi Industri dan Ekonomi Sirkular 26
Tabel 2.1 Proses Desain Konvensional (Gagnon et al., 2012) 41
Tabel 2.2 Proses Desain Berkelanjutan (Gagnon *et al*., 2012) 42
Tabel 2.3 Atribut untuk Mengukur Keberlanjutan Material dalam Konsep Desain (Han *et al*., 2021) 55
Tabel 2.4 Atribut untuk Mengukur Keberlanjutan Proses dalam Konsep Desain (Han *et al*., 2021) 55
Tabel 2.5 Atribut untuk Mengukur Keberlanjutan Penggunaan dalam Konsep Desain (Han *et al*., 2021) 56
Tabel 2.6 Atribut untuk Mengukur Keberlanjutan *End of life* dalam Konsep Desain (Han *et al*., 2021) 56
Tabel 2.7 *Sustainable concept metrics measurement* (Faradilla *et al*., 2022) 61
Tabel 3.1 Perbedaan MFA Statis dan Dinamis 73
Tabel 3.3 Perhitungan Aliran per Proses 100
Tabel 3.4 Ringkasan Efisiensi Material 107
Tabel 3.5 Rekap Konsumsi Listrik Per Proses 107
Tabel 4.1 Data Inventori Produksi Baja 127
Tabel 4.2 Jenis Rangka dan Beratnya 151
Tabel 4.3 Data Inventori untuk Produksi 1.5 kg Rangka Aluminium 152
Tabel 4.4 Inventori Produksi Baja 166
Tabel 4.5 Dampak lingkungan proses produksi baja 166
Tabel 4.6 Data inventori produksi tahu 170
Tabel 4.7 Dampak lingkungan dari produksi 35 kg tahu. 171
Tabel 4.8 Inventori proses produksi padi 174
Tabel 4.9 Kategori dampak 175
Tabel 4.10 Data Inventori untuk Produksi 1 kg Rangka Serat Karbon PAN 180
Tabel 4.11 Data Inventori untuk Produksi 1.8 kg Rangka Baja 181
Tabel 4.12 Data Inventori untuk Produksi 1.36 kg Rangka Titanium 182
Tabel 5.1 Seri Iso 14000 193
Tabel 5.5 Perbandingan ISO 14001:2015 dan ISO 14001:2004 202

SEKAPUR SIRIH

Transformasi industri menuju keberlanjutan merupakan agenda strategis yang semakin penting dalam menghadapi dinamika global, perubahan teknologi, dan tuntutan lingkungan yang kompleks. Konsep Ekologi Industri hadir sebagai pendekatan multidisiplin yang mampu mengintegrasikan aspek teknologi, ekonomi, sosial, dan lingkungan untuk mewujudkan sistem industri yang lebih efisien, bertanggung jawab, dan adaptif terhadap tantangan masa depan.

Dalam konteks pengembangan ilmu pengetahuan dan praktik industri berkelanjutan di Indonesia, kehadiran buku *"Ekologi Industri: Strategi Menuju Industri Berkelanjutan"* ini menjadi kontribusi berharga. Buku ini menyajikan konsep dasar, metode analitis, serta aplikasi praktis ekologi industri secara sistematis, mulai dari transformasi teknologi, perancangan produk berkelanjutan, analisis aliran material, analisis daur hidup, hingga penerapan standar manajemen lingkungan. Pendekatan yang komprehensif ini memungkinkan pembaca memahami bagaimana industri dapat dioperasikan secara lebih efektif tanpa mengabaikan tanggung jawab ekologis.

Buku ini juga memperkaya wawasan pembaca dengan menghadirkan berbagai studi kasus dan pengalaman empiris yang relevan dengan kondisi industri saat ini. Hal ini menjadikan buku ini tidak hanya sebagai sumber pengetahuan teoritis, tetapi juga sebagai rujukan praktis bagi mahasiswa, dosen, peneliti, profesional industri, maupun pengambil kebijakan yang ingin menerapkan prinsip keberlanjutan dalam proses produksi dan manajemen industri.

Saya menyampaikan apresiasi dan penghargaan kepada para penulis: Ir. Emelia Sari, S.T., M.T., Ph.D; Prof. Dr. Ir. Astri Rinanti, M.T., IPM., ASEAN Eng.; Indah Permata Sari, S.Pd., M.Si; Dr. Ir. Tiena Gustina Amran, Ph.D., IPU., ASEAN Eng.; Ir. Wawan

Kurniawan, S.T., M.T.; Annisa Dewi Akbari, S.T., M.Sc., atas kerja ilmiah dan dedikasi mereka dalam menyusun buku ini. Saya yakin buku ini akan menjadi salah satu referensi utama dalam bidang ekologi industri serta memberikan manfaat yang luas bagi seluruh pihak yang berkepentingan dalam pembangunan industri yang berkelanjutan.

Semoga karya ini turut mendorong lahirnya generasi baru yang memiliki kesadaran ekologis tinggi, mampu mengintegrasikan kemajuan teknologi dengan keberlanjutan lingkungan, dan berkontribusi bagi masa depan industri Indonesia yang lebih hijau, cerdas, dan berdaya saing.

Prof. Dr. Ir. Kadarsah Suryadi, DEA

Guru Besar Teknik Industri – Fakultas Teknologi Industri, ITB

Rektor Universitas Trisakti

Prakata

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyusun buku ajar ini dengan judul "Ekologi Industri: Strategi Menuju Industri Berkelanjutan". Buku ini disusun sebagai bahan ajar utama bagi mahasiswa yang menempuh mata kuliah Ekologi Industri, khususnya di lingkungan program studi Teknik Industri maupun bidang lain yang berkaitan dengan industri berkelanjutan.

Ekologi industri merupakan bidang multidisiplin yang menjembatani aspek teknologi, ekonomi, sosial, dan lingkungan. Dalam era transformasi dari Revolusi Industri 1.0 hingga *Society* 5.0, pendekatan ekologi industri menjadi semakin relevan untuk mewujudkan sistem produksi dan konsumsi yang berkelanjutan. Oleh karena itu, buku ini menghadirkan materi-materi kunci yang mencerminkan integrasi antara kemajuan teknologi dan tanggung jawab lingkungan. Secara garis besar, buku ini memuat lima pokok bahasan utama:

1. Transformasi Teknologi dan Keberlanjutan - dari Revolusi Industri hingga *Society* 5.0: pembahasan mengenai evolusi industri dalam perspektif sosial, ekonomi, dan ekologi.
2. Perancangan Produk Berkelanjutan (*Sustainable Product Design*): prinsip dan strategi perancangan produk yang mempertimbangkan daur hidup dan dampak lingkungan.
3. Analisis Aliran Material (*Material Flow Analysis*/MFA): alat untuk memetakan dan mengevaluasi efisiensi aliran material dan energi dalam sistem industri.
4. Analisis Daur Hidup (*Life Cycle Assessment*/LCA): metode kuantitatif untuk menilai dampak lingkungan dari suatu produk atau proses sepanjang siklus hidupnya.
5. Standar Manajemen Lingkungan ISO 14000: panduan penerapan sistem manajemen lingkungan untuk meningkatkan kinerja dan kepatuhan terhadap regulasi lingkungan.

Buku ajar ini tidak hanya menyajikan konsep dan teori, tetapi juga dilengkapi dengan studi kasus yang telah dilaksanakan penulis baik dalam bentuk penelitian maupun Pengabdian kepada Masyarakat (PkM), latihan, dan tugas aplikatif yang relevan dengan kondisi industri saat ini. Diharapkan buku ini dapat menjadi pegangan praktis bagi mahasiswa, dosen, maupun praktisi yang ingin memahami dan menerapkan prinsip-prinsip ekologi industri dalam kegiatan produksi, manajemen, maupun pengambilan kebijakan.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah mendukung penyusunan buku ini. Penulis juga menyadari bahwa buku ini masih memiliki keterbatasan, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi penyempurnaan di edisi mendatang.

Semoga buku ini dapat memberikan kontribusi nyata dalam membangun kesadaran dan kompetensi keberlanjutan di kalangan generasi penerus industri Indonesia.

Penulis

BAB 1

TRANSFORMASI TEKNOLOGI DAN KEBERLANJUTAN: DARI REVOLUSI INDUSTRI HINGGA *SOCIETY* 5.0

Rencana Pembelajaran

Tujuan	Mahasiswa mampu menguasai prinsip dan isu perkembangan teknologi dan hubungannya dengan ekonomi, sosial, dan ekologi industri dan mengkomunikasikannya secara tulis dan lisan.
Capaian Pembelajaran	CPMK1 : Mampu menguasai prinsip dan isu terkini dalam ekonomi, sosial, ekologi industri (P.c). CPMK2 : Mampu menguasai pengetahuan tentang teknik komunikasi dan perkembangan teknologi terbaru dan terkini dalam bidang ekonomi, sosial, ekologi industri (P.d).
Sub Pembahasan	1. Sejarah dan perkembangan teknologi. 2. Pengertian dan konsep *Sustainable Development Goals* (SDGs). 3. Pengaruh teknologi terhadap ekonomi, sosial, dan ekologi. 4. Ekologi industri dan ekonomi sirkular.

1.1 Sejarah dan Perkembangan Teknologi

1.1.1 Definisi dan Hakikat Teknologi

Teknologi merupakan konsep yang terus berkembang seiring waktu sebagai bentuk pengorganisasian dan penerapan ilmu pengetahuan untuk mencapai tujuan praktis (Barbier *et al*., 2003). Pemahaman tentang teknologi tidak hanya terbatas pada wujud fisik seperti alat dan mesin, tetapi juga mencakup proses intelektual, metode, serta teknik yang digunakan untuk menyelesaikan masalah dan menghasilkan solusi. Lebih jauh, teknologi dapat dipandang sebagai perpaduan antara alat, aturan, dan prosedur yang lahir dari penerapan ilmu pengetahuan dalam pekerjaan yang dapat dilakukan secara berulang. Dengan demikian, teknologi sesungguhnya adalah hasil interaksi dinamis antara pengetahuan, kreativitas, dan kebutuhan manusia dalam menghadapi tantangan kehidupan sehari-hari.

1.1.2 Evolusi Teknologi dalam Revolusi Industri

Sejarah mencatat, bahwa perjalanan teknologi telah melewati berbagai fase penting, dimulai dari Revolusi Industri 1.0 yang menandai awal mekanisasi, hingga berkembang menjadi Revolusi *Industry* 4.0 yang sarat dengan integrasi digital dan kecerdasan buatan. Setiap fase mencerminkan bagaimana manusia terus berinovasi untuk menyesuaikan diri dengan perubahan zaman, menjadikan teknologi bukan hanya sebagai alat bantu, tetapi sebagai bagian integral dari kehidupan itu sendiri.

Perjalanan revolusi industri menggambarkan evolusi teknologi yang secara bertahap telah mengubah wajah peradaban manusia, terutama dalam dunia produksi dan industri. Setiap tahap revolusi membawa lompatan besar dalam cara manusia bekerja, berkreasi, dan berinovasi. Berikut adalah penjelasan dari masing-masing tahap revolusi industri (Kumar *et al*., 2024):

a. *Industry 1.0* (Revolusi Industri Pertama)
Dimulai pada akhir abad ke-18, revolusi ini ditandai dengan lahirnya mesin uap sebagai inovasi utama. Teknologi ini memungkinkan transisi dari sistem produksi manual ke sistem mekanis, yang secara drastis meningkatkan kapasitas produksi dan efisiensi. Dampaknya sangat terasa dalam industri tekstil, pertambangan, dan transportasi. Inilah titik awal ketika tenaga manusia mulai digantikan oleh mesin.

b. *Industry 2.0* (Revolusi Industri Kedua)
Memasuki akhir abad ke-19, dunia menyaksikan kemunculan tenaga listrik dan konsep *assembly line* atau lini perakitan. Inovasi ini memungkinkan produksi massal yang jauh lebih cepat dan konsisten. Industri otomotif menjadi simbol dari era ini, di mana mobil dapat diproduksi secara efisien dalam skala besar. Energi listrik menggantikan tenaga uap, membuka jalan bagi pengembangan mesin-mesin yang lebih canggih dan fleksibel.

c. *Industry 3.0* (Revolusi Industri Ketiga)
Pada pertengahan abad ke-20, komputer dan teknologi elektronik mulai diintegrasikan ke dalam sistem produksi. Inilah awal dari otomatisasi industri, di mana komputer dan robot mulai mengambil alih tugas-tugas yang berulang dan membutuhkan presisi tinggi. Revolusi ini menciptakan sistem produksi yang lebih cerdas, stabil, dan efisien, serta membuka ruang bagi pengolahan data dan kontrol proses secara digital.

d. *Industry 4.0* (Revolusi Industri Keempat)
Memasuki abad ke-21, dunia industri mengalami transformasi besar menuju era digitalisasi dan konektivitas. Konsep *Industry* 4.0 menghadirkan teknologi canggih seperti *Internet of Things* (IoT), *big data analytics*, *cloud computing*, serta kecerdasan buatan (*Artificial*

Intelligence/AI). Teknologi-teknologi ini memungkinkan terwujudnya *smart factory*, yaitu pabrik yang mampu beroperasi secara otomatis, adaptif, dan terhubung dalam satu ekosistem digital yang saling berkomunikasi secara *real-time*.

1.1.3 *Society* 5.0: Teknologi Berbasis Kemanusiaan

Setiap fase revolusi industri tidak hanya mencerminkan kemajuan teknologi, tetapi juga merefleksikan perubahan paradigma dalam cara manusia hidup dan bekerja. Dari era mekanisasi hingga digitalisasi, teknologi terus mendorong batas-batas inovasi dan membuka kemungkinan-kemungkinan baru. Namun, di tengah pesatnya perkembangan teknologi digital di era *Industry* 4.0, muncul kesadaran bahwa kemajuan teknologi semestinya tidak hanya berfokus pada efisiensi industri, tetapi juga harus mengedepankan nilai-nilai kemanusiaan. Dari sinilah lahir konsep *Society* 5.0.

Society 5.0 adalah visi masa depan masyarakat yang pertama kali diperkenalkan oleh pemerintah Jepang sebagai respon terhadap tantangan Revolusi *Industry* 4.0. Konsep ini menempatkan manusia sebagai pusat dari inovasi teknologi, di mana teknologi canggih seperti AI, IoT, robotika, dan *big data* digunakan bukan semata untuk tujuan industri, melainkan untuk menciptakan masyarakat yang lebih inklusif, adil, dan berkelanjutan.

Dalam *Society* 5.0, teknologi tidak hanya menjadi alat bantu, tetapi menjadi mitra strategis dalam memecahkan berbagai permasalahan sosial, seperti penuaan populasi, perubahan iklim, kesenjangan ekonomi, hingga keterbatasan akses layanan kesehatan dan pendidikan. Tujuannya adalah membangun sebuah masyarakat yang mampu menyeimbangkan kemajuan ekonomi dengan penyelesaian masalah sosial melalui integrasi dunia fisik dan dunia digital.

Di era ini, konsep *smart city, personalized healthcare,* pembelajaran berbasis AI, serta sistem logistik yang terotomatisasi, bukan lagi sekadar wacana, melainkan bagian nyata dari transformasi sosial yang tengah berlangsung. *Society* 5.0 mengajak kita untuk tidak hanya menjadi pengguna teknologi, tetapi juga pengarahnya, agar kemajuan teknologi benar-benar memberikan manfaat luas bagi seluruh lapisan masyarakat.

Dengan demikian, setelah melewati empat revolusi industri yang masing-masing menekankan pada aspek teknis dan efisiensi produksi, *Society* 5.0 hadir sebagai babak baru yang lebih humanis dan berkelanjutan. Era ini menuntut manusia untuk tidak hanya beradaptasi dengan teknologi, tetapi juga mengarahkan teknologi agar senantiasa berpihak pada nilai-nilai kemanusiaan.

1.1.4 Peluang dan Tantangan Perkembangan Teknologi

Perkembangan teknologi tidak hanya menghadirkan peluang, tetapi juga tantangan. Transformasi ini membawa dampak yang kompleks terhadap pasar tenaga kerja dan struktur sosial ekonomi. Di satu sisi, terdapat berbagai dampak positif yang menguntungkan, yaitu:

a. Peningkatan efisiensi dan produktivitas dalam proses produksi melalui otomatisasi dan pengambilan keputusan berbasis data.
b. Terciptanya lapangan kerja baru di sektor teknologi, digital, dan inovasi.
c. Pengembangan produk dan layanan yang lebih responsif dan adaptif terhadap kebutuhan pasar.

Namun di sisi lain, ada pula dampak negatif yang perlu dicermati secara kritis, yaitu:

a. Risiko tergesernya tenaga kerja manusia oleh sistem otomatis dan robotik yang dapat mengurangi kebutuhan akan pekerjaan rutin.

b. Tuntutan terhadap keterampilan baru (*reskilling* dan *upskilling*) bagi pekerja agar tetap relevan dalam lingkungan kerja yang berubah cepat.
c. Kesenjangan akses teknologi, yang berpotensi memperlebar jurang ketimpangan sosial dan ekonomi antara kelompok yang memiliki akses terhadap teknologi dan yang tidak.

Oleh karena itu, penting bagi semua pemangku kepentingan, baik pemerintah, sektor industri, institusi pendidikan, maupun masyarakat, untuk melakukan penyesuaian secara proaktif terhadap perubahan ini. Pemanfaatan teknologi harus diarahkan untuk mendukung prinsip-prinsip industri yang berkelanjutan dan inklusif, agar manfaatnya dapat dirasakan secara merata dan tidak meninggalkan kelompok manapun di belakang. Adaptasi yang bijak akan menentukan apakah revolusi ini menjadi berkah bagi semua, atau justru menjadi sumber ketimpangan baru dalam masyarakat *modern*.

1.2 Pengertian dan Konsep *Sustainable Development Goals* (SDGs)

1.2.1 Definisi dan Ruang Lingkup SDGs

Sustainable Development Goals (SDGs) merupakan seperangkat tujuan global yang ditetapkan oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) sebagai panduan utama dalam mewujudkan pembangunan berkelanjutan hingga tahun 2030. Agenda ini secara resmi diluncurkan pada tahun 2015 dan dituangkan ke dalam 17 tujuan utama (17 *goals*) yang mencakup berbagai aspek penting kehidupan manusia dan planet ini. Keseluruhan poin SDGs tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.1.

Gambar 1.1 Poin SDGs (United Nations, n.d.)

Ketujuhbelas poin SDGs yang telah ditetapkan oleh PBB, terus dijalankan hingga saat ini sebagai upaya global untuk menjaga keberlanjutan di berbagai sektor. Tujuan utamanya adalah memastikan terciptanya pola konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab dan berkelanjutan, terutama di sektor industri yang menjadi salah satu motor utama dalam sistem perekonomian suatu negara.

1.2.2 Peran Sektor Industri dalam SDGs

Sektor industri memiliki peran strategis dalam mewujudkan pembangunan berkelanjutan dan oleh karena itu, kita dituntut untuk memahami serta menerapkan prinsip-prinsip industri berwawasan lingkungan. Industri berwawasan lingkungan adalah pendekatan yang mengedepankan upaya untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan yang ditimbulkan oleh proses produksi, tanpa mengabaikan keberlanjutan ekonomi dan sosial.

Konsep ini mencakup strategi seperti efisiensi penggunaan sumber daya, pengurangan limbah, serta penerapan praktik ramah lingkungan dalam proses produksi maupun desain produk akhir. Dalam kerangka SDGs, khususnya Tujuan 12 tentang konsumsi dan produksi berkelanjutan, industri berwawasan lingkungan diharapkan berkontribusi langsung pada pencapaian agenda pembangunan berkelanjutan secara menyeluruh. Untuk mewujudkan hal tersebut, diperlukan langkah-langkah konkret yang dapat diterapkan secara konsisten oleh pelaku industri, antara lain:

a. Mengurangi emisi gas rumah kaca melalui penerapan teknologi ramah lingkungan yang mendukung efisiensi energi dan proses produksi yang rendah karbon (Liu *et al*., 2023).
b. Mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya alam dengan menerapkan prinsip-prinsip produksi berkelanjutan, seperti efisiensi bahan baku, konservasi energi, dan penggunaan energi terbarukan (Chilabade *et al*., 2025).
c. Melaksanakan pengelolaan limbah yang efektif melalui sistem pengurangan, pemanfaatan kembali, dan daur ulang limbah untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan (Jayasinghe *et al*., 2020).
d. Mengikuti program sertifikasi lingkungan, seperti ISO 14001, sebagai bentuk komitmen terhadap pengelolaan lingkungan yang sistematis dan berstandar internasional (da Fonseca, 2015).

Melalui langkah-langkah tersebut, sektor industri dapat bergerak sejalan dengan prinsip keberlanjutan serta berkontribusi nyata dalam pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs). Namun, untuk memperkuat komitmen terhadap keberlanjutan, dibutuhkan tidak hanya penerapan prinsip industri berwawasan lingkungan, tetapi juga adopsi pendekatan baru seperti konsep Industri *Society* 5.0.

1.2.3 Integrasi SDGs dengan Konsep *Society* 5.0

Konsep *Society* 5.0 yang berasal dari Jepang merupakan pendekatan inovatif yang menempatkan manusia sebagai pusat dari proses inovasi dan perkembangan teknologi dengan tujuan menciptakan masyarakat yang lebih inklusif, cerdas, dan berorientasi pada kesejahteraan. Teknologi informasi dan komunikasi dimanfaatkan tidak hanya untuk meningkatkan efisiensi industri, tetapi juga untuk menyelesaikan permasalahan sosial dan lingkungan serta meningkatkan kualitas hidup. Melalui integrasi dunia fisik dan digital, teknologi seperti *Internet of Things* (IoT), kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*/AI), dan robotika, digunakan untuk membangun sistem yang efisien, produktif, dan responsif terhadap kebutuhan manusia. Selain itu, *Society* 5.0 menekankan pentingnya kolaborasi antara sektor publik, swasta, dan institusi pendidikan sebagai kunci dalam mewujudkan pembangunan berkelanjutan secara holistik.

Berbeda dengan pendekatan industri sebelumnya yang lebih berfokus pada otomatisasi dan efisiensi produksi, *Society* 5.0 menitikberatkan pada pemanfaatan teknologi digital secara menyeluruh dan integratif di seluruh rantai nilai industri. Tujuannya adalah membangun masyarakat yang tidak hanya maju secara teknologi, tetapi juga adil, berkelanjutan, dan tanggap terhadap berbagai tantangan global.

Dalam kerangka ini, *Society* 5.0 diposisikan sebagai pendorong terbentuknya *super-smart society* yang mengedepankan kesejahteraan manusia, sekaligus memperkuat praktik ekonomi sirkular untuk mengurangi limbah dan memaksimalkan sumber daya. Alimohammadlou *and* Khoshsepehr (2023) menunjukkan bahwa peran *Society* 5.0 dalam mendukung pembangunan berkelanjutan dapat dipetakan melalui lima dimensi utama yaitu pemerintahan, ekonomi, sosial, lingkungan, dan teknologi. Hal ini menegaskan bahwa *Society* 5.0 bukan sekadar strategi digitalisasi, melainkan sebuah paradigma

holistik yang mengintegrasikan inovasi teknologi dengan kebutuhan manusia serta tujuan keberlanjutan global.

1.2.4 Keterkaitan SDGs dengan Desain Produk Berkelanjutan

Selain konsep industri yang telah dijelaskan sebelumnya, SDGs juga memiliki keterkaitan yang sangat erat dengan desain produk (*product design*). Keterkaitan ini tercermin dari prinsip keberlanjutan yang diintegrasikan ke dalam proses perancangan produk.

Pembangunan berkelanjutan sendiri merupakan pendekatan pembangunan yang bertujuan untuk memenuhi kebutuhan generasi masa kini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang dalam memenuhi kebutuhannya. Dalam konteks desain produk, prinsip ini menuntut agar setiap produk yang dikembangkan tidak hanya memenuhi aspek fungsi dan estetika, tetapi juga mempertimbangkan dampaknya terhadap lingkungan, masyarakat, dan perekonomian (Faradilla *et al*., 2022).

Desain produk yang berkelanjutan, idealnya mempertimbangkan siklus hidup produk secara menyeluruh, mulai dari pemilihan bahan baku, proses produksi, distribusi, penggunaan, hingga akhir masa pakai produk. Ini mencakup penggunaan bahan ramah lingkungan, proses produksi yang hemat energi, pengurangan limbah, serta kemudahan dalam proses daur ulang.

Dengan menerapkan prinsip-prinsip pembangunan berkelanjutan dalam desain produk, perusahaan dapat secara signifikan mengurangi jejak ekologis mereka sekaligus memberikan kontribusi positif jangka panjang bagi masyarakat. Lebih dari itu, pendekatan ini juga menciptakan nilai tambah strategis bagi perusahaan, yang antara lain dapat dicapai melalui:

a. Diferensiasi dari pesaing
   Produk yang dirancang dengan mempertimbangkan aspek keberlanjutan dapat menjadi nilai pembeda yang signifikan, terutama di tengah meningkatnya kesadaran konsumen terhadap isu lingkungan. Hal ini memberikan keunggulan kompetitif di pasar yang semakin mengutamakan produk ramah lingkungan.
b. Peningkatan reputasi perusahaan
   Perusahaan yang konsisten menghadirkan produk berkelanjutan cenderung memperoleh citra positif di mata konsumen, investor, dan masyarakat luas. Reputasi yang baik ini dapat memperkuat loyalitas pelanggan dan memperluas pangsa pasar.
c. Efisiensi operasional jangka panjang
   Desain produk yang memperhitungkan seluruh siklus hidup, termasuk penggunaan bahan baku yang ramah lingkungan dan efisiensi energi, dapat secara signifikan menurunkan biaya produksi dan operasional dalam jangka panjang.
d. Kepatuhan terhadap regulasi
   Dengan menerapkan prinsip-prinsip keberlanjutan, perusahaan dapat memastikan kepatuhan terhadap berbagai peraturan dan standar lingkungan yang semakin ketat, sekaligus mengurangi risiko hukum dan administratif di masa mendatang.

Poin-poin tersebut menunjukkan bagaimana desain produk yang berorientasi pada keberlanjutan, dapat memberikan nilai tambah strategis bagi perusahaan. Namun, untuk mewujudkan nilai keberlanjutan tersebut, perusahaan juga harus menghadapi sejumlah tantangan yang tidak dapat diabaikan. Implementasi prinsip keberlanjutan dalam desain produk sering kali memerlukan penyesuaian yang kompleks, baik dari sisi teknis, sumber daya, maupun manajerial (Bocken *et al*., 2016). Beberapa tantangan utama yang umum dihadapi antara lain:

a. Biaya awal yang tinggi
   Mengintegrasikan aspek keberlanjutan ke dalam desain produk kerap memerlukan investasi awal yang lebih besar, seperti untuk penelitian material baru, pengadaan teknologi ramah lingkungan, atau pelatihan tenaga kerja.
b. Keterbatasan sumber daya
   Ketersediaan bahan ramah lingkungan atau teknologi berkelanjutan masih terbatas, baik secara geografis maupun ekonomis, sehingga menyulitkan proses produksi dalam skala besar atau berkelanjutan.
c. Kurangnya pendidikan dan kesadaran
   Tidak semua tim desain, produksi, maupun manajemen memiliki pemahaman yang memadai mengenai prinsip keberlanjutan. Kurangnya pengetahuan ini dapat menjadi hambatan dalam proses pengambilan keputusan dan implementasi yang efektif.
d. Tantangan teknis dalam integrasi teknologi
   Mengadopsi teknologi baru atau mengganti material konvensional dengan bahan yang lebih ramah lingkungan sering kali memerlukan proses rekayasa ulang dan pengujian teknis yang kompleks.
e. Penyesuaian dalam rantai pasok
   Untuk memastikan keberlanjutan secara menyeluruh, perusahaan harus melakukan penyesuaian pada seluruh rantai pasok, dari pemasok bahan baku hingga distribusi akhir, yang dapat memerlukan waktu, koordinasi, dan biaya tambahan.

Menghadapi berbagai tantangan dalam penerapan desain produk berkelanjutan, perusahaan perlu mengadopsi konsep perencanaan produk berkelanjutan yang terintegrasi. Pendekatan ini dirancang untuk menggabungkan tiga aspek utama keberlanjutan, ekonomi, lingkungan, dan sosial ke dalam seluruh proses perancangan produk. Tidak hanya menitikberatkan pada

aspek ekologis, perencanaan ini juga mencakup kepedulian terhadap kesejahteraan pekerja, kenyamanan pengguna, serta efisiensi biaya dan nilai jual produk.

Pendekatan terintegrasi ini mendorong perusahaan untuk tidak sekadar berfokus pada satu dimensi keberlanjutan, melainkan melihat dampak menyeluruh dari suatu produk sepanjang siklus hidupnya, mulai dari pemilihan bahan baku, proses manufaktur, distribusi, penggunaan, hingga tahap akhir daur ulang atau pembuangan. Untuk itu, kolaborasi lintas fungsi antar departemen, seperti desain, produksi, pemasaran, dan manajemen menjadi sangat penting guna memastikan tercapainya tujuan keberlanjutan secara holistik.

Dengan menerapkan konsep perancangan produk berkelanjutan yang terintegrasi, perusahaan dapat menghasilkan produk yang:

a. ramah lingkungan;
b. memiliki dampak sosial yang positif; serta
c. memberi nilai ekonomi yang berkelanjutan dalam jangka panjang.

Beberapa manfaat nyata dari pendekatan ini, antara lain:

a. Mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, melalui pengelolaan limbah dan emisi yang lebih baik.
b. Meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, termasuk energi, bahan baku, dan air.
c. Memperkuat citra dan reputasi perusahaan sebagai entitas yang peduli terhadap keberlanjutan.
d. Mengurangi biaya operasional jangka panjang dengan menekan konsumsi energi dan limbah produksi.
e. Menciptakan produk yang tahan lama, mudah diperbaiki, dan dapat didaur ulang, sehingga memperpanjang umur ekonomis produk.

Selain itu, efektivitas penerapan konsep ini perlu didukung oleh pengukuran keberhasilan yang sistematis, yang mencakup indikator kuantitatif dan kualitatif. Pengukuran tersebut dapat meliputi:

a. Penilaian atas penurunan dampak lingkungan dari produk baru dibandingkan produk sebelumnya.
b. Perhitungan efisiensi penggunaan sumber daya dalam proses produksi.
c. Pemantauan perubahan reputasi perusahaan di mata konsumen dan pemangku kepentingan.
d. Analisis penghematan biaya jangka panjang, sebagai akibat dari pengurangan konsumsi energi dan limbah.
e. Survey tingkat kepuasan pelanggan, khususnya terhadap produk yang lebih awet, aman, dan ramah lingkungan.

1.2.5 *Green Society* sebagai Pendorong Keberlanjutan

Dalam konsep perancangan produk berkelanjutan yang terintegrasi, dikenal pula istilah *Green Society*. Istilah ini merujuk pada masyarakat yang memiliki kesadaran tinggi akan pentingnya keberlanjutan lingkungan, serta secara aktif mendukung praktik-praktik yang ramah lingkungan dalam kehidupan sehari-hari. Dalam konteks desain produk, *Green Society* berperan strategis sebagai konsumen yang secara selektif memilih produk-produk yang didesain dengan mempertimbangkan aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi.

Peningkatan kesadaran masyarakat terhadap isu lingkungan turut mendorong permintaan akan produk-produk yang berkelanjutan. Fenomena ini memberikan insentif moral sekaligus tekanan pasar bagi perusahaan untuk mulai mengadopsi konsep perancangan produk berkelanjutan secara terintegrasi dalam proses inovasi dan pengembangan produknya. Dengan demikian, semakin kuat peran *Green Society*

dalam preferensi pasar, maka semakin besar pula dorongan bagi perusahaan untuk menghasilkan produk yang lebih ramah lingkungan dan berdampak positif bagi masyarakat.

Kesadaran kolektif *Green Society* menjadi katalisator penting dalam mempercepat penerapan desain berkelanjutan. Tindakan nyata dari konsumen seperti memilih produk dengan label hijau, mendukung perusahaan yang peduli lingkungan, hingga menghindari produk yang berdampak negatif akan memperbesar ruang gerak bagi perusahaan untuk menjalankan strategi keberlanjutan secara konsisten. Dalam konteks ini, *Green Society* tidak hanya bertindak sebagai penerima manfaat, tetapi juga sebagai agen perubahan yang mampu mengarahkan perusahaan menuju praktik industri yang lebih bertanggung jawab secara sosial dan ekologis.

Lebih jauh, perusahaan juga dapat mengukur dampak positif dari kemitraan atau respon terhadap *Green Society* melalui berbagai metode evaluasi yang terukur dan objektif, seperti:

a. Analisis komparatif sebelum dan sesudah keterlibatan dengan *Green Society,* misalnya melalui pengukuran penghematan energi, pengurangan volume limbah, atau peningkatan efisiensi dalam proses produksi.
b. Survei atau wawancara mendalam dengan karyawan, konsumen, dan pemangku kepentingan lainnya untuk menilai persepsi terhadap komitmen dan kinerja keberlanjutan perusahaan.
c. Audit lingkungan berkala, untuk mengevaluasi perubahan signifikan yang terjadi setelah implementasi strategi yang melibatkan peran aktif *Green Society*.
d. Pemantauan indikator kinerja keberlanjutan yang telah ditetapkan sebelumnya, seperti pengurangan emisi karbon, peningkatan penggunaan material ramah lingkungan, atau capaian sertifikasi lingkungan tertentu.

1.2.6 Evaluasi dan Pengukuran Keberlanjutan

Penerapan langkah-langkah keberlanjutan yang melibatkan *Green Society* memerlukan metode evaluasi dampak yang terukur dan sistematis agar efektivitas strategi dapat dipantau serta dipastikan memberikan kontribusi nyata terhadap tujuan keberlanjutan. Pemilihan metode evaluasi bergantung pada konteks organisasi, tujuan pengukuran, serta jenis dampak yang hendak dianalisis. Tiga pendekatan yang banyak digunakan adalah *Life Cycle Assessment* (LCA), *Social Return on Investment* (SROI), dan *Sustainability Reporting* (SR).

Life Cycle Assessment (LCA) menilai dampak lingkungan dari suatu produk atau layanan sepanjang siklus hidupnya, mulai dari produksi, distribusi, penggunaan, hingga pembuangan akhir. Metode ini membantu perusahaan mengidentifikasi titik-titik kritis yang berpotensi menimbulkan dampak lingkungan signifikan, sehingga dapat dilakukan perbaikan yang tepat sasaran (ISO, 2006).

Social Return on Investment (SROI) digunakan untuk mengukur nilai sosial, ekonomi, dan lingkungan dari suatu kegiatan atau proyek dengan mengonversi dampak menjadi nilai moneter. Pendekatan ini memberikan gambaran yang lebih holistik mengenai manfaat suatu investasi atau inisiatif, sekaligus menjadi alat komunikasi strategis bagi pemangku kepentingan (Nicholls *et al*., 2012).

Sustainability Reporting (SR) berfungsi sebagai sarana akuntabilitas dan transparansi, di mana perusahaan melaporkan kinerja keberlanjutan secara periodik melalui indikator tertentu, seperti efisiensi energi, emisi karbon, dan keterlibatan dengan komunitas. Dengan mengacu pada standar internasional seperti *Global Reporting Initiative* (GRI), laporan ini meningkatkan legitimasi sosial sekaligus memperkuat reputasi perusahaan (GRI, 2020). Perbandingan metode-metode ini dapat dilihat pada Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Perbandingan LCA, SROI, dan SR

Aspek	LCA	SROI	SR
Fokus Pengukuran	Dampak lingkungan sepanjang siklus hidup produk/ layanan.	Dampak sosial, ekonomi, dan lingkungan, dikonversi ke nilai moneter.	Kinerja keberlanjutan perusahaan berdasarkan indikator tertentu.
Pendekatan	Analisis siklus hidup (*cradle-to-grave*).	Monetisasi dampak non-finansial.	Pelaporan periodik sesuai standar internasional (misalnya GRI).
Kelebihan	Memberikan gambaran menyeluruh dampak lingkungan dan identifikasi titik kritis.	Memberikan nilai kuantitatif mudah dipahami dan mendorong pertimbangan sosial.	Transparansi, akuntabilitas, dan membangun kepercayaan publik.
Kelemahan	Membutuhkan data lengkap dan terverifikasi, fokus hanya pada aspek lingkungan.	Monetisasi kompleks dan subjektif, tidak semua dampak dapat dimonetisasi.	Berpotensi bias jika hanya bersifat kepatuhan formal, tidak selalu mendalam secara analitis.
Kesesuaian Penggunaan	Analisis produk dan perbandingan teknologi produksi	Evaluasi proyek sosial dan investasi berdampak luas.	Komunikasi kinerja keberlanjutan dan akuntabilitas publik.

1.3 Pengaruh Teknologi Terhadap Ekonomi, Sosial, dan Lingkungan

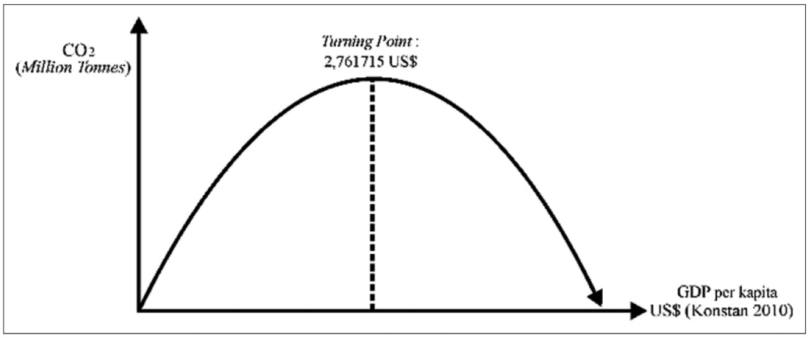
Teknologi berkembang pesat seiring kemajuan zaman dan telah terintegrasi dalam berbagai aspek kehidupan manusia. Sebagai alat bantu utama, teknologi mempermudah dan mempercepat aktivitas manusia, terutama di era digital yang mendorong transformasi masif pada sektor ekonomi, sosial, dan lingkungan. Dalam bidang ekonomi, digitalisasi membawa dampak signifikan, khususnya pada sektor jasa dan manufaktur, melalui efisiensi yang dicapai lewat integrasi jaringan digital. Sejalan dengan itu, penerapan prinsip ekonomi hijau mendorong perusahaan untuk mengadopsi teknologi ramah lingkungan dalam mengelola sumber daya secara hemat dan berkelanjutan, termasuk penggunaan energi terbarukan serta pemanfaatan sumber daya alam yang bertanggung jawab (Lumbanraja *and* Lumbanraja, 2023).

Dalam ranah lingkungan, teknologi berperan penting dalam menghadapi tantangan ekologis akibat industrialisasi, seperti meningkatnya emisi gas rumah kaca dan limbah berbahaya. Teknologi ramah lingkungan, misalnya sistem efisiensi energi dan teknologi pengolahan limbah modern, menjadi instrumen utama dalam mitigasi dampak negatif tersebut. Kemajuan ini sejalan dengan penguatan konsep ekonomi hijau yang menekankan efisiensi energi dan pengelolaan sumber daya berkelanjutan.

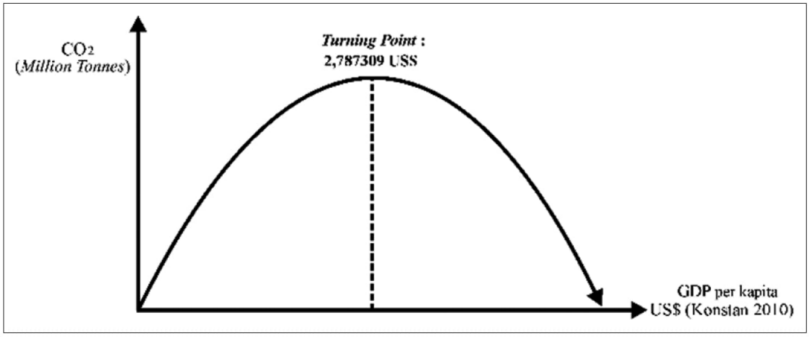
Hubungan antara pembangunan ekonomi dan kualitas lingkungan secara teoritis dianalisis melalui *Environmental Kuznets Curve* (EKC). Konsep ini menunjukkan bahwa pada fase awal pembangunan, peningkatan pendapatan per kapita cenderung menurunkan kualitas lingkungan karena aktivitas ekonomi yang belum ramah lingkungan. Namun, setelah melewati titik ambang tertentu, pertumbuhan pendapatan diiringi kesadaran dan kebijakan pro-lingkungan justru berkontribusi pada perbaikan

kondisi ekologis. Fenomena ini divisualisasikan dalam bentuk kurva U terbalik (Grossman *and* Krueger, 1991; Prasetyanto *and* Sari, 2021).

Model jangka pendek EKC (Gambar 1.2) memperlihatkan fase awal di mana pertumbuhan ekonomi meningkatkan degradasi lingkungan, sedangkan model jangka panjang (Gambar 1.3) menegaskan bahwa kemajuan teknologi bersih dan kebijakan pembangunan berkelanjutan memungkinkan peningkatan pendapatan berjalan seiring dengan perbaikan lingkungan (Prasetyanto *and* Sari, 2021).



Gambar 1.2 *Short Term* EKC (Prasetyanto and Sari, 2021)



Gambar 1.3 *Long Term* EKC (Prasetyanto and Sari, 2021)

Secara empiris, Grossman *and* Krueger (1991) menemukan bahwa pada tahap awal pembangunan, peningkatan pendapatan per kapita berkorelasi dengan memburuknya kualitas lingkungan akibat aktivitas produksi padat sumber daya. Namun, setelah melewati tingkat pendapatan tertentu, kondisi lingkungan membaik karena faktor teknologi, perubahan struktur ekonomi, dan meningkatnya kesadaran masyarakat terhadap isu keberlanjutan.

Degradasi lingkungan sendiri dipahami sebagai penurunan kualitas ekosistem yang mengganggu fungsi alaminya. Faktor pemicu utamanya adalah pertumbuhan ekonomi yang tidak terkendali, meningkatnya kepadatan penduduk, industrialisasi, serta konsumsi energi berlebihan. Dalam konteks ini, kebijakan ekonomi dan perilaku manusia sangat menentukan arah perkembangan teknologi serta implikasinya terhadap lingkungan. Saraç *and* Yağlikara (2017) menjelaskan tiga mekanisme penting, yaitu (1) efek skala (peningkatan produksi mendorong eksploitasi sumber daya yang lebih besar); (2) efek komposisi (pergeseran struktur ekonomi dari sektor padat polusi menuju sektor rendah emisi); dan (3) efek teknologi (inovasi dan adopsi teknologi ramah lingkungan menekan emisi serta meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya).

Pertumbuhan ekonomi yang diarahkan dengan bijak dapat mendukung perbaikan kondisi lingkungan. Penerapan teknologi rendah emisi, sistem pengelolaan limbah efisien, serta digitalisasi untuk perencanaan berbasis data merupakan contoh kontribusi nyata teknologi terhadap keberlanjutan.

Selain itu, teknologi juga membawa dampak sosial. Digitalisasi dalam sektor manufaktur memperluas partisipasi masyarakat dalam ekonomi digital dan mendorong inklusi sosial melalui penciptaan lapangan kerja baru di bidang energi terbarukan serta pengelolaan sumber daya berbasis teknologi ramah lingkungan. Hal ini menegaskan bahwa ekonomi hijau

bukan hanya mengejar pertumbuhan ekonomi, tetapi juga mengedepankan keseimbangan antara peningkatan kualitas hidup masyarakat dengan pelestarian lingkungan (Lumbanraja *and* Lumbanraja, 2023).

Peran teknologi dalam ekonomi hijau bersifat lintas sektor. Dari sisi ekonomi, teknologi meningkatkan efisiensi produksi dan daya saing. Dari sisi lingkungan, teknologi menyediakan solusi efisiensi energi, pengurangan emisi, serta pemanfaatan energi terbarukan. Dari sisi sosial, teknologi memperkuat inklusi, mendorong inovasi, dan mengubah pola kerja ke arah yang lebih adaptif. Dengan demikian, teknologi dapat dipandang sebagai pilar utama pembangunan berkelanjutan.

Lebih jauh, teknologi juga berfungsi dalam pengukuran serta evaluasi kinerja keberlanjutan. Perusahaan kini menggunakan perangkat lunak manajemen keberlanjutan, *Geographic Information Systems* (GIS), *Internet of Things* (IoT), *blockchain*, kecerdasan buatan (AI), dan *machine learning*. Teknologi-teknologi ini membantu integrasi dan analisis data keberlanjutan, meningkatkan akurasi pemantauan, sekaligus memperkuat transparansi dan akuntabilitas terhadap para pemangku kepentingan.

1.4 Ekologi Industri dan Ekonomi Sirkular

1.4.1 Definisi dan Prinsip Dasar

Ekologi Industri (*Industrial Ecology*, IE) adalah disiplin yang menggabungkan prinsip ekologi dengan aktivitas industri untuk menciptakan sistem produksi yang berkelanjutan. IE memandang sistem industri sebagai bagian dari ekosistem yang lebih luas, dengan menekankan transisi dari model linear *take–make–dispose* menuju sistem siklus tertutup yang menyerupai metabolisme alam (*industrial metabolism*).

Konsep ini berfokus pada pemanfaatan limbah sebagai sumber daya baru. Melalui prinsip *industrial symbiosis*, yaitu hasil samping dari satu industri dapat menjadi input bagi industri lain, sehingga terbentuk hubungan simbiotik yang mengurangi polusi sekaligus meningkatkan efisiensi sumber daya (Shah *et al*., 2024; Geng *et al*., 2012). Implementasi praktis konsep ini diwujudkan melalui *eco-industrial parks* (EIP), yakni kawasan industri yang didesain untuk memfasilitasi pertukaran energi, material, dan informasi antarindustri.

1.4.2 Metodologi dan Alat Analisis

IE tidak hanya membahas isu polusi, tetapi juga menyediakan seperangkat alat analisis untuk mengelola sumber daya secara optimal. Beberapa pendekatan utama antara lain:

a. *Material Flow Analysis* (MFA): menganalisis aliran material dan energi dalam sistem industri untuk mengidentifikasi peluang penghematan dan pemanfaatan ulang.
b. *Life Cycle Assessment* (LCA): mengevaluasi dampak lingkungan sepanjang siklus hidup produk untuk mendukung peralihan menuju model produksi berkelanjutan (Ghisellini *et al*., 2016; Merli *et al*., 2018).
c. *Industrial Symbiosis:* penerapan prinsip ekonomi sirkular dalam praktik nyata dengan memanfaatkan limbah antarindustri sebagai sumber daya baru (Geissdoerfer *et al*., 2017)

Dengan mengadopsi pendekatan ini, IE berfungsi sebagai *agent of change* yang mendorong industri bertransformasi dari sistem linear ke model ekonomi sirkular.

1.4.3 Manfaat Ekologi Industri

Penerapan IE membawa sejumlah manfaat yang signifikan, di antaranya:

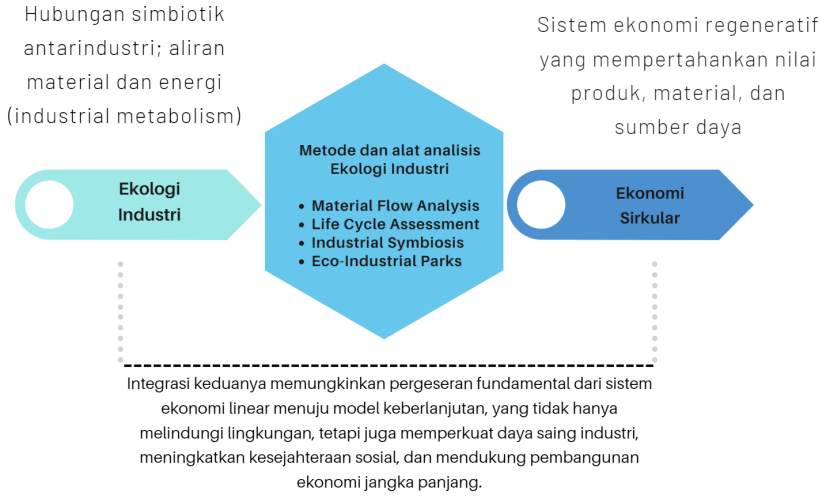
a. Efisiensi sumber daya: mengurangi konsumsi bahan baku baru melalui daur ulang dan pemanfaatan limbah (Shah *et al*., 2024).
b. Pengurangan dampak lingkungan: menekan emisi, polusi air, udara, dan tanah (Geng *et al*., 2012).
c. Kolaborasi dan inovasi: memperkuat kerja sama antarindustri dalam berbagi teknologi dan pengetahuan (Merli *et al*., 2018).
d. Keunggulan ekonomi: menurunkan biaya produksi, mengurangi ketergantungan pada pasar bahan baku, dan meningkatkan citra perusahaan di mata konsumen sadar lingkungan.
e. Kontribusi sosial: membuka lapangan kerja hijau dan mendukung pembangunan ekonomi lokal (Kirchherr *et al*., 2017).

1.4.4 Hubungan Ekologi Industri dengan Ekonomi Sirkular

Ekonomi Sirkular (*Circular Economy*, CE) merupakan paradigma yang bertujuan meminimalkan limbah, memaksimalkan efisiensi sumber daya, dan mempertahankan nilai produk selama mungkin dalam siklus ekonomi. CE menekankan sistem regeneratif di mana input sumber daya, limbah, emisi, dan kebocoran energi diminimalkan (Geissdoerfer *et al*., 2017). Beberapa aspek kunci CE adalah:

a. Efisiensi sumber daya melalui optimalisasi aliran material (Ghisellini *et al*., 2016).
b. Reduksi, penggunaan ulang, dan daur ulang (3R) sebagai strategi inti (Kirchherr *et al*., 2017).
c. Retensi nilai produk melalui perpanjangan usia pakai dan inovasi desain.
d. Manfaat sosial-ekonomi berupa penciptaan lapangan kerja, peluang komersial baru, dan peningkatan PDB (Merli *et al*., 2018).

Namun, Kirchherr *et al.* (2017) menekankan bahwa sebagian besar definisi CE masih berfokus pada 3R tanpa cukup memperhatikan aspek sosial dan generasi mendatang. Oleh karena itu, integrasi dengan IE sangat penting, karena IE menawarkan mekanisme teknis (*industrial symbiosis*, MFA, LCA) yang memungkinkan penerapan CE secara nyata (Gambar 1.4). Perbandingan antara IE dan CE dapat dilihat pada Tabel 1.2.



Gambar 1.4 Integrasi Ekologi Industri dan Ekonomi Sirkular

Tabel 1.2 Perbandingan Ekologi Industri dan Ekonomi Sirkular

Aspek	Ekologi Industri	Ekonomi Sirkular
Paradigma (Ghisellini *et al.*, 2016; Kirchherr *et al.*, 2017)	Transisi dari model linear ke model siklus (*closed-loop system*)	Pergeseran dari *take–make–dispose* ke 3R (*reduce, reuse, recycle*)
Tujuan (Merli *et al.*, 2018; Geng *et al.*, 2012)	Meminimalkan limbah, mengoptimalkan sumber daya, dan menciptakan simbiosis antarindustri	Mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam baru, memaksimalkan retensi nilai produk, dan mendorong regenerasi sistem ekonomi

Aspek	Ekologi Industri	Ekonomi Sirkular
Metode/Alat Analisis (Geng *et al*., 2012; Merli *et al*., 2018)	– *Material Flow Analysis* (MFA) – *Life Cycle Assessment* (LCA) – *Industrial Symbiosis* – *Eco-Industrial Parks*	– Desain produk berkelanjutan – Model bisnis berbasis sirkular (*sharing, remanufacturing, recycling*) – Indikator CE (*resource efficiency, waste minimization*)
Manfaat (Shah *et al*., 2024; Geissdoerfer *et al*., 2017)	– Efisiensi energi dan material – Mengurangi polusi dan limbah – Penghematan biaya – Peningkatan citra perusahaan	– Pertumbuhan PDB – Penciptaan lapangan kerja hijau – Peluang komersial baru – Peningkatan kualitas lingkungan hidup
Tantangan (Kirchherr *et al*., 2017; Merli *et al*., 2018)	– Investasi awal tinggi – Perubahan budaya organisasi – Keterbatasan data dan teknologi – Kolaborasi antar pihak terkait	– Definisi masih bervariasi (114 versi) – Fokus 3R belum selalu dikaitkan dengan pembangunan berkelanjutan – Kompleksitas implementasi lintas sektor
Level Implementasi (Merli *et al*., 2018)	– Mikro (perusahaan), meso (simbiosis industri/EIP), makro (kebijakan lingkungan)	– Mikro (produk/ perusahaan), meso (industri/*cluster*), makro (ekonomi nasional dan global)

1.4.5 Indikator Keberhasilan IE dan CE

Keberhasilan IE dan CE dapat dinilai melalui berbagai indikator seperti dijelaskan pada Tabel 1.3.

Tabel 1.3 Indikator Keberhasilan Ekologi Industri dan Ekonomi Sirkular

Dimensi	Indikator Utama	Penjelasan
Efisiensi Sumber Daya (Shah *et al*., 2024; Geng *et al*., 2012)	– Intensitas material (*material intensity*) – Efisiensi energi	Mengukur pengurangan penggunaan bahan baku dan konsumsi energi dalam produksi
Lingkungan (Ghisellini *et al*., 2016; Geissdoerfer *et al*., 2017)	– Reduksi limbah padat – Penurunan emisi CO_2 – Pengurangan polusi air dan tanah	Menilai sejauh mana praktik IE dan CE menekan dampak negatif terhadap ekosistem
Kolaborasi Antarindustri (Shah *et al*., 2024; Merli *et al*., 2018)	– Jumlah pertukaran limbah antarindustri – Partisipasi dalam *eco-industrial parks*	Mengukur keberhasilan industrial symbiosis dalam memfasilitasi pertukaran sumber daya
Kinerja Ekonomi (Geng *et al*., 2012; Geissdoerfer *et al*., 2017)	– Efisiensi biaya operasional – Peningkatan produktivitas – Nilai tambah dari limbah yang dimanfaatkan kembali	Mencerminkan kontribusi IE dan CE terhadap keuntungan ekonomi jangka panjang

Dimensi	Indikator Utama	Penjelasan
Sosial (Kirchherr *et al*., 2017; Merli *et al*., 2018)	– Penciptaan lapangan kerja hijau – Peningkatan kesadaran konsumen – Partisipasi masyarakat dalam program daur ulang	Menilai dampak sosial dari penerapan konsep IE dan CE
Inovasi dan teknologi (Shah *et al*., 2024; Merli *et al*., 2018)	– Adopsi teknologi bersih – Penggunaan LCA dan MFA dalam evaluasi – Digitalisasi rantai pasok (IoT, AI)	Mengukur kemampuan industri beradaptasi dengan teknologi berkelanjutan
Kebijakan dan regulasi (Ghisellini *et al*., 2016; Kirchherr *et al*., 2017)	– Tingkat kepatuhan regulasi lingkungan – Implementasi standar keberlanjutan	Menunjukkan peran regulasi dalam memperkuat praktik IE dan CE

Pengukuran keberhasilan ini menghadapi tantangan berupa kompleksitas sistem, keterbatasan data, dan perbedaan perspektif stakeholder (Geissdoerfer *et al*., 2017). Geng *et al*. (2012) menekankan pentingnya penggunaan MFA dan LCA sebagai metode utama untuk menilai keberhasilan CE, khususnya dalam konteks negara berkembang.

1.4.6 Kesimpulan

Ekologi industri dan ekonomi sirkular adalah dua pendekatan yang saling melengkapi. IE menyediakan kerangka praktis melalui simbiosis industri, MFA, dan LCA, sementara CE menawarkan paradigma makro yang menekankan regenerasi sistem dan

retensi nilai produk. Integrasi keduanya memungkinkan pergeseran fundamental dari sistem ekonomi linear menuju model keberlanjutan, yang tidak hanya melindungi lingkungan, tetapi juga memperkuat daya saing industri, meningkatkan kesejahteraan sosial, dan mendukung pembangunan ekonomi jangka panjang.

1.5 Pertanyaan Konsep dan Studi Kasus

Jawablah pertanyaan yang terkait dengan konsep sebagai berikut:

1. Jelaskan secara singkat perbedaan utama antara Revolusi Industri 1.0, 2.0, 3.0, dan 4.0, serta bagaimana *Society* 5.0 melengkapi fase-fase tersebut.
2. Mengapa *Society* 5.0 disebut sebagai era yang lebih humanis dibandingkan dengan Revolusi Industri 4.0?
3. Bagaimana konsep *Sustainable Development Goals (SDGs)* berhubungan dengan perkembangan teknologi di era industri modern? Berikan minimal dua contoh konkret.
4. Jelaskan hubungan antara ekonomi hijau (*green economy*) dengan penerapan teknologi ramah lingkungan dalam sektor industri.
5. Apa yang dimaksud dengan *Environmental Kuznets Curve* (EKC) dan bagaimana teknologi berperan dalam membalikkan kurva tersebut pada jangka panjang?
6. Definisikan *Ekologi Industri* dan *Ekonomi Sirkular*. Apa perbedaan paradigma utama keduanya?
7. Bagaimana konsep *Industrial Symbiosis* membantu mengurangi limbah dan meningkatkan efisiensi sumber daya di kawasan industri?
8. Berikan tiga tantangan yang dihadapi industri dalam mengimplementasikan konsep ekonomi sirkular.

9. Bagaimana peran *Green Society* dalam mempercepat adopsi desain produk berkelanjutan?
10. Sebutkan dan jelaskan minimal dua metode evaluasi keberlanjutan yang dapat digunakan industri untuk menilai dampak teknologi terhadap lingkungan dan masyarakat.

Instruksi Studi Kasus: Analisis Transformasi Teknologi dan Keberlanjutan dalam Konteks Nyata

1. Pendahuluan

Mahasiswa bekerja dalam kelompok (3–4 orang) untuk menganalisis sebuah perusahaan atau sektor industri yang sedang atau telah mengalami transformasi teknologi. Analisis dilakukan dengan mengaitkan perkembangan teknologi dengan prinsip keberlanjutan.

2. Langkah-Langkah:

a. Pemilihan Objek Studi Kasus
   - Pilih satu industri/perusahaan (misalnya: otomotif, energi, manufaktur, kesehatan, atau agribisnis).
   - Deskripsikan profil singkat industri/perusahaan tersebut.

b. Analisis Transformasi Teknologi
   - Identifikasi perubahan teknologi yang telah atau sedang diadopsi (misalnya otomatisasi, digitalisasi, IoT, AI, energi terbarukan).
   - Jelaskan dampak positif dan negatif dari transformasi tersebut terhadap aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan.

c. Keterkaitan dengan SDGs
   - Kaitkan implementasi teknologi tersebut dengan minimal 2 dari 17 tujuan SDGs.

d. Ekologi Industri dan Ekonomi Sirkular
   - Tinjau bagaimana industri tersebut mengelola limbah, energi, dan sumber daya.
   - Jelaskan apakah ada penerapan *industrial symbiosis* atau strategi *circular economy.*
e. *Green Society* dan Konsumen
   - Analisis bagaimana respon konsumen terhadap produk atau layanan yang lebih berkelanjutan.
   - Berikan contoh upaya perusahaan dalam meningkatkan kesadaran konsumen.
f. Evaluasi dan Rekomendasi
   - Lakukan Analisa terhadap minimal satu metode evaluasi keberlanjutan (LCA, SROI, atau *Sustainability Reporting*) yang sudah diterapkan untuk menilai dampak teknologi.
   - Berikan rekomendasi inovatif agar transformasi teknologi yang dilakukan dapat lebih mendukung keberlanjutan jangka panjang.

3. Ketentuan Output:
   a. Laporan dalam bentuk PPT.
   b. Presentasi kelompok maksimal 15 menit.
   c. Kriteria Penilaian:
      - Pemahaman Konsep (20%)
      - Analisis Kritis dan Keterkaitan dengan SDGs (30%)
      - Kreativitas Solusi Berkelanjutan (30%)
      - Kejelasan Laporan dan Presentasi (20%)

Referensi

Alimohammadlou, M., & Khoshsepehr, Z. (2023). The role of Society 5.0 in achieving sustainable development: a spherical fuzzy set approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(16), 47630-47654. https://doi.org/10.1007/s11356-023-25543-2

Barbier, X., Kircher, E., & Cordero, P. (2003). The future is our business: How ESA prepares its technology. *European Space Agency Bulletin*, 116, 46–51. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14740652

Bocken, N. M., De Pauw, I., Bakker, C., & Van Der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of industrial and production engineering*, 33(5), 308-320. https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124

Chilabade, D., Mwengula, G., & Mulopo, J. (2025). Review of opportunities and challenges for food waste circular economy advancement via hydrothermal carbonization. *Process Safety and Environmental Protection*, 196, 105433. https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.03.029

da Fonseca, L. M. C. M. (2015). ISO 14001:2015: An improved tool for sustainability. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 8(1), 35–50. https://doi.org/10.3926/jiem.1298

Faradilla, A., Azmi, N., Sari, E., Angwen, G. E., Chofreh, A. G., Goni, F. A., & Klemeš, J. J. (2022). Sustainable product design concept metrics for developing the eco-bag from pineapple leaf fiber. *Chemical Engineering Transactions*, 94, 949–954. https://doi.org/10.3303/CET2294158

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production,* 143, 757–768. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048

Geng, Y., Fu, J., Sarkis, J., & Xue, B. (2012). Towards a national circular economy indicator system in China: an evaluation

and critical analysis. *Journal of cleaner production*, 23(1), 216-224. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.005

Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007

Global Reporting Initiative. (2020). *Consolidated set of GRI Standards 2020*. GRI. https://www.globalreporting.org

Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). *Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement* (NBER Working Paper No. 3914). National Bureau of Economic Research. https://doi.org/10.3386/w3914

ISO. (2006). *Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework* (ISO 14040:2006). International Organization for Standardization.

Jayasinghe, G. Y., Maheepala, S. S., & Wijekoon, P. C. (2020). *Green productivity and cleaner production: A guidebook for sustainability.* CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003082262

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. P. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling,* 127, 221–232. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005

Kumar, S., Tiwari, G., & Tiwari, N. (2024). *Evolving industries: A journey from Industry 1.0 to 5.0.* In Artificial intelligence and communication techniques in Industry 5.0. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003494027-5

Liu, X., Yuan, X., Ye, N., & Zhang, R. (2023). An intelligent low carbon economy management scheme based on the genetic algorithm enabled replacement recommendation model. *Technological Forecasting and Social Change*, 194, 122597. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122597

Lumbanraja, P. C., & Lumbanraja, P. L. (2023). Analisis variabel ekonomi hijau (Green Economy Variable) terhadap

pendapatan Indonesia (Tahun 2011–2020) dengan metode SEM-PLS. Cendekia Niaga: *Journal of Trade Development and Studies*, 7(2), 45–59.

Merli, R., Preziosi, M., & Acampora, A. (2018). How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 178, 703–722. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.112

Nicholls, J., Lawlor, E., Neitzert, E., & Goodspeed, T. (2012). *A guide to Social Return on Investment*. The SROI Network.

Prasetyanto, P. K., & Sari, F. (2021). Environmental Kuznets Curve: Economic Growth With Environmental Degradation In Indonesia. *International Journal Of Energy Economics And Policy*, 622-628. Doi: https://www.econjournals.net.tr/index.php/ijeep/article/view/11609.

Saraç, Ş., & Yağlikara, A. (2017). Environmental Kuznets Curve: The evidence from BSEC countries. *Ege Academic Review*, 17(2), 255–264.

Shah, A., Che Mat, C. R., Ibrahim, A., Zhang, Y., & Muzammil, S. (2024). *Industrial Ecology: A Fusion of Material and Energy in Green Supply Chain Context*. Springer.

United Nations. (n.d.). *The 17 goals. United Nations*. https://sdgs.un.org/goals

BAB 2
PERANCANGAN PRODUK BERKELANJUTAN (*SUSTAINABLE PRODUCT DESIGN*)

Rencana Pembelajaran

Tujuan	Mahasiswa mampu menguasai prinsip dan isu perkembangan teknologi dan hubungannya dengan ekonomi, sosial, dan ekologi secara umum dan mengkomunikasikannya secara tulis dan lisan
Capaian Pembelajaran	CPMK1: Mampu menguasai prinsip dan isu terkini dalam ekonomi, sosial, ekologi secara umum (P.c) CPMK2: Mampu menguasai pengetahuan tentang teknik komunikasi dan perkembangan teknologi terbaru dan terkini dalam bidang ekonomi, sosial, ekologi secara umum (P.d) CPMK3: Mampu meneliti dan menyelidiki masalah rekayasa kompleks pada sistem terintegrasi dengan melaksanakan analisis, interpretasi data dan sintesis informasi untuk memberikan solusi (KK.c)
Sub Pembahasan	1. Hubungan *sustainable development* dengan *product design* 2. Konsep *sustainable product design* 3. Faktor pendorong (*drivers*) dan penghambat (*barriers*) *sustainable product design* 4. *Green society* 5. Studi kasus *sustainable product design* 6. Penelitian dan pengabdian kepada masyarakat terkait *sustainable product design*

2.1 Hubungan *Sustainable Development* dengan *Product Design*

Sustainable development atau pembangunan berkelanjutan sebagaimana telah dijelaskan pada Bab 1, bertujuan untuk memenuhi kebutuhan generasi saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka. Dalam konteks *product design*, hubungan antara pembangunan berkelanjutan dan desain produk sangat erat karena desain produk yang baik harus mempertimbangkan dampak sosial, ekonomi, dan lingkungan. Desain produk yang berkelanjutan bertujuan untuk menciptakan produk yang tidak hanya memenuhi kebutuhan konsumen, tetapi juga meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan serta meningkatkan kesejahteraan sosial dan ekonomi (Che Aziz *et al*., 2023).

Sustainable product design adalah pendekatan terintegrasi yang mencakup semua aspek keberlanjutan dalam siklus hidup produk, mulai dari pemilihan bahan baku yang ramah lingkungan, proses produksi yang efisien, distribusi produk yang hemat energi, hingga tahap akhir penggunaan di mana produk dapat didaur ulang atau diperbaiki (Gambar 2.1). Dalam mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan, desain produk berkelanjutan membantu mengurangi emisi gas rumah kaca, mengurangi polusi, meningkatkan efisiensi dalam penggunaan sumber daya alam dan proses produksi yang akan dilakukan (Che Aziz *et al*., 2023).

Prinsip utama pembangunan berkelanjutan adalah keseimbangan antara tiga pilar, yaitu lingkungan, ekonomi, dan sosial. Desain produk berkelanjutan yang mendukung prinsip ini, melalui inisiatif berikut (Che Aziz *et al*., 2023):

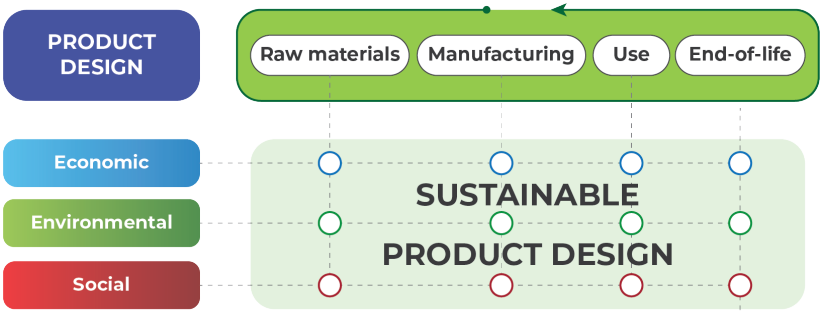
1. Pengoptimalan penggunaan bahan/ material yang ramah lingkungan.
2. Merancang proses produksi yang menghemat penggunaan energi dan sumber daya produksi lainnya.
3. Memastikan produk memberikan manfaat ekonomi jangka panjang.
4. Penggunaan teknologi hijau dan pendekatan ekonomi sirkular memungkinkan produk dirancang untuk didaur ulang, digunakan kembali, atau diperbaiki, sehingga mengurangi jumlah limbah dan menciptakan manfaat jangka panjang bagi masyarakat dan lingkungan.

Gambar 2.1 Pendekatan terintegrasi *sustainable product design*

2.2 Konsep *Sustainable Product Design*

Konsep *sustainable product design* melibatkan pendekatan yang komprehensif terhadap proses desain, dengan mempertimbangkan seluruh siklus hidup produk. Ini meliputi aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi. Tujuan utama dari desain produk berkelanjutan adalah untuk menciptakan produk yang berfungsi secara optimal, tetapi juga ramah lingkungan dan efisien dalam penggunaan sumber daya. Produk dirancang dengan mempertimbangkan siklus hidup mulai dari desain awal hingga akhir masa pakainya, termasuk potensi untuk didaur ulang atau diperbaiki (Ahmad *et al*., 2018).

Meskipun produk dapat berkontribusi positif pada ekosistem, produk juga dapat menyebabkan dampak negatif terhadap lingkungan sepanjang siklus hidup mereka, mulai dari memperoleh bahan baku, proses produksi, dan fase penggunaan oleh konsumen, sampai pada tahap akhir dari siklus hidupnya (Gambar 2.2). Dilaporkan bahwa sebagian besar dampak negatif lingkungan, dapat ditentukan pada fase desain awal yang menunjukkan bahwa penentuan keberlanjutan produk harus dipertimbangkan sedini mungkin. Konsep desain berkelanjutan dapat menjadi pedoman untuk mengukur tingkat keberlanjutan konsep desain produk untuk mendukung desainer dalam mengembangkan produk yang berkelanjutan.



Gambar 2.2 *Sustainable product design* (Ahmad *et al*., 2018)

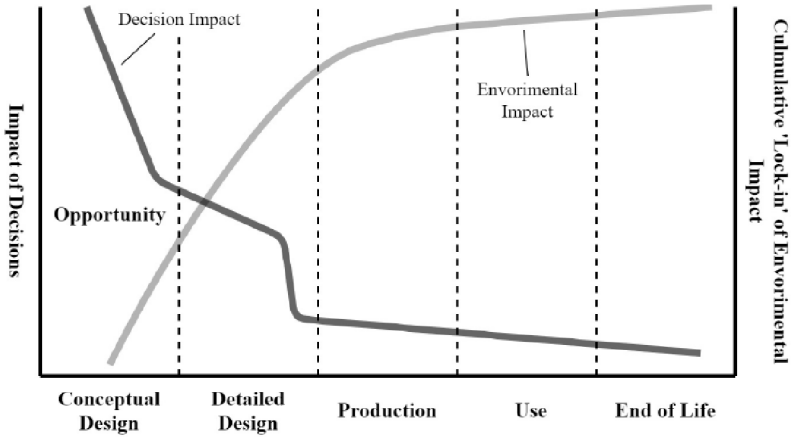
Pengembangan konsep produk berkelanjutan oleh para akademisi dan praktisi, perlu dilakukan untuk mengurangi pemanasan global dan kelangkaan sumber daya produksi. Hal ini bertujuan untuk meminimalkan dampak lingkungan dari produk pada tahap desain, yang merupakan hal kritikal untuk menciptakan produk yang berkelanjutan. Oleh karena itu, memenuhi persyaratan fungsional dan keberlanjutan sangat penting untuk sebuah produk sukses di pasar.

Pendekatan *Design for Environment* (DfE) juga berperan penting dalam memastikan bahwa aspek keberlanjutan dipertimbangkan sejak tahap awal desain. Pada masa lalu, banyak produk ramah lingkungan hanya memperhatikan aspek lingkungan, tetapi saat ini desain produk berkelanjutan harus mencakup dimensi ekonomi dan sosial, sehingga menciptakan manfaat yang lebih holistik bagi masyarakat, lingkungan, dan ekonomi (Jiang *et al*., 2021). Keberlanjutan dalam desain produk telah semakin berkembang dari *product level* ke *socio-technical system level*, yang mewujudkan desain untuk *product-service systems* dan inovasi sosial (Jiang *et al*., 2021).

Sebelum aspek ekonomi dan sosial menjadi pertimbangan dalam sebuah konsep desain produk berkelanjutan, desain produk yang ramah lingkungan umumnya dianggap sebagai desain yang berkelanjutan. Misalnya melakukan review penilaian siklus hidup/*Life Cycle Assessment* (LCA) untuk pengembangan produk yang berkelanjutan, meskipun LCA adalah berkaitan dengan aspek lingkungan saja. Ahmad *et al*. (2018) mengkategorikan *tools* yang digunakan dalam melakukan desain dan pengembangan produk berkelanjutan kepada dua, yaitu:

1. *Partial Sustainable Product Design (P-SPD) Tools*: tidak mempertimbangkan ketiga aspek keberlanjutan.
2. *Sustainable Product Design (SPD) Tools:* mempertimbangkan keseluruhan aspek keberlanjutan secara komprehensif.

Proses manufaktur sebuah produk, akan mempengaruhi ketiga aspek keberlanjutan sepanjang siklus hidupnya, dimulai dari ekstraksi bahan baku, proses manufaktur, transportasi, penggunaan, dan pembuangan sebagaimana terlihat pada Gambar 2.3 (Han *et al*., 2021). 80% pengaruh produk terhadap aspek keberlanjutan ditentukan pada tahap desain, sehingga keputusan yang diambil pada fase ini akan sangat menentukan apakah sebuah produk layak atau tidak dari perspektif keberlanjutan (Ahmad *et al*., 2018).



Gambar 2.3 Peluang pada tahap desain konseptual untuk meminimalkan akumulasi dampak lingkungan yang bersifat mengikat/*lock-in* (Han *et al.*, 2021)

Menurut Hosseinpour *et al*. (2015), desain produk adalah salah satu tahapan terpenting dalam pengembangan produk yang berkelanjutan. Desain mempengaruhi semua tahap siklus hidup produk, mulai dari ekstraksi bahan baku sampai akhir umur produk. Di antara berbagai cakupan keberlanjutan, desain produk memiliki pengaruh yang signifikan terhadap pengembangan produk dari seleksi material, proses manufaktur dan perakitan, distribusi produk, penggunaan, penggunaan kembali, daur ulang, dan pembuangan.

Ahmad *et al*. (2018) mendefiniskan desain produk berkelanjutan sebagai kemampuan suatu produk untuk bekerja terus menerus sambil memastikan dampak lingkungan yang rendah, memberikan manfaat ekonomi dan sosial kepada para pemangku kepentingan. Desain produk konvensional berfokus pada fungsionalitas produk, kualitas, dan biaya dalam rangka memenuhi kebutuhan pelanggan, sedangkan desain produk berkelanjutan secara sistematis melihat seluruh siklus hidup produk untuk memenuhi pencapaian kinerja fungsional, lingkungan, dan ekonomi serta pada saat yang sama memberikan manfaat sosial kepada masyarakat.

Konsep desain produk yang berkelanjutan, dapat dengan mudah dipahami dengan memahami istilah "desain" yang merupakan kegiatan kreatif untuk memilih antara kemungkinan yang berbeda. Ini merupakan konsep yang sangat luas dalam hal pengembangan ide melalui proses yang mengarah pada pengembangan suatu produk. Gagnon *et al*. (2012) menjelaskan empat tahapan proses desain konvensional sebagai mana terlihat pada Tabel 2.1.

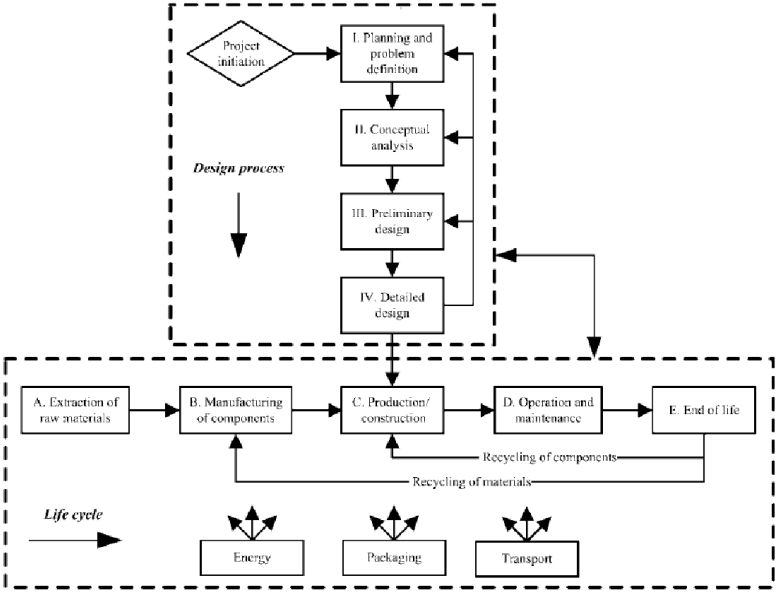
Tabel 2.1 Proses Desain Konvensional (Gagnon et al., 2012)

Perencanaan dan Definisi Masalah	Analisis Konseptual	Desain Awal	Desain Detail
•Pembentukan tim •Penentuan masalah, tujuan, dan konteks •Identifikasi batasan dan data pendahuluan lainnya •Perencanaan tahap berikutnya	•Identifikasi fungsi sistem Pembuatan konsep alternatif Penetapan spesifikasi desain, berdasarkan fungsi atau persyaratan wajib seperti regulasi	•Pengembangan konsep alternatif Evaluasi konsep (kinerja teknis, estimasi biaya, analisis risiko, dll.) Pemilihan konsep terbaik	•Pengembangan rinci dari alternatif yang dipilih Evaluasi lebih lanjut dan optimasi Identifikasi kebutuhan untuk tahap manufaktur, konstruksi, operasi, dan pemeliharaan Dokumentasi dan komunikasi dari desain akhir

Tujuan utama dari desain produk yang berkelanjutan, adalah untuk mengurangi penggunaan sumber daya dalam pembuatan sebuah produk dan meminimalkan emisi ke lingkungan, serta pada saat yang sama meningkatkan kontribusi terhadap aspek sosial-ekonomi sepanjang siklus hidupnya (Gagnon *et al*., 2012). Lebih lanjut Gagnon *et al*. (2012) mengadopsi proses desain konvensional untuk proses desain berkelanjutan, sebagaimana terlihat pada Tabel 2.2. Selanjutnya Gambar 2.4 (Gagnon *et al*. (2012) memperlihatkan hubungan antara proses desain berkelanjutan dengan konsep LCA.

Tabel 2.2 Proses Desain Berkelanjutan (Gagnon *et al*., 2012)

Perencanaan dan Definisi Masalah	Analisis Konseptual	Desain Awal	Desain Detail
•**Membentuk tim desain multidisipliner. Merumuskan prinsip-prinsip keberlanjutan.** Menetapkan kerangka konseptual keberlanjutan. **Mengidentifikasi isu-isu keberlanjutan yang terkait dengan masalah yang telah didefinisikan.** Mengidentifikasi hubungan antara proyek dengan elemen-elemen dalam kerangka konseptual. Menganalisis pemangku kepentingan dan merencanakan keterlibatan mereka.	•**Menetapkan kriteria keberlanjutan yang selaras dengan isu-isu keberlanjutan yang sebelumnya diidentifikasi, secara paralel dengan fungsi teknis.** Memastikan kelengkapan kriteria keberlanjutan dalam kerangka konseptual. Mengembangkan visi masa depan di mana fungsi-fungsi dapat terpenuhi dengan tetap mempertimbangkan prinsip keberlanjutan. **Menghasilkan setidaknya satu konsep alternatif yang berbeda dari konsep konvensional dengan menggunakan alat keberlanjutan.** Menetapkan skenario umum yang memungkinkan perkembangan konsep alternatif. **Menentukan indikator keberlanjutan yang diturunkan dari isu atau kriteria, secara paralel dengan spesifikasi teknis yang diturunkan dari fungsi. Mengidentifikasi alat analisis yang akan digunakan untuk menghasilkan data bagi setiap indikator. Menetapkan pendekatan pengambilan keputusan multikriteria**.	•**Menilai kinerja konsep alternatif berdasarkan kriteria atau indikator keberlanjutan, termasuk satu "alternatif pembanding" yang mewakili praktik saat ini. Memvalidasi pendekatan pengambilan keputusan multikriteria yang dipilih dan menggunakannya untuk merekomendasikan konsep yang paling tepat.** Memvalidasi kinerja konsep alternatif berdasarkan skenario yang telah ditentukan.	•**Memperhalus penilaian terhadap konsep yang dipilih.** Mengoptimalkan kinerja konsep berdasarkan kriteria atau indikator keberlanjutan. Memaksimalkan ketangguhan (*robustness*) dan fleksibilitas dari konsep yang dipilih dalam berbagai skenario yang telah diidentifikasi. Mengkomunikasikan rekomendasi untuk tahap manufaktur, konstruksi, penggunaan, dan akhir masa pakai. **Menghasilkan seperangkat indikator keberlanjutan untuk tujuan pemantauan.**



Gambar 2.4 Tahapan Desain dan *Life Cycle* (Gagnon *et al*., 2012)

Baumann *et al*. (2002) mengklasifikasikan *eco-design tools* kepada 6 kategori, yaitu *frameworks, checklists and guidelines, rating and ranking approaches, analytical tools, software and expert systems, and organizing methods.*

LCA adalah sebuah metode yang paling umum digunakan untuk sebuah desain produk yang ramah lingkungan (dijelaskan lebih detail pada Bab 4). LCA menyediakan data kuantitatif dampak produk terhadap lingkungan sepanjang siklus hidupnya, *from cradle* (ekstraksi material) *to grave* (akhir kehidupan) (Germani *et al*., 2013). LCA yang disederhanakan adalah sebuah cara sederhana dan mudah untuk melakukan penilaian dalam waktu yang lebih singkat dan dengan sumber daya dan data yang lebih sedikit, tetapi memberikan hasil yang tidak pasti. Ekstensif data diperlukan untuk melakukan proses LCA secara lengkap/ penuh. Akibatnya, akan menjadi sulit untuk menggunakan metode

ini pada tahap desain selanjutnya jika informasi terperinci tentang produk akhir tidak tersedia (Hosseinpour *et al*., 2015). Tools lain yang umum digunakan untuk desain produk ramah lingkungan adalah QFD menggunakan HoQ (Hosseinpour *et al*., 2015).

2.3 Faktor Pendorong (*Drivers*) dan Penghambat (*Barriers*) *Sustainable Product Design*

Dalam penerapan *sustainable product design*, terdapat berbagai faktor pendorong (*drivers*) dan penghambat (*barriers*) yang mempengaruhi kesuksesan implementasinya. Menurut Che Aziz *et al*., (2023) *drivers* dalam penerapan *sustainable product design* adalah sebagai berikut:

1. Kebutuhan Pasar dan Konsumen
   Konsumen semakin sadar akan pentingnya produk yang ramah lingkungan dan berkelanjutan, sehingga menciptakan permintaan yang lebih tinggi untuk produk-produk yang dirancang secara berkelanjutan. Penelitian yang dilakukan mengidentifikasi bahwa *customer requirements* (CRs) sangat mempengaruhi bagaimana produk didesain, seperti permintaan produk yang mudah diinstal, ramah lingkungan, serta memiliki fitur keselamatan yang baik.
2. Regulasi dan Kebijakan Pemerintah
   Regulasi lingkungan yang semakin ketat menjadi salah satu pendorong utama bagi perusahaan untuk mengadopsi praktik-praktik keberlanjutan dalam desain produk mereka. Pemerintah di berbagai negara telah menerapkan standar yang mengharuskan perusahaan untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, termasuk pengurangan emisi karbon dan penggunaan bahan berbahaya.

3. Tekanan dari Pemangku Kepentingan
   Tekanan dari pemangku kepentingan, seperti investor, komunitas, dan organisasi non-pemerintah (NGO), yang mendorong perusahaan untuk lebih bertanggung jawab secara sosial dan lingkungan. Perusahaan dituntut untuk menjaga reputasi mereka dengan menunjukkan komitmen terhadap praktik keberlanjutan.
4. Efisiensi Biaya dan Keunggulan Kompetitif
   Adopsi desain produk berkelanjutan dapat menghasilkan efisiensi biaya dalam jangka panjang, seperti pengurangan penggunaan energi, air, dan bahan baku. Selain itu, perusahaan yang mampu menawarkan produk yang ramah lingkungan memiliki keunggulan kompetitif di pasar yang semakin peduli pada isu keberlanjutan.
5. Inovasi Teknologi
   Perkembangan teknologi memungkinkan terciptanya produk yang lebih berkelanjutan. Teknologi seperti sensor pintar, kontrol otomatis, dan energi terbarukan memungkinkan efisiensi yang lebih tinggi dalam proses produksi, distribusi, dan penggunaan produk.

Lebih lanjut Che Aziz *et al*., (2023) menerangkan tentang *barriers* dalam penerapan *sustainable product design*, yaitu:

1. Biaya Implementasi yang Tinggi
   Salah satu hambatan terbesar dalam penerapan *sustainable product design* adalah biaya awal yang tinggi. Penggunaan teknologi canggih dan material ramah lingkungan, sering kali memerlukan investasi yang besar di awal, yang bisa menjadi penghalang terutama bagi perusahaan kecil dan menengah.
2. Kurangnya Kesadaran dan Pengetahuan
   Tidak semua perusahaan atau konsumen memiliki kesadaran atau pengetahuan yang memadai tentang pentingnya desain produk berkelanjutan. Hal ini terutama berlaku di sektor-

sektor tradisional di mana kesadaran akan keberlanjutan belum menjadi prioritas utama.

3. Kompleksitas dalam Rantai Pasokan
   Mengimplementasikan desain produk berkelanjutan sering kali memerlukan perubahan dalam rantai pasokan. Pemilihan bahan baku yang ramah lingkungan, pengelolaan limbah, dan proses daur ulang dapat memperumit rantai pasokan dan memerlukan kerja sama yang lebih erat dengan pemasok.
4. Resistensi terhadap Perubahan
   Perubahan dalam strategi desain dan produksi sering kali menghadapi resistensi dari karyawan, manajemen, atau pemangku kepentingan lainnya yang terbiasa dengan proses yang sudah ada. Mengadopsi pendekatan berkelanjutan memerlukan perubahan dalam pola pikir dan praktik bisnis.
5. Ketidakpastian dalam Permintaan Pasar
   Meskipun ada peningkatan kesadaran terhadap produk berkelanjutan, masih terdapat ketidakpastian tentang sejauh mana konsumen bersedia membayar lebih untuk produk yang dirancang secara berkelanjutan. Ini bisa menjadi penghalang bagi perusahaan yang mempertimbangkan untuk mengadopsi praktik tersebut.

2.4 *Green Society*

Green society mengacu pada masyarakat yang menyadari pentingnya keberlanjutan dan berkomitmen untuk mengadopsi praktik-praktik ramah lingkungan dalam kehidupan sehari-hari. Masyarakat ini tidak hanya mendukung penggunaan produk ramah lingkungan tetapi juga mendorong produsen untuk merancang produk yang sesuai dengan prinsip-prinsip keberlanjutan. *Green society* membantu mendorong permintaan pasar untuk produk-produk yang berkelanjutan dan mendukung inovasi dalam desain produk (Baumann *et al*., 2002).

Prinsip-prinsip *green society* mencakup pengurangan konsumsi sumber daya alam, penggunaan kembali barang-barang yang ada, serta mendorong praktik daur ulang untuk mengurangi limbah. Masyarakat ini juga mendukung transisi ke energi terbarukan, yang mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meminimalkan dampak perubahan iklim. Dengan demikian, *green society* menciptakan lingkungan yang mendukung desain produk yang berkelanjutan dan mendukung keberlanjutan di berbagai bidang kehidupan (Baumann *et al*., 2002).

Desain produk yang berkelanjutan memainkan peran penting dalam membangun *green society* dengan menyediakan produk yang dirancang secara efisien dan ramah lingkungan, sekaligus memberikan manfaat sosial dan ekonomi yang lebih besar (Hosseinpour *et al.*, 2015).

Untuk membangun *green society*, perubahan perilaku masyarakat adalah kunci utama. Fokus pada dua strategi dasar, yaitu *reduce* dan *reuse*, adalah langkah awal yang dapat diterapkan oleh individu secara langsung. Kedua strategi ini tidak memerlukan infrastruktur kompleks seperti daur ulang, yang sering kali berada di ranah industri. Jayasinghe *et al*. (2021) memperkuat argumen mengenai pentingnya memulai perubahan dari *reduce* dan *reuse* sebelum bergantung pada daur ulang.

Pendekatan yang berfokus pada *reduce* dan *reuse* memungkinkan masyarakat untuk memulai dari langkah-langkah kecil yang dapat berdampak besar. Meskipun daur ulang tetap penting, ini bukan langkah pertama yang harus diambil. Seperti yang dijelaskan oleh Jayasinghe *et al*. (2021), upaya pengurangan dan penggunaan ulang adalah pilar utama dalam produktivitas hijau dan keberlanjutan. Dengan mengintegrasikan perilaku *reduce* dan *reuse* ke dalam gaya hidup sehari-hari, masyarakat dapat memberikan kontribusi signifikan dalam membangun *green society* yang lebih berkelanjutan, sementara *recycle* dapat

dilihat sebagai solusi jangka panjang yang lebih memerlukan dukungan infrastruktur dan teknologi industri.

1. *Reduce* sebagai Langkah Preventif untuk Mengurangi Limbah
   Prinsip *reduce* berfungsi sebagai langkah preventif untuk mencegah terjadinya limbah dengan mengurangi penggunaan sumber daya di awal proses. Dalam masyarakat, ini berarti mengurangi konsumsi berlebihan dan memprioritaskan pembelian produk yang lebih tahan lama serta berkualitas tinggi. Misalnya, mengganti produk sekali pakai dengan produk yang dapat digunakan berulang secara signifikan dapat mengurangi limbah dan jejak karbon. Masyarakat bisa berperan aktif dalam strategi ini dengan memilih produk yang memerlukan lebih sedikit bahan baku atau kemasan yang minimalis.

   Jayasinghe *et al*. (2021) menekankan bahwa pengurangan (*reduce*) adalah langkah awal dalam konsep produktivitas hijau. Optimalisasi penggunaan energi dan material sangat penting untuk memastikan bahwa limbah tidak diproduksi secara berlebihan. *Reduce* menjadi strategi yang melibatkan masyarakat dan industri untuk bersama-sama mencegah pemborosan dan mengurangi beban terhadap sumber daya alam.

2. *Reuse* untuk Memaksimalkan Nilai dari Produk yang Sudah Ada
   Strategi *reuse* menekankan pentingnya memanfaatkan kembali barang-barang sebelum membuangnya. Dalam kehidupan sehari-hari, *reuse* dapat diterapkan dengan cara sederhana seperti menggunakan kembali wadah air, tas kain, atau peralatan yang bisa dipakai ulang. Penggunaan kembali produk ini tidak hanya mengurangi limbah tetapi juga memperpanjang umur produk, sehingga secara keseluruhan mengurangi kebutuhan akan produksi baru dan bahan baku tambahan.

Menurut Jayasinghe *et al*. (2021), penggunaan kembali (*reuse*) merupakan komponen penting dalam strategi produktivitas hijau. Pemanfaatan kembali produk atau limbah untuk proses produksi tidak hanya menghemat bahan baku, tetapi juga mengurangi tekanan terhadap lingkungan. Dalam konteks ini, *reuse* diintegrasikan ke dalam operasi industri sebagai cara untuk memastikan bahwa setiap produk memiliki umur yang lebih panjang dan dapat digunakan kembali, baik oleh konsumen maupun oleh sistem produksi itu sendiri.

3. *Recycle* sebagai Langkah Industri untuk Mengurangi Limbah Akhir

   Meskipun *recycle* sering dianggap sebagai solusi utama dalam pengelolaan limbah, pelaksanaannya sering kali memerlukan teknologi dan sistem yang canggih, yang lebih banyak berada di ranah industri daripada masyarakat umum. Masyarakat dapat mendukung daur ulang dengan memilah limbah, namun, proses daur ulang sebenarnya bergantung pada infrastruktur industri yang mampu mengolah limbah menjadi bahan baku baru.

   Jayasinghe *et al*. (2021) juga menyoroti bahwa daur ulang adalah bagian dari strategi produktivitas hijau yang diterapkan dalam skala industri. Teknologi canggih diperlukan untuk memastikan bahwa bahan-bahan yang didaur ulang dapat digunakan kembali dalam proses produksi. Proses daur ulang tidak hanya melibatkan pengolahan limbah, tetapi juga memerlukan inovasi dalam desain produk untuk mempermudah daur ulang di akhir masa pakainya.

Untuk mendukung perubahan menuju *green society*, perilaku masyarakat harus berubah secara fundamental. Jayasinghe *et al*. (2021) menekankan pentingnya penerapan prinsip *reduce* dan *reuse* dalam produktivitas hijau, di mana masyarakat dan industri sama-sama bertanggung jawab dalam mengurangi penggunaan sumber daya dan limbah yang dihasilkan. Beberapa cara untuk mendorong perubahan perilaku ini antara lain:

1. Pendidikan tentang kesadaran lingkungan
   Pendidikan yang memadai sangat penting untuk meningkatkan kesadaran masyarakat tentang pentingnya *reduce* dan *reuse*. Kampanye publik dan program pendidikan di sekolah dapat membantu masyarakat memahami dampak perilaku konsumsi mereka terhadap lingkungan.
2. Akses yang lebih mudah ke produk berkelanjutan
   Pemerintah dan produsen harus memastikan bahwa produk yang ramah lingkungan mudah diakses oleh masyarakat. Hal ini dapat mencakup pengembangan produk yang lebih tahan lama, mudah diperbaiki, atau menggunakan kemasan yang minimal.
3. Kebijakan Pemerintah
   Kebijakan pemerintah yang mendorong penggunaan produk yang dapat digunakan kembali dan mengurangi penggunaan produk sekali pakai bisa menjadi pendorong dalam perubahan perilaku masyarakat. Insentif pajak atau larangan terhadap plastik sekali pakai adalah contoh langkah yang bisa dilakukan.

2.5 Studi Kasus *Sustainable Product Design*

2.5.1 Desain Kursi Roda Berkelanjutan Menggunakan QFD-HoQ dan LCA (Hosseinpour *et al.*, 2015)

Latar Belakang

Hosseinpour *and* Peng (2015) mengusulkan metode *benchmark-based sustainable design* yang mengintegrasikan *Quality Function Deployment* (QFD), *benchmarking*, dan *Life Cycle Assessment* (LCA). Metode ini ditujukan untuk membantu desainer menentukan detail teknis produk sejak tahap awal, sehingga keberlanjutan

tidak hanya dipertimbangkan secara umum tetapi juga masuk ke tingkat komponen produk.

Metodologi

1. Identifikasi kebutuhan pelanggan (*Customer Attributes*/ CA): diterjemahkan menjadi *Functional Requirements* (FR) dan *Design Parameters* (DP) menggunakan pendekatan *axiomatic design*.
2. *House of Quality* (HoQ): memetakan hubungan antara CA, FR, dan DP, serta memberikan bobot kepentingan masing-masing fungsi.
3. *Benchmarking*: empat kursi roda listrik di pasar dipilih sebagai pembanding. Analisis dilakukan terhadap material, jumlah komponen, bobot, biaya, serta jejak lingkungan.
4. *Life Cycle Assessment* (LCA): digunakan untuk menghitung *environmental footprints* (*carbon footprint, air acidification, water emission*) pada level komponen.
5. Integrasi data: hasil *benchmarking* dan LCA digunakan untuk merancang kursi roda berkelanjutan dengan detail teknis lebih baik.

Hasil Studi Kasus Kursi Roda

- Pemilihan Material dan Desain:
  Material ringan (aluminium) dan pengurangan jumlah komponen berhasil menurunkan berat kursi roda serta memudahkan proses daur ulang.
- Efisiensi Energi dan Lingkungan:
  Desain baru mampu mengurangi emisi karbon setara hingga 18,55% dibandingkan dengan kursi roda pembanding.
- Aspek Fungsional:
  Kursi roda tetap memenuhi kebutuhan stabilitas, kenyamanan, daya tahan, dan keamanan, sekaligus lebih ramah lingkungan.

- Analisis Ekonomi:
  Pengurangan material dan komponen berimplikasi pada biaya produksi yang lebih rendah, sehingga meningkatkan profitabilitas tanpa mengorbankan kualitas.

Kontribusi Ilmiah

- Metode ini memperbaiki keterbatasan QFD dan LCA tradisional yang sering gagal memberikan detail teknis di tahap desain awal.
- Pendekatan benchmarking memungkinkan transfer praktik terbaik dari produk yang ada, mengurangi proses *trial-and-error.*
- Studi kasus kursi roda menunjukkan bahwa desain berkelanjutan dapat dicapai tanpa mengorbankan performa fungsional produk, sekaligus memberikan manfaat lingkungan dan ekonomi.

Kesimpulan

Studi kasus kursi roda berkelanjutan karya Hosseinpour *and* Peng (2015) membuktikan bahwa integrasi QFD, *benchmarking*, dan LCA mampu menghasilkan rancangan produk yang tidak hanya fungsional tetapi juga ramah lingkungan dan efisien secara ekonomi (Gambar 2.5). Hasilnya menegaskan bahwa hingga 80% dampak lingkungan dapat ditentukan pada tahap desain, sehingga keputusan desain awal memiliki peranan krusial dalam keberlanjutan produk. Dengan pendekatan sistematis ini, desainer dan industri dapat merancang produk yang lebih ringan, hemat energi, murah dalam produksi, serta memiliki jejak karbon lebih rendah. Studi ini menegaskan bahwa *sustainable product design* bukan sekadar konsep, melainkan strategi praktis yang dapat meningkatkan daya saing sekaligus memberikan kontribusi nyata terhadap keberlanjutan global.

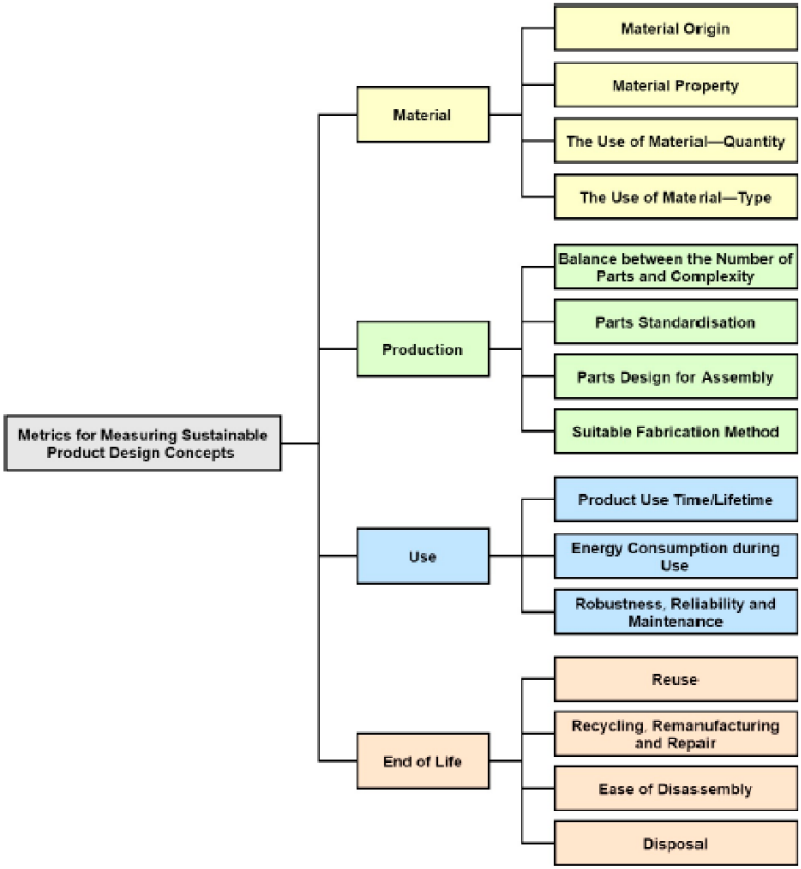
Gambar 2.5 *Proposed Sustainable Wheelchair* (Hosseinpour *and* Peng, 2015)

2.5.2 Desain Blender Berkelanjutan dengan *Sustainable Product Metrics* (Han *et al*., 2021)

Latar Belakang

Han *et al*. (2021) menyoroti bahwa 80% dampak keberlanjutan ditentukan pada tahap desain awal, khususnya desain konseptual. Namun, sebagian besar metode evaluasi desain hanya berfokus pada aspek kelayakan (*feasibility*) dan kreativitas, bukan pada keberlanjutan. Untuk menjembatani kesenjangan ini, mereka mengembangkan empat metrik kuantitatif (Gambar 2.6) untuk mengukur keberlanjutan konsep desain produk:

1. Material: asal, sifat, kuantitas, dan jumlah jenis material.
2. Produksi: kemudahan manufaktur dan perakitan (*Design for Manufacturing and Assembly*/DFMA).
3. Penggunaan: efisiensi energi, ketahanan, dan kesesuaian antara masa pakai dan waktu penggunaan.
4. Akhir Masa Pakai (*End-of-Life*): potensi *reuse*, daur ulang, perbaikan, remanufaktur, serta kemudahan *disassembly* (lepas rakit).



Gambar 2.6 Metrik dan Atribut untuk Mengukur Konsep Desain Produk Berkelanjutan (Han *et al.*, 2021)

Studi Kasus: Desain Blender Portabel

Dua konsep blender portabel diuji menggunakan metrik seperti terlihat pada Tabel 2.3 sampai dengan 2.6:

1. Konsep (a): Blender elektrik dengan motor DC 3V, menggunakan dua baterai AA. Bodi terdiri dari bagian dasar dan wadah yang tidak dapat dipisahkan. Material utama: PET (plastik), baja tahan karat, baterai, dan motor.
2. Konsep (b): Blender manual tanpa sumber daya listrik/ baterai. Desain sederhana dengan wadah PET transparan, poros baja tahan karat, bilah pisau, dan komponen berbahan bambu serta karet.

Tabel 2.3 Atribut untuk Mengukur Keberlanjutan **Material** dalam Konsep Desain (Han *et al*., 2021)

Attributes	Symbol	Low = 0	Medium = 1	High = 2
Material origin	M_1	Nonrenewable (e.g., fossil-based plastics, metal, glass)	Hybrid (e.g., bioplastics, by-product waste materials)	Renewable (e.g., bamboo, wood, natural rubber)
Material property	M_2	Toxic, neither recyclable nor biodegradable	Either toxic or nontoxic, either recyclable or biodegradable	Nontoxic, can be easily reused or recycled
Use of material—quantity	M_3	Poor potential for material quantity reduction	Fair potential for material quantity reduction	Good potential for material quantity reduction
Use of material—type	N	*Not Applicable*		

Tabel 2.4 Atribut untuk Mengukur Keberlanjutan **Proses** dalam Konsep Desain (Han *et al*., 2021)

Attributes	Symbol	Low = 0	Medium = 1	High = 2
Balance between number of parts and their complexity	P_1	Poor balance (e.g., contains too many parts or too complicated parts)	Fair balance (e.g., contains few parts but is complicated)	Good balance (e.g., contains few simple parts)
Parts standardisation	P_2	The concept requires a considerable degree of customisation	The concept has a reasonable degree of potential to be standardised	The concept can benefit significantly by using standardised components
Parts design for assembly	P_3	Poor potential for assembly optimisation	Fair potential for assembly optimisation	Good potential for assembly optimisation
Suitable fabrication method	P_4	Excessive operations needed (e.g., polishing, fine machining)	Partial excessive operations needed	No excessive operations needed

Tabel 2.5 Atribut untuk Mengukur Keberlanjutan **Penggunaan** dalam Konsep Desain (Han *et al.*, 2021)

Attributes	Symbol	Low = 0	Medium = 1	High = 2
Product use time/lifetime	U_1	Product lifetime is significantly shorter/longer than product use time	Product lifetime is fairly shorter/longer than product use time	Product lifetime is almost identical to product use time
Energy consumption during use	U_2	The concept consumes a significant amount of energy	The concept consumes a fair amount of energy	The concept consumes a slight amount of energy
Robustness, reliability, and maintenance	U_3	The concept requires a significant amount of resource to maintain/service	The concept consumes a fair amount of resource to maintain/service	The concept consumes a slight amount of resource to maintain/service

Tabel 2.6 Atribut untuk Mengukur Keberlanjutan ***End of life*** dalam Konsep Desain (Han *et al.*, 2021)

Attributes	Symbol	Low = 0	Medium = 1	High = 2
Reuse	E_1	Poor potential for reuse	Fair potential for reuse	Good potential for reuse
Recycling, remanufacturing, and repair	E_2	Poor potential for recycling and remanufacturing	Fair potential for recycling and remanufacturing	Good potential for recycling and remanufacturing
Disposal	E_3	Significant impact due to disposal	Moderate impact due to disposal	Little impact due to disposal
Ease of disassembly	E_4	Poor potential for disassembly optimisation	Fair potential for disassembly optimisation	Good potential for disassembly optimisation

Hasil Penilaian

1. Material
   a. Konsep (a): Skor rendah (1,84) karena menggunakan material *non-renewable* (PET, motor, baterai).
   b. Konsep (b): Lebih baik (2,69) karena mengandung material *renewable* (bambu, karet).
2. Produksi
   a. Konsep (a): Sangat baik (10,0) karena desain sederhana, banyak standar komponen, dan metode produksi efisien.
   b. Konsep (b): Rendah (2,5) karena membutuhkan lebih banyak komponen kustom dan proses fabrikasi ekstra.
3. Penggunaan
   a. Konsep (a): Skor menengah (5,5) karena membutuhkan baterai dan perawatan pada motor.

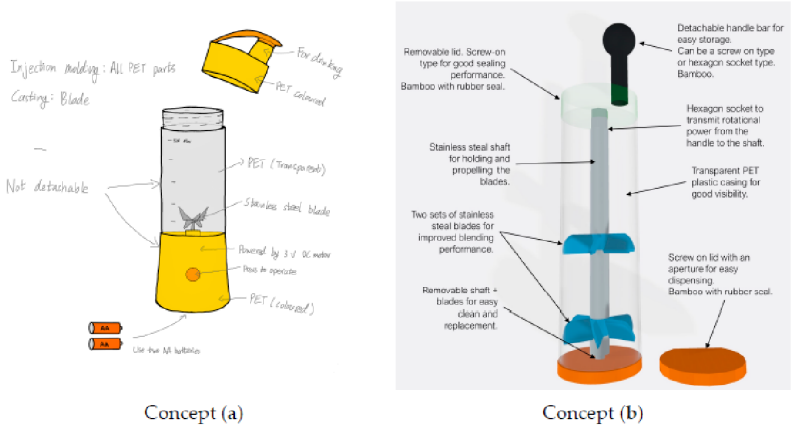
b. Konsep (b): Tinggi (10,0) karena tidak membutuhkan energi eksternal dan mudah dirawat.

4. Akhir Masa Pakai
   - Konsep (a): Rendah (3,25) karena sulit dibongkar, dan baterai/motor menghasilkan dampak pembuangan
   - Konsep (b): Tinggi (7,0) karena mudah dibongkar, dapat didaur ulang, serta sebagian material bisa diremanufaktur.
5. Skor Rata-Rata
   - Konsep (a): 5,15
   - Konsep (b): 5,55

Kesimpulan

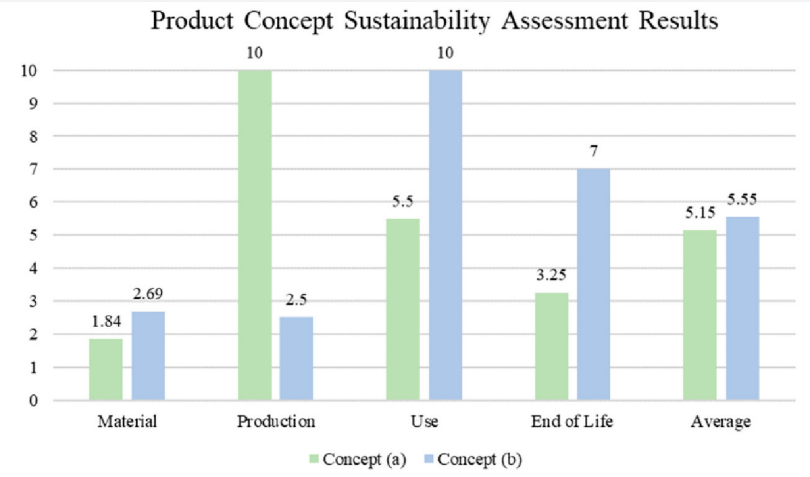
Studi kasus *blender portable* (Gambar 2.7) membuktikan bahwa penggunaan metrik material, produksi, penggunaan, dan akhir masa pakai memungkinkan evaluasi kuantitatif yang lebih objektif terhadap keberlanjutan desain produk sejak tahap konseptual. Konsep (a) memperlihatkan efisiensi produksi, sedangkan konsep (b) lebih ramah lingkungan dalam pemakaian dan akhir masa pakai (Gambar 2.8). Temuan ini menegaskan pentingnya mempertimbangkan keberlanjutan sejak awal desain untuk meminimalkan *lock-in effect* dampak lingkungan.

Bagi industri, metode ini dapat digunakan sebagai alat perbandingan antar konsep desain untuk mengidentifikasi area perbaikan dan mengarahkan pengembangan produk ke arah yang lebih berkelanjutan. Bagi pendidikan, studi ini memberikan contoh praktis bagaimana *sustainable product design* tidak hanya berhenti pada ide, tetapi bisa diukur dengan indikator yang jelas, sistematis, dan terintegrasi dalam siklus hidup produk.



Concept (a) Concept (b)

Gambar 2.7 Konsep *Portable blender* (Han *et al.*, 2021)



Gambar 2.8 Hasil Perbandingan Desain Konsep a dan b (Han *et al.*, 2021)

2.6 Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Terkait *Sustainable Product Design*

2.6.1 Penelitian

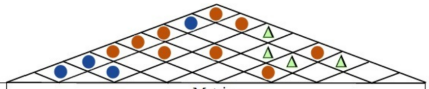
Penelitian dan pengabdian kepada masyarakat memegang peran penting dalam pengembangan konsep *sustainable product design.* Penelitian di bidang ini bertujuan untuk menemukan solusi inovatif yang dapat meningkatkan keberlanjutan, seperti pengembangan material baru yang lebih ramah lingkungan, peningkatan proses produksi yang lebih efisien, serta desain produk yang memiliki dampak lingkungan minimal namun memberikan manfaat sosial dan ekonomi yang signifikan (Gagnon *et al*., 2012).

Pengabdian kepada masyarakat dapat diwujudkan melalui program pelatihan dan edukasi yang fokus pada pentingnya penggunaan produk ramah lingkungan. Program ini bertujuan untuk mendorong masyarakat agar mengadopsi praktik daur ulang, pengurangan limbah, dan penghematan energi dalam kehidupan sehari-hari. Selain itu, kolaborasi antara akademisi, pemerintah, dan industri juga sangat penting dalam memastikan bahwa prinsip keberlanjutan diterapkan secara nyata dan efektif di masyarakat (Gagnon *et al*., 2012).

Penelitian terkait *sustainable product design* yang dilakukan oleh Faradilla *et al*. (2022) di Universitas Trisakti bertujuan untuk mengembangkan konsep tas ramah lingkungan (*eco-bag*) dari serat daun nanas menggunakan metode *Quality Function Deployment* (QFD) yang berkelanjutan. Penelitian ini berfokus pada penerapan aspek keberlanjutan dalam desain produk, terutama pada tahap pengembangan konsep. Latar belakang penelitian ini didasarkan pada masalah lingkungan yang semakin kritis, seperti polusi dan penggunaan bahan baku yang

tidak ramah lingkungan. Indonesia, sebagai salah satu produsen nanas terbesar di dunia, seringkali tidak memanfaatkan serat daun nanas secara optimal, meskipun serat ini memiliki potensi besar sebagai bahan material yang kuat dan ramah lingkungan untuk produk seperti tas.

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengembangkan konsep *eco-bag* yang mempertimbangkan aspek keberlanjutan dengan menggunakan metode QFD berkelanjutan. Selain itu, penelitian ini juga mengevaluasi konsep tas tersebut dengan menggunakan metrik yang mengukur keberlanjutan dari segi material, produksi, penggunaan, dan akhir masa pakai produk. Proses penelitian dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu mengidentifikasi kebutuhan pelanggan melalui survei yang melibatkan 50 responden, yang terdiri dari 13 wanita karir dan 37 mahasiswa. Berdasarkan survei ini, kebutuhan pelanggan diterjemahkan ke dalam *House of Quality* (HoQ) berkelanjutan yang membantu memahami hubungan antara kebutuhan pelanggan dengan karakteristik desain produk (Gambar 2.9).



Customer Need			Metrics							
	Needs	Importance Rating	Bag Size	Bag Design	Color Variations	Bag Strap Length	Material	Color Material	Bag Hook Design	Price
Function	Easy to Carry	4	●	●		●			Δ	
	Can be Used in Many Occasions	4	●	●	●	●				●
	Adjustable	5	●			●				
	Comfortable	4	Δ			●	●			
Design	Aesthethic	4	●	●	●		●			●
	Many Colors Variations	3			●					
Sustainable	Green Material	4					●			●
	Non-Toxic Color	4						●		●
	Design of Bag Hook Can be Reused	4					●		●	
Economic	Low Price	4	●	●			●			●
1	Weak Relation : Δ	Our Importance Rating	83	64	39	69	84	20	24	79
3	Medium Relation : ●									
5	Strong Relation : ●									

Gambar 2.9 *Sustainable HoQ for the eco-bag concept* (Faradilla *et al.*, 2022)

Pengembangan konsep *eco-bag* ini didasarkan pada tiga kriteria utama yang diperoleh dari HoQ, yaitu material, ukuran tas, dan harga. Dalam penelitian ini, serat daun nanas digunakan sebagai material utama, dengan fokus pada pengembangan tas yang ramah lingkungan, berukuran sesuai kebutuhan, dan memiliki harga yang kompetitif. Evaluasi konsep dilakukan dengan menggunakan metrik produk berkelanjutan (Tabel 2.7), dan hasilnya menunjukkan bahwa konsep *eco-bag* ini memiliki skor keberlanjutan yang cukup baik dengan nilai rata-rata 6,25. Aspek material memperoleh skor 5,5, produksi 10, penggunaan 5,5, dan akhir masa pakai 4.

Tabel 2.7 *Sustainable concept metrics measurement* (Faradilla *et al.*, 2022)

Metrics	Attributes	Concept
Material	Material Origin (M1)	Pineapple leaf fiber cloth (1); Stainless steel (0); Bamboo (2); Natural dye (2)
	Material Property (M2)	Pineapple leaf fiber cloth (1); Stainless steel (1); Bamboo (2); Natural dye (2)
	Use of Material – Quantity (M3)	Pineapple leaf fiber cloth (1); Stainless steel (1); Bamboo (2); Natural dye (2)
	Use of Material – Type (N)	4
Material Metric		5.5
Production	The balance between the Number of Parts and Complexity (P1)	2
	Parts Standardisation (P2)	2
	Parts Design for Assembly (P3)	2
	Suitable Fabrication Method (P4)	2
Production Metric		10
Use	Product Use Time /Lifetime	1
	Energy Consumption during Time	2
	Robustness, Reliability and Maintenance	2
Use Metric		5.5
End of Life	Reuse	1
	Recycling, Remanufacturing, and Repair	1
	Disposal	2
	Ease of Disassembly	1
End Of Life Metric		5.5
Average		6.25

Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa metode QFD dapat diterapkan dalam desain produk ramah lingkungan dengan mempertimbangkan aspek keberlanjutan sejak tahap awal pengembangan konsep. Penggunaan serat daun nanas sebagai material utama menunjukkan potensi besar sebagai material yang dapat terurai secara hayati dan berdampak rendah terhadap lingkungan. Selain itu, *eco-bag* ini juga didesain dengan menggunakan warna yang tidak beracun serta material *stainless steel* yang dapat digunakan kembali, sehingga memperkuat nilai keberlanjutannya. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam meningkatkan kesadaran akan pentingnya mempertimbangkan aspek keberlanjutan dalam desain produk, khususnya di sektor industri kreatif dan desain produk ramah lingkungan.

2.6.2 Pengabdian Kepada Masyarakat (PkM)

PkM yang dilakukan oleh Arnes Faradilla *et al*., 2021 ini (Gambar 2.10) merupakan tindak lanjut dari hasil penelitian sebelumnya mengenai pengembangan konsep tas ramah lingkungan (*eco-bag*) dari serat daun nanas. Penelitian tersebut menemukan bahwa serat daun nanas memiliki potensi besar sebagai material yang kuat dan ramah lingkungan untuk produk tas, dengan hasil evaluasi konsep menggunakan metode *Quality Function Deployment* (QFD) yang berkelanjutan. Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan serat daun nanas dalam desain tas tidak hanya mendukung keberlanjutan lingkungan, tetapi juga memiliki potensi pasar yang baik dengan skor keberlanjutan yang cukup tinggi.

Berdasarkan temuan dari penelitian tersebut, tim kemudian melaksanakan PkM dengan tujuan menerapkan hasil penelitian dalam bentuk penyuluhan dan pendampingan kepada UMKM Depok Creative Woman (DeCW). Dalam PkM ini, serat daun nanas diperkenalkan kepada komunitas sebagai

bahan dasar pembuatan tas yang ramah lingkungan, sekaligus melibatkan penyandang disabilitas, khususnya tuna rungu, untuk berpartisipasi dalam proses produksi. Hal ini memungkinkan hasil penelitian diintegrasikan ke dalam program pengabdian kepada masyarakat, dengan dampak yang signifikan baik dari segi sosial maupun ekonomi.

Kegiatan ini mendapatkan dukungan pendanaan dari Pemerintah Republik Indonesia melalui hibah dari Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi. Hibah tersebut diberikan sebagai bagian dari Program Pengabdian Masyarakat Berbasis Hasil Penelitian dan Purwarupa yang bertujuan untuk mendukung kegiatan penelitian dan pengabdian yang bermanfaat bagi masyarakat luas. Dukungan ini memungkinkan pelaksanaan kegiatan penyuluhan dan pendampingan kepada UMKM DeCW untuk memanfaatkan serat daun nanas sebagai bahan ramah lingkungan dalam produksi tas, sekaligus memberdayakan penyandang disabilitas.

Selain menjadi aplikasi dari hasil penelitian, kegiatan ini juga mendukung beberapa Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs). Pertama, SDG 1: Tanpa Kemiskinan, dengan memberdayakan UMKM dan penyandang disabilitas untuk menciptakan produk yang memiliki nilai tambah ekonomi, PkM ini membantu meningkatkan pendapatan masyarakat, khususnya ibu rumah tangga dan penyandang tuna rungu. Kedua, SDG 4: Pendidikan Berkualitas, di mana kegiatan ini memberikan pelatihan kepada penyandang disabilitas, meningkatkan keterampilan mereka sehingga dapat berkontribusi dalam proses produksi. Ketiga, SDG 12: Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab, kegiatan ini mendukung pengelolaan limbah yang berkelanjutan dengan memanfaatkan serat daun nanas, yang biasanya menjadi limbah, menjadi produk yang memiliki nilai jual tinggi. Dengan demikian, kegiatan ini berhasil mengurangi limbah sekaligus menciptakan produk inovatif yang ramah lingkungan.

Dengan menghubungkan penelitian dan pengabdian masyarakat, PkM ini tidak hanya mengaplikasikan hasil riset dalam konteks praktis, tetapi juga memberdayakan komunitas lokal untuk menciptakan produk inovatif yang berkelanjutan. Kegiatan ini berhasil mentransformasikan limbah serat daun nanas menjadi produk bernilai jual, sekaligus mendukung berbagai aspek SDGs, khususnya dalam hal pengelolaan limbah, inovasi produk, pemberdayaan ekonomi, dan inklusi sosial.

Gambar 2.10 Pelaksanaan PkM dan Produk yang Dihasilkan
(Faradilla *et al.*, 2021)

2.7 Pertanyaan Konsep dan Studi Kasus

Jawablah pertanyaan yang terkait dengan konsep sebagai berikut:

1. Jelaskan yang dimaksud dengan *sustainable product design* dan bagaimana penerapannya dalam memenuhi kebutuhan ekonomi, sosial, dan lingkungan?
2. Mengapa fase desain awal produk dianggap sebagai tahap yang paling kritis dalam mengurangi dampak lingkungan sebuah produk?

3. Jelaskan bagaimana *Life Cycle Assessment* (LCA) membantu dalam menilai keberlanjutan sebuah produk dari awal hingga akhir masa pakainya.
4. Jelaskan perbedaan antara *Partial Sustainable Product Design* (P-SPD) dan *Sustainable Product Design* (SPD). Berikan contoh dari masing-masing.
5. Bagaimanakah *Quality Function Deployment* (QFD) dan *House of Quality* (HoQ) dapat digunakan dalam proses perancangan produk berkelanjutan?
6. Jelaskan minimal tiga faktor pendorong (*drivers*) utama yang dapat memotivasi perusahaan untuk menerapkan desain produk berkelanjutan.
7. Jelaskan minimal tiga hambatan (*barriers*) yang biasanya dihadapi perusahaan ketika mengimplementasikan *sustainable product design*.
8. Bagaimana prinsip *reduce* dan *reuse* berperan dalam membangun *green society*? Berikan contoh penerapan nyata dari kedua prinsip tersebut.
9. Bagaimana pendekatan *Design for Environment* (DfE) mempengaruhi desain produk berkelanjutan, dan apa keuntungannya dibandingkan dengan desain konvensional?
10. Jelaskan peran pengabdian kepada masyarakat dalam mendukung penerapan desain produk berkelanjutan di industri lokal.

Instruksi Studi Kasus: Pengembangan Produk UMKM Menggunakan Pendekatan *Sustainable Product Development*

1. Pendahuluan

Mahasiswa akan bekerja dalam kelompok untuk mengembangkan produk bagi UMKM (Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah) menggunakan pendekatan *Sustainable Product Development*. Setiap kelompok akan memilih UMKM yang berbeda dan mengevaluasi produk yang dikembangkan menggunakan *Sustainable Product Metrics*.

2. Ketentuan

a. Pilih satu UMKM sebagai studi kasus. UMKM ini bisa bergerak di berbagai bidang seperti kuliner, kerajinan tangan, *fashion*, atau jasa.

b. Kembangkan produk baru atau modifikasi produk yang ada, dengan fokus pada aspek keberlanjutan.

3. Langkah-langkah Pelaksanaan

a. Pembagian Kelompok:

- Kelompok terdiri dari 3 - 4 mahasiswa.
- Setiap kelompok memilih UMKM yang berbeda untuk pengembangan produk.

b. Deskripsi UMKM:

- Jelaskan UMKM yang dipilih, termasuk latar belakang, produk atau jasa yang ditawarkan, dan tantangan keberlanjutan.
- Jelaskan bagaimana UMKM ini bisa mendapatkan manfaat dari penerapan *Sustainable Product Development*.

c. Pengembangan Produk:
   - Identifikasi produk yang relevan dengan UMKM dan bagaimana aspek keberlanjutan diterapkan, seperti material ramah lingkungan, efisiensi produksi, atau umur pakai yang lebih panjang.

d. Analisis *Sustainable Product Metrics*:
   - Material: Evaluasi sumber dan dampak bahan baku yang digunakan.
   - Produksi: Tinjau proses produksi untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi limbah
   - Penggunaan: Evaluasi umur pakai, konsumsi energi, dan kemudahan perawatan produk.
   - Akhir Masa Pakai: Tinjau potensi produk untuk didaur ulang, diperbaiki, atau digunakan kembali.

4. Pelaporan dan Presentasi

a. Setiap kelompok harus menyusun laporan yang mencakup:
   - Deskripsi UMKM dan produk yang dikembangkan
   - Penjelasan tentang analisis menggunakan *Sustainable Product Metrics*.
   - Solusi untuk meningkatkan keberlanjutan produk.
   - Presentasi kelompok dilakukan di kelas dengan durasi maksimal 15 menit.

b. Kriteria Penilaian:
   - Pemahaman Konsep: Pengaplikasian konsep *Sustainable Product Development* dan *Sustainable Product Metrics* (20%).
   - Analisis Keberlanjutan: Kualitas evaluasi produk menggunakan metrik keberlanjutan (40%).
   - Kreativitas Produk: Kreativitas dalam merancang produk yang ramah lingkungan (20%).

- Presentasi: Kejelasan laporan dan kemampuan kelompok dalam menyampaikan ide (20%).

5. Waktu Pelaksanaan

Proyek ini berlangsung selama 2 minggu (minggu ke tiga dan ke empat perkuliahan), dengan presentasi pada minggu ke-4 perkuliahan.

Referensi

Ahmad, S., Wong, K. Y., Tseng, M. L., & Wong, W. P. (2018). Sustainable product design and development: A review of tools, applications and research prospects. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 49-61. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.020

Baumann, H., Boons, F., & Bragd, A. (2002). Mapping the green product development field: Engineering, policy and business perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 10(5), 409-425. https://doi.org/10.1016/s0959-6526(02)00015-x

Che Aziz, D. H., Razak, N. H., Zulkafli, N. I., & Klemeš, J. J. (2023). Systematic framework to select the sustainable best design for an automated fertiliser blending system. *Journal of Cleaner Production*, 428, 139107. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139107

Faradilla A., Azmi N., Sari E., Angwen G.E., Chofreh A.G., Goni F.A., & Klemeš J.J. (2022). Sustainable Product Design Concept Metrics for Developing the Eco-Bag from Pineapple Leaf Fiber. *Chemical Engineering Transactions*, 94, 949-954. DOI:10.3303/CET2294158

Faradilla, A., Sari, E., Azmi, N., & Angwen, G. E. (2021). *Laporan akhir PKM: Pengembangan eco-bag berbahan serat daun nanas.* Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia.

Gagnon, B., Leduc, R., & Savard, L. (2012). From a conventional to a sustainable engineering design process: Different shades of sustainability. *Journal of Engineering Design*, 23(1), 49-74. https://doi.org/10.1080/09544828.2010.516246

Germani, M., Dufrene, M., Mandolini, M., Marconi, M., & Zwolinski, P. (2013). *Integrated Software Platform for Green Engineering Design and Product Sustainability. In: Nee A., Song B., Ong SK. (eds) Re-engineering Manufacturing for Sustainability*. Springer, Singapore.

Han, J., Jiang, P., & Childs, P. R. (2021). Metrics for measuring sustainable product design concepts. *Energies*, 14(12), 3469. https://doi.org/10.3390/en14123469

Hosseinpour, A., Peng, Q., & Gu, P. (2015). A benchmark-based method for sustainable product design. *Benchmarking: An International Journal*, 22(4), 643-664. https://doi.org/10.1108/bij-09-2014-0092

Jayasinghe, G. Y., Maheepala, S. S., & Wijekoon, P. C. (2021). *Green productivity and cleaner production: A guidebook for sustainability*. CRC Press.

Jiang, P., Dieckmann, E., Han, J., & Childs, P. R. (2021). A bibliometric review of sustainable product design. *Energies*, 14(21), 6867. https://doi.org/10.3390/en14216867References

BAB 3

ANALISIS ALIRAN MATERIAL (*MATERIAL FLOW ANALYSIS*)

Rencana Pembelajaran

Tujuan	Mahasiswa mampu menguasai prinsip dan masalah perkembangan analisis aliran material dan mengkomunikasikannya secara menulis dan lisan (CPMK1-Pc; CPMK2-Pd).
Capaian Pembelajaran	CPMK1: Mampu menguasai prinsip dan masalah terkini dalam ekonomi, sosial, ekologi secara umum (Pc). CPMK2: Mampu menguasai pengetahuan tentang teknik komunikasi dan perkembangan teknologi terbaru dan terkini dalam bidang ekonomi, sosial, ekologi secara umum (Pd).
Sub Pembahasan	1. Definisi dan Konsep Analisis Aliran Material. 2. Sejarah dan Perkembangan MFA. 3. Tujuan Penerapan MFA dalam Industri. 4. Manfaat Penerapan MFA dalam Industri. 5. Konsep Dasar Material Flow. 6. Tahapan-tahapan MFA. 7. Membangun Model MFA dengan STAN. 8. Studi Kasus MFA di Industri.

3.1 Definisi dan Konsep Analisis Aliran Material

Material Flow Analysis (MFA) adalah sebuah metodologi penting dalam ekologi industri yang digunakan untuk menilai aliran dan akumulasi material dalam suatu sistem tertentu secara sistematis. Penilaian ini mempertimbangkan dimensi spasial (lokasi) dan temporal (waktu), sehingga memberikan gambaran yang utuh tentang bagaimana material digunakan, disimpan, dan akhirnya dibuang dalam sistem tersebut. MFA memiliki nilai strategis dalam berbagai bidang, termasuk pengelolaan lingkungan, perencanaan perkotaan, serta manajemen sumber daya alam. Dengan pendekatan ini, para peneliti dan pembuat kebijakan dapat memperoleh pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai hubungan antar material, proses produksi, dan potensi dampaknya terhadap lingkungan.

MFA merupakan suatu metode yang fleksibel, yang dapat diterapkan pada berbagai skala sistem, mulai dari proses tunggal di tingkat mikro, hingga sistem kompleks seperti sektor industri, kota, atau bahkan wilayah regional dan global. Misalnya, MFA dapat digunakan untuk menelusuri bagaimana tembaga mengalir dari tambang hingga menjadi komponen elektronik, atau bagaimana plastik dikonsumsi dan menjadi limbah di wilayah perkotaan. Dengan demikian, MFA tidak terbatas pada satu jenis material atau skala, tetapi mampu mengakomodasi kompleksitas aliran material dalam sistem sosial-ekonomi modern.

Dalam praktiknya, MFA mencakup berbagai jenis material, mulai dari unsur kimia (seperti karbon atau nitrogen), senyawa (seperti logam berat), material generik (misalnya plastik atau baja), hingga produk akhir (seperti kendaraan atau pakaian). Analisis ini bertujuan untuk memahami bagaimana bahan-bahan tersebut berpindah antar sektor ekonomi dan apa yang terjadi pada material tersebut sepanjang siklus hidupnya. MFA juga

sangat berguna untuk menyusun neraca massa pada skala sistem, sehingga dapat diketahui apakah terjadi ketidakseimbangan, kehilangan material, atau potensi daur ulang yang belum dimanfaatkan.

MFA dapat diklasifikasikan menjadi dua pendekatan utama: analisis statis dan analisis dinamis. Analisis statis dilakukan untuk menangkap kondisi aliran dan stok material pada satu titik waktu tertentu, misalnya pada tahun 2024. Pendekatan ini cocok digunakan untuk memberikan potret sesaat yang berguna dalam laporan tahunan, audit lingkungan, atau perbandingan antar wilayah. Di sisi lain, analisis dinamis melacak perubahan aliran material dari waktu ke waktu, misalnya dari tahun 2000 hingga 2025. Analisis ini sangat bermanfaat untuk memahami tren jangka panjang, mendeteksi transisi sistemik, atau mengevaluasi dampak kebijakan terhadap efisiensi sumber daya. Kedua pendekatan ini memberi fleksibilitas kepada peneliti untuk memilih metode yang paling relevan dengan tujuan dan konteks studi mereka.

Tabel 3.1 Perbedaan MFA Statis dan Dinamis

Faktor	MFA Statis	MFA Dinamis
Dimensi Waktu	Satu periode waktu tunggal (*snapshot*)	Banyak periode waktu (evolusi, tren)
Tujuan Utama	a. Mengidentifikasi skala dan struktur aliran & stok pada waktu tertentu. b. Menentukan hotspot limbah atau inefisiensi pada satu titik waktu. c. Pelaporan tahunan.	a. Memprediksi tren aliran & stok material di masa depan. b. Menganalisis akumulasi stok jangka panjang. c. Mengevaluasi dampak kebijakan jangka panjang atau perubahan teknologi. d. Memahami transisi sistem.

Faktor	MFA Statis	MFA Dinamis
Model Sistem	Dianggap dalam kondisi tunak (*steady-state*)	Dianggap terus berubah dan berkembang
Data yang Dibutuhkan	Data input, output, dan stok untuk satu periode spesifik.	Data historis, laju perubahan, distribusi umur produk, proyeksi masa depan.
Kompleksitas	Relatif lebih sederhana	Lebih kompleks (pemodelan, data, komputasi)
Jenis Output	Angka absolut (misalnya, ton/tahun, ton) untuk satu periode. Diagram aliran tunggal.	Grafik tren waktu (misalnya, ton per tahun selama 50 tahun). Proyeksi akumulasi stok. Skenario masa depan.
Kemampuan Prediksi	Terbatas pada periode analisis; tidak memproyeksikan masa depan.	Mampu memproyeksikan aliran dan stok di masa depan.
Cocok untuk	a. Laporan lingkungan tahunan. b. Audit material suatu pabrik. c. Analisis kebijakan jangka pendek.	a. Perencanaan infrastruktur jangka panjang (misalnya, fasilitas daur ulang). b. Studi *urban mining*. c. Analisis dampak perubahan demografi atau teknologi. d. Evaluasi strategi ekonomi sirkular.

Faktor	MFA Statis	MFA Dinamis
Contoh Pertanyaan	a. Berapa banyak sampah elektronik yang dihasilkan negara X tahun ini?	a. Berapa banyak baja yang akan terakumulasi dalam bangunan kota ini hingga tahun 2050? b. Bagaimana volume limbah kaca akan berubah jika tingkat daur ulang meningkat 5% setiap tahun selama dekade berikutnya?
Indikator Umum	DMI, DMC, DPO, MP, EEE (semua untuk periode tunggal)	Indikator yang berorientasi tren (misalnya, Decoupling Factor, Elastic Coefficient), serta proyeksi DMI, DMC, DPO di masa depan.

Secara keseluruhan, MFA bukan hanya alat teknis untuk menghitung aliran material, tetapi juga merupakan kerangka berpikir sistemik yang membantu menjawab pertanyaan-pertanyaan penting dalam pembangunan berkelanjutan: Seberapa efisien sistem ekonomi kita dalam menggunakan sumber daya? Di mana terjadi pemborosan atau kehilangan material? Bagaimana strategi kita untuk mengelola stok dan aliran material di masa depan? Dengan menjawab pertanyaan-pertanyaan ini, MFA memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk merancang sistem produksi dan konsumsi yang lebih efisien, sirkular, dan berwawasan lingkungan.

3.2 Sejarah dan Perkembangan MFA

Konsep dasar dari MFA, yaitu prinsip keseimbangan massa atau hukum kekekalan massa seperti yang telah dikenal sejak zaman Yunani kuno. Namun, bukti ilmiah pertama datang dari ahli kimia

Prancis Antoine Lavoisier pada abad ke-18 yang menyatakan bahwa materi tidak bisa diciptakan maupun dimusnahkan melalui proses kimia. Prinsip ini kemudian menjadi landasan bagi banyak disiplin ilmu, termasuk kedokteran, teknik, dan ekonomi, jauh sebelum istilah MFA secara resmi digunakan.

Salah satu contoh awal analisis aliran material dilakukan oleh Santorio, seorang dokter Italia pada abad ke-17. Ia dikenal karena melakukan studi sistematis terhadap metabolisme manusia dengan menimbang makanan yang dikonsumsi dan ekskresi yang dihasilkan oleh tubuh. Ia menyadari adanya ketidakseimbangan massa dan menduga adanya kehilangan melalui "penguapan tak terlihat", yang kemudian hari diketahui sebagai proses respirasi dan pengeluaran cairan melalui kulit. Eksperimen Santorio menunjukkan pentingnya memahami semua aliran material untuk dapat menggambarkan sistem dengan akurat, sebuah prinsip utama dalam MFA modern.

Pada abad ke-20, konsep *input–output* dalam konteks ekonomi diperkenalkan oleh Wassily Leontief, yang mengembangkan tabel *input–output* untuk menggambarkan keterkaitan antar sektor dalam suatu perekonomian. Metode ini kemudian menjadi cikal bakal MFA dalam konteks ekonomi dan berkontribusi besar terhadap pengembangan metode kuantitatif untuk perencanaan sumber daya dan lingkungan. Metodologi ini juga dikembangkan lebih lanjut ke dalam LCA (*Life Cycle Assessment*) untuk mengevaluasi konsumsi sumber daya dan emisi dalam produksi barang dan jasa.

Konsep metabolisme kota mulai dikenalkan pada tahun 1965 oleh Abel Wolman, yang menganalisis *input* dan *output* material serta energi dalam sebuah kota hipotesis. Studi-studi selanjutnya, seperti oleh Duvigneaud di Brussels dan Newcombe di Hong Kong, menunjukkan bagaimana kota bergantung pada

wilayah sekitarnya (*hinterland*) untuk pasokan dan pembuangan, serta pentingnya menciptakan sistem perkotaan yang lebih sirkular untuk mengurangi pencemaran.

Mulai akhir tahun 1960-an hingga 1990-an, MFA digunakan secara luas dalam studi lingkungan regional. Misalnya, Huntzicker *et al*. menganalisis akumulasi timbal dari kendaraan bermotor di Los Angeles, sementara Ayres *et al*. melakukan rekonstruksi sejarah aliran polutan selama satu abad di wilayah Sungai Hudson. Penelitian-penelitian ini menekankan pentingnya MFA untuk memahami sumber, jalur, dan tempat penyimpanan zat-zat berbahaya serta untuk merancang strategi pengelolaan lingkungan.

Konsep metabolisme antroposfer dikembangkan oleh Baccini dan Brunner, yang memperluas MFA menjadi alat untuk merancang sistem teknologi dan sosial yang lebih efisien dalam penggunaan sumber daya. Mereka menunjukkan bahwa pendekatan pencegahan dari hulu (bukan hanya mengandalkan teknologi filtrasi di akhir proses) lebih efektif untuk mengurangi dampak lingkungan. Studi mereka menggabungkan ilmu teknik dengan arsitektur, perencanaan kota, dan bahkan ilmu sosial untuk mengkaji struktur dan aktivitas manusia dalam konteks penggunaan sumber daya.

Berbagai penelitian lanjutan di Eropa, Amerika, dan Asia terus memperkaya penerapan MFA pada skala nasional dan global. Institusi seperti Wuppertal Institute dan Yale University mengembangkan indikator fisik baru untuk melengkapi indikator ekonomi nasional, seperti proyek STAF yang menganalisis stok dan aliran tembaga serta seng secara global. Studi ini memperkuat peran MFA sebagai alat pendukung pengambilan keputusan dalam transisi menuju sistem industri dan masyarakat yang lebih berkelanjutan.

3.3 Tujuan Penerapan MFA dalam Industri

1. Mengetahui pola aliran material secara menyeluruh.
   Tujuan utama dari penerapan MFA adalah untuk mendapatkan gambaran yang komprehensif dan terukur mengenai seluruh aliran material dalam suatu sistem industri, baik yang berasal dari bahan baku, produk antara, hingga limbah akhir. Dengan melakukan pemetaan ini, perusahaan dapat mengetahui berapa banyak bahan yang digunakan, disimpan, terbuang, atau terlepas ke lingkungan.
2. Meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya.
   MFA bertujuan untuk mengidentifikasi inefisiensi dalam sistem produksi, seperti kelebihan penggunaan bahan baku, kehilangan material dalam proses, atau emisi yang tidak terkendali. Informasi ini menjadi dasar untuk melakukan perbaikan proses sehingga dapat meminimalkan pemborosan, menurunkan biaya produksi, dan mengoptimalkan nilai ekonomi dari tiap satuan material yang digunakan.
3. Mendukung pengambilan keputusan berbasis data.
   Salah satu tujuan strategis MFA adalah menyajikan data kuantitatif yang valid untuk mendukung perumusan kebijakan internal industri, mulai dari efisiensi energi, substitusi bahan, hingga perencanaan investasi lingkungan. MFA juga berguna sebagai alat bantu perhitungan indikator performa keberlanjutan, seperti intensitas material, produktivitas material, dan *eco-efficiency*.
4. Memenuhi kebutuhan regulasi dan standar lingkungan.
   Dalam banyak yurisdiksi, industri diwajibkan untuk menyampaikan laporan lingkungan dan jejak material yang digunakan dalam operasionalnya. MFA dapat digunakan sebagai alat pelaporan yang sistematis dan akurat sesuai standar nasional maupun internasional, seperti ISO 14040 (untuk LCA) atau kerangka ekonomi-sumber daya OECD dan Eurostat.

5. Mendukung implementasi ekonomi sirkular dan produksi bersih.
   MFA memiliki peran penting dalam mengidentifikasi potensi untuk mendaur ulang, penggunaan kembali material, serta penutupan siklus material. Dengan memahami bagaimana dan di mana material mengalir dan hilang, perusahaan dapat menyusun strategi menuju produksi yang lebih berkelanjutan, seperti pemanfaatan limbah sebagai bahan baku baru.

3.4 Manfaat Penerapan MFA dalam Industri

1. Optimalisasi proses produksi dan rantai pasok.
   Dengan data MFA, industri dapat mengevaluasi titik-titik dalam proses produksi atau rantai pasok yang memiliki intensitas material tinggi atau menghasilkan limbah berlebih. Hal ini memungkinkan perusahaan untuk mengubah desain proses, mengganti teknologi, atau mengalihkan sumber bahan baku ke opsi yang lebih efisien dan ramah lingkungan.
2. Efisiensi biaya dan penghematan energi.
   Identifikasi inefisiensi dan kehilangan material dalam sistem industri melalui MFA dapat secara langsung menghasilkan penghematan biaya. Pemanfaatan kembali limbah atau pengurangan konsumsi bahan mentah akan berdampak pada penurunan biaya pembelian bahan baku dan biaya penanganan limbah.
3. Pengendalian emisi dan risiko lingkungan.
   MFA membantu perusahaan dalam mengidentifikasi titik-titik sumber emisi, baik berupa limbah cair, gas, maupun padat. Dengan data tersebut, industri dapat menyusun strategi mitigasi yang lebih tepat sasaran dan mengurangi risiko pencemaran lingkungan, tuntutan hukum, serta kerusakan reputasi.

4. Perencanaan strategis jangka panjang.
   MFA menyediakan basis informasi yang solid untuk perencanaan jangka panjang, termasuk perencanaan kapasitas produksi, substitusi material, pengelolaan sumber daya, dan desain produk. Dengan menganalisis tren penggunaan material dari waktu ke waktu, industri dapat mengantisipasi perubahan pasar dan kebijakan.
5. Meningkatkan daya saing industri.
   Industri yang menerapkan MFA dapat lebih cepat menyesuaikan diri dengan tuntutan pasar akan produk yang berkelanjutan dan transparan. Informasi mengenai jejak material suatu produk dapat menjadi nilai tambah dalam pemasaran, baik di tingkat lokal maupun internasional.
6. Menjadi dasar pengembangan produk ramah lingkungan.
   MFA memungkinkan pengembangan desain produk yang mempertimbangkan seluruh siklus hidup material, dari ekstraksi hingga akhir masa pakai. Pendekatan ini mendukung strategi desain untuk daur ulang (*design for recycling*) dan meningkatkan *circularity* dari produk industri.

3.5 Konsep Dasar Material Flow

Material flow mengacu pada pergerakan, penyimpanan, pengendalian, dan perlindungan material, barang, dan produk selama seluruh siklus hidupnya mulai dari proses manufaktur, distribusi, konsumsi, hingga tahap akhir berupa pembuangan (Christopher, 2016).

***Material*: Substansi dan Barang**

Dalam kajian aliran *material*, istilah material mencakup dua kategori utama, yaitu zat dan barang:

1. Zat (*Substances*)
   Substansi/zat adalah unsur kimia atau senyawa yang terdiri dari unit-unit seragam dan homogen dengan komposisi yang

khas dan konsisten. Dalam SFA, substansi dapat berupa elemen (misalnya tembaga, fosfor, kadmium) maupun senyawa kimia (seperti karbon dioksida atau amonia). Substansi dapat mengalami perubahan bentuk tergantung pada tahapan siklus hidupnya. Contohnya, tembaga dapat dijumpai dalam bentuk bijih tembaga, tembaga murni, paduan tembaga, hingga menjadi produk akhir berbasis tembaga.

2. Barang (*Goods*)
   Barang adalah entitas nyata yang memiliki nilai ekonomi, terdiri dari satu atau lebih jenis substansi, dan dapat bernilai positif (produk) maupun negatif (limbah). Bahkan, bahan buangan juga dapat diklasifikasikan sebagai komoditas, tergantung pada konteksnya dalam sistem ekonomi. Misalnya, kayu (yang mengandung serat, hidrogen, dan oksigen) dan air (yang terdiri dari H_2O serta berbagai unsur jejak seperti kalsium) merupakan contoh barang yang terdiri atas campuran substansi dan memiliki nilai ekonomi.

Flow: Aliran Material Antar Proses

Konsep *flow* merujuk pada arus masuk dan keluar material yang terjadi di setiap proses dalam sistem. Aliran ini dapat diukur secara kuantitatif, biasanya dalam satuan kilogram per tahun (kg/tahun) atau ton per tahun (t/tahun), tergantung pada skala analisis. Selain itu, dikenal pula istilah *flux*, yaitu laju aliran per satuan penampang dan satuan waktu, biasanya dinyatakan dalam $kg/(s \cdot m^2)$. Konsep ini sangat penting ketika analisis dilakukan pada media yang bersifat difus, seperti aliran air tanah atau emisi udara.

Process: Transformasi, Transportasi, dan Penyimpanan

Process adalah unit fungsional dalam sistem MFA yang melibatkan transformasi, transportasi, dan penyimpanan material (Brunner & Rechberger, 2004; Zhang *et al*., 2009). Pada tahap transformasi, substansi mengalami perubahan bentuk atau komposisi kimia akibat proses produksi, konsumsi, atau daur ulang. Selama

proses transportasi, bentuk fisik barang biasanya tidak berubah, namun lokasinya berpindah, yang memengaruhi distribusi spasial material dalam sistem. Dalam MFA, proses seringkali disederhanakan sebagai kotak hitam (*black box*), di mana hanya aliran input dan output yang diperhatikan, sementara mekanisme internal dikesampingkan untuk memudahkan analisis kuantitatif.

Klasifikasi *Material* dalam *Material Flow Analysis* (MFA)

Berdasarkan pedoman analisis aliran bahan yang dikembangkan oleh Eurostat, klasifikasi standar untuk material dalam konteks MFA mencakup tiga kategori utama, yaitu input material, output material, dan stok material. Klasifikasi ini digunakan untuk menjamin konsistensi analisis dan memfasilitasi perbandingan antar wilayah atau waktu.

Tabel 3.2 Klasifikasi Bahan Utama dalam MFA (Adriaanse et.al 1997; Zhou 2006)

Input		Output	
Domestic excavation used	Fossil fuel	Emission and waste	Water gas
	Minerals		Solid waste
	Biomass		Wastewater
	Water		Dissipation
Import	Raw materials	Outport	Raw materials
	Semi-manufactured goods and products		Semi-manufactured goods and products
	Other products		Other products
	Wrapper with import goods		Wrapper with import goods
	Import waste final disposal		Import waste final disposal
Balance catalogue	Oxygen consumption by breath	Balance catalogue	Water vapor in burning process
	Oxygen consumption by burning		Water vapor of goods
	Oxygen consumption by other industrial process		Vapor by breathing of human and livestock
Domestic excavation unused	Excavation unused in mining ore and stone	Disposal of domestic excavation unused	Excavation unused in mining ore and stone
	Biomass unused in harvest process		Biomass unused in harvest process
	Soil exploration and dig		Soil exploration and dig
Non-direct flow import (aboard hidden flow)	Hidden flow of import raw material	Non-direct flow import (aboard hidden flow)	Hidden flow of import raw material
	Hidden flow of import semi-manufactured goods and products		Hidden flow of import semi-manufactured goods and products

Klasifikasi Input Material

Input material dalam MFA dibedakan menjadi beberapa subkategori berikut:

1. DMI (*Direct Material Input*), Material yang diekstraksi dan digunakan langsung di dalam wilayah:
   a. Bahan bakar fosil: seperti batubara keras, lignit, minyak mentah, gas alam, dan lainnya (seperti gas dari minyak mentah, gambut, serpih minyak).
   b. Mineral:
      - Bijih logam: besi, bijih non-ferro seperti tembaga, bauksit, dan lainnya.
      - Mineral industri: garam, lempung khusus, pasir dan kerikil industri, gambut pertanian, dan lainnya.
      - Mineral konstruksi: pasir, kerikil, batu pecah (termasuk batu kapur untuk pencampuran tanah), lempung biasa (untuk bata), batu bangunan, dan sebagainya.
   c. Biomassa (termasuk untuk kebutuhan sendiri):
      - Biomassa pertanian: hasil panen seperti biji-bijian, umbi-umbian, polong-polongan, biji minyak, sayuran, buah, tanaman serat, serta hasil samping seperti jerami, dedaunan, dan rumput pakan dari padang rumput.
      - Biomassa kehutanan: kayu dari hutan konifer dan non-konifer, serta hasil samping hutan seperti daun oleander, teh minyak, kastanye, dan sebagainya.
      - Biomassa perikanan: ikan laut, ikan air tawar, dan mamalia air lainnya.
      - Hasil perburuan: seperti daging buruan.
      - Biomassa lainnya: madu, jamur, buah kering, rempah-rempah, dan sebagainya.

2. Material Impor:
   a. Bahan mentah: mencakup bahan bakar fosil, mineral, biomassa, dan bahan mentah sekunder.

b. Produk setengah jadi: hasil olahan parsial dari bahan bakar fosil, mineral, atau biomassa.
   - Produk jadi: barang akhir hasil olahan dari bahan mentah.
   - Material kemasan: bahan pembungkus yang menyertai bahan impor.
   - Limbah untuk pengolahan akhir atau pembuangan: termasuk limbah berbahaya atau tak berguna yang masuk ke wilayah tersebut.

3. Material Penyeimbang (*Balancing Item Substance*):
   Bahan terkait penggunaan oksigen akibat proses pembakaran, respirasi, dan proses industri. Contohnya termasuk gas cair dan polimer.

4. DHF (*Domestic Hidden Flows*), material hasil ekstraksi yang tidak digunakan secara langsung:
   - Aliran tersembunyi dari ekstraksi bahan bakar fosil.
   - Aliran tersembunyi dari penambangan dan pemurnian mineral.
   - Aliran tersembunyi dari hasil panen biologis, seperti kerugian dari panen kayu dan pertanian.
   - Galian tanah konstruksi dan pengerukan sungai atau pelabuhan.

5. IHF (*Imported Hidden Flows*), Aliran tersembunyi yang terkait dengan material impor:
   - Aliran tersembunyi dari bahan mentah impor (bahan bakar fosil, mineral, biomassa).
   - Aliran tersembunyi dari produk jadi dan setengah jadi yang diimpor.

Klasifikasi Output Material

Output material mencerminkan bahan yang dikeluarkan dari sistem ekonomi, baik dalam bentuk emisi ke lingkungan maupun ekspor.

1. Emisi ke lingkungan:
   - Zat yang dilepaskan ke lingkungan selama tahap pra-produksi, produksi, atau penggunaan. Contohnya: gas buang, limbah cair, dan limbah padat.
   - Penggunaan dan kehilangan zat secara menyebar (*dissipative use/loss*). Misalnya: pupuk, pestisida, dan zat lain yang tersebar di lingkungan selama pemakaian.
2. Material ekspor: termasuk bahan mentah, produk setengah jadi dan jadi, barang lain, material kemasan, serta limbah yang diekspor untuk pengolahan atau pembuangan.
3. Zat penyeimbang (*balancing items*): termasuk uap air dari pembakaran, uap air dari produk, serta CO2 dan uap air dari respirasi manusia dan hewan.
4. Pembuangan volume tambang yang tidak digunakan: Sisa dari proses ekstraksi dan pemurnian mineral yang tidak termanfaatkan, baik di wilayah itu sendiri maupun yang terkait dengan produk ekspor. Termasuk juga tanah hasil galian dan pengerukan.
5. EHF (*Export Hidden Flow*), aliran tersembunyi dari material yang diekspor:
   - Dari bahan mentah (mineral, bahan bakar, biomassa).
   - Dari produk setengah jadi dan produk jadi.

Klasifikasi Stok Material (*Material Stocks*)

Kategori ini mengacu pada penyimpanan atau akumulasi material di dalam sistem, termasuk penambahan dan pengurangan stok.

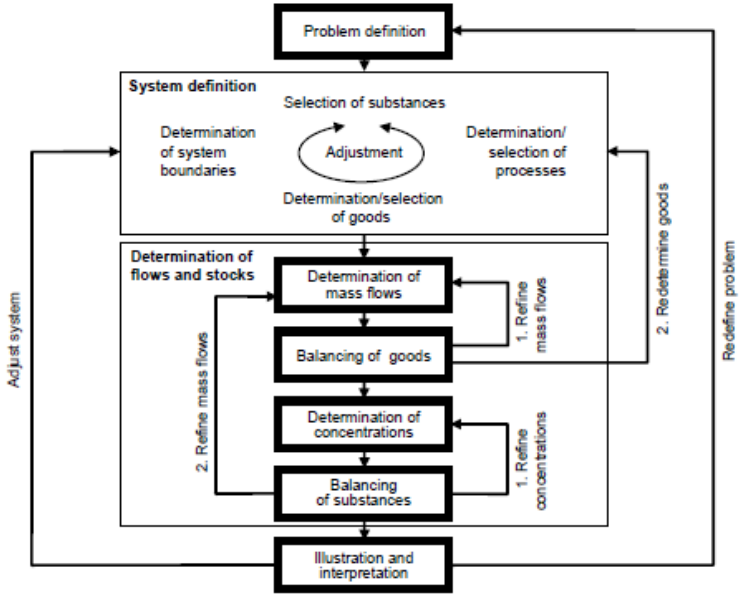
1. Penambahan total pada stok:
   - Bangunan dan infrastruktur: mencakup mineral konstruksi, logam, kayu, dan material bangunan lainnya.
   - Mesin dan barang tahan lama: termasuk logam dan bahan lain dalam mesin atau peralatan.
2. Pengurangan inventori:
   - Bangunan dan infrastruktur: rusak atau hancur, pengurangan material akibat kerusakan.

- Mesin dan barang tahan lama: kehilangan atau degradasi bahan logam dan lainnya selama masa pakai.

3. Kenaikan bersih stok (*Net Stock Increase*):
   - Dihitung dari penambahan total dikurangi pengurangan inventori.
   - Dapat terjadi pada bangunan/infrastruktur maupun mesin/barang tahan lama, menggambarkan akumulasi material dalam sistem ekonomi.

3.6 Tahapan-tahapan MFA

Secara sederhana, *Material Flow Analysis* (MFA) merupakan proses yang dilakukan secara bertahap dan berulang, dimulai dari merumuskan masalah dan menetapkan tujuan yang ingin dicapai. Setelah itu, ditentukan zat atau material yang akan dianalisis, batas sistemnya, proses-proses yang terlibat, serta barang-barang yang relevan. Langkah selanjutnya adalah menghitung aliran massa dari barang-barang tersebut serta kandungan zat di dalamnya. Dari perhitungan itu, diperoleh informasi tentang aliran dan stok material, termasuk memperhitungkan ketidakpastian data. Hasil analisis kemudian disajikan dengan cara yang mudah dipahami untuk mendukung pengambilan keputusan yang sesuai dengan tujuan awal. Proses ini tidak harus dilakukan secara kaku dari awal sampai akhir, tetapi bisa dilakukan secara fleksibel dan berulang, dengan penyesuaian di sepanjang proses agar hasilnya lebih akurat dan sesuai kebutuhan proyek.



Gambar 3.1 Skema prosedur MFA (Brunner & Rechberger, 2004).

3.6.1 Pemilihan Zat/Material

Tahap pertama dalam MFA adalah memilih zat atau material yang ingin dianalisis. Pemilihan ini tergantung pada tujuan dari studi MFA dan sistem yang sedang dikaji. Salah satu cara memilih zat adalah mengacu pada regulasi yang sudah ada, seperti undang-undang lingkungan atau standar kualitas dan keselamatan material. Dengan cara ini, kita bisa memastikan bahwa zat-zat penting yang telah diidentifikasi oleh lembaga resmi turut dimasukkan dalam analisis.

Cara kedua adalah menilai pentingnya zat berdasarkan aliran barang yang masuk dan keluar dari sistem. Pertama-tama, barang-barang dikelompokkan ke dalam bentuk padat, cair, dan gas. Kemudian, dari tiap kelompok dipilih aliran-aliran utama yang mewakili paling tidak 90% dari total massa. Setelah

itu, kita membandingkan konsentrasi zat tertentu dalam aliran tersebut dengan konsentrasi alaminya (misalnya di kerak bumi, air alami, atau atmosfer). Jika konsentrasi zat dalam aliran jauh lebih tinggi (biasanya 10 kali lipat atau lebih) dibandingkan konsentrasi alaminya, maka zat itu dianggap penting dan dipilih untuk dianalisis. Cara ketiga muncul jika proyek MFA memang difokuskan pada satu atau beberapa zat tertentu sejak awal, seperti studi tentang tembaga atau nutrien (C, N, P) dalam sistem tertentu. Dalam kasus ini, pemilihan zat sudah termasuk dalam definisi proyek itu sendiri.

3.6.2 Menentukan Batas Sistem secara Spasial dan Temporal

Setelah memilih zat atau material yang akan dianalisis, langkah selanjutnya dalam MFA adalah menentukan batas sistem, baik secara spasial (ruang) maupun temporal (waktu). Batas spasial mengacu pada wilayah geografis yang dianalisis. Biasanya, batas ini ditentukan berdasarkan tujuan studi. Misalnya, jika kita ingin menganalisis neraca karbon suatu komunitas, maka batas sistemnya bisa berupa kota, kawasan industri, atau bahkan satu fasilitas seperti pembangkit listrik.

Batas spasial sering kali mengikuti wilayah administratif seperti negara, provinsi, atau kota, karena data biasanya dikumpulkan berdasarkan batas-batas ini. Kelebihan dari pendekatan ini adalah hasil MFA bisa langsung dikaitkan dengan kebijakan atau keputusan yang berlaku di wilayah tersebut, sehingga lebih mudah diimplementasikan. Namun, batas sistem sebaiknya tidak terlalu luas hingga menyulitkan, tapi juga tidak terlalu sempit hingga kehilangan informasi penting. Contohnya, jika kita menganalisis aliran nitrogen dalam sebuah kota, kita harus mempertimbangkan bahwa makanan yang dikonsumsi warga kota berasal dari wilayah luar kota (disebut *hinterland*). Jika hanya kota yang dijadikan batas sistem, kita akan melewatkan

banyak aliran polutan yang sebenarnya terjadi di wilayah pertanian penghasil makanan. Maka, dalam kasus seperti ini, lebih tepat jika batas sistem mencakup kota dan wilayah hinterland-nya sekaligus.

Sementara itu, batas waktu dalam MFA umumnya lebih mudah ditentukan. Biasanya, periode satu tahun dipilih sebagai rentang waktu analisis karena cukup panjang untuk mewakili rata-rata kondisi sistem dan mengurangi pengaruh fluktuasi sesaat. Namun, jika kita ingin melihat perubahan jangka pendek atau mendeteksi lonjakan yang tidak biasa (misalnya saat musim panen atau saat terjadi bencana), maka bisa digunakan periode yang lebih pendek seperti per bulan atau per minggu. Pemilihan batas waktu harus disesuaikan dengan tujuan analisis dan karakteristik sistem yang sedang dikaji.

3.6.3 Mengidentifikasi Aliran Material, Stok, dan Proses yang Penting

Setelah menentukan zat yang akan dianalisis dan batas sistemnya, langkah selanjutnya adalah mengidentifikasi aliran material, *stock* (penumpukan), dan proses-proses penting dalam sistem tersebut. Pada tahap awal, biasanya dilakukan perkiraan kasar terhadap aliran barang yang masuk dan keluar dari sistem. Informasi ini dapat diperoleh dari berbagai sumber, seperti laporan perusahaan, data pemerintah, atau publikasi ilmiah. Jika data tidak tersedia, kita bisa menghubungi pakar atau melakukan kunjungan langsung ke instansi terkait.

Dalam perkiraan awal ini, aliran material yang jumlahnya sangat kecil—kurang dari 1% dari total aliran sistem biasanya diabaikan agar analisis tidak terlalu rumit. Namun, aliran kecil ini tetap perlu diperiksa ulang pada tahap berikutnya, terutama jika ternyata berpengaruh besar terhadap zat tertentu yang sedang

dianalisis.

Jumlah proses yang dimasukkan ke dalam model MFA bergantung pada seberapa kompleks sistem yang dikaji dan apa tujuan dari studi tersebut. Proses-proses bisa dibagi menjadi bagian-bagian kecil (sub-proses) atau digabung menjadi satu jika ingin disederhanakan. Namun, jika terlalu banyak proses dimasukkan misalnya lebih dari 15 (tidak termasuk proses impor dan ekspor) analisis bisa menjadi terlalu rumit dan tidak efisien. Padahal, salah satu tujuan utama MFA adalah menyederhanakan sistem dunia nyata menjadi model yang mudah dipahami namun tetap akurat.

Dalam setiap proses, berlaku prinsip neraca massa: jumlah total input harus sama dengan jumlah total output ditambah dengan perubahan stok (penumpukan atau pengurangan material dalam proses tersebut). Jika ada ketidakseimbangan antara input dan output, maka kemungkinan ada aliran yang terlewat atau kesalahan data. Oleh karena itu, untuk mendapatkan hasil MFA yang akurat, semua aliran masuk dan keluar harus dicatat dengan benar, termasuk akumulasi yang terjadi. Jika tidak bisa diukur secara langsung, maka perubahan stok bisa dihitung dari selisih antara input dan output.

3.6.4 Menentukan Aliran Massa, Stok, dan Konsentrasi Zat

Setelah mengidentifikasi aliran dan proses dalam sistem, langkah selanjutnya dalam MFA adalah menghitung berapa besar aliran massa, stok material, dan konsentrasi zat dalam sistem tersebut. Informasi ini bisa didapatkan dari berbagai sumber, seperti database statistik nasional, asosiasi industri, laporan pemerintah, atau literatur ilmiah seperti jurnal dan buku. Data ini biasanya mencakup angka produksi, konsumsi, penjualan, limbah, emisi, dan kandungan zat dalam air, udara, atau tanah.

Dalam banyak kasus, data tidak selalu tersedia secara

langsung. Oleh karena itu, kita bisa menggunakan data pendekatan atau proxy, yaitu data dari sistem serupa yang digunakan sebagai perkiraan. Misalnya, jika kita ingin mengetahui berapa banyak seng (Zn) yang hilang akibat keausan ban mobil di AS, tetapi tidak memiliki data lokal, kita bisa mengambil data dari Swedia yang menyatakan bahwa setiap mobil menghasilkan 0,032 kg Zn per tahun. Jika AS memiliki 140 juta mobil, maka estimasi kehilangan seng adalah sekitar 4.500 ton per tahun. Namun, penting untuk selalu mengecek apakah data proxy tersebut benar-benar cocok digunakan dalam konteks sistem yang berbeda.

Jika tersedia dana dan sumber daya yang cukup, aliran massa dan konsentrasi zat bisa diukur langsung. Namun, pengukuran ini cenderung mahal, terutama jika dilakukan pada sistem besar atau dalam periode waktu yang panjang. Oleh karena itu, pengukuran sering difokuskan pada sistem yang lebih kecil, seperti pabrik, rumah tangga, pertanian, atau instalasi pengolahan air limbah. Pengambilan sampel dalam studi lapangan semacam ini perlu dirancang dengan baik untuk memastikan hasilnya akurat, efisien, dan hemat biaya.

Meski begitu, dalam praktiknya sangat jarang sebuah sistem memiliki keseimbangan input-output dengan tingkat kesalahan di bawah 10%. Artinya, sedikit perbedaan antara jumlah masuk dan keluar dalam sistem hampir selalu ada, dan itu masih dapat diterima dalam analisis. Aspek yang penting adalah mengevaluasi apakah data yang tersedia cukup akurat untuk mencapai tujuan studi, atau apakah perlu dilakukan pengumpulan data tambahan. Pada tahap ini, semua data yang telah dihitung atau diukur akan dicatat dalam tabel data sebagai dasar untuk analisis berikutnya.

3.6.5 Menilai Total Aliran dan Stok Material

Setelah mengetahui aliran barang dan konsentrasi zat di dalamnya, langkah selanjutnya dalam MFA adalah menghitung aliran total zat

yang mengikuti pergerakan barang tersebut. Caranya sederhana yaitu kita kalikan jumlah massa suatu barang dengan konsentrasi zat yang dikandungnya. Misalnya, jika kita punya 1.000 kg limbah dan diketahui mengandung 2% tembaga, maka aliran tembaga dari limbah itu adalah 20 kg. Perhitungan ini dilakukan untuk setiap zat dan setiap aliran barang yang ada dalam sistem.

Dalam setiap proses pada sistem, prinsip neraca massa tetap berlaku yaitu jumlah zat yang masuk harus sama dengan jumlah zat yang keluar ditambah akumulasi (stok) di dalam proses tersebut. Jika hasil perhitungannya tidak seimbang, bisa jadi ada aliran yang belum terdeteksi atau terjadi kesalahan dalam data konsentrasi zat. Namun, selisih input dan output hingga 10% masih dianggap wajar dan tidak terlalu memengaruhi kesimpulan analisis secara keseluruhan. Jika ketidakseimbangan lebih besar, kita bisa menggunakan pendekatan matematis tertentu untuk menyempurnakan hasilnya dan memperkirakan ketidakpastian.

a. Untuk stok yang tidak banyak berubah dalam waktu lama (misalnya air di danau besar atau zat organik dalam tanah), kita bisa langsung mengukurnya berdasarkan massa atau menghitung dari volume dan densitas material.
b. Untuk stok yang berubah cepat (disebut *fast-changing stocks*, seperti sampah di TPA, logam di kota, atau pupuk di lahan pertanian), kita perlu menghitung selisih antara jumlah zat yang masuk dan keluar dalam suatu periode waktu tertentu. Namun, kita perlu tahu terlebih dahulu ukuran stok awalnya (misalnya stok di tahun pertama), agar bisa melacak perubahannya dari waktu ke waktu.

Contoh stok yang cepat berubah umumnya ditemukan pada aktivitas manusia, seperti logam dalam bangunan, plastik dan alat elektronik di rumah, atau nutrien di lahan pertanian. Dalam banyak kasus, jika kita hanya ingin estimasi kasar, kita bisa mengasumsikan bahwa stok tersebut tidak terlalu berubah dari waktu ke waktu.

3.7 Membangun Model MFA dengan STAN

3.7.1 *Introduction* "Software STAN"

Penggunaan *Material Flow Analysis* (MFA) menjadi sangat penting untuk memahami bagaimana aliran material bergerak dari input hingga menjadi produk akhir maupun limbah. Akan tetapi, jika hal ini dilakukan secara manual, seringkali terdapat ketidaksesuaian antara data input dan output akibat keterbatasan pengukuran di lapangan. Oleh karena itu diperlukan bantuan perangkat software untuk memudahkan pembuatan model MFA secara akurat. Salah satu perangkat lunak yang digunakan untuk pembuatan model MFA adalah STAN (subSTance flow ANalysis).

a. Sejarah Singkat Pengembangan STAN

Perangkat lunak STAN (subSTance flow ANalysis) adalah perangkat lunak gratis yang mudah digunakan yang mendukung pelaksanaan analisis aliran material sesuai dengan standar Austria ÖNORM S 2096 (MFA - Aplikasi dalam pengelolaan limbah) dengan mempertimbangkan ketidakpastian data (Brunner & Rechberger, 2017). STAN dikembangkan di *Research Unit for Waste and Resource Management at TU Wien* di bawah arahan Helmut Rechberger (Cencic et al., 2008). Penemu STAN adalah Oliver Cencic, yang menciptakan fondasi matematis, metodologis, dan praktis untuk perancangan STAN, sedangkan pekerjaan pemrogramannya dikerjakan oleh Alfred Kovac dari inka software (TU Wien, 2012).

Perangkat lunak ini pertama kali dirilis pada tahun 2005 sebagai solusi untuk mempermudah analisis aliran material dalam berbagai sistem produksi maupun lingkungan. Dalam perkembangannya, STAN telah melalui beberapa kali pembaruan hingga kini pada tahun 2025 tersedia dalam

versi 2.7 yang paling banyak digunakan, dan dapat diunduh secara gratis melalui laman resmi *https://stan2web.net/downloads/stan*. STAN didesain sebagai software gratis dengan antarmuka sederhana sehingga dapat diakses oleh peneliti, akademisi, maupun praktisi industri. Keunggulannya terletak pada kemampuannya merekonsiliasi data yang tidak seimbang, mengakomodasi ketidakpastian, dan menghasilkan visualisasi dalam bentuk diagram Sankey yang intuitif (TU Wien, 2012).

b. Fitur Utama STAN

STAN menawarkan empat fitur inti yang menjadi alasan utama mengapa perangkat lunak ini banyak digunakan. Pertama adalah *balance calculation*, yaitu perhitungan keseimbangan massa dengan metode *data reconciliation* berbasis *least squares method*. Dengan cara ini, input dan output yang tidak seimbang akibat kesalahan pengukuran dapat dikoreksi secara statistik hingga diperoleh neraca massa yang konsisten. Kedua, STAN memiliki *uncertainty handling*, yang memungkinkan pengguna memasukkan data dengan ketidakpastian, misalnya berupa simpangan baku, interval nilai, atau distribusi probabilitas. Fitur ini sangat berguna pada studi lapangan yang sering kali penuh dengan variasi data. Ketiga, terdapat *unit handling*, yaitu kemampuan untuk mengonversi otomatis antar satuan, misalnya dari kg per hari menjadi ton per tahun, sesuai dengan periode analisis yang dipilih. Terakhir, STAN dapat menghasilkan *Sankey diagram*, sebuah visualisasi aliran material yang menggunakan ketebalan panah untuk mewakili besarnya aliran. Diagram ini membuat hasil MFA lebih mudah dipahami, baik oleh peneliti maupun oleh pihak non-teknis.

3.7.2 Tahapan Membangun Model di STAN

Panduan resmi telah tersedia secara lengkap dalam bentuk manual yang dapat diakses melalui laman STAN Help Manual (STAN2, n.d). Manual tersebut memberikan instruksi terperinci mulai dari tahap awal pembuatan proyek, penentuan batas sistem, pengaturan layer, hingga proses perhitungan keseimbangan dan visualisasi aliran dalam bentuk diagram Sankey. Namun demikian, untuk memudahkan pemahaman bagi pembaca, dalam buku ini akan disajikan ringkasan dari isi manual tersebut. Ringkasan ini bertujuan agar pengguna dapat memperoleh gambaran praktis mengenai langkah-langkah membangun model MFA tanpa harus membaca keseluruhan dokumen teknis. Dengan demikian, pembaca dapat lebih cepat memahami konsep dasar, alur penggunaan, serta fitur utama STAN, yang kemudian dapat diaplikasikan sesuai dengan kebutuhan studi maupun penelitian yang dilakukan.

a. Membuat Model MFA dengan STAN

Proses pembuatan model MFA di STAN dimulai dengan membuat proyek baru. Pengguna dapat membuka menu *File* → *New*, kemudian menentukan nama proyek dan lokasi penyimpanan. Pada tahap ini juga dilakukan pengaturan parameter sistem, yaitu pemilihan *layer* dan periode analisis.

STAN menyediakan tiga jenis *layer* untuk menggambarkan aliran, yaitu *goods*, *substances*, dan *elements*. *Goods* digunakan untuk menggambarkan aliran material fisik seperti kayu, kaca, atau aluminium. *Substances* digunakan untuk zat tertentu yang terkandung dalam material, misalnya karbon dalam kayu. Sedangkan *elements* digunakan untuk menggambarkan aliran unsur kimia spesifik seperti karbon (C), nitrogen (N), atau fosfor (P). Dalam studi kasus sederhana, biasanya digunakan *goods layer*, karena fokus analisis adalah pada material fisik yang diproses dan dihasilkan.

b. Membuat Sistem *Boundary*

Setelah proyek dibuat, langkah berikutnya adalah membangun model sistem dalam STAN dengan mendefinisikan batas sistem (*system boundary*). Dalam STAN, batas sistem perlu ditetapkan baik dari sisi ruang maupun waktu. Batas spasial dapat ditentukan, misalnya mengikuti area logistik suatu pabrik atau wilayah tertentu, sedangkan batas temporal biasanya ditetapkan dalam periode tertentu, seperti satu tahun perhitungan neraca.

Dalam *system boundary* ini, dapat ditambahkan *process box* yang mewakili tahapan proses produksi. Misalnya, dalam industri kayu terdapat proses pemotongan kayu, perakitan *frame* (awal), dan perakitan akhir. Setiap proses digambarkan dengan kotak yang kemudian dihubungkan dengan aliran (*flow*) berupa input dan output material.

Proses pemotongan dapat menerima input berupa kayu gelondongan, dengan output berupa potongan kayu, serbuk kayu, dan sisa limbah. Proses perakitan menerima potongan kayu yang layak sebagai input, lalu menghasilkan produk *frame* kayu sekaligus sisa potongan yang tidak terpakai. Semua aliran ini diberi nama jelas dan dapat disesuaikan simbolnya, baik dari segi warna, ketebalan garis, maupun bentuk panah. Dengan cara ini, model sistem *boundary* dalam STAN menjadi representasi visual dari aliran material nyata di lapangan.

Periode analisis juga penting ditentukan sejak awal, karena akan memengaruhi konversi satuan otomatis dalam perhitungan. Sebagai contoh, sebuah industri kayu kecil mungkin ingin menganalisis penggunaan material harian (kg/hari), sedangkan studi skala besar mungkin lebih sesuai jika menggunakan periode tahunan (ton/tahun).

c. Memasukkan Data

Setelah model sistem dibangun, tahap berikutnya adalah memasukkan data. Pada setiap aliran, pengguna dapat memasukkan nilai massa, volume, atau densitas sesuai data yang tersedia. STAN kemudian dapat secara otomatis menghitung konversi antar satuan. Sebagai contoh, jika densitas kayu diketahui, maka aliran volume dapat otomatis dikonversi menjadi massa.

Selain data utama, pengguna juga dapat memasukkan ketidakpastian data. Misalnya, serbuk kayu hasil pemotongan bervariasi antara 0,5–0,6 kg per hari. Nilai ini dapat dimasukkan dalam bentuk interval atau simpangan baku. STAN akan menggunakan informasi tersebut untuk memperhitungkan variasi dalam perhitungan neraca massa.

d. Balance Calculation

Prinsip dasar perhitungan di STAN adalah hukum kekekalan massa, yaitu: *Input* + *Generation* = *Output* + *Accumulation*. Jika data yang dimasukkan tidak konsisten, STAN akan melakukan perhitungan *data reconciliation* berdasarkan tingkat ketidakpastian yang diberikan. Proses ini dijalankan melalui menu *Extras* → *Calculation Modules* → *Balance calculation*. Hasil perhitungan akan menunjukkan nilai aliran yang telah disesuaikan agar konsisten, serta menampilkan ketidakpastian pada masing-masing aliran.

e. Visualisasi dan Output

Salah satu keunggulan utama STAN adalah kemampuannya menampilkan hasil dalam bentuk *Sankey diagram*. Panah pada diagram dibuat dengan ketebalan proporsional terhadap besar aliran material, sehingga mudah dipahami secara

visual. Warna, label, dan ketebalan panah dapat diatur sesuai kebutuhan pengguna. Diagram tersebut dapat diekspor ke berbagai format gambar (*.png, *.jpg*), sementara data numerik dapat diekspor ke Excel atau CSV untuk analisis lebih lanjut.

3.7.3 Studi Kasus untuk Membangun Model STAN pada Industri Kayu

Pada bagian ini dijelaskan studi kasus *Material Flow Analysis* (MFA) yang difokuskan pada produksi satu unit jendela berbahan kayu (*frame*) dan kaca (panel) pada UMKM XYZ. Tujuan penulisan adalah menyediakan panduan komprehensif dan langkah demi langkah untuk melakukan analisis aliran material dan energi menggunakan perangkat lunak STAN versi 2.7, sehingga pembaca dapat lebih mudah memahami aplikasi dari metode ini untuk kebutuhan evaluasi efisiensi material, pengurangan limbah, dan perbaikan proses produksi.

a. Latar Belakang dan Tujuan

Pada studi kasus ini, MFA difokuskan pada satu unit produk berupa jendela dengan dua material utama: kayu (*frame*) dan kaca (*panel*). Tujuan utama adalah:

1. Mengidentifikasi proporsi material yang benar-benar memberi nilai tambah pada produk akhir,
2. Memetakan sisa material (scrap/serbuk/pecahan) yang timbul di setiap tahapan,
3. Mengukur efisiensi penggunaan material dan konsumsi energi per proses di UMKM XYZ.

Visualisasi hasil analisis disajikan dalam dua tipe aliran:

1. Goods (material): menampilkan aliran fisik kayu & kaca dari input hingga produk dan sisa.
2. Energy: menampilkan konsumsi energi (listrik) per proses.

b. Sistem dan Batasan

Sistem	Proses produksi jendela kayu + kaca
Batasan	Dari penerimaan bahan baku hingga produk akhir dan pelepasan sisa ke pihak ketiga (*waste collector*).
Satuan	kg per hari (kg/d) untuk material dan kJ per hari (kJ/d) untuk energi
Asumsi unit analisis	1unit jendela per hari (dapat diskalakan)

c. Penentuan Material (*Goods* & *Energy*)

Daftar material (Input utama & pendukung)

- Kayu: 6,80 kg
- Kaca lembaran: 10,00 kg
- Fastener (rivet/sekrup): 0,12 kg
- Sealant: 0,05 kg
- Karet gasket/list: 0,40 kg

Energi yang digunakan:

- Listrik – *Wood processing*: 1.500 kJ
- Listrik – *Initial assembly* (bor/rivet): 500 kJ
- Listrik – *Glass processing* (cutting): 2.500 kJ
- Listrik – *Final assembly*: 300 kJ

Catatan: Nilai diatur agar tutup neraca massa pada tiap proses (*mass balance* = OK) dan tetap realistis untuk operasi bengkel kecil.

d. Aliran Proses

1. *Wood processing*: pemotongan & pematangan profil kayu (miter saw / planer).
2. *Glass processing*: pemotongan kaca dengan *glass cutter*.
3. *Initial assembly*: perakitan profil menjadi frame (rangka kayu), pengeboran, *riveting*.

4. *Final assembly*: pemasangan panel kaca ke frame (sealant + gasket).
5. *Third-party waste collector*: pengumpulan seluruh sisa material (kayu dan kaca).

e. Sisa Material dan Stock Material

1. Sisa material Kayu: Sisa material kayu diperoleh dari tahapan proses kayu dan perakitan frame dengan total sisa material sebesar 2,1 kg yang berupa sisa potongan kayu dan serbuk kayu.
2. Sisa material Kaca: Sisa material kaca diperoleh dari tahapan Proses Kaca dengan total Sisa material sebesar 3,5 kg.
3. Third-Party Waste Collector: merupakan akumulasi Sisa material yang diperoleh selama proses produksi dan berakhir di pengepul. Dikategorikan menjadi stok material dengan total sebesar 5,6 kg.

f. Perhitungan Aliran per Proses (*Goods*)

Tabel 3.3 Perhitungan Aliran per Proses

Proses Kayu		Perakitan Frame		Proses Kaca		Perakitan Akhir	
Input							
Material	Jumlah	Material	Jumlah	Material	Jumlah	Material	Jumlah
Kayu	6,80 kg/d	Frame kayu	4,80 kg/d	Kaca	10,00 kg/d	Frame jendela	4,82 kg/d
Listrik	1.500 kJ/d	Sekrup	0,12 kg/d	Listrik	2.500 kJ/d	Panel kaca	6,50 kg/d
		Listrik	500 kJ/d			Sealant	0,05 kg/d
						Karet gas-ket/list	0,40 kg/d
						Listrik	300 kJ/d

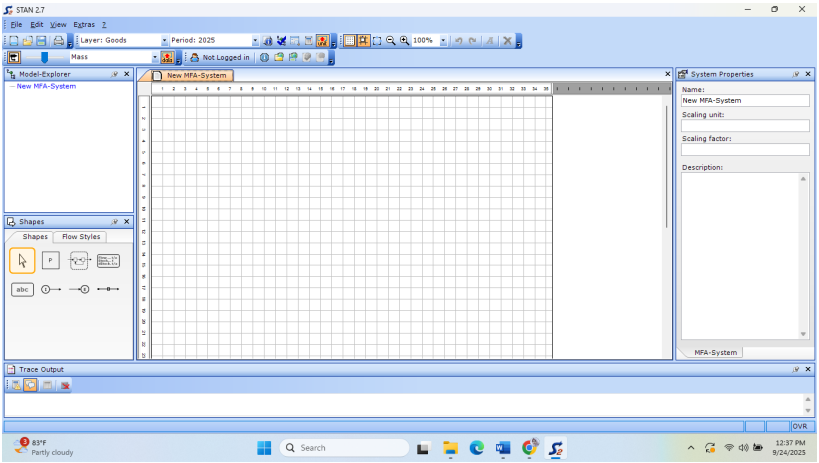
Proses Kayu		Perakitan Frame		Proses Kaca		Perakitan Akhir	
Output							
Material	**Jumlah**	**Material**	**Jumlah**	**Material**	**Jumlah**	**Material**	**Jumlah**
Frame kayu	4,80 kg/d	Frame jendela	4,82 kg/d	Panel kaca terpakai	6,50 kg/d	Jendela	11,77 kg/d
Waste							
Material	**Jumlah**	**Material**	**Jumlah**	**Material**	**Jumlah**	**Material**	**Jumlah**
Sisa potongan kayu	1,60 kg/d	Serbuk sanding/ kayu	0,10 kg/d	Sisa potongan kaca	3,50 kg/d		
Serbuk kayu	0,40 kg/d						

g. Langkah-langkah Praktis di STAN

1. Buat *Project* Baru

a. File → New Project (atau icon New).

b. Isi Project name: **MFA_Jendela_Kayu**. Isi Description singkat: "MFA 1 unit jendela — kayu & kaca, kg/d & kJ/d".

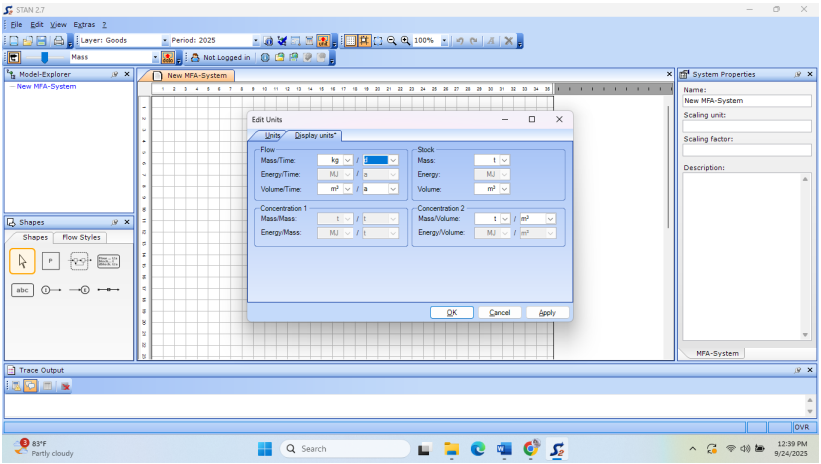


Gambar 3.2 Tampilan Software STAN versi 2.7

2. Atur Define Unit

a. Cari menu Edit → Define Unit.

b. Pada display units Ganti flow menjadi kg/d



Gambar 3.3 Tampilan Edit Unit

3. Buat Processes/Nodes

Buat proses/nodes dalam proyek pada menu shapes dan *rename* nama pada *Process properties* persis sesuai tabel mempermudah :

a. Proses Kayu (tipe: Process)

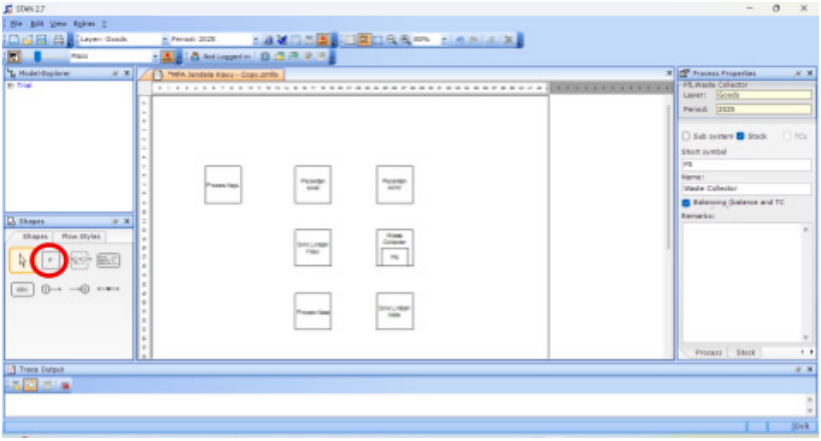
b. Perakitan Frame (tipe : Process)

c. Proses Kaca (tipe : Process)

d. Perakitan Akhir (tipe : Process)

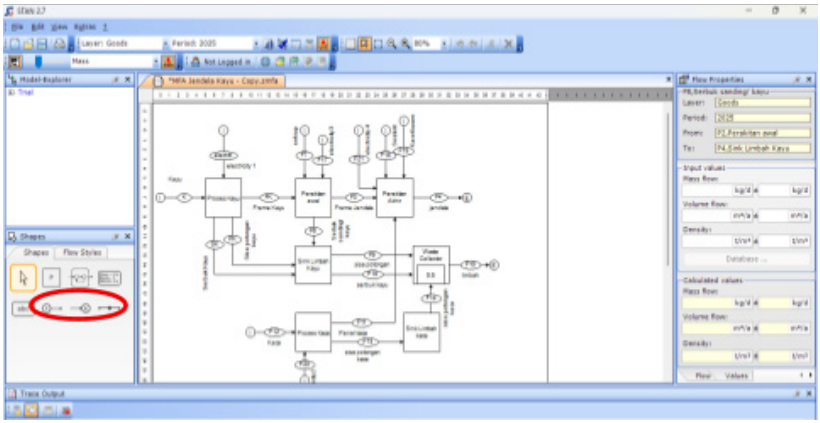
e. Waste_collector (third-party)

f. Sink (tipe Process atau gunakan Waste_collector sebagai sink langsung)



Gambar 3.4 Tampilan Software STAN untuk membuat *Process*

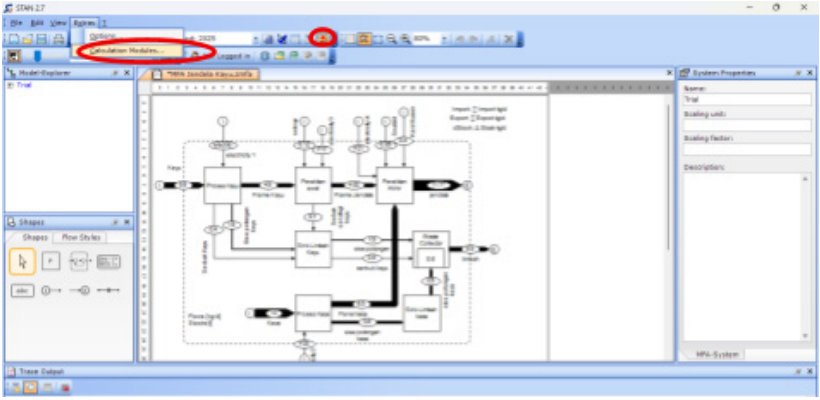
4. **Masukkan Flows (baris per baris)**
   a. Buka menu Shape → Flows
   b. Tambahkan flow pada setiap proses (*import flow*, *export flow*, dan *flow/polyline*) dan rename sesuai pada Tabel 3.3.



Gambar 3.5 Tampilan Software STAN untuk Penambahan *Flow*

7. Jalankan *mass balance/calculation*

Menu Calculate → pilih *Balance/Mass balance/Run balance with error propagation*.

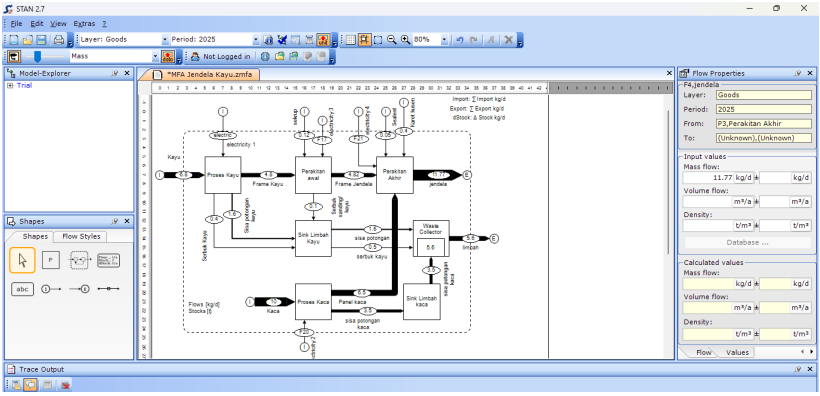


Gambar 3.7 Tampilan Software STAN untuk Menu Calculation

8. Menandai Product Node

a. Pastikan Final_assembly → Product_Jendela berisi semua flows komponen (Kayu 4.70; Kaca 6.50; fastener 0.12; sealant 0.05; gasket 0.40) atau sebagai agregat 10.57 kg.

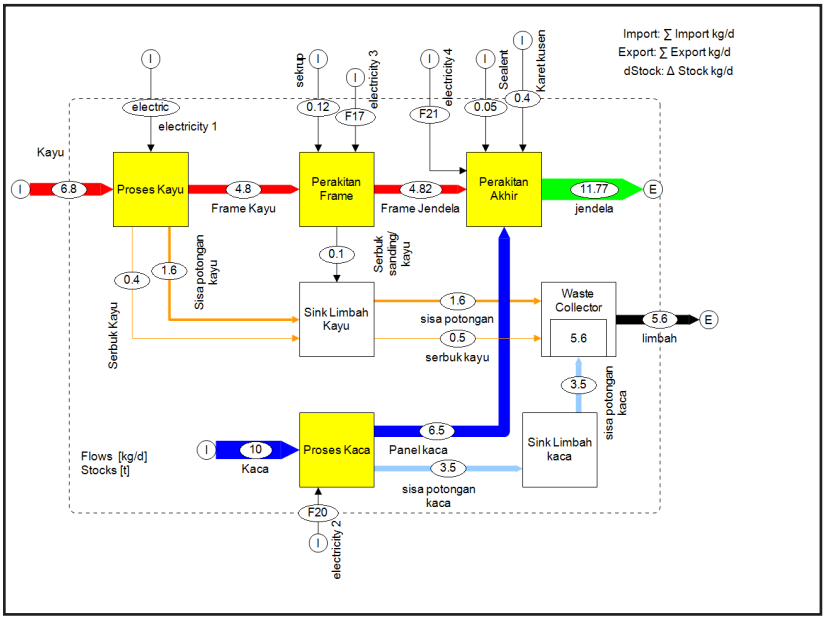
b. Di STAN, kamu bisa representasikan product sebagai node 'stock' sehingga total massa produk tercatat.



Gambar 3.8 Tampilan Final Software STAN untuk Produk Jendela Kayu

9. **Buat visualisasi Sankey (*Goods* dan *Electricity*)**

a. Pilih File → Export diagram (pilih PNG/JPEG dan Save image).

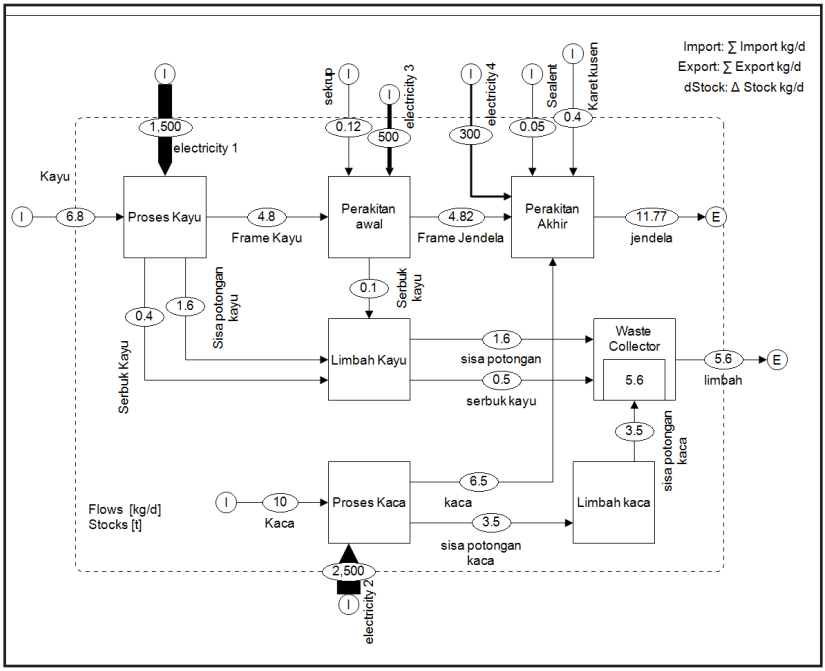


Gambar 3.9 Sankey Diagram (Goods) MFA Jendela Kayu

b. Keterangan pada Gambar 3.9. Sankey diagram (*Goods*):

- Aliran (*flow*) ditunjukkan dengan panah.
  - ▢ Panah tebal warna merah merupakan aliran kayu
  - ▢ Panah tebal warna biru tua merupakan aliran kaca (panel)
  - ▢ Panah tipis orange merupakan aliran limbah kayu
  - ▢ Panah tipis biru muda merupakan aliran limbah kaca
  - ▢ Panah hijau merupakan hasil akhir kusen jendela kayu
  - ▢ Panel hitam merupakan limbah akhir proses

- Ketebalan panah proporsional dengan besarnya kuantitas (misalnya massa, volume, energi).
- Kotak (*process box*) mewakili tahapan proses.
  - Kotak kuning : proses kayu, proses kaca, perakitan frame, dan perakitan akhir.
  - Kotak putih : *sink/waste collector*
- Aliran input dan output terlihat jelas, termasuk material utama (kayu, kaca) maupun limbah (serbuk kayu, sisa potongan kaca, dll).
- Sankey diagram dapat menggambarkan efisiensi pemanfaatan material dan lokasi terjadinya limbah/ pemborosan.



Gambar 3.10 Sankey Diagram (Electircity) MFA Jendela Kayu

10. Ringkasan Efisiensi Material

Tabel 3.4 Ringkasan Efisiensi Material

Jenis Material	Input (kg)	Masuk Produk (kg)	Sisa Material (kg)	Persentase Sisa	Efisiensi Material
Kayu	6,80	4,70	2,10	30,9%	69,1%
Kaca	10,00	6,50	3,50	35,0%	65,0%
Total	**16,80**	**11,20**	**5,60**	**33,3%**	**66,7%**

Keterangan:

- Masuk Produk (kg) = massa material utama yang benar-benar berkontribusi pada nilai tambah produk akhir (kayu 4,70 kg dalam frame; kaca 6,50 kg sebagai panel).
- Fastener/sealant/gasket tetap ada (0,12 + 0,05 + 0,40 = 0,57 kg) — sudah termasuk dalam berat produk total (11,77 kg) tetapi bukan bagian dari kolom dua material utama.

11. Aliran Energi (*Energy*)

Tabel 3.5 Rekap Konsumsi Listrik Per Proses

Proses	Konsumsi Energi (kJ/d)	Persentase
Proses Kayu	1.500	31,25%
Proses Kaca	2.500	52,08%
Perakitan Frame	500	10,42%
Perakitan Akhir	300	6,25%
Total	4.800 kJ/d	100%

Interpretasi energi: konsumsi terbesar berada pada *Glass processing* (52,08%) dan *Wood processing* (31,25%). Kedua proses inilah kandidat utama untuk perbaikan efisiensi energi (optimasi cutting plan, pemeliharaan mata pisau/cutter, *idle time* mesin, dsb.).

Ringkasan Naratif

Aliran pada Software STAN ini mencakup semua input utama seperti bahan kayu, kaca, serta material pendukung lainnya, yang kemudian diproses melalui beberapa tahapan hingga menjadi produk akhir. Diagram ini juga menunjukkan output yang dihasilkan dari setiap tahapan, baik dalam bentuk produk bernilai tambah maupun sisa material seperti potongan kaca dan kayu yang tidak terpakai. Aliran ini berfungsi untuk memperlihatkan sejauh mana material dimanfaatkan secara efisien serta di mana letak terjadinya pemborosan atau potensi limbah dalam proses produksi.

MFA per hari menunjukkan dari total 16,80 kg material masuk, 11,20 kg (kayu 4,70 + kaca 6,50) benar-benar masuk ke produk, sedangkan 5,60 kg menjadi sisa material (2,10 kg kayu dan 3,50 kg kaca) yang dialirkan ke third-party waste collector. Efisiensi material kumulatif nya adalah 66,7%. Diagram menggambarkan aliran fisik material yang digunakan dalam proses produksi satu unit kusen.

3.8 Studi Kasus MFA di Industri

3.8.1 MFA pada Industri Aluminium di Cina

Salah satu contoh penerapan MFA dalam industri dapat dilihat pada studi mengenai aliran material aluminium di Cina dari Jurnal yang berjudul *"Aluminum material flow analysis for production, consumption, and trade in China from 2008 to 2017"* dengan penulis Li *et al* (2021). MFA digunakan untuk melacak dan menganalisis bagaimana sumber daya aluminium bergerak melalui berbagai tahap siklus hidupnya, mulai dari penambangan, pengolahan, produksi, penggunaan, hingga daur ulang dan pembuangan. Pendekatan ini memberikan gambaran menyeluruh tidak hanya

terhadap aliran material dalam negeri, tetapi juga keterkaitannya dengan perdagangan internasional. Dalam studi ini, digunakan data statistik dari perdagangan aluminium di Cina selama 2008–2017, serta data domestik terkait penambangan bauksit, peleburan alumina, produksi aluminium, dan pemanfaatan kembali sumber daya aluminium sekunder.

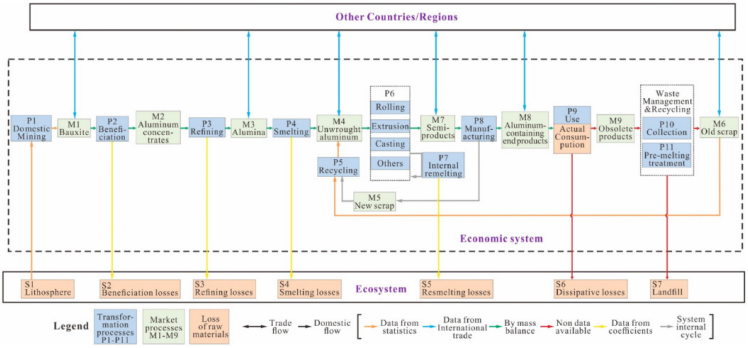
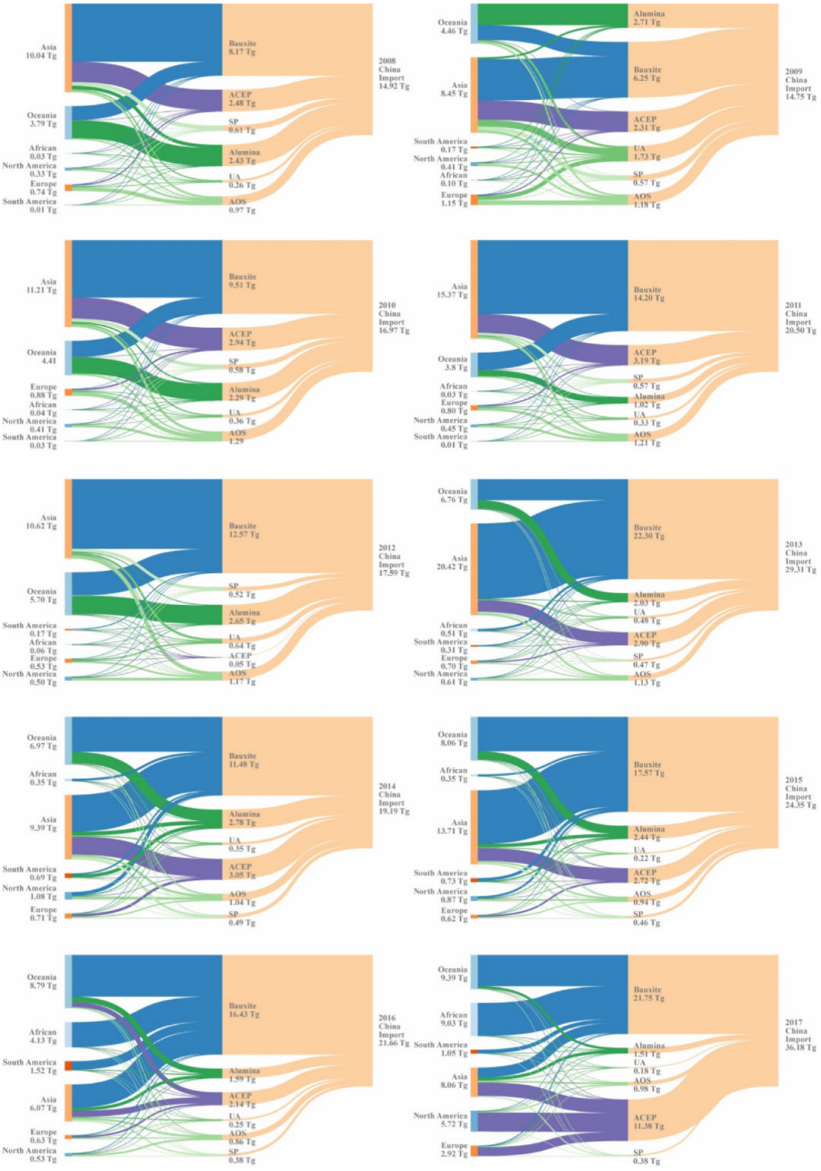


Fig. 1. System definition for aluminum materials flow analysis (MFA) in China; modified from Liu and Müller (2013). Transformation processes, market processes, stocks, and repositories are portrayed as boxes. Domestic and trade flows are portrayed as arrows. Colors of arrows indicate different determination approaches.

Gambar 3.11 Definisi sistem untuk analisis aliran material aluminium (MFA) di Tiongkok (Li et al., 2021).

Gambar tersebut menyajikan alur dari seluruh proses aliran material aluminium di Cina, mulai dari tahap hulu hingga hilir dalam sistem ekonomi dan ekologis. Berdasarkan gambar ini diketahui bahwa produksi aluminium di Cina melibatkan banyak tahapan yang kompleks dan saling terkait, mulai dari penambangan bauksit (P1), proses benefisiasi dan pemurnian (P2–P3), hingga peleburan (P4) dan produksi aluminium primer (M4). Aluminium yang telah diproduksi kemudian masuk ke dalam jalur manufaktur, mulai dari pembentukan produk setengah jadi (P6 dan M7) hingga menjadi produk akhir yang digunakan masyarakat (P8–P9). Setelah digunakan, aluminium mengalami fase akhir berupa pembuangan, pengumpulan limbah, daur ulang, atau hilang sebagai limbah.

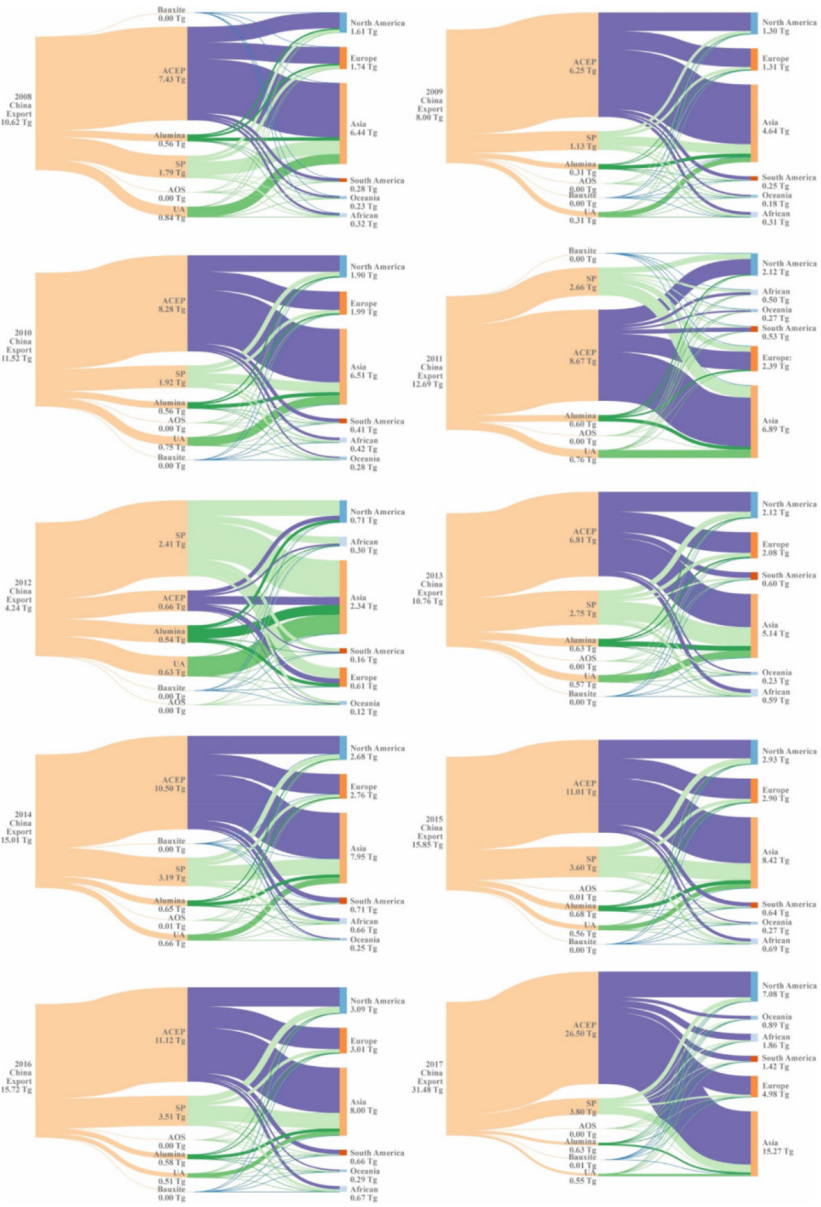


Gambar 3.12 Arus material aluminium dalam perdagangan internasional Tiongkok dari tahun 2008 hingga 2017 (Import) [Li *et al.*, 2021].

Diagram Sankey tersebut, menggambarkan aliran impor bahan aluminium ke Cina dari berbagai kawasan dunia selama tahun 2008 hingga 2017. Secara umum, terlihat bahwa impor bauksit meningkat drastis dalam satu dekade terakhir, terutama dari wilayah Asia dan Oceania. Pada tahun-tahun awal, impor bauksit Cina berkisar 8–10 Tg, namun pada tahun 2017 meningkat tajam hingga mencapai 21.75 Tg.

Dari gambar ini juga dapat dilihat bahwa Alumina dan aluminium olahan lainnya (seperti ACEP, SP, dan AOS) turut diimpor dalam jumlah signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa ketergantungan Cina tidak hanya pada bahan mentah, tetapi juga pada produk antara dan produk sekunder dari luar negeri. Fakta ini memperkuat argumen bahwa sistem produksi aluminium di Cina sangat bergantung pada sumber daya luar negeri, sehingga pemanfaatan limbah dalam negeri seperti AOS dan peningkatan efisiensi proses menjadi semakin penting untuk meningkatkan kemandirian industri dan keberlanjutan sistem produksi.

Sementara itu Sankey diagram pada Gambar 3.13 menunjukkan bahwa ekspor utama Cina didominasi oleh ACEP dan SP, yang menunjukkan bahwa Cina tidak hanya mengekspor bahan mentah, tetapi juga memproduksi dan menjual produk setengah jadi dan jadi bernilai tambah tinggi. Volume ekspor meningkat signifikan selama dekade ini, dari sekitar 10.6 Tg pada tahun 2008 menjadi 31.48 Tg pada tahun 2017. Dilihat dari kawasan tujuan, Asia, Eropa, dan Amerika Utara adalah pasar utama produk aluminium Cina. Asia merupakan tujuan ekspor terbesar secara konsisten, namun volume ke Eropa dan Amerika Utara juga meningkat seiring waktu. Produk akhir (ACEP) menjadi ekspor utama, khususnya sejak tahun 2014, yang mengindikasikan bahwa Cina mengalihkan fokus dari sekadar menjadi eksportir bahan mentah menjadi produsen produk bernilai tambah tinggi.



Gambar 3.13 Aluminum material flows of China's international trade from 2008 to 2017 (exports) [Li *et al.*, 2021].

Hasil studi ini menunjukkan bahwa sekitar 86% konsumsi aluminium nyata di Cina terjadi di dalam negeri, sementara sisanya diekspor. Sekitar 43% produk aluminium diproses untuk pasar dalam negeri dan sisanya untuk pasar luar negeri. Namun, lebih dari separuh kehilangan material terjadi pada tahap pemurnian alumina, yaitu sekitar 51%, yang menjadi titik kritis dalam proses ini. Dengan memahami titik-titik kritis tersebut melalui MFA, industri dapat merancang strategi untuk meningkatkan efisiensi, seperti dengan mengurangi kehilangan selama pemrosesan dan memperkuat sistem daur ulang aluminium dari limbah produk lama (*old scrap*) dan sisa proses produksi (*new scrap*). Upaya ini penting dalam mendukung ekonomi sirkular dan mengurangi tekanan terhadap sumber daya alam primer.

Penugasan dan Studi Kasus

Instruksi Studi Kasus: Analisis Aliran Material Menggunakan Material Flow Analysis (MFA) dengan STAN

1. Pendahuluan

Mahasiswa akan bekerja dalam kelompok untuk melakukan *Material Flow Analysis* (MFA) pada suatu sistem nyata dengan bantuan perangkat lunak STAN (*Substance Flow Analysis*). Setiap kelompok akan memilih kasus berbeda, misalnya aliran material pada UMKM, rumah tangga, industri kecil, atau sistem perkotaan. Tujuannya adalah untuk memahami bagaimana material mengalir dalam sistem, mengidentifikasi inefisiensi, dan memberikan rekomendasi perbaikan menuju sistem yang lebih berkelanjutan.

2. Ketentuan

a. Mahasiswa bekerja dalam kelompok berisi 3 – 4 orang.

b. Setiap kelompok wajib memilih sistem yang berbeda (contoh: aliran plastik pada UMKM makanan, aliran air di usaha *laundry*, aliran energi pada bengkel las, aliran organik pada pasar tradisional, dan sebagainya).

c. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan MFA dengan pemodelan di software STAN.

3. Langkah-langkah Pelaksanaan

a. Pembagian Kelompok dan Pemilihan Sistem

- Bentuk kelompok berisi 3–4 orang.
- Pilih sistem nyata yang akan dianalisis (misalnya: UMKM kuliner, *laundry*, pertanian, rumah tangga, atau industri kecil).

b. Deskripsi Sistem

Jelaskan sistem yang dipilih:

- Latar belakang, tujuan, dan ruang lingkup sistem.
- Identifikasi batas sistem (*system boundary*).
- Definisi proses utama dalam sistem (misalnya: produksi, transportasi, penyimpanan).

c. Identifikasi Material dan *Flow*

- Pilih material atau substansi utama yang relevan dengan sistem (contoh: plastik, air, energi, logam, atau limbah organik).
- Identifikasi aliran material (input, output, emisi, limbah, produk).
- Tentukan data kuantitatif aliran material (misalnya: kg/tahun, ton/bulan, atau satuan lain sesuai skala). Jika data nyata sulit diperoleh, gunakan asumsi yang wajar dengan menyebutkan sumber referensi.

d. Pemodelan di STAN

- Masukkan data aliran material ke dalam software STAN.
- Lakukan perhitungan neraca massa untuk memastikan keseimbangan input–output.

e. Analisis dan Rekomendasi
   - Analisis hasil MFA untuk mengidentifikasi masalah keberlanjutan (misalnya: limbah berlebih, konsumsi energi tinggi, atau material yang tidak dimanfaatkan) dan juga analisis efisiensi material
   - Berikan rekomendasi perbaikan berdasarkan hasil MFA (misalnya: daur ulang, efisiensi energi, penggantian material, sistem pengelolaan limbah).

4. Pelaporan dan Presentasi

a. Laporan Kelompok (maksimal 10 halaman) mencakup:
   - Deskripsi sistem yang dipilih dan batas sistem.
   - Identifikasi material dan aliran utama.
   - Hasil pemodelan MFA menggunakan STAN (grafik/diagram output STAN wajib ditampilkan).
   - Hasil analisis keseimbangan material dari STAN.
   - Rekomendasi perbaikan menuju keberlanjutan.

b. Presentasi Kelas
   - Durasi: maksimal 15 menit per kelompok.
   - Wajib menampilkan output MFA dari STAN dalam *slide*
   - Diskusi dan tanya jawab dilakukan setelah presentasi.

c. Kriteria Penilaian
   - Pemahaman Konsep MFA & STAN (20%)
   - Kualitas Analisis Aliran Material & Neraca Massa (40%)
   - Kreativitas dalam rekomendasi perbaikan sistem (20%)
   - Kualitas laporan & presentasi (20%)

5. Waktu Pelaksanaan

Proyek ini berlangsung selama 3 minggu (minggu ke lima sampai ke tujuh perkuliahan), dengan presentasi pada minggu ke-7 perkuliahan.

Referensi

Amicarelli, V., Rana, R., Lombardi, M., & Bux, C. (2021). Material flow analysis and sustainability of the Italian meat industry. *Journal of Cleaner Production, 299*, 126902.

Ayres, R.U., & Ayres, L.W. (2002). A Handbook of Industrial Ecology. Edward Elgar Publishing, Inc.

Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2004). Practical Handbook of Material Flow Analysis. Boca Raton: CRC Press.

Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2016). Handbook of material flow analysis: For environmental, resource, and waste engineers (2nd ed.). CRC Press, Taylor & Francis Group.

Cencic, O. & Rechberger, H. (2008). *Material flow analysis with Software STAN*. Journal of Environmental Engineering and Management, 18(1), 3-7.

Hu, X., Luo, F., Lin, J., Wang, M., & Li, X. (2022). *Dynamic material flow analysis of titanium sponge in China: 2000–2019*. Journal of Cleaner Production, 371, 133704

Ismail, H., & Hanafiah, M. M. (2021). Evaluation of e-waste management systems in Malaysia using life cycle assessment and material flow analysis. *Journal of Cleaner Production, 308*, 127358.

Li, Q., Dai, T., Gao, T., Zhong, W., Wen, B., Li, T., & Zhou, Y. (2021). Aluminum material flow analysis for production, consumption, and trade in China from 2008 to 2017. *Journal of Cleaner Production, 296*, 126444

Shafique, M., Rafiq, M., Azam, A., & Luo, X. (2022). Material flow analysis for end-of-life lithium-ion batteries from battery electric vehicles in the USA and China. Resources, Conservation & Recycling, 178, 106061.

STAN2. (n.d.). STAN help manual. Retrieved September 26, 2025, from https://www.stan2web.net/NetHelp/default.htm?turl=HTMLDocuments%2FContentManual.htm

TU Wien, Institute for Water Quality and Resource Management. “About STAN” (stan2web.net). TU Wien.

TU Wien, “Downloads – STAN: software for material flow analysis”. TU Wien Resources

BAB 4
ANALISIS DAUR HIDUP (*LIFE CYCLE ASSESSMENT*)

Rencana Pembelajaran

Tujuan	Mahasiswa mampu menguasai prinsip, meneliti dan menyelidiki masalah *life cycle assessment* pada sistem terintegrasi dengan melaksanakan analisis, interpretasi data dan sintesis informasi untuk memberikan solusi serta mengkomunikasikannya secara tulis dan lisan.
Capaian Pembelajaran	CPMK 1 : Mampu menguasai prinsip dan isu terkini dalam ekonomi, sosial, ekologi secara umum. CPMK 2 : Mampu menguasai pengetahuan tentang teknik komunikasi dan perkembangan teknologi terbaru dan terkini dalam bidang ekonomi, sosial, ekologi secara umum. CPMK 3 : Mampu meneliti dan menyelidiki masalah rekayasa kompleks pada sistem terintegrasi dengan melaksanakan analisis, interpretasi data dan sintesis informasi untuk memberikan solusi.
Sub Pembahasan	1. Sejarah Singkat *Life Cycle Assessment* 2. Konsep Dasar *Life Cycle Assessment* 3. Peran LCA di Berbagai Sektor Industri 4. Pedoman Umum Studi *Life Cycle Assessment* menggunakan Software Simapro 5. Membangun Model LCA dengan Simapro: Studi Kasus 6. Contoh Studi LCA di Berbagai Industri

4.1 Sejarah Singkat *Life Cycle Assessment*

Sejak lama, manusia memprioritaskan efisiensi energi dalam teknologi dan layanan yang digunakan. Pertanyaan mendasar muncul dari Hukum Termodinamika: bagaimana energi terdistribusi dalam berbagai proses dan apa dampaknya terhadap perubahan iklim? Perkembangan teknologi energi baru dan terbarukan setelah Perang Dunia II semakin menyoroti pentingnya analisis energi. Awalnya, analisis ini hanya menilai input energi langsung pada proses produksi. Namun, dengan meningkatnya kompleksitas teknologi, cakupannya meluas hingga mencakup siklus lengkap, mulai dari penambangan bahan baku hingga pengelolaan limbah dan dampak transportasi.

Pendekatan ini kemudian dikenal sebagai *Life Cycle Analysis* (LCA). Pada akhir 1960-an, metode ini mulai digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari berbagai produk, seperti kemasan minuman oleh Coca-Cola. Krisis minyak pada 1970-an mempercepat perkembangan analisis energi, yang akhirnya mencakup produk-produk lain seperti kendaraan dan perumahan. Pada tahun 1990, istilah "Life Cycle Assessment" disetujui sebagai kerangka analisis lingkungan yang sistematis. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) memainkan peran penting dalam memformalkan LCA, menghasilkan panduan praktik terbaik dan pendekatan sederhana untuk implementasi. Bersama UNEP, SETAC membentuk Prakarsa Siklus Hidup yang membantu penyebaran LCA ke negara-negara berkembang di Asia, Afrika, dan Amerika Selatan. Globalisasi industri manufaktur modern memperluas penggunaan LCA untuk menghitung dampak lingkungan dari produksi dan konsumsi secara lebih komprehensif (Horne *et al*., 2009).

Life Cycle Assessment (LCA) mulai berkembang pesat di Indonesia seiring dengan meningkatnya kesadaran akan pentingnya pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan. Salah satu penerapan LCA yang signifikan di Indonesia adalah melalui Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup (PROPER), yang dikelola oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK).

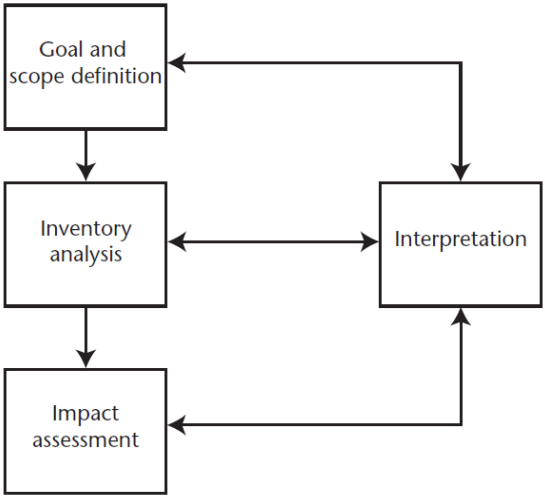
Penerapan LCA dalam PROPER juga didukung oleh Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 3 Tahun 2014 tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup, yang mengatur bahwa perusahaan yang ingin memperoleh peringkat hijau atau emas harus menunjukkan inovasi dalam pengelolaan lingkungan, termasuk melalui penerapan LCA untuk menganalisis dampak siklus hidup produk. PROPER merupakan program nasional yang bertujuan untuk mendorong perusahaan meningkatkan kinerja lingkungan mereka melalui inovasi dan efisiensi dalam aktivitas operasional. Dalam konteks PROPER, penerapan LCA menjadi salah satu alat penting untuk mengidentifikasi dampak lingkungan dari aktivitas perusahaan sepanjang siklus hidup produk, mulai dari bahan baku, proses produksi, hingga pengelolaan limbah. Dengan LCA, perusahaan dapat menilai efisiensi penggunaan sumber daya, energi, dan emisi yang dihasilkan, serta mengembangkan strategi untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan.

Penerapan LCA dalam PROPER juga mencerminkan komitmen Indonesia untuk mendorong implementasi praktik keberlanjutan di sektor industri. PROPER tidak hanya mendorong perusahaan untuk mematuhi aturan lingkungan, tetapi juga memberi penghargaan kepada perusahaan yang aktif melakukan inovasi, termasuk penggunaan LCA. Melalui program ini, Indonesia berhasil mengintegrasikan LCA sebagai bagian dari upaya nasional untuk mencapai pembangunan berkelanjutan.

4.2 Konsep Dasar *Life Cycle Assessment*

Life Cycle Assessment (LCA) atau penilaian siklus hidup adalah alat teoritis yang digunakan untuk mengevaluasi potensi dampak lingkungan. Alat ini menyediakan informasi terkait konsumsi energi, penggunaan sumber daya, dan emisi lingkungan selama seluruh siklus hidup suatu produk (Xiong *et al*., 2020). LCA juga dapat memberikan rekomendasi serta langkah-langkah untuk perbaikan lingkungan, menjadikannya instrumen penting dalam mewujudkan pembangunan berkelanjutan. Menurut ISO 14040 (2006), secara umum LCA terdiri dari empat tahap utama, antara lain:

1. Penetapan tujuan dan ruang lingkup.
2. Analisis inventaris siklus hidup (*life cycle inventory* - LCI).
3. Penilaian dampak siklus hidup (*life cycle impact assessment* - LCIA).
4. Interpretasi.



Gambar 4.1 Tahapan *Life Cycle Assessment*

4.2.1 Penetapan Tujuan dan Ruang Lingkup

Tujuan dan ruang lingkup LCA perlu dirumuskan secara jelas dan selaras dengan tujuan penggunaannya. Mengingat sifat LCA yang bersifat berulang, ruang lingkupnya perlu disesuaikan selama proses studi berlangsung. Dalam menetapkan tujuan LCA, hal-hal berikut harus dinyatakan dengan jelas:

a. tujuan penggunaan yang dimaksud;
b. alasan utama pelaksanaan studi;
c. audiens sasaran, yaitu pihak yang akan menerima hasil studi; dan
d. apakah hasil studi akan dipublikasikan atau tidak.

Dalam menetapkan ruang lingkup LCA, hal-hal berikut harus dipertimbangkan dan dijelaskan dengan rinci:

a. sistem produk yang akan dipelajari;
b. fungsi sistem produk;
c. unit fungsional;
d. batas sistem;
e. prosedur alokasi;
f. metodologi LCIA dan jenis dampak;
g. interpretasi yang akan digunakan;
h. persyaratan data;
i. asumsi;
j. pilihan nilai dan elemen opsional;
k. batasan;
l. persyaratan kualitas data;
m. jenis tinjauan kritis, jika ada; serta
n. jenis dan format laporan yang diperlukan untuk studi (untuk membuat laporan LCA). (sumber: BSI Standards Publication, 2018)

4.2.1.1 Fungsi dan Unit Fungsional

Ruang lingkup LCA harus secara jelas menetapkan fungsi sistem yang sedang dipelajari. Unit fungsional harus konsisten dengan tujuan dan ruang lingkup studi. Unit fungsional adalah deskripsi kuantitatif fungsi suatu produk yang berfungsi sebagai dasar acuan untuk semua perhitungan terkait penilaian dampak (Arzoumanidis *et al*., 2020). Salah satu tujuan utama unit fungsional adalah untuk menyediakan referensi yang menjadi dasar normalisasi data masukan dan keluaran. Oleh karena itu, unit fungsional harus didefinisikan dengan jelas dan terukur. Sebagai contoh, jika kita melakukan studi LCA terhadap produk baja untuk konstruksi bangunan, maka unit fungsionalnya adalah 1 ton baja yang digunakan dalam struktur bangunan dengan masa pakai 50 tahun.

4.2.1.2 Batasan Sistem

Batasan sistem menentukan proses unit mana yang akan dimasukkan dalam LCA. Pemilihan batas sistem harus konsisten dengan tujuan studi. Sebagai contoh, jika sebuah studi difokuskan pada dampak lingkungan dari pembuatan plastik, batasan sistem harus mencakup proses ekstraksi bahan baku, produksi, dan distribusi. Namun, tahapan tertentu dapat dikecualikan jika tidak memengaruhi kesimpulan studi secara signifikan. Untuk mempermudah pemahaman, sistem sering dijelaskan menggunakan diagram alir proses yang mencakup semua unit proses dan hubungan antarproses tersebut. Dalam mendefinisikan batasan sistem, dapat digunakan beberapa pendekatan, di antaranya:

a. *Cradle-to-Grave*

   Pendekatan *cradle-to-grave* menganalisis seluruh siklus hidup produk, dimulai dari ekstraksi bahan baku alam, proses produksi, distribusi, penggunaan oleh konsumen, hingga pembuangan akhir atau daur ulang. Tujuan utamanya adalah untuk memahami dampak lingkungan total dari suatu produk

sepanjang masa hidupnya. Pendekatan ini memberikan gambaran menyeluruh tentang potensi dampak terhadap lingkungan seperti emisi gas rumah kaca, penggunaan energi, air, dan sumber daya alam pada setiap tahap.

Sebagai contoh, dalam studi LCA botol plastik PET, analisis cradle-to-grave mencakup:

- Ekstraksi minyak bumi sebagai bahan baku plastik,
- Proses polimerisasi menjadi resin PET,
- Pencetakan botol di pabrik,
- Distribusi ke pasar,
- Penggunaan oleh konsumen,
- Hingga tahap akhir: pembuangan di TPA atau daur ulang.

Dari hasil analisis, dapat diketahui bahwa tahap produksi resin dan pembuangan akhir menyumbang dampak terbesar terhadap emisi karbon.

b. *Cradle-to-Gate*

Pendekatan *cradle-to-gate* membatasi analisis hanya sampai tahap produk keluar dari pabrik (*gate*). Artinya, tahapan penggunaan, distribusi, dan pembuangan akhir tidak termasuk dalam analisis. Pendekatan ini banyak digunakan dalam studi bahan baku, proses industri, atau perbandingan material, karena fokusnya pada efisiensi proses produksi dan optimasi sumber daya di hulu.

Sebagai contoh, dalam industri semen, analisis cradle-to-gate mencakup:

- Penambangan batu kapur dan tanah liat,
- Penggilingan bahan mentah,
- Pembakaran di kiln,
- Hingga keluarnya semen dari pabrik.

Analisis ini membantu industri memahami seberapa besar energi dan emisi CO_2 yang dihasilkan dari proses manufaktur,

tanpa mempertimbangkan tahap penggunaan semen di lapangan.

c. *Gate-to-Gate*

Pendekatan *gate-to-gate* memfokuskan analisis pada satu proses atau tahapan tertentu dalam rantai produksi. Pendekatan ini digunakan untuk mengevaluasi efisiensi energi, konsumsi air, dan emisi pada satu unit operasi spesifik, serta dapat menjadi bagian dari analisis *cradle-to-gate* atau *cradle-to-grave* yang lebih luas.

Contohnya, pada pabrik baja, analisis gate-to-gate bisa difokuskan pada tahap penggilingan panas (*hot rolling*) untuk mengubah slab baja menjadi pelat baja. Analisis ini menilai dampak dari konsumsi energi pada tungku pemanas, emisi CO_2 dari pembakaran gas alam, serta limbah padat berupa kerak oksida (*mill scale*) yang dihasilkan dari proses tersebut. Hasilnya dapat digunakan untuk perbaikan efisiensi energi, penerapan sistem pemulihan panas buang, atau pengelolaan limbah internal di pabrik baja.

4.2.2 Analisis Inventaris Siklus Hidup (*Life Cycle Inventory* - LCI)

Pada fase *Life Cycle Inventory* (LCI) dalam analisis LCA, dilakukan pengumpulan data dan pemodelan aliran input dan output dalam sistem produk. Proses ini harus sesuai dengan tujuan dan ruang lingkup yang telah ditetapkan. Hasil dari analisis inventori ini adalah daftar aliran dasar yang terkuantifikasi dan melintasi batas sistem dari siklus hidup yang dipelajari. Data ini akan digunakan sebagai input untuk fase berikutnya, yaitu *life cycle impact assessment* (Bjørn *et al*., 2017). Sebagai contoh, dalam studi LCA produk baja, data yang perlu dikumpulkan adalah semua input yang diperlukan untuk membuat produk baja dengan unit fungsional yang telah ditentukan. Tabel berikut merupakan contoh inventori untuk LCA produk baja.

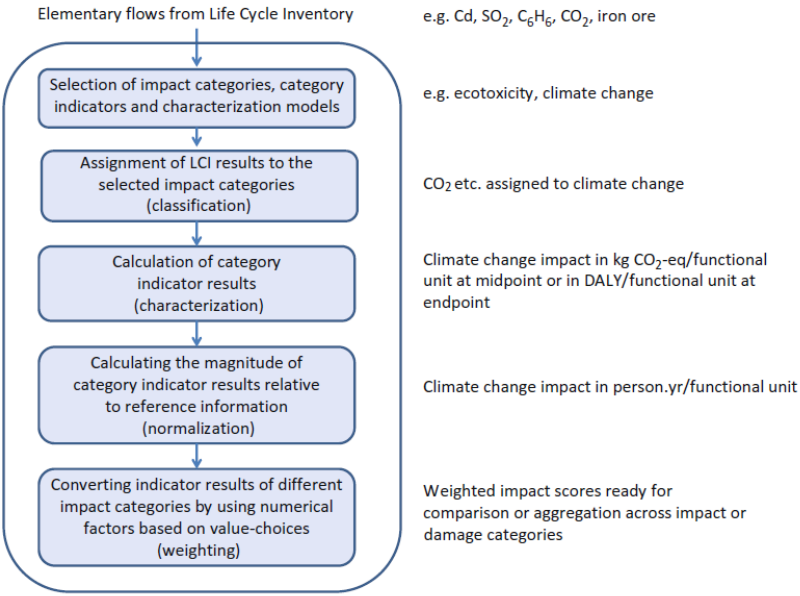
Tabel 4.1 Data Inventori Produksi Baja

Input			Output		
Material	Amount	Unit	Material	Amount	Unit
Electric Arc Furnace					
Scrap	1,101	tons	Liquid steel	1,011	tons
Electricity	390.82	KwH	Slag	0.064	tons
CaO	0.036	tons	Dust	0.064	tons
Carbonizer	0.002	tons			
LNG	101.8	MJ			
Oxygen	8.07	Nm^3			
Electric Dust Collector	24.68	KwH			
Ladle Furnace					
Liquid steel	1,011	tons	Liquid Steel	1.03	tons
Carbonizer	0.003	tons			
FeSi	0.001	ton			
SiMn	0.011	ton			
FeCrom	0.002	ton			
CaO	0.007	ton			
Argon	34,784	kg			
Nitrogen	1,491	ppm			
Electricity	47.86	KwH			
Continuous Casting Machine					
Liquid steel	1.03	ton	Billets	1.03	ton
Electricity	13.06	KwH			
Water	0.879	m^3			
Oxygen	0.183	m^3			
LPG	0.382	kg			
Reheating Furnace					
Billets	1.03	tons	Heated billets	1.03	tons
LPG	47,127	m^3			
Rolling Mills					
Heated billets	1.03	ton	Deformed Steel	1	ton
Electricity	363.57	KwH	Mill scale	0.03	ton
Water	0.310	m^3	Water	0.310452864	m^3
Finishing Line					
Deformed Steel	1	ton	Deformed Steel	1	ton
Electricity	18.49	KwH			

4.2.3 Penilaian Dampak Siklus Hidup (*Life Cycle Impact Assessment* - LCIA)

Penilaian dampak siklus hidup merupakan fase ketiga dari LCA menurut standar ISO 14040. Tujuannya adalah untuk menerjemahkan aliran dasar dari inventaris siklus hidup menjadi kontribusi potensial terhadap dampak lingkungan yang dipertimbangkan dalam LCA dan dengan demikian mendukung

fase interpretasi, yang menjawab pertanyaan yang diajukan dalam definisi tujuan. Menurut standar ISO 14040, LCIA terdiri dari lima langkah seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Tahapan Life Cycle Impact Assessment
(Sumber : Klöpffer *et al.*, 2015)

4.3.2.1 Pemilihan Kategori Dampak, Indikator Kategori, dan Model Karakterisasi (Seleksi)

Pada tahap ini langkah pertama adalah menentukan kategori dampak yang akan dianalisis. Pemilihan ini harus disesuaikan dengan tujuan studi, konteks geografis, dan kebutuhan spesifik sistem yang dinilai. Misalnya, jika fokusnya adalah pengurangan emisi karbon, kategori dampak seperti pemanasan global menjadi prioritas. Beberapa kategori dampak yang umum digunakan, antara lain:

- Pemanasan Global (*Global Warming Potential*, GWP): Mengukur emisi gas rumah kaca dalam ekivalen CO_2.
- Keasaman (*Acidification*): Mengukur dampak emisi sulfur dan nitrogen pada pH tanah dan air, dalam ekivalen SO_2
- Eutrofikasi: Menganalisis dampak nutrien seperti nitrogen dan fosfor yang menyebabkan alga berlebih (dalam ekivalen fosfat (PO_4^{3-}))
- Toksisitas: Memahami dampak bahan kimia beracun pada kesehatan manusia dan ekosistem.

Setelah kategori dampak dipilih, tahap berikutnya adalah menentukan indikator kategori, yang merupakan parameter kuantitatif untuk mengukur dampak lingkungan. Indikator ini dirancang untuk mencerminkan dampak tertentu, seperti konsentrasi CO_2-ekivalen untuk pemanasan global atau ekivalen fosfat untuk eutrofikasi.

Langkah terakhir adalah pemilihan model karakterisasi, yang menghubungkan aliran material atau energi dari data inventaris (LCI) dengan kategori dampak tertentu. Model karakterisasi ini menggunakan faktor karakterisasi, seperti yang disediakan oleh metode IPCC untuk pemanasan global, yang menghitung dampak gas rumah kaca berdasarkan potensi pemanasan global selama periode tertentu (20, 50, atau 100 tahun). Metode seperti ReCiPe dan TRACI banyak digunakan untuk keperluan ini, dengan ReCiPe sering digunakan untuk analisis global, sedangkan TRACI lebih cocok untuk studi berbasis Amerika Serikat. Sebagai contoh, dalam studi LCA untuk energi terbarukan, kategori dampak seperti pemanasan global, keasaman, dan eutrofikasi dipilih. Metode ReCiPe digunakan untuk memodelkan kategori ini dengan indikator CO_2-ekivalen, SO_2-ekivalen, dan PO_4^{3-}-ekivalen.

4.2.3.2 Penugasan Hasil LCI ke Kategori Dampak yang Dipilih (Klasifikasi)

Di sini, aliran dasar inventaris seperti konsumsi sumber daya dan emisi ke udara atau air, ditetapkan ke kategori dampak yang relevan di antara yang dipilih pada langkah 1, menurut kemampuannya untuk berkontribusi pada berbagai masalah lingkungan. Misalnya, emisi gas rumah kaca seperti CO_2 dan CH_4 akan dialokasikan ke kategori dampak pemanasan global, sementara emisi sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NO_x) dialokasikan ke kategori keasaman. Proses ini sering menggunakan *database* standar seperti Ecoinvent untuk mempermudah klasifikasi dan memastikan konsistensi dengan metode karakterisasi yang digunakan, seperti ReCiPe atau TRACI. Aliran yang diklasifikasikan juga sering kali berkontribusi pada lebih dari satu kategori dampak. Sebagai contoh, emisi NO_x dapat memengaruhi kategori keasaman sekaligus eutrofikasi.

4.2.3.3 Perhitungan Hasil Indikator Kategori (Karakterisasi)

Tahap ini bertujuan untuk menghitung kontribusi data inventaris siklus hidup (LCI) terhadap setiap kategori dampak yang telah ditentukan. Pada tahap ini, aliran material, energi, dan emisi yang telah diklasifikasikan dikalikan dengan faktor karakterisasi untuk menentukan potensi dampak lingkungan. Faktor karakterisasi adalah parameter yang mengukur sejauh mana setiap aliran memengaruhi kategori dampak tertentu. Sebagai contoh, emisi gas rumah kaca seperti CO_2, CH_4, dan N_2O dikonversi ke dalam ekivalen CO_2 menggunakan *Global Warming Potential* (GWP). Jika 1 kg CH_4 memiliki GWP sebesar 25, maka dampaknya setara dengan 25 kg CO_2-ekivalen. Setelah kontribusi individu dihitung, total dampak untuk setiap kategori, seperti pemanasan global, keasaman, atau eutrofikasi, dijumlahkan. Proses ini memastikan bahwa data inventaris diterjemahkan menjadi hasil kuantitatif yang relevan untuk kategori dampak tertentu, memungkinkan analisis yang akurat dan pengambilan keputusan berbasis data.

4.2.3.4 Menghitung Besarnya Hasil Indikator Kategori Relatif terhadap Informasi Referensi (Normalisasi)

Tahap normalisasi bertujuan untuk menempatkan hasil indikator kategori dalam konteks yang lebih luas dengan membandingkannya terhadap data referensi. Proses ini membantu memahami seberapa besar kontribusi suatu sistem terhadap dampak lingkungan global, regional, atau lokal. Normalisasi dilakukan dengan membagi hasil indikator kategori dengan nilai referensi, yang biasanya berupa total dampak lingkungan dari populasi, wilayah geografis, atau sektor tertentu dalam jangka waktu tertentu. Misalnya, jika total emisi CO_2-ekivalen dari suatu sistem adalah 1.000 kg dan nilai referensi untuk total emisi CO_2-ekivalen per kapita di wilayah tersebut adalah 10.000 kg per tahun, maka hasil normalisasi adalah 0,1. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem tersebut menyumbang 10% dari total dampak lingkungan rata-rata per kapita.

Proses ini tidak hanya membantu mengidentifikasi kategori dampak yang dominan tetapi juga memfasilitasi komunikasi hasil kepada pemangku kepentingan non-teknis. Namun, normalisasi tidak memengaruhi nilai absolut dari dampak, melainkan memberikan konteks untuk interpretasi yang lebih bermakna.

4.2.3.5 Mengonversi Hasil Indikator dari Berbagai Kategori Dampak dengan Menggunakan Faktor Numerik berdasarkan Pilihan Nilai (Pembobotan)

Tahap pembobotan adalah proses mengonversi hasil indikator dari berbagai kategori dampak ke dalam satuan yang dapat dibandingkan secara langsung menggunakan faktor numerik. Faktor pembobotan ini ditentukan berdasarkan nilai atau prioritas yang diberikan terhadap setiap kategori dampak, yang dapat mencerminkan pentingnya dampak tersebut terhadap tujuan studi atau konteks sosial, ekonomi, dan lingkungan tertentu. Misalnya, dalam studi yang berfokus pada pengurangan emisi gas rumah kaca, kategori pemanasan global dapat diberikan bobot

yang lebih tinggi dibandingkan kategori dampak lainnya seperti keasaman atau eutrofikasi.

Proses pembobotan biasanya melibatkan dua langkah utama. Pertama, hasil indikator kategori, seperti CO_2-ekivalen untuk pemanasan global atau SO_2-ekivalen untuk keasaman, dikalikan dengan faktor pembobotan yang ditentukan. Kedua, hasil yang telah dibobotkan untuk semua kategori dampak dijumlahkan untuk menghasilkan skor agregat tunggal. Skor ini memberikan pandangan keseluruhan tentang dampak lingkungan sistem yang dianalisis, yang memudahkan perbandingan dengan alternatif lain.

Sebagai contoh, dalam analisis LCA kendaraan, emisi CO_2 sebesar 1.000 kg dapat diberikan bobot 0,6, sedangkan emisi SO_2 sebesar 50 kg diberikan bobot 0,4. Setelah pembobotan, total skor dampak lingkungan dapat dihitung, yang memungkinkan evaluasi kuantitatif dari pilihan desain atau kebijakan. Metode pembobotan seperti yang digunakan dalam ReCiPe atau Eco-indicator 99 sering kali menggabungkan pertimbangan ilmiah dan nilai sosial untuk menentukan faktor pembobotan.

4.2.4 Interpretasi

Tahap interpretasi adalah langkah akhir yang bertujuan untuk menganalisis, mengevaluasi, dan menarik kesimpulan dari hasil yang diperoleh di tahap sebelumnya. Interpretasi berfungsi untuk memastikan bahwa hasil LCA memenuhi tujuan studi, menjawab pertanyaan penelitian, dan memberikan dasar yang kuat untuk pengambilan keputusan. Tahap ini mencakup tiga elemen utama: identifikasi masalah signifikan, evaluasi, dan kesimpulan serta rekomendasi.

4.2.4.1 Identifikasi Masalah Signifikan

Pada tahap ini, masalah atau temuan yang paling signifikan dalam hasil inventaris siklus hidup (LCI) dan penilaian dampak siklus hidup (LCIA) diidentifikasi. Masalah ini dapat berupa:

a. Kategori dampak yang paling dominan, misalnya pemanasan global memiliki kontribusi tertinggi dibandingkan kategori lain seperti keasaman atau toksisitas.
b. Proses yang paling berkontribusi terhadap dampak lingkungan, seperti produksi bahan baku yang menyumbang emisi karbon tertinggi.
c. Aliran material atau energi tertentu yang memiliki dampak signifikan terhadap lingkungan, misalnya konsumsi energi listrik atau emisi gas rumah kaca dari satu tahap siklus hidup.

4.2.4.2 Evaluasi

Evaluasi hasil dilakukan untuk menilai kualitas dan keandalan studi LCA. Proses ini melibatkan beberapa langkah penting, di antaranya:

a. Konsistensi: Memastikan bahwa metode yang digunakan konsisten di seluruh tahap LCA, termasuk pemilihan kategori dampak, batasan sistem, dan unit fungsional.
b. Sensitivitas: Melakukan analisis sensitivitas untuk mengevaluasi sejauh mana perubahan asumsi atau data memengaruhi hasil. Sebagai contoh, perubahan nilai efisiensi energi pada tahap produksi dapat berdampak besar pada hasil kategori pemanasan global.
c. Ketidakpastian: Mengevaluasi ketidakpastian yang muncul dari data atau model yang digunakan. Misalnya, perbedaan data emisi dari berbagai sumber dapat memengaruhi akurasi hasil.

4.2.4.3 Kesimpulan dan Rekomendasi

Berdasarkan analisis hasil dan evaluasi, kesimpulan dibuat untuk menjawab tujuan studi LCA. Rekomendasi diberikan untuk membantu pengambil keputusan dalam mengurangi dampak lingkungan atau meningkatkan keberlanjutan produk atau proses. Contohnya:

a. Jika produksi bahan baku terbukti menjadi penyumbang terbesar dampak lingkungan, rekomendasi dapat berupa substitusi bahan yang lebih ramah lingkungan atau pengurangan limbah produksi.
b. Jika konsumsi energi tinggi selama tahap penggunaan, efisiensi energi dapat menjadi fokus perbaikan.

Dalam studi perbandingan, hasil interpretasi juga digunakan untuk menentukan pilihan yang lebih baik dari segi lingkungan, seperti memilih antara kendaraan listrik dan berbahan bakar fosil berdasarkan hasil LCA.

4.3 Peran LCA di Berbagai Sektor Industri

Life Cycle Assessment (LCA) memainkan peran penting dalam industri manufaktur untuk mengurangi dampak lingkungan dari produksi, bahan baku, hingga pengelolaan limbah. Dalam produksi kendaraan misalnya, LCA digunakan untuk mengevaluasi emisi gas rumah kaca (GHG) dari bahan bakar dan material produksi kendaraan listrik, yang memberikan panduan bagi kebijakan dan desain yang lebih berkelanjutan (Andersson & Börjesson, 2021). Penelitian tentang penggunaan teknologi manufaktur aditif seperti Powder Bed Fusion (PBF) untuk suku cadang logam menunjukkan bahwa proses ini memiliki dampak lingkungan lebih rendah dibandingkan metode konvensional karena efisiensi material yang lebih tinggi (Böckin & Tillman, 2019).

LCA memainkan peranan penting dalam proses desain produk. Memasukkan konsep keberlanjutan sejak awal dalam desain produk sangat penting agar produk dan prosesnya dapat dibuat, digunakan, dan dibuang dengan cara yang ramah lingkungan. LCA adalah metode utama yang digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan, baik dalam penelitian maupun industri, dan didukung oleh standar ISO 14040 dan 14044. LCA

membantu dalam desain produk dengan memberikan pandangan menyeluruh mengenai dampak lingkungan dari setiap tahap siklus hidup produk, mulai dari pemilihan bahan hingga pembuangan akhir, sehingga memungkinkan para desainer untuk membuat keputusan yang lebih baik untuk mengurangi dampak ekologis (Horsthuis & Lutters, 2024).

Studi kasus menunjukkan bahwa mengintegrasikan LCA ke dalam desain produk memungkinkan penilaian dampak lingkungan sejak awal dalam desain. Hal ini membantu teknisi untuk mengidentifikasi komponen berbahaya lebih awal dan menyesuaikan siklus hidup produk, serta melakukan analisis tingkat lanjut dengan efektif. Selain itu pendekatan ini juga membantu teknisi untuk menyampaikan informasi yang akurat kepada pembuat keputusan, sehingga memungkinkan mereka untuk membuat pilihan yang tepat dalam upaya mencapai tujuan keberlanjutan (Bassam *et al*., 2024).

Dalam industri makanan, LCA berperan penting dalam pemberian label ekologi (*ecolabel*). Sebagian besar konsumen mulai menyadari pentingnya label keberlanjutan, dan cenderung memilih produk yang ramah lingkungan dalam membeli produk makanan (Hélias *et al*., 2022). Sehingga, penggunaan ekolabel penting karena membantu konsumen memilih produk ramah lingkungan, sesuai dengan kebutuhan mereka untuk membedakan dampak lingkungan dari produk makanan. Bagi perusahaan, ekolabel dapat menjadi strategi untuk sinyal keberlanjutan dan keunggulan kompetitif. Selain keuntungan finansial, motivasi nonfinansial, seperti meningkatkan keberlanjutan produksi dan membangun citra positif merupakan alasan yang mendasari penggunaan ecolabel (Roesch *et al*., 2025).

Selain dalam industri manufaktur, LCA juga berperan penting dalam mengidentifikasi dan mengurangi dampak lingkungan di sektor jasa, khususnya pariwisata, transportasi, dan akomodasi. Dalam pariwisata, LCA digunakan untuk menganalisis

emisi gas rumah kaca (GHG) yang berasal dari transportasi wisatawan dan operasional hotel, yang dapat mencapai 11% dari total emisi nasional di beberapa negara (Casals Miralles *et al*., 2023). Dengan menerapkan LCA, energi terbarukan dan teknologi hemat energi dapat diadopsi untuk mengurangi emisi secara signifikan (Herrero *et al*., 2022). Pada layanan hotel, LCA membantu mengoptimalkan konsumsi energi, mengurangi limbah, dan mendorong penggunaan teknologi ramah lingkungan seperti pemanas surya (Campos *et a*l., 2022).

Dalam transportasi udara, LCA memungkinkan evaluasi siklus hidup bahan bakar dan operasional maskapai, menciptakan peluang untuk mengadopsi bahan bakar ramah lingkungan serta efisiensi energi pada pesawat (Leal Filho *et al*., 2023). Selain itu, LCA berkontribusi dalam pariwisata berbasis anggur (*wine tourism*) dengan mengurangi emisi dari perjalanan internasional dan konsumsi energi melalui optimalisasi transportasi dan pemilihan bahan bangunan ramah lingkungan untuk akomodasi (Sun & Drakeman, 2020). Dengan pendekatan ini, LCA menjadi panduan strategis dalam membangun kebijakan dan praktik berkelanjutan di sektor jasa, mengurangi dampak lingkungan secara keseluruhan.

4.3.1 Pedoman Umum Studi *Life Cycle Assessment* Menggunakan Software Simapro

Tahapan dalam LCA melibatkan proses sistematis untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mengevaluasi dampak lingkungan dari suatu produk atau proses. Untuk mempermudah analisis ini, berbagai perangkat lunak telah dikembangkan, memungkinkan pengguna mengelola data yang kompleks dan menghasilkan hasil yang lebih akurat. Beberapa perangkat lunak populer yang digunakan dalam LCA antara lain OpenLCA, GaBi, dan SimaPro. Masing-masing perangkat lunak ini memiliki keunggulan tersendiri, seperti kemudahan akses, kompatibilitas dengan berbagai database, dan fitur analisis yang spesifik.

Namun, dalam buku ini, fokus utama akan diberikan pada Simapro, salah satu perangkat lunak terkemuka dalam analisis LCA. Simapro dirancang untuk memberikan kemudahan dalam mengelola data inventaris siklus hidup, mengevaluasi dampak lingkungan, serta membuat visualisasi hasil yang jelas dan terstruktur. Dengan dukungan *database* yang luas dan metode penilaian dampak yang beragam, Simapro menjadi pilihan utama bagi banyak praktisi dan peneliti di bidang ini.

Pembahasan dalam sub bab ini akan dimulai dengan penjelasan langkah-langkah utama dalam proses LCA menggunakan Simapro. Setiap tahapan, mulai dari definisi tujuan dan ruang lingkup, analisis inventaris, penilaian dampak, hingga interpretasi hasil, akan dijelaskan secara detail. Tutorial praktis juga disertakan untuk memandu proses input data, pemilihan metode analisis, hingga interpretasi keluaran yang dihasilkan oleh perangkat lunak. Dengan demikian, pembaca akan mendapatkan panduan yang komprehensif untuk memanfaatkan Simapro secara efektif dalam melakukan analisis LCA. Diharapkan, sub bab ini tidak hanya membantu memahami cara kerja Simapro tetapi juga memberikan keterampilan praktis yang dapat diterapkan langsung dalam berbagai proyek yang membutuhkan analisis siklus hidup. Adanya contoh dan panduan langkah demi langkah akan mempermudah proses belajar, sehingga penggunaan perangkat lunak ini dapat dioptimalkan untuk menghasilkan analisis yang lebih mendalam dan bermakna.

Panduan tahapan penggunaan SimaPro yang disajikan dalam buku ini merupakan hasil terjemahan dan penyesuaian dari tutorial resmi SimaPro yang diperoleh dari *website* resmi PRé Sustainability (PRé Sustainability, 2023). Dengan mengacu pada tutorial asli, panduan ini telah disusun secara sistematis dan disesuaikan dengan kebutuhan pembaca, sehingga mampu menjadi referensi praktis dan relevan.

4.3.2 Tujuan dan Ruang Lingkup

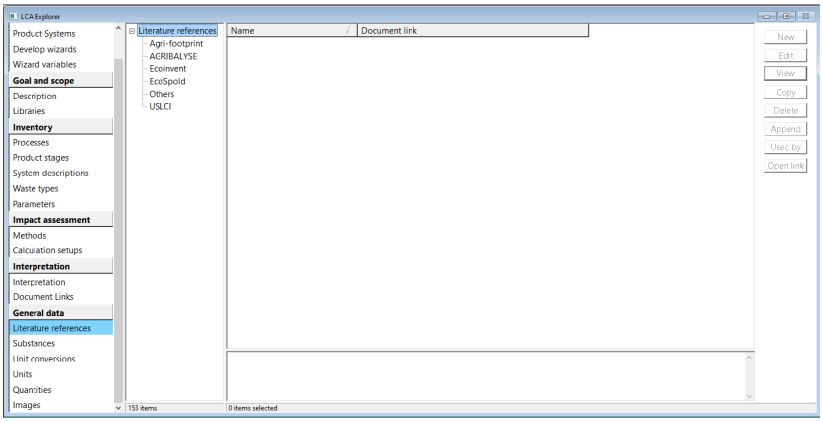
1. Komponen SimaPro

SimaPro terdiri dari tiga komponen utama: Data Umum, Proyek dan Pustaka:

a. **Data Umum**: berisi informasi pendukung untuk semua pustaka dan proyek, seperti referensi literatur, zat, satuan, dan kuantitas. Ketika Anda membuka SimaPro, kolom Data Umum muncul di sebelah kiri (lihat Gambar 3). Berikut adalah kategorinya:

Berikut adalah kategorinya:

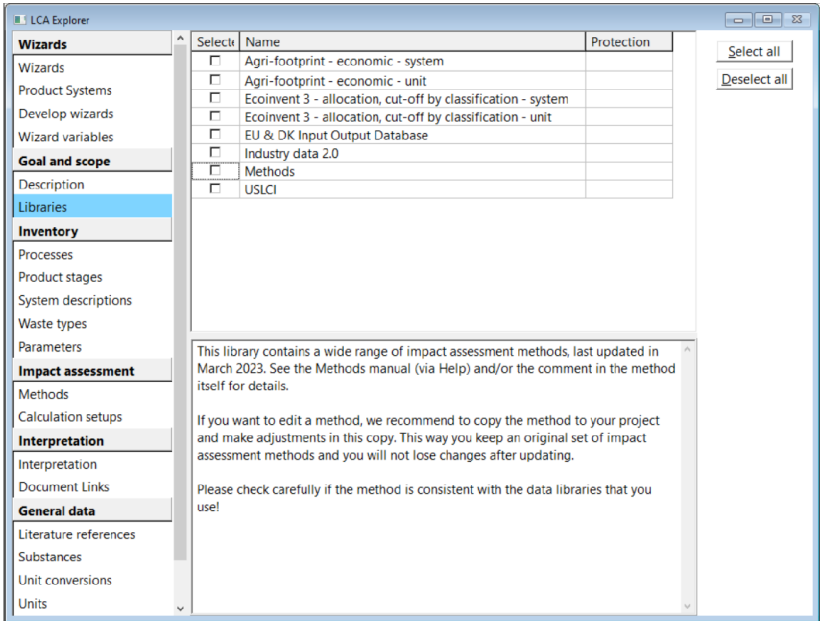
- Referensi Literatur: Tautan dan dokumen pendukung dari pustaka LCI atau proyek.
- Zat: Daftar semua zat yang digunakan dalam bahan dan proses di basis data.
- Satuan: Berisi faktor konversi dan satuan untuk berbagai besaran.
- Kuantitas: Mengorganisasi berbagai kuantitas seperti massa, volume, energi, dan sebagainya.



Gambar 4.3 LCA Explorer: Data Umum

b. **Proyek**: menyimpan semua model yang dibuat. Anda dapat memasukkan data input dengan membuat proses sendiri atau menautkan proses dari pustaka LCI.

c. **Pustaka**: merupakan basis data Inventaris Siklus Hidup (LCI) seperti ecoinvent dan Agri-footprint. Berisi data masukan, keluaran, dan emisi dari berbagai proses industri dan pertanian yang digunakan sebagai data latar belakang untuk model LCA. Setelah membuka atau membuat proyek, Anda akan menemukan Pustaka di kolom kiri bawah "Goal and Scope" (lihat Gambar 4.4).



Gambar 4.4 LCA Explorer: Pustaka/Library

Berdasarkan Gambar 4.4 terlihat dua jenis Pustaka yang umum digunakan dalam SimaPro. Berikut adalah penjelasan singkat untuk kedua jenis Pustaka tersebut:

a. *Agri-footprint:*
   - Fokus pada data LCA pertanian, *bio-based production*, dan kompatibel dengan standar ISO.
   - Berisi ribuan dataset seperti tanaman, pakan, pupuk, dan transportasi.

b. *Ecoinvent:*
   - Basis data LCI paling lengkap mencakup energi, pertanian, transportasi, logam, bahan kimia, dan lain-lain.
   - Tersedia dalam beberapa model sistem, seperti APOS, *cut-off by classification*, dan lainnya.

Pada masing-masing *library*, Anda dapat menggunakan model unit ataupun proses, berikut adalah perbedaannya:

a. Unit Process:
   - Berisi data untuk satu langkah proses, termasuk emisi dan input bahan mentah.
   - Terdapat referensi ke proses *upstream* lainnya.
   - Contoh: Proses pembuatan baja:
     — Hanya mencakup data transportasi logam, bahan input, dan proses baja itu sendiri.
     — Beban lingkungan dari proses *upstream* (misalnya pembuatan besi) dirujuk melalui proses unit sebelumnya.
   - Keunggulan:
     — Memberikan transparansi terhadap input dan output dari setiap langkah *supply chain.*
     — Semua proses *upstream* otomatis dimasukkan saat dipilih.

b. System Process:

- Merupakan hasil agregasi dari seluruh inventaris LCA untuk satu proses.
- Tidak ada referensi ke proses lain, semua emisi dari hulu ke hilir sudah dihitung.
- Contoh: pembuatan baja dalam *system process*:
  - Mencakup semua tahap dari penambangan hingga pembuatan baja dalam satu catatan proses.
  - Tidak memberikan detail input-output setiap proses individu.
- Keunggulan:
  - Mudah digunakan
  - Memberikan hasil inventaris keseluruhan yang identik dengan unit *process* (termasuk proses infrastruktur).

TIPS

Kapan sebaiknya Anda menggunakan *Processes* dan *Product Stages*?

Gunakan *Unit Process* Jika:

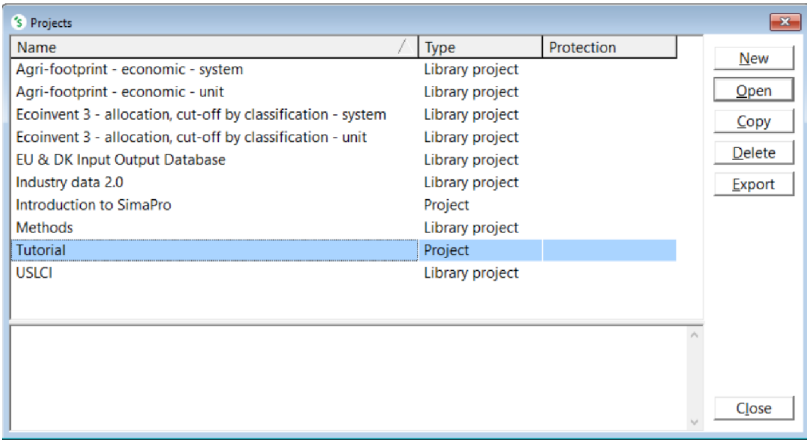
- ◯ Anda ingin transparansi dan detail dari setiap langkah proses.
- ◯ Membutuhkan fleksibilitas untuk melihat data upstream dan downstream.

Gunakan *System Process* Jika:

- ◯ Anda membutuhkan hasil cepat tanpa memerlukan detail.
- ◯ Fokus pada hasil akhir keseluruhan daripada setiap proses individu.

2. Memulai Proyek di SimaPro

Saat Anda membuka SimaPro dan mengklik tombol "Open Projects", maka akan tampil jendela seperti Gambar 4.5. Jendela ini akan menampilkan daftar semua proyek Anda. Semua pekerjaan Anda dalam SimaPro akan ditampung dalam proyek.

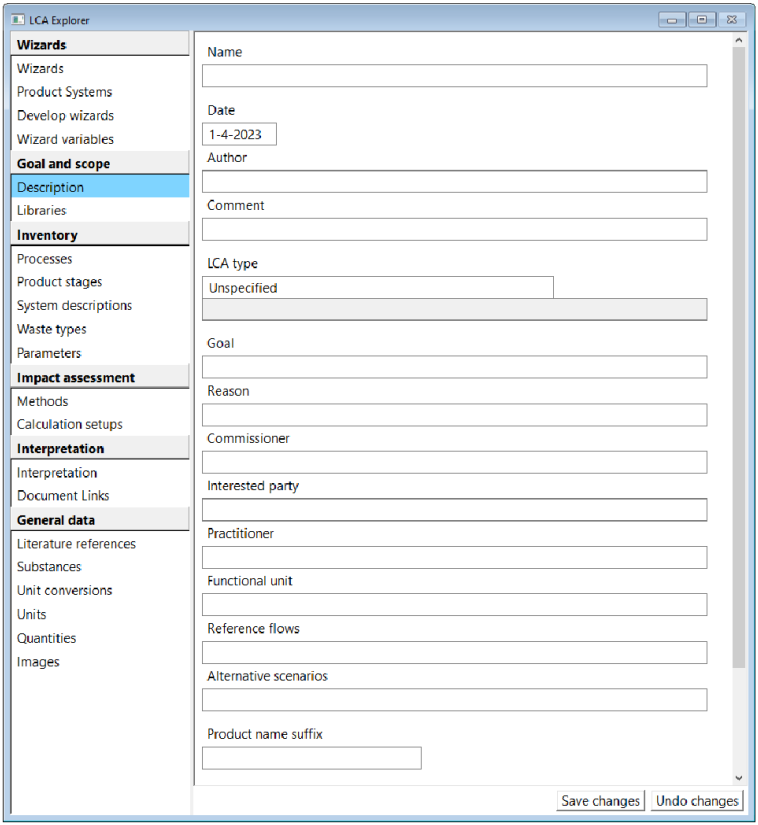


Gambar 4.5 Jendela "Projects"

a. Pilih "New" untuk memulai proyek baru
b. Masukkan nama proyek Anda dan klik "OK" untuk menyimpannya.
c. Pilih "Projects" dan klik "Open" atau cukup klik dua kali pada nama proyek untuk membuka dan melanjutkan proyek yang sudah dibuat sebelumnya.
d. Pada panduan ini, digunakakan proyek "Tutorial", yang tersedia di basis data SimaPro Professional. Anda dapat menggunakan proyek ini untuk membuat contoh dan latihan tutorial.

3. Membuat Deskripsi Proyek

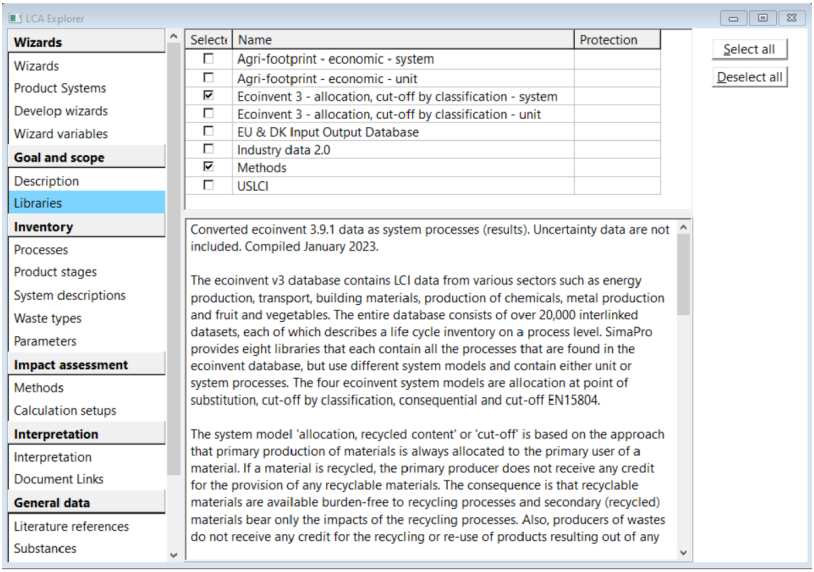
Setelah Anda membuka proyek, masukkan rincian tujuan dan cakupan proyek Anda dengan memilih kolom 'Description' di sebelah kiri, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.6. Di kolom "Nama," "Tanggal," "Penulis," dan "Komentar," Anda dapat memasukkan nama proyek, tanggal, dan nama orang-orang yang mengerjakannya. Di kolom "Jenis LCA," pilih jenis studi LCA Anda. Pengisian deskripsi bersifat tidak wajib, tujuannya adalah untuk memberi Anda gambaran tentang cara kerja penilaian siklus hidup dengan menjelaskan tujuan dan cakupan LCA.



Gambar 4.6 Jendela "Description"

4. Memilih Perpustakaan di SimaPro

Anda dapat melihat berbagai pustaka dengan file LCI di sebelah kanan saat mengeklik "Libraries" seperti yang ditunjukkan Gambar 4.7. Pilih pustaka yang tepat untuk pekerjaan Anda. Pastikan juga bahwa Anda selalu memilih pustaka "Methods", sehingga Anda tidak mengalami masalah saat mencoba memodelkan cara kerja sistem Anda. Dalam panduan ini, digunakan pustaka "Methods" dan "Ecoinvent 3 – allocation, cut off by classification" (Gambar 4.7).



Gambar 4.7 Jendela "Libraries"

5. Inventori

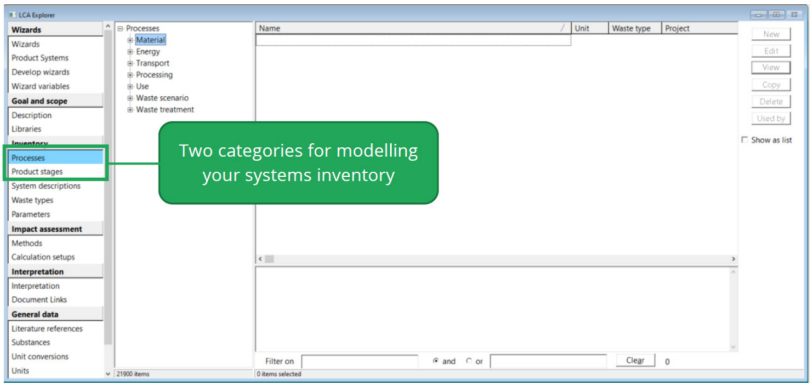
Pada bagian "Inventory", Anda dapat memasukkan detail bahan (input) dan proses untuk membangun sistem Anda. Dalam SimaPro, Anda hanya boleh menggunakan tahapan Proses dan Produk untuk membangun model Anda seperti yang terlihat dalam kategori yang ditandai pada Gambar 4.8.

TIPS

Kapan sebaiknya Anda menggunakan *Processes* dan *Product Stages*?

Processes: Jika Anda hanya ingin melakukan pemodelan *cradle-to-gate*, yaitu ingin melihat bagaimana pembuatan produk mempengaruhi lingkungan.

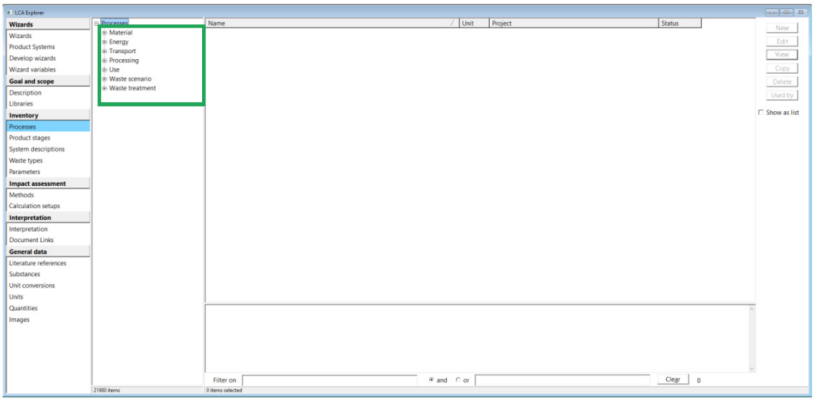
Product stages: Jika ingin melihat bagaimana produk mempengaruhi lingkungan sejak dibuat hingga dibuang (pemodelan *cradle-to-grave*).



Gambar 4.8 Inventory, Processes dan Product Stages

6. Processes

Dalam 'Processes' terdapat data lingkungan untuk bahan (material), energi, transportasi, pemrosesan, skenario limbah dan proses pengolahan limbah (Gambar 4.9). Anda juga dapat membuat proses baru di basis data atau menyalin proses yang sudah ada di basis data, mengedit input dan output-nya, dan menyimpannya. Saat Anda mengklik " Processes ", Anda dapat melihat tujuh kategori utama seperti yang terlihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 LCA Explorer: Inventori, Proses, Proses: Material, Energi, Transportasi Pengolahan, Penggunaan, Skenario Limbah, Pengolahan Limbah

Adapun langkah - langkah Membuat Proses Baru antara lain:

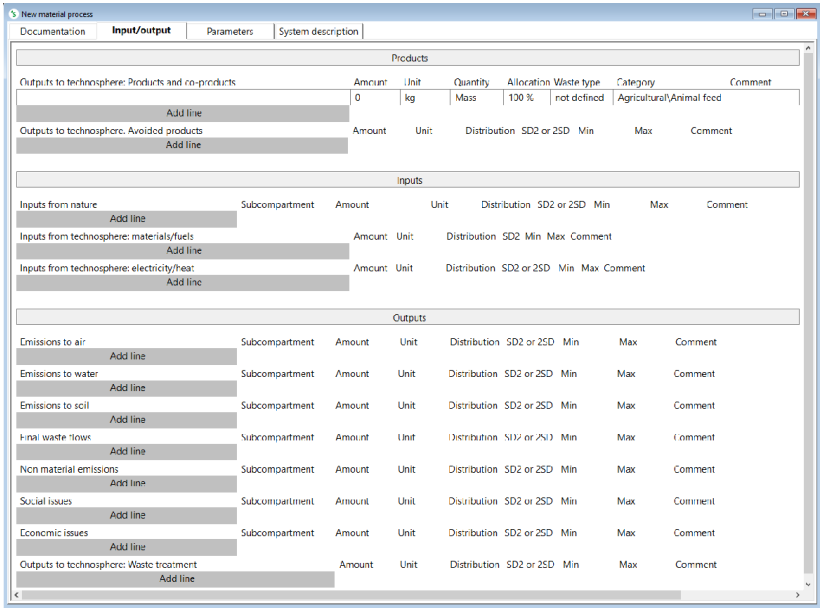
a. Klik dua kali pada kategori Material, pilih subkategori, lalu klik New.

b. Isi Tab Input/output (lihat Gambar 4.10) dengan cara mengisi Output to technosphere dengan nama produk akhir dan jumlah.

c. Pilih bahan baku di bawah Inputs from nature atau Inputs from technosphere (bahan bakar/listrik).

d. Tambahkan data emisi ke udara, air, tanah, atau aliran limbah.

e. Jika ada produk sampingan (misalnya susu dan daging pada sapi), atur alokasi.



Gambar 4.10 Proses material (tab Input/output)

7. *Product Stages*

Product Stages memiliki lima kategori: *Assembly, Life cycle, Disposal scenario, Disassembly*, dan *Reuse* (lihat Gambar 4.11). Adapun penjelasan kategori tersebut antara lain:

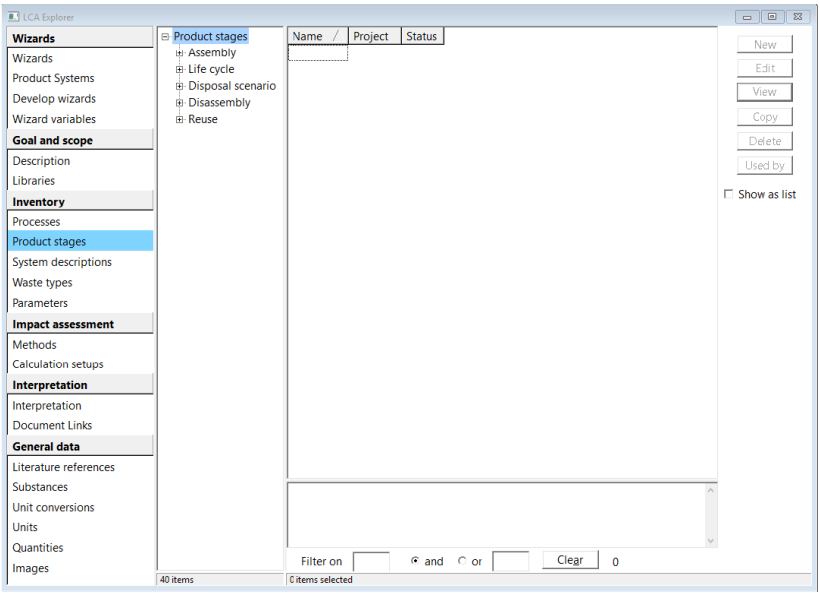
a. *Assembly* (Perakitan)
   - Digunakan untuk memasukkan data bahan dan proses yang terlibat dalam merakit produk dari komponen-komponen yang berbeda.
   - Contoh: Menggabungkan bahan seperti aluminium dan plastik untuk membangun sebuah sepeda.

b. *Life Cycle* (Siklus Hidup)
   - Digunakan untuk memasukkan informasi mengenai proses penggunaan produk.
   - Anda juga dapat menghubungkan skenario pembuangan limbah produk di tahap ini.

c. *Disposal Scenario* (Skenario Pembuangan)
   - Digunakan untuk memasukkan informasi bagaimana produk atau subkomponen dibuang.
   - Contoh: Apakah produk akan dibakar, didaur ulang, atau dibuang ke tempat pembuangan akhir.

d. *Disassembly* (Pembongkaran)
   - Digunakan jika produk Anda dapat dibongkar setelah digunakan.
   - Informasi ini mencakup bagaimana bagian-bagian produk dipisahkan untuk proses selanjutnya.

e. *Reuse* (Penggunaan Kembali)
   - Digunakan untuk produk yang dapat digunakan kembali sepenuhnya setelah siklus hidup pertama selesai.
   - Contoh: Botol kaca yang dapat diisi ulang dan digunakan kembali.



Gambar 4.11 LCA Explorer, Inventori, Tahapan Produk: Perakitan, Siklus Hidup, Skenario Pembuangan, Pembongkaran, Penggunaan Kembali

Setiap kategori digunakan untuk memasukkan informasi spesifik tentang tahapan siklus hidup model Anda. Pada bagian ini hanya dijelaskan langkah memasukkan data pada proses perakitan, antara lain:

a. Buka Tab Assembly dan Klik Assembly > Others di bagian Product Stages.
b. Klik tombol New di sisi kanan. Jendela seperti pada Gambar 12 akan muncul.
c. Di kolom Name pada tab Input/output, masukkan nama model Anda.
d. Di kolom Materials/Assemblies, pilih bahan yang digunakan untuk merakit produk.
e. Jika model Anda kompleks dan membutuhkan sub-perakitan lain, tautkan sub-perakitan ini di kolom ini.

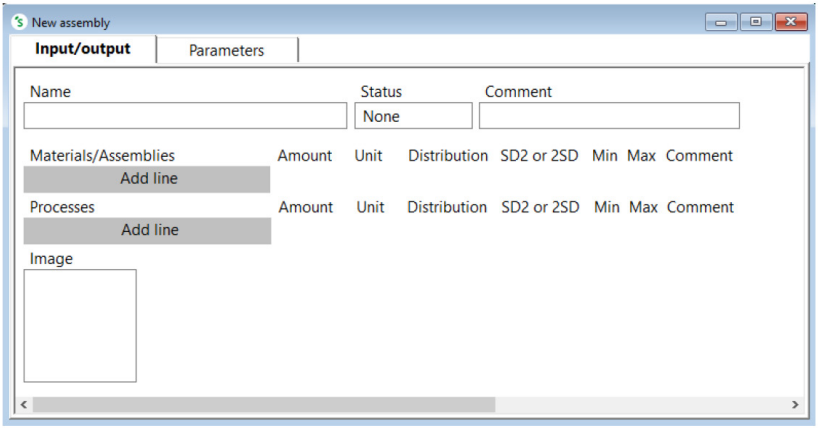
Langkah ini penting jika setiap sub-perakitan memiliki metode pembuangan yang berbeda.

f. Masukkan jumlah bahan/perakitan di kolom Amount.

g. Di kolom Processes, pilih proses yang terlibat dalam produksi model, seperti energi, transportasi, atau proses industri lainnya.

h. Di kolom Comment, masukkan deskripsi perakitan. Anda juga dapat menambahkan status terkini perakitan di kolom Status.

i. Setelah semua detail dimasukkan, tekan CTRL + S atau klik ikon Save di bagian atas untuk menyimpan model perakitan produk Anda.



Gambar 4.12 Perakitan (tab Input/output)

8. *Impact Assessment*

Di tahap ini, bahan baku dan emisi selama siklus hidup diubah menjadi dampak lingkungan. Gunakan tab **Impact Assessment > Methods** untuk memilih metode evaluasi dampak. Berikut adalah langkah-langkah dalam **penilaian dampak**:

a. Karakterisasi: Setiap zat dikalikan dengan faktor dampak.

b. Penilaian Kerusakan (opsional): Dampak terhadap kategori kerusakan seperti kesehatan manusia atau ekosistem.
c. Normalisasi (opsional): Bandingkan hasil dengan rata-rata dampak global per tahun.
d. Pembobotan (opsional): Tambahkan bobot pada kategori dampak untuk mendapatkan hasil skor tunggal.
e. Skor Tunggal: Menggabungkan hasil menjadi satu angka total.

9. Interpretasi

a. Gunakan tab Interpretation untuk menyimpulkan hasil proyek Anda.
b. Document Links: Akses referensi tambahan seperti pustaka ecoinvent untuk informasi lebih lanjut.

4.4 Membangun Model LCA dengan Simapro: Studi Kasus

Pada bagian ini, diberikan contoh langkah-langkah membangun model LCA untuk produksi rangka sepeda dan menganalisis dampak lingkungannya. Tujuan dari studi ini adalah untuk membandingkan dampak lingkungan dari produksi rangka sepeda yang terbuat dari aluminium, titanium, serat karbon dan baja, sehingga dapat dipilih sepeda yang lebih ramah lingkungan. Data input berat berbagai rangka sepeda disajikan dalam Tabel 3.2

Tabel 4.2 Jenis Rangka dan Beratnya

Jenis Rangka	Berat (kg)
Aluminium	1.5
Titanium	1.36
Serat karbon PAN (PolyAcrylonitrile)	1
Baja	1.8

Di bagian ini, akan dimodelkan dampak tahap produksi rangka sepeda aluminium. Rangka aluminium dibuat menggunakan material dan proses berikut seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 4.3 Data Inventori untuk Produksi 1.5 kg Rangka Aluminium

Input Material			
Data	**Kategori SimaPro**	**Jumlah**	**Komentar**
Aluminium, primary, ingot {IAI Area, EU27 & EFTA}	Processes > Materials > Metals > Non Ferro > Market	1.579 kg	Diperkirakan 5% kerugian produksi
Input Proses			
Powder coat, aluminium sheet {GLO}	Processes > Processing > Metals > Coating > Market	0.375 m^2	-
Impact extrusion of aluminium, 3 strokes {GLO}	Processes > Processing > Metals > Chipless shaping > Market	1.51 kg	-
Welding, arc, aluminium {GLO}	Processes > Processing > Metals > Welding > Market	0.75 m	-
Electricity, medium voltage, aluminium industry {IAI area, EU27 & EFTA}	Processes > Energy > Electricity country mix > Medium voltage > Market	31.5 kWh	Energi untuk bending, hydroforming, furnace, quench tank, dan screwing
Output			
Aluminium (waste treatment) {GLO}	Waste treatment > recycling > transformation	0.079 kg	Mengasumsikan kerugian produksi harus diolah (coating diabaikan)

1. **Membuat Model Rangka Aluminium**

   a. **Membuat Proses Baru:**

      1) Pilih Processes di kolom Inventory sebelah kiri.
      2) Klik Processes > Material > Different types of bike.
      3) Tekan tombol New di sebelah kanan dan beri nama proses baru: Aluminium frame.
      4) Pada bagian Outputs to technosphere: Product and co-products, masukkan:

         Nama produk: Aluminium frame.

         Amount: 1.5.

         Unit: kg.

         Allocation: 100% (default karena hanya ada satu produk).

         Waste type: Aluminium.
      5) Klik Save untuk menyimpan pengaturan awal.

   b. **Menambahkan Material dan Proses:**

      1) Pilih inputs from technosphere: Material/fuels
      2) Tambahkan material untuk memproduksi rangka aluminium dengan memilih kategori: Material > Metals > Non Ferro > Market.
      3) Pilih Aluminium, primary, ingot {IAI Area, EU27 & EFTA}|market for aluminium, primary, ingot|Cut-off, S.
      4) Masukkan:

         Amount: 1.579.

         Unit: kg.

         Comment: Tambahkan komentar opsional seperti " Kehilangan produksi 5%.".
      5) Lanjutkan dengan langkah serupa untuk menambahkan:

      - Powder coat, aluminium sheet (GLO): Amount: 0.375 kg.

- Impact extrusion of aluminium, 3 strokes (GLO): Amount: 1.51 kg.
- Welding, arc, aluminium (GLO): Amount: 0.75 kg.

c. Menambahkan Energi yang Digunakan:

1) Pada Inputs from technosphere: electricity/heat, tambahkan: Energy > Electricity mix > Medium voltage > Market.
2) Pilih Electricity, medium voltage, aluminium industry {IAI Area, EU27 & EFTA}|market for electricity, medium voltage, aluminium industry|Cut-off, S.
3) Masukkan:

   Amount: 31.5.

   Unit: kWh.

   Comment: "Digunakan untuk pembengkokan, pembentukan hidro, tungku, tangki pendinginan, dan penyekrupan."

d. Menambahkan Pengolahan Limbah:

1) Di Outputs to technosphere: Waste treatment, tambahkan Proses: Aluminium (waste treatment) {GLO}|recycling of aluminium|Cut-off, S.
2) Masukkan:

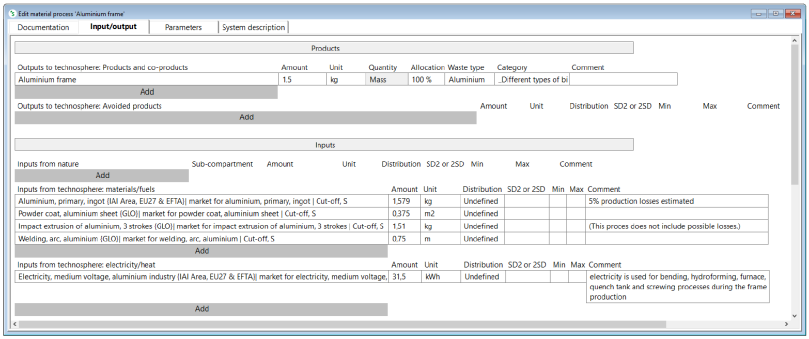
   Amount: 0.079.

   Unit: kg.

   Comment: "Penanganan limbah produksi (massa lapisan serbuk diabaikan)."

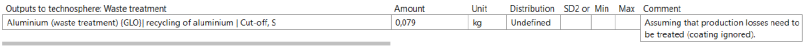
e. Melihat Tampilan Input/Output:

1) Tampilan tab Input/output setelah semua bahan dan proses dimasukkan akan terlihat seperti Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Proses material (tab input/output) dengan material dan proses untuk rangka aluminium.

2) Pada bagian bawah tab ini, proses pengolahan limbah akan ditampilkan seperti pada Gambar 4.14.



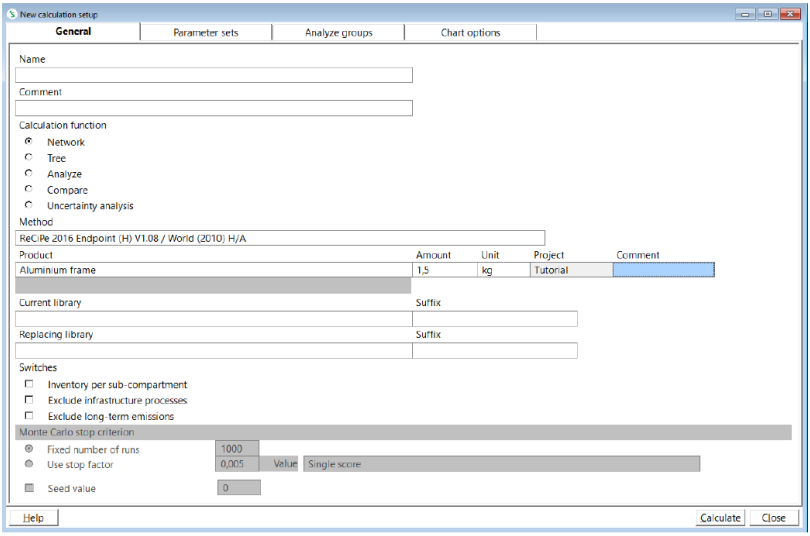
Gambar 4.14 Proses material (tab input/output) dengan proses pengolahan limbah untuk rangka aluminium.

2. Penilaian Dampak (*Impact Assessment*)

Setelah data dimasukkan, Anda dapat melanjutkan untuk menghitung hasil dan menilai dampak lingkungan. Adapun langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

a. Membuka dan mengisi setup perhitungan:

1) Klik tab Network atau tekan F10 untuk masuk ke mode perhitungan.
2) Pilih New calculation setup (lihat Gambar 4.15).



Gambar 4.15 Pengaturan perhitungan untuk rangka aluminium.

3) Isi Nama dengan "Diagram jaringan rangka aluminium."
4) Pilih Network pada Calculation function
5) Pilih method ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.08 / World (2010) H/A.
6) Isi bagian Product:

   Nama: Aluminium frame.

Jumlah: 1,5.

Unit: kg.

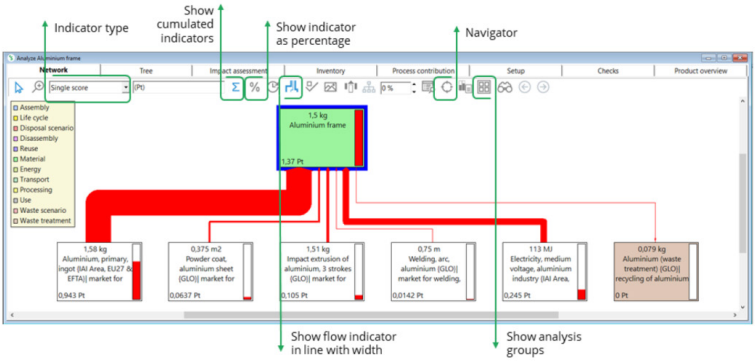
Comment (opsional)

7) Klik Calculate untuk menjalankan perhitungan.

b. Visualisasi dan Analisis

Setelah perhitungan selesai, tampilan akan seperti pada Gambar 4.16. Gunakan fitur berikut untuk eksplorasi lebih lanjut:

- Indicator type: Pilih Single score untuk melihat dampak lingkungan keseluruhan.
- Show cumulated indicators: Menampilkan dampak kumulatif.
- Show indicator as percentage: Menampilkan kontribusi relatif dalam persentase.
- Show flow indicator in line width: Menggunakan diagram Sankey dengan ketebalan garis mewakili dampak.
- Navigator: Memperbesar, memperkecil, atau menyesuaikan tampilan diagram.

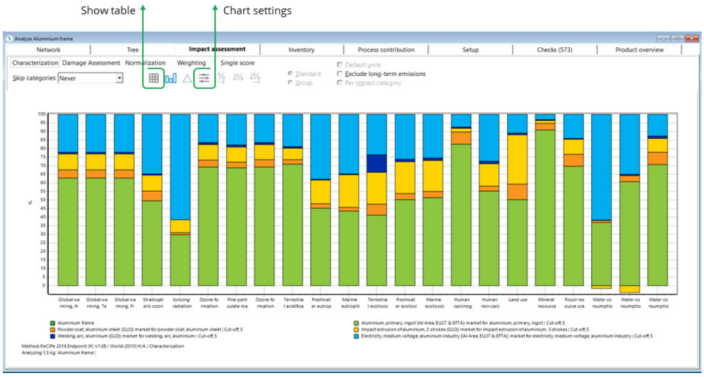


Gambar 4.16 Analisis rangka aluminium, diagram jaringan.

c. **Penilaian Dampak *(Impact Assessment):***

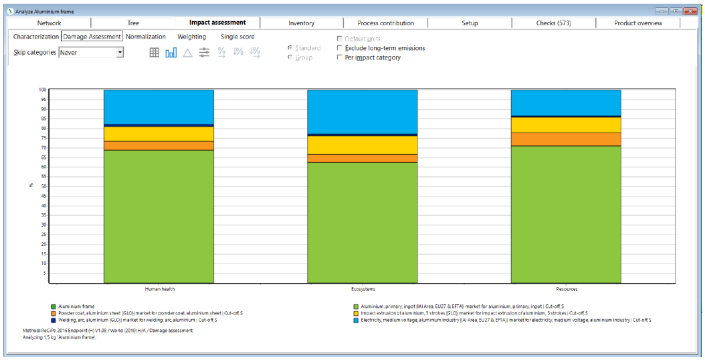
Klik tab impact assessment untuk mengevaluasi dampak:

1) Klik Characterization untuk melihat kontribusi berbagai bahan terhadap kategori dampak (lihat Gambar 4.17). Contoh: Aluminium primer menyumbang 62,8% dampak pemanasan global.



Gambar 4.17 Analisis rangka aluminium, hasil karakterisasi.

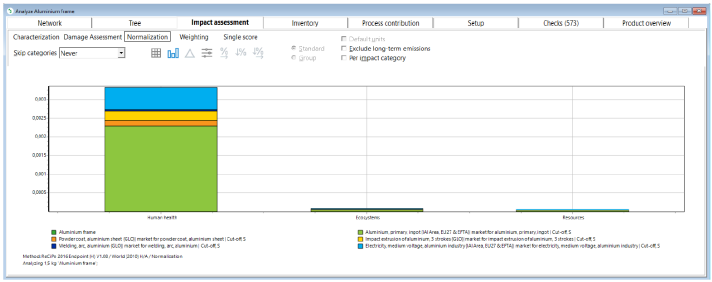
2) Klik Damage assessment untuk engevaluasi dampak pada Human health, Ecosystems, dan Resources (lihat Gambar 4.18).



Gambar 4.18 Analisis rangka aluminium, penilaian kerusakan.

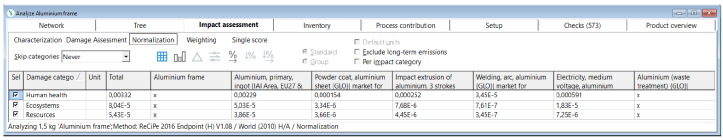
3) Pilih Normalization untuk membandingkan dampak relatif terhadap rata-rata tahunan global (lihat Gambar 4.19; 4.20; 3.21). Perbedaan gambar tersebut antara lain:

- Gambar 4.19: Menunjukkan hasil normalisasi dalam bentuk grafik batang untuk kategori kerusakan utama (Human health, Ecosystems, dan Resources), memberikan gambaran visual yang cepat.



Gambar 4.19 Analisis rangka aluminium, hasil normalisasi.

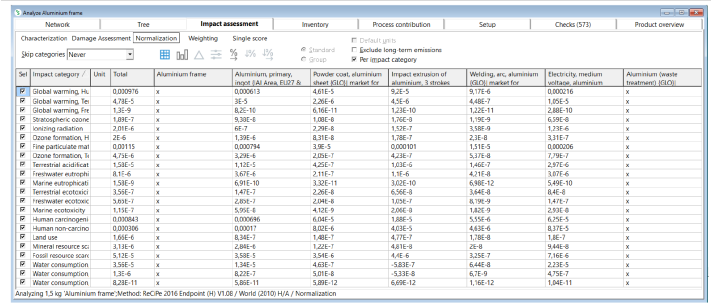
- Gambar 4.20: Menampilkan hasil normalisasi dalam bentuk tabel rinci untuk kategori kerusakan utama, cocok untuk analisis numerik mendalam.



Sel	Damage catego /	Unit	Total	Aluminium frame	Aluminium, primary, ingot (IAI Area, EU27 &	Powder coat, aluminium sheet (GLO) market for	Impact extrusion of aluminium, 3, strokes	Welding, arc, aluminium (GLO) market for	Electricity, medium voltage, aluminium	Aluminium (waste treatment) (GLO)
☑	Human health		0,00332	x	0,00229	0,000154	0,000252	3,45E-5	0,000591	x
☑	Ecosystems		8,04E-5	x	5,03E-5	3,34E-6	7,88E-6	7,61E-7	1,83E-5	x
☑	Resources		5,43E-5	x	3,86E-5	3,66E-6	4,45E-6	3,43E-7	7,25E-6	x

Gambar 4.20 Analisis rangka aluminium, hasil normalisasi (kategori kerusakan, tabel).

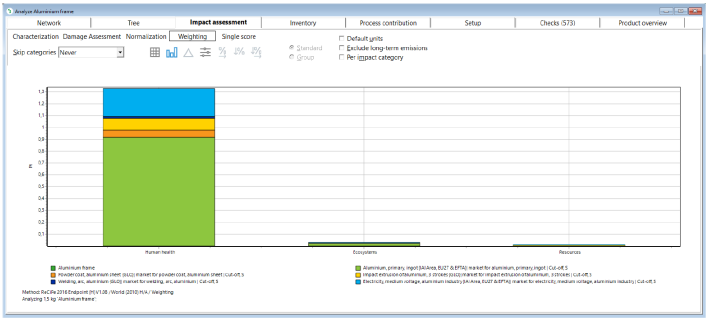
- Gambar 4.21: Menyediakan tabel numerik untuk semua kategori dampak, seperti Global warming, Water consumption, dan lainnya, memungkinkan analisis yang sangat mendetail.



Sel	Impact category /	Unit	Total	Aluminium frame	Aluminium, primary, ingot [AI Area, EU27 &	Powder coat, aluminium sheet (GLCI) market for	Impact extrusion of aluminium, 3 strokes	Welding, arc, aluminium (GLCI), market for	Electricity, medium voltage, aluminium	Aluminium (waste treatment) (GLCI)
☑	Global warming, Hu		0,000976	x	0,000613	4,01E-5	9,2E-5	9,17E-6	0,000216	x
☑	Global warming, Ter		4,73E-5	x	3E-5	2,26E-6	4,5E-6	4,48E-7	1,05E-5	x
☑	Global warming, Fre		1,3E-9	x	8,2E-10	6,16E-11	1,23E-10	1,22E-11	2,88E-10	x
☑	Stratospheric ozone		1,89E-7	x	9,38E-8	1,08E-8	1,76E-9	1,19E-9	6,59E-9	x
☑	Ionizing radiation		2,01E-6	x	6E-7	2,29E-8	1,52E-7	3,58E-9	1,23E-6	x
☑	Ozone formation, Hu		2E-6	x	1,39E-6	8,31E-8	1,28E-7	2,3E-8	3,31E-7	x
☑	Fine particulate mat		0,00115	x	0,000794	3,9E-5	0,000101	1,51E-5	0,000206	x
☑	Ozone formation, Te		4,73E-6	x	3,29E-6	2,05E-7	4,23E-7	5,37E-8	7,79E-7	x
☑	Terrestrial acidificat		1,58E-5	x	1,12E-5	4,25E-7	1,03E-6	1,46E-7	2,97E-6	x
☑	Freshwater eutrophi		8,1E-6	x	3,67E-6	2,11E-7	1,1E-6	4,21E-8	3,07E-6	x
☑	Marine eutrophicati		1,58E-9	x	6,91E-10	3,32E-11	3,02E-10	6,98E-12	5,49E-10	x
☑	Terrestrial ecotoxici		3,56E-7	x	1,47E-7	2,26E-8	6,56E-8	3,64E-8	8,4E-8	x
☑	Freshwater ecotoxic		5,83E-7	x	2,83E-7	2,04E-8	1,05E-7	8,19E-9	1,47E-7	x
☑	Marine ecotoxicity		1,15E-7	x	5,95E-8	4,12E-9	2,06E-8	1,82E-9	2,93E-8	x
☑	Human carcinogeni		0,000843	x	0,000696	6,04E-5	1,88E-5	5,55E-6	6,75E-5	x
☑	Human non-carcino		0,000306	x	0,00017	8,02E-6	4,03E-5	4,63E-6	8,37E-5	x
☑	Land use		1,66E-6	x	8,34E-7	1,48E-7	4,77E-7	1,78E-8	1,8E-7	x
☑	Mineral resource sc		3,13E-6	x	2,84E-6	1,22E-7	4,81E-8	2E-8	9,44E-8	x
☑	Fossil resource scar		5,12E-5	x	3,58E-5	3,54E-6	4,4E-6	3,25E-7	7,16E-6	x
☑	Water consumption		3,56E-5	x	1,34E-5	4,63E-7	-5,83E-7	6,44E-8	2,23E-5	x
☑	Water consumption		1,3E-6	x	8,22E-7	5,01E-8	-5,33E-8	6,7E-9	4,75E-7	x
☑	Water consumption		8,23E-11	x	5,86E-11	5,89E-12	6,69E-12	1,16E-12	1,04E-11	x

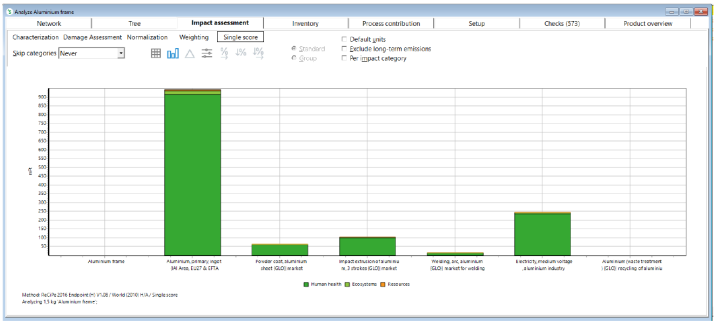
Gambar 4.21 Analisis rangka aluminium, hasil normalisasi (kategori dampak, tabel).

4) Pilih Weighting untuk menampilkan hasil pembobotan untuk memprioritaskan kategori dampak (lihat Gambar 4.22).



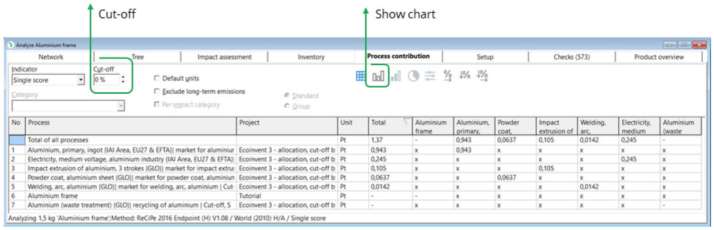
Gambar 4.22 Analisis rangka aluminium, hasil pembobotan.

5) Pilih Single score untuk memperoleh gambaran total dampak produksi rangka aluminium dalam satu skor (lihat Gambar 4.23).



Gambar 4.23 Analisis rangka aluminium, hasil skor tunggal.

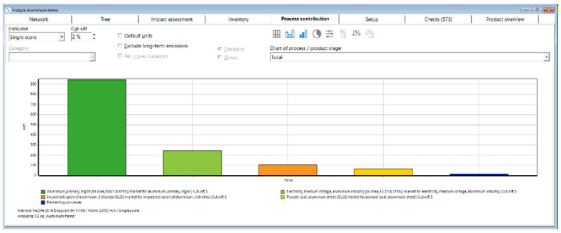
6) Klik tab Process contribution untuk melihat kontribusi proses terhadap total dampak (lihat Gambar 4.24).



Gambar 4.24 Analisis rangka aluminium, tab kontribusi proses.

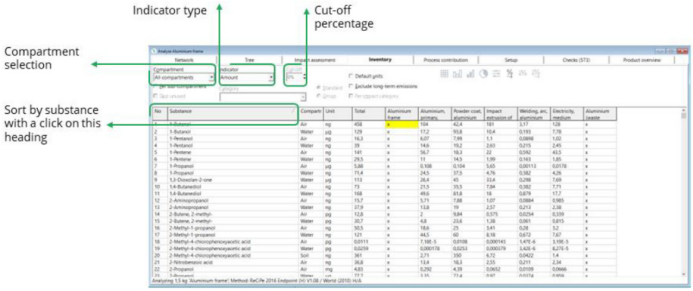
7) Atur Cut-off untuk menampilkan hanya proses dengan kontribusi lebih besar dari persentase tertentu (contoh: 2%).

8) Klik Show chart untuk menampilkan grafik kontribusi (lihat Gambar 3.25). Contoh: Aluminium primer menjadi kontributor utama.



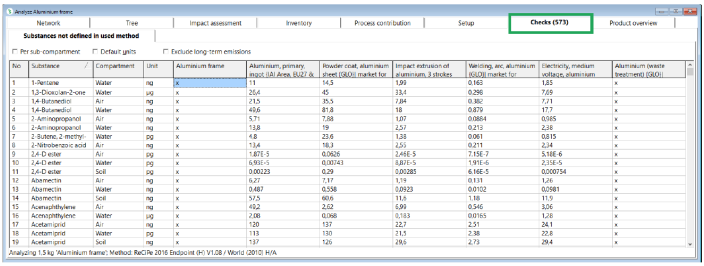
Gambar 4.25 Analisis rangka aluminium, tab kontribusi proses (grafik)

9) Klik tab Inventory untuk melihat zat dan proses yang terlibat (Gambar 4.26):
   - Compartment selection: Pilih kategori emisi (contoh: udara, air).
   - Cut-off percentage: Atur batas untuk menampilkan zat dengan kontribusi tertentu saja.
   - Indicator type: Pilih hasil yang dikarakterisasi, dinormalisasi, atau pembobotan sesuai kebutuhan.



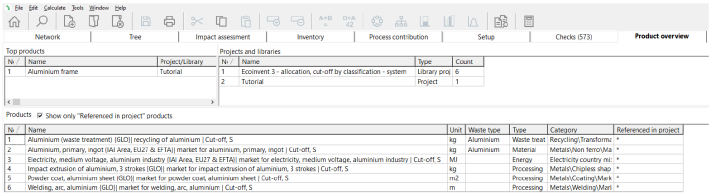
Gambar 4.26 Analisis rangka aluminium, tab Inventaris.

10) Gunakan tab Checks untuk memeriksa zat yang tidak memiliki faktor karakterisasi (lihat Gambar 4.27). Contoh: Ada 573 zat yang tidak terdefinisi. Anda dapat mengecualikan long-term emissions jika tidak relevan.



Gambar 4.27 Analisis rangka aluminium, tab Checks - Periksa faktor karakterisasi yang hilang.

11) Pilih tab Product Overview untuk memperoleh gambaran umum material dan proses yang digunakan dalam proyek (lihat Gambar 4.28)



Gambar 4.28 Analisis rangka aluminium, tab gambaran produk.

4.5 Contoh Studi LCA di Berbagai Industri

Dalam sub-bab ini, disajikan penerapan LCA melalui beberapa contoh kasus nyata yang mencakup berbagai sektor. Studi kasus ini melibatkan analisis produk baja, makanan tradisional seperti tempe, serta produk pertanian seperti padi. Studi pada produk baja mengulas analisis dampak lingkungan dari proses produksi material yang digunakan secara luas di industri. Pada makanan tradisional seperti tempe, pembahasan berfokus pada efisiensi sumber daya dan potensi pengurangan emisi dari proses produksinya. Sementara itu, sektor pertanian, dengan fokus pada padi dan sayuran, mengeksplorasi penggunaan input seperti air, pupuk, dan energi, serta dampaknya terhadap lingkungan.

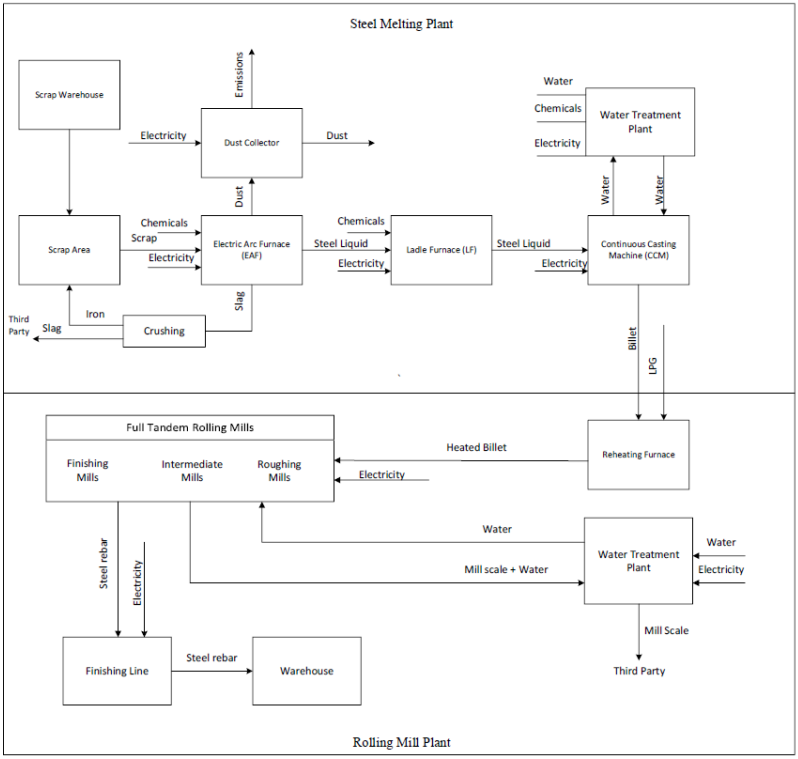
Setiap kasus dirancang untuk menunjukkan bagaimana LCA dapat diterapkan untuk mengidentifikasi langkah-langkah strategis dalam mengurangi dampak lingkungan sekaligus meningkatkan keberlanjutan proses produksi. Kajian ini diharapkan menjadi kontribusi nyata dalam mendukung pengembangan solusi yang lebih ramah lingkungan di berbagai sektor.

4.5.1 LCA Produk Baja (Alyarahma et al., 2023)

Baja merupakan salah satu material industri yang banyak digunakan di berbagai sektor, seperti transportasi, konstruksi, dan bangunan (Renzulli et al., 2016). Setelah industri kimia, sektor besi dan baja menjadi konsumen energi terbesar kedua secara global dan termasuk penyumbang emisi CO2 yang signifikan (Backes et al., 2021). Industri ini bertanggung jawab atas 3,2% emisi gas rumah kaca global dan 15% emisi dari sektor industri. Tantangan yang dihadapi adalah risiko lingkungan yang besar dari proses pembuatan baja, di tengah peningkatan permintaan baja konstruksi dan pembangunan infrastruktur yang terus berkembang. Meskipun bahaya lingkungan tidak dapat dihindari sepenuhnya, pengembangan infrastruktur tetap berjalan. Hal ini menunjukkan pentingnya langkah-langkah mitigasi untuk mengurangi dampak lingkungan dari proses produksi baja. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan ini secara komprehensif adalah *Life Cycle Assessment* (LCA).

a. Penentapan Tujuan dan Ruang Lingkup

Tujuan studi ini adalah menganalisis dampak lingkungan dari proses produksi baja. Unit fungsional dalam studi ini adalah 1 ton baja. Batasan sistem studi ini adalah *gate-to-gate* yang hanya berfokus pada proses manufaktur baja yang meliputi: tanur busur listrik (EAF), tanur sendok (LF), mesin pengecoran kontinu (CCM), tanur pemanas ulang (RF), pabrik penggilingan (RM), dan pabrik finishing (FM) (lihat Gambar 4.29). Analisis ini tidak termasuk transportasi antar proses. Potensi pemanasan global (GWP), penipisan abiotik (ADP), penipisan lapisan ozon (ODP), toksisitas manusia (HT), ekotoksisitas akuatik air tawar (FAETP), ekotoksisitas terestrial (TETP), oksidasi fotokimia (POP), pengasaman (AP), dan eutrofikasi (EP) termasuk di antara kategori dampak yang dinilai menggunakan teknik dasar CML-IA.



Gambar 4.29 Batasan Sistem Produksi Baja

b. *Life Cycle Inventory*

Analisis inventaris bertujuan untuk mengumpulkan data terkait aliran fisik dalam sistem produk, mencakup penggunaan sumber daya, bahan baku, produk setengah jadi, produk jadi, emisi yang dihasilkan, serta limbah yang dihasilkan. Pada tahap ini, data input disajikan dalam bentuk konsumsi energi listrik, bahan mentah, dan bahan kimia, sementara outputnya berupa produk yang dihasilkan oleh masing-masing unit proses dalam sistem tersebut.

Tabel 4.4 Inventori Produksi Baja

Input			Output		
Material	Amount	Unit	Material	Amount	Unit
Electric Arc Furnace					
Scrap	1,101	tons	Liquid steel	1,011	tons
Electricity	390.82	KwH	Slag	0.064	tons
CaO	0.036	tons	Dust	0.064	tons
Carbonizer	0.002	tons			
LNG	101.8	MJ			
Oxygen	8.07	Nm^3			
Electric Dust Collector	24.68	KwH			
Ladle Furnace					
Liquid steel	1,011	tons	Liquid Steel	1.03	tons
Carbonizer	0.003	tons			
FeSi	0.001	ton			
SiMn	0.011	ton			
FeCrom	0.002	ton			
CaO	0.007	ton			
Argon	34,784	kg			
Nitrogen	1,491	ppm			
Electricity	47.86	KwH			
Continuous Casting Machine					
Liquid steel	1.03	ton	Billets	1.03	ton
Electricity	13.06	KwH			
Water	0.879	m^3			
Oxygen	0.183	m^3			
LPG	0.382	kg			
Reheating Furnace					
Billets	1.03	tons	Heated billets	1.03	tons
LPG	47,127	m^3			
Rolling Mills					
Heated billets	1.03	ton	Deformed Steel	1	ton
Electricity	363.57	KwH	Mill scale	0.03	ton
Water	0.310	m^3	Water	0.310452864	m^3
Finishing Line					
Deformed Steel	1	ton	Deformed Steel	1	ton
Electricity	18.49	KwH			

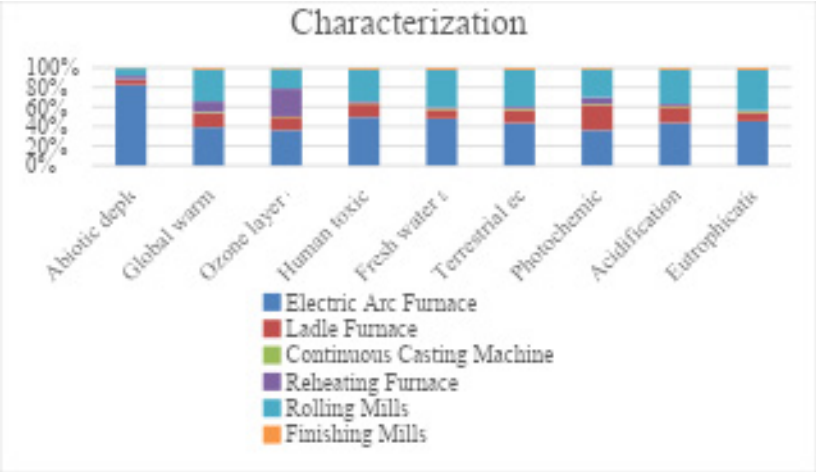
c. *Life Cycle Impact Assessment dan Interpretasi*

Tabel 4.5 Dampak lingkungan proses produksi baja

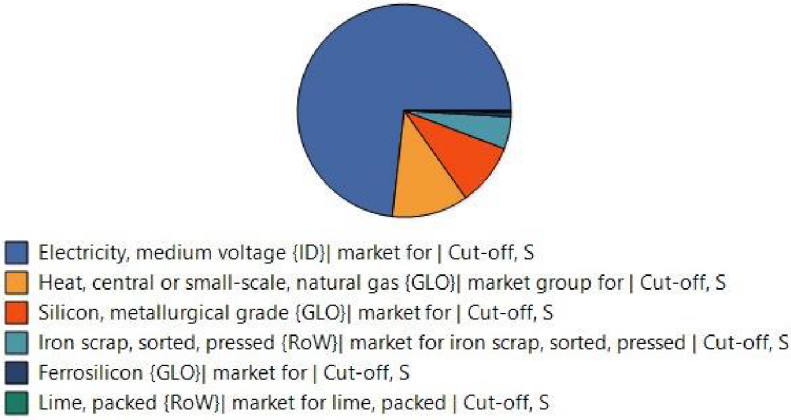
Impact Category	Unit	Electric Arc Furnace	Ladle Furnace	Continuous Casting Machine	Re-heating Furnace	Roll-ing Mills	Fin-ishing Mills	Total
Abiotic depletion	kg Sb eq	0.0036 0155	0.0002 29088	1.2039 6E-05	0.0001 68635	0.0003 33916	1.750 71E-05	0.0043 62736
Global warming (GWP100a)	kg CO2 eq	477.36 59659	174.37 30235	14.258 0765	132.99 07267	395.44 50214	20.733 05257	1215.1 65867

Impact Category	Unit	Electric Arc Furnace	Ladle Furnace	Continuous Casting Machine	Re-heating Furnace	Roll-ing Mills	Fin-ishing Mills	Total
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	2.0955 3E-05	7.691 E-06	4.176 69E-07	1.6467 3E-05	1.158 4E-05	6.073 43E-07	5.7722 5E-05
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	356.91 43321	96.525 09254	8.4405 30134	11.560 45612	234.09 64869	12.273 60191	719.81 04997
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	447.77 79998	86.104 61052	12.903 14135	9.2777 38827	357.86 61544	18.762 80492	932.69 24498
Terrestrial eco-toxicity	kg 1,4-DB eq	0.9640 02182	0.2979 06766	0.0300 97705	0.0446 3159	0.8347 54083	0.0437 65882	2.2151 58207
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	0.0725 9282	0.0516 02163	0.0020 68808	0.0134 80531	0.0573 77981	0.0030 08309	0.2001 30612
Acidification	kg SO2 eq	2.2175 62782	0.8193 36216	0.0639 00111	0.1107 52233	1.7722 57332	0.0929 1887	5.0767 27545
Eutrophication	kg PO4--- eq	2.3703 53423	0.4728 85873	0.0784 07565	0.0244 88132	2.1746 18788	0.1140 14549	5.2347 6833

Berdasarkan tabel tersebut, dapat diketahui bahwa 1 ton baja menghasilkan total dampak terhadap *Global warming* sebesar 1.215,165 kg CO2 eq, dengan proses yang memiliki kontribusi paling besar terhadap kategori dampak *Global warming* adalah *Electric Arc Furnace* dengan kontribusi dampak sebesar 477,36 kg CO2 eq, diikuti dengan *Rolling Mills* dengan kontribusi sebesar 395,55 kg CO2 eq dan *Reheating Furnace* dengan kontribusi sebesar 132,99 kg CO2 eq. Penyebab besarnya kontribusi terhadap *Global Warming* dari proses *Electric Arc Furnace*, *Rolling Mills* adalah akibat dari emisi tidak langsung yang dihasilkan dari pemakaian listrik yang besar. Sedangkan, untuk *Reheating Furnace* disebabkan oleh pemakaian bahan bakar LPG untuk pemanasan ulang *Billet* sebelum memasuki *Rolling Mills*.



Gambar 4.30 Karakterisasi proses produksi terhadap kategori dampak



Gambar 4.31 Distribusi karakterisasi dari materials

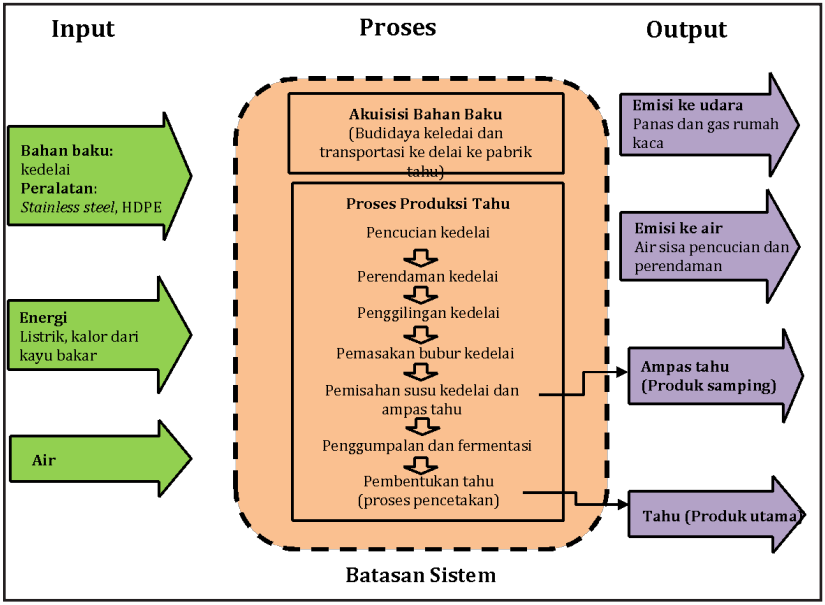
Diketahui bahwa proses yang memiliki kontribusi yang paling besar adalah *electricity*. Maka berdasarkan hasil, diperlukan suatu upaya untuk dapat meminimalisir penggunaan listrik pada EAF dan *Rolling mills*, serta penggunaan bahan bakar pada *Reheating Furnace*.

4.5.2 LCA Produk Tahu (Permata Sari et al., 2022; Sari et al., 2021)

a. Definisi Tujuan dan Ruang Lingkup

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menilai dampak lingkungan dari seluruh proses yang terlibat dalam produksi tahu yang meliputi budidaya dan transportasi kedelai dan proses pembuatan tahu.

Satuan fungsional dalam penelitian ini adalah 35 kg tahu yang merupakan jumlah produksi tahu per batch. Penelitian ini menggunakan batasan sistem *cradle to gate* dalam analisis dampak lingkungan produk tahu. Gambar 3.32 menunjukkan sistem boundary pada studi ini.



Gambar 4.32 Diagram alir produksi tahu

b. *Life Cycle Inventory*

Tabel 4.6 Data inventori produksi tahu

Proses	Input	Total
Akuisisi bahan baku: budidaya dan transportasi kedelai:	Biji kedelai (kg)	12.5
Chicago ke Portland Maine	Kereta api (tkm)	21.75
Portland Maine ke Cigading	Kapal (tkm)	172.79
Cigading ke Jakarta Barat (pabrik tahu)	Truk (tkm)	1.26
Pencucian kedelai	Kedelai (kg)	12.5
	Air (kg)	85.7
	Peralatan HDPE (kg)	0.031
Perendaman kedelai	Kedelai hasil cuci (kg)	12.5
	Air (kg)	28.57
	Peralatan HDPE (kg)	0.031
Penggilingan kedelai	Kedelai hasil rendam(kg)	15
	Listrik (kWh)	3.22
	Air (kg)	38.6
Pemasakan bubur kedelai	Bubur kedelai (kg)	53.6
	Air (kg)	57.14
	Listrik / kalor (MJ)	67.17
	Peralatan stainless steel (kg)	0.0075
	Transportasi (tkm)	0.375
Penyaringan susu kedelai	Susu kedelai (kg)	107.14
	koagulan (kg)	31.07
	Peralatan stainless steel	0.0195
	(kg)	0.0075
Penggumpalan tahu	Susu kedelai (kg)	118.46
	koagulan (kg)	35.54
	Peralatan stainless steel (kg)	0.015

Proses	Input	Total
Pencetakan tahu	Gumpalan tahu (kg)	45
	Peralatan kayu (kg)	0.025

c. Analisis Dampak Lingkungan

Nilai seluruh dampak lingkungan disajikan pada Tabel 3.7. Produksi 35 kg tahu menghasilkan nilai GWP 34,2 kg CO_2 eq, sebesar yang dihasilkan 30,9 kg CO_2 eq diperoleh dari budidaya dan transportasi kedelai. Nilai GWP yang dihasilkan pada penelitian ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Mejia terhadap produk tahu dengan nilai GWP sebesar 0,982 kg CO_2-eq untuk 1 kg tahu (Mejia, dkk. 2018). Selain itu, nilai GWP yang dihasilkan pada penelitian ini juga sesuai dengan nilai GWP produk tahu yang ada dalam *database ecoinvent.*

Tabel 4.7 Dampak lingkungan dari produksi 35 kg tahu.

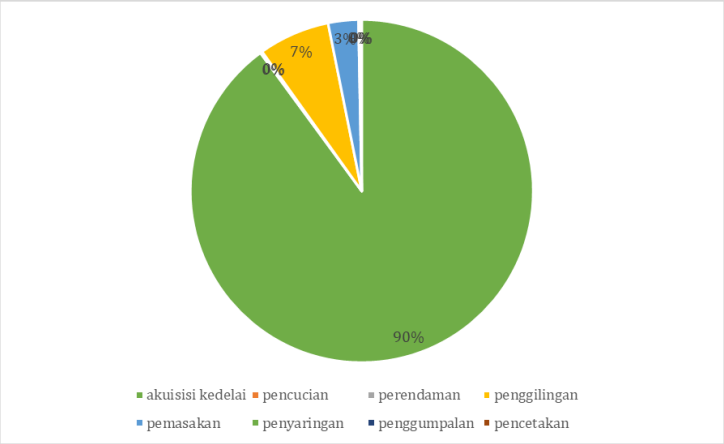
Kategori Dampak	Total
Potensi global warming (GWP100a); kg CO2 eq	34.2
Penipisan lapisan ozon (ODP); kg CFC-11eq	5.44E-7
Asidifikasi; kg SO2 eq	0.0551
Eutrofikasi; kg PO4- eq	0.0549

d. Interpretasi

Hasil analisis dampak lingkungan dengan menggunakan *software* Simapro menunjukkan bahwa nilai GWP yang ditimbulkan selama proses produksi 35 kg tahu adalah sebesar 34,2 kg CO_2 eq. Berdasarkan nilai total ini, dibuat rincian kontribusi GWP untuk tiap-tiap tahap produksi tahu seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.33. Proses akuisisi kedelai yang terdiri dari tahap budidaya kedelai dan transportasi kedelai dari negara asal, Amerika menuju pabrik

tahu di Indonesia merupakan penyumbang utama GWP dalam proses produksi tahu dengan nilai sebesar 90%, diikuti dengan proses penggilingan kedelai dan pemasakan bubur kedelai. Hasil ini dapat dijadikan masukan bagi pemerintah Indonesia agar kedepannya dapat meningkatkan produksi kedelai di Indonesia sehingga Indonesia dapat mengurangi jumlah ekspor kedelai sehingga akan berdampak pada pengurangan potensi global warming.

Peluang peningkatan produksi kedelai di Indonesia masih terbuka lebar (Kaman Nainggolan, Muchjidin Rachmat, 2014). Upaya peningkatan produktivitas kedelai telah dilakukan di beberapa wilayah di Indonesia, antara lain di daerah Bone dengan hasil adanya peningkatan produksi kedelai dari 1,2 ton/ha menjadi 2,8 ton/ha (Asman et al., 2022), daerah Bengkulu yang menghasilkan peningkatan produksi kedelai sebesar 0,61 ton/ha untuk varietas Grobogan dan 1,12 ton/ha untuk varietas Wilis yang keduanya merupakan kedelai varietas unggul (Nusantara, dkk. 2019). Penelitian lain di Provinsi Jambi menunjukkan peningkatan produksi kedelai varietas unggul mencapai 0,7 ton/ha (Jumakir, dkk. 2021).



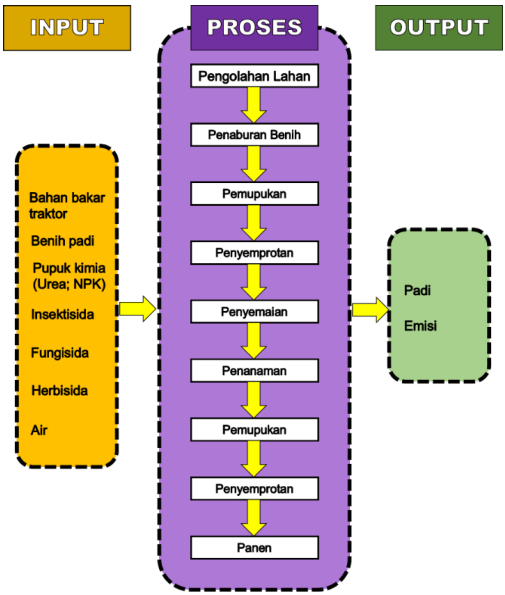
Gambar 4.33 Persentase GWP setiap tahapan proses produksi tahu

4.5.3 LCA Produk Pertanian (Padi) (Sari et al., 2024)

Metode LCA yang digunakan dalam penelitian ini didasarkan pada standar ISO 14040 (2006) dan ISO 14044 (2006) dan berisi empat fase, termasuk definisi tujuan dan ruang lingkup, inventaris siklus hidup (LCI), penilaian dampak siklus hidup (LCIA), dan interpretasi data. Dalam studi ini dilakukan evaluasi dampak lingkungan produksi beras di Jatibarang, Indramayu, Jawa Barat. LCA ini menggunakan metodologi penilaian CML-IA *baseline*, data dari database *Ecoinvent* dan perangkat lunak Simapro.

a. Definisi Tujuan dan Ruang Lingkup

Tujuan dari studi LCA ini adalah untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari produksi padi. Satuan fungsional adalah satu ton gabah. Lokasi penelitian terletak di Jatibarang, Indramayu, Jawa Barat. Batasan sistem yang digunakan pada penelitian ini adalah *gate to gate*, yaitu tahap pengolahan lahan hingga tahap panen dengan hasil berupa gabah. Gambar 3.34 menunjukkan batasan sistem yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 4.34 Batasan sistem

b. Analisis Inventori Daur Hidup

Kajian ini difokuskan pada sistem pertanian padi konvensional. Hampir semua tahapan pada pertanian padi konvensional dilakukan secara manual. Analisis inventarisasi input budidaya padi dilakukan dengan menggunakan data primer meliputi input sumber daya dan operasional pertanian; data diperoleh dari catatan lapangan dan wawancara langsung kepada petani. Pertanian konvensional menggunakan bahan kimia pertanian seperti pestisida dan pupuk sintetis, insektisida, herbisida, dan fungisida seperti yang terlihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Inventori proses produksi padi

INPUT	JUMLAH
Benih	2 kg
Solar untuk traktor	3 L
Pupuk urea	22 kg
Pupuk NPK 16-16-16	10 kg
Pupuk NPK 15-15-15	20 kg
Insektisida	125 mL
Fungsida	125 mL
Herbisida	40 mL
Air untuk penyemprotan	210 mL

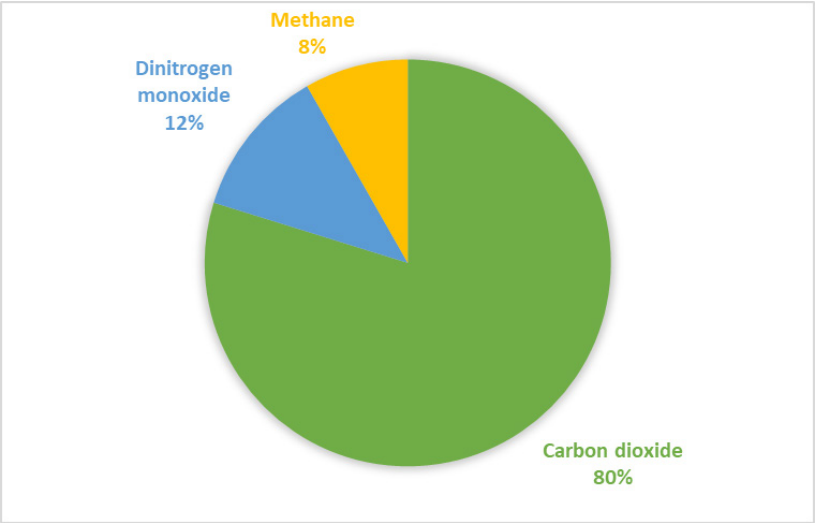
c. Penilaian Dampak Daur Hidup dan Interpretasi

Metode yang digunakan dalam penilaian dampak siklus hidup pada penelitian ini adalah CML-IA baseline. Dampak dievaluasi menggunakan SimaPro dengan database ecoinvent 3 yang melengkapi data lapangan dan data lokal lainnya. Kategori dampak yang dianalisis dipilih berdasarkan potensi dampak terkait dan konteks kebijakan antara lain seperti yang ditunjukkan Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Kategori dampak

Kategori Dampak	Satuan	Nilai
Abiotic depletion	kg Sb eq	0,0115
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	$1{,}03\times10^{4}$
Global warming (GWP100a)	kg CO_2 eq	708
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	$7{,}65\times10^{-5}$
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	536
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	334
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	$6{,}62\times10^{5}$
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	1,04
Photochemical oxidation	kg C_2H_4 eq	0,135
Acidification	kg SO_2 eq	3,53
Eutrophication	kg PO_4^{3-} eq	1,11

Proses pertanian padi berkontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca. Penggunaan pupuk dalam pertanian memiliki pengaruh terhadap lingkungan, karena nitrogen dalam pupuk berkontribusi terhadap emisi N_2O, nitrogen oksida (NOx), dan NH_3. Pupuk melepaskan N_2 karena proses nitrifikasi diikuti oleh denitrifikasi, yang diciptakan oleh interaksi mikroba dalam tanah dalam kondisi aerobik dan anaerobik (Amirahmadi *et al*., 2022). Gambar 3.35 menunjukkan gas rumah kaca yang berkontribusi tehadap pemanasan global yang diperoleh dari proses produksi 1 ton padi. Karbon dioksida adalah kotributor utama dengan presentase sebesar 80% dan kemudian diikuti nitrogen oksida dan metana.

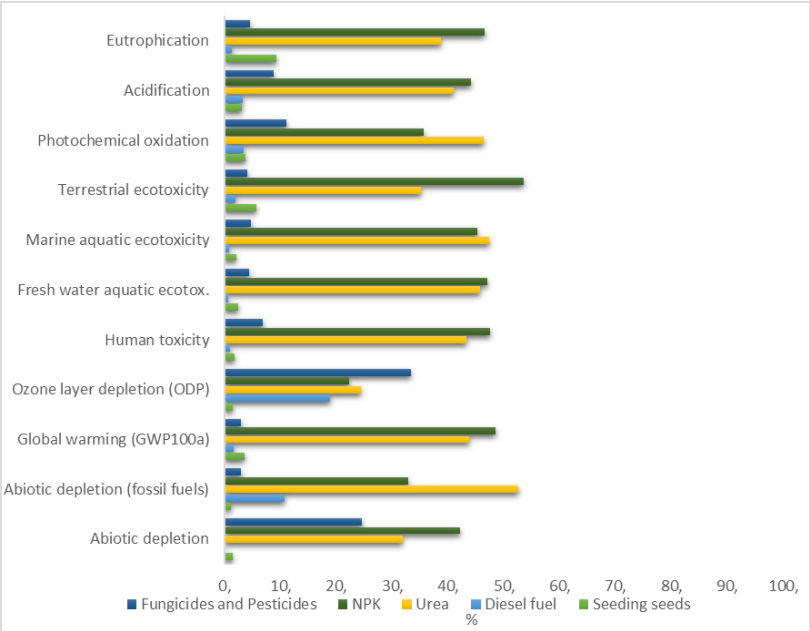


Gambar 4.35 Kontributor potensi pemanasan global

Salah satu stresor lingkungan terpenting yang menyebabkan patogenisitas adalah indeks respirasi anorganik, yang digambarkan sebagai pengaruh mineral pernapasan pada kesehatan manusia. Indeks respirasi anorganik dipengaruhi oleh operasi lapangan, penggunaan bahan bakar fosil, dan penggunaan pupuk nitrogen. Darzi-Naftchali dkk. (2022) menemukan bahwa pada indeks penyakit karsinogenik, pupuk urea memiliki dampak terbesar.

Dalam sistem tanam padi, aplikasi pupuk urea yang berlebihan dan efisiensi penggunaan nitrogen yang tidak memadai dapat memperburuk konsekuensi lingkungan yang negatif ini. Menurut Darzi-Naftchali *et al*. (2022), penggunaan bahan bakar fosil berbasis solar memiliki pengaruh terbesar terhadap potensi radiasi pengion, diikuti oleh penggunaan *triple superphosphate* dan pupuk urea. Mesin pertanian yang beroperasi dengan bahan bakar solar dapat memperparah penipisan lapisan ozon. Konsumsi herbisida butaklor juga merupakan sumber penipisan

ozon. Karena mengandung klorin, herbisida ini memiliki daya rusak yang tinggi dan dikategorikan sebagai bahaya bagi sumber daya air dan penipisan ozon.



Gambar 4.36 Dampak lingkungan proses produksi 1 ton padi

Gambar 4.36 menunjukkan semua kategori dampak lingkungan dari proses produksi padi. Secara umum, kontribusi dampak lingkungan terbesar disebabkan karena penggunaan pupuk selama proses pertanian, dimana pupuk yang digunakan adalah pupuk urea dan pupuk NPK.

Penugasan dan Studi Kasus

1. Pendahuluan

Pada bab ini bagian E (Membangun Model LCA dengan Simapro: Studi Kasus), Anda telah diberikan tutorial studi LCA mengenai proses produksi rangka sepeda berbahan aluminium menggunakan software **SimaPro**. Untuk memperdalam pemahaman dan keterampilan dalam melakukan analisis LCA, Anda akan melakukan studi lebih lanjut dengan membandingkan berbagai material yang digunakan dalam pembuatan rangka sepeda, yaitu **serat karbon, titanium, dan baja**, serta membandingkannya dengan aluminium. Hasil studi ini akan membantu menentukan material yang paling ramah lingkungan berdasarkan analisis siklus hidupnya.

2. Ketentuan
   a. Tugas ini dikerjakan secara individu.
   b. Pada tugas ini Anda diminta untuk menganalisis dan membandingkan dampak lingkungan dari proses produksi rangka sepeda yang dibuat dari empat jenis material: aluminium, serat karbon, titanium, dan baja.
   c. Gunakan software SimaPro untuk mengolah data input-output yang disediakan (Tabel 3.10 – Tabel 3.12).
   d. Susun hasil kerja Anda dalam bentuk laporan berisi analisis LCA dari keempat material dan rekomendasi material yang paling ramah lingkungan.

3. Langkah-Langkah Pelaksanaan
   a. Persiapan Data
      - Baca dan pahami kembali tutorial studi LCA pada rangka sepeda berbahan aluminium yang telah diberikan.

- Kumpulkan dan telaah data input-output yang telah disediakan untuk keempat material: aluminium, serat karbon, titanium, dan baja.

b. Pengolahan Data di SimaPro
   - Buka software SimaPro dan buat proyek baru untuk studi ini.
   - Masukkan data input-output untuk masing-masing material sesuai dengan pedoman yang telah diberikan.
   - Gunakan metode LCA yang sesuai (misalnya, ReCiPe atau CML) untuk menganalisis dampak lingkungan.

c. Analisis Hasil
   - Bandingkan hasil analisis LCA dari keempat material berdasarkan parameter lingkungan
   - Sajikan data dalam bentuk grafik atau tabel untuk mempermudah interpretasi.

d. Kesimpulan dan Rekomendasi
   - Tentukan material yang paling ramah lingkungan berdasarkan hasil analisis.
   - Jelaskan kelebihan dan kekurangan masing-masing material dalam konteks keberlanjutan.
   - Berikan rekomendasi berdasarkan hasil studi untuk pemilihan material yang optimal bagi industri manufaktur sepeda.

Tabel 4.10 Data Inventori untuk Produksi 1 kg Rangka Serat Karbon PAN

Data	Kategori SimaPro	Jumlah	Komentar
Input Material			
Acrylonitrile-butadi-ene-styrene copoly-mer {GLO}	Processes > Material > Chemicals > Organic > Market	2.25 kg	-
Dimethylacetamide {GLO}	Processes > Material > Chemicals > Organic > Market	0.0306 kg	-
Injection moulding {GLO}	Processes > Process-ing > Plastics > Market	1 kg	-
Input Proses			
Electricity, low volt-age {GLO}	Processes > Energy > Electricity country mix > Low voltage > Market	58 kWh	-
Heat, district or industrial, other than natural gas {GLO}	Processes > Energy > Heat > Others > Market	237.3 MJ	-
Output			
Carbon dioxide, fossil	Airborne emission	1.06 kg	-
Waste asphalt {RoW}	Waste treatment > Others > Market	0.22	-

Tabel 4.11 Data Inventori untuk Produksi 1.8 kg Rangka Baja

Data	Kategori SimaPro	Jumlah	Komentar
Input Material			
Chromium steel pipe {GLO}	Processes > Material > Metals > Ferro > Market	1.894 kg	5% kerugian produksi diperkirakan
Tap water {Europe without Switzerland}	Processes > Material > Water > Drinking water > Market	0.54 kg	-
Input Proses			
Powder coat, steel {GLO}	Processes > Processing > Metals > Coating > Market	0.45 m^2	-
Welding, arc, steel {GLO}	Processes > Processing > Metals > Welding > Market	0.9 m	-
Output			
Steel and iron (waste treatment) {GLO}	Waste treatment > Recycling > Transformation	0.094 kg	Untuk mencapai keseimbangan input/output (lapisan diabaikan)
Wastewater, average {Europe without Switzerland}	Waste treatment > Waste water Treatment > Market	0.54 1	Mengasumsikan semua input 0.54 kg perlu diolah dan airnya tercemar sedang

Tabel 4.12 Data Inventori untuk Produksi 1.36 kg Rangka Titanium

Data	Kategori SimaPro	Jumlah	Komentar
Input Material			
Titanium {GLO}	Processes > Material > Metals > Non-Ferro > Market	1.43 kg	5% kerugian produksi diperkirakan
Tap water {Europe without Switzerland}	Processes > Material > Water > Drinking water > Market	0.408 kg	-
Input Proses			
Powder coat, aluminium sheet {GLO}	Processes > Processing > Metals > Coating > Market	0.34 m^2	Menggunakan aluminium karena proses titanium tidak tersedia
Welding, arc, aluminium {GLO}	Processes > Processing > Metals > Welding > Market	0.68 m	-
Output			
Steel and iron (waste treatment) {GLO}	Waste treatment > Recycling > Transformation	0.07 kg	Baja dan besi (proses kosong ini) digunakan sebagai proxy untuk keseimbangan input/output (lapisan diabaikan)
Wastewater, average {Europe without Switzerland}	Waste treatment > Waste water Treatment > Market	0.408 1	Mengasumsikan semua input 0.408 kg perlu diolah dan airnya tercemar sedang

Referensi

Alyarahma, S., Sari, I. P., & Kurniawan, W. (2023). Environmental Impact Assessment of Steel Production in Indonesia : A Case Study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1203*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/1203/1/012044

Andersson, Ö., & Börjesson, P. (2021). The greenhouse gas emissions of an electrified vehicle combined with renewable fuels: Life cycle assessment and policy implications. *Applied Energy*, *289*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116621

Arzoumanidis, I., D'Eusanio, M., Raggi, A., & Petti, L. (2020). *Functional Unit Definition Criteria in Life Cycle Assessment and Social Life Cycle Assessment: A Discussion* (pp. 1–10). https://doi.org/10.1007/978-3-030-01508-4_1

Asman, A., Patandjengi, B., Haris Bahrun, A., Nur, M., Eny Dungga, N., & Adiansyah Syarifuddin, dan. (2022). Peningkatan Produktivitas Kedelai Di Kabupaten Bone Melalui Pendampingan Petani Kedelai Dan Introduksi Teknologi Pupuk Hayati. *Jurnal Dinamika Pengabdian*, *7*(2), 321–328.

Backes, J. G., Suer, J., Pauliks, N., Neugebauer, S., & Traverso, M. (2021). Life cycle assessment of an integrated steel mill using primary manufacturing data: Actual environmental profile. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(6). https://doi.org/10.3390/su13063443

Bassam, H., Lünnemann, P., Riedelsheimer, T., & Lindow, K. (2024). A Model-Based Methodology for Life Cycle Assessment from Cradle-to-Grave Early in Product Design. *Procedia CIRP*, *128*, 662–667. https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.07.058

Bjørn, A., Moltesen, A., Laurent, A., Owsianiak, M., Corona, A., Birkved, M., & Hauschild, M. Z. (2017). Life cycle inventory analysis. In *Life Cycle Assessment: Theory and Practice* (pp. 117–165). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_9

Böckin, D., & Tillman, A. M. (2019). Environmental assessment of additive manufacturing in the automotive industry. *Journal of Cleaner Production*, *226*, 977–987. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.086

Brunner, P. H. ., & Rechberger, Helmut. (2017). *Handbook of material flow analysis : for environmental, resource, and waste engineers*. Taylor & Francis, CRC Press.

BSI Standards Publication. (2018). *Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines*.

Campos, C., Laso, J., Cristóbal, J., Albertí, J., Bala, A., Fullana, M., Fullana-i-Palmer, P., Margallo, M., & Aldaco, R. (2022). Towards more sustainable tourism under a carbon footprint approach: The Camino Lebaniego case study. *Journal of Cleaner Production*, *369*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133222

Casals Miralles, C., Barioni, D., Mancini, M. S., Colón Jordà, J., Boy Roura, M., Ponsá Salas, S., Llenas Argelaguet, L., & Galli, A. (2023). The Footprint of tourism: a review of Water, Carbon, and Ecological Footprint applications to the tourism sector. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 422). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138568

Cencic, O., Wien, T. U., & Rechberger, H. (2008). J. Environ. Eng. Manage., 18(1), 3-7 (2008) Material Flow Analysis With Software STAN. In *J. Environ. Eng. Manage* (Vol. 18, Issue 1). https://www.researchgate.net/publication/284663142

Hélias, A., van der Werf, H. M. G., Soler, L. G., Aggeri, F., Dourmad, J. Y., Julia, C., Nabec, L., Pellerin, S., Ruffieux, B., & Trystram, G. (2022). Implementing environmental labelling of food products in France. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *27*(7), 926–931. https://doi.org/10.1007/s11367-022-02071-8

Herrero, C. C., Laso, J., Cristóbal, J., Fullana-i-Palmer, P., Albertí, J., Fullana, M., Herrero, Á., Margallo, M., & Aldaco, R. (2022). Tourism under a life cycle thinking approach: A review of perspectives and new challenges for the tourism sector in the last decades. In *Science of the Total Environment* (Vol. 845). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157261

Horne, R., Grant, T., & Verghese, K. (2009). *Life cycle assessment: Principles, Practice and Prospects*. CSIRO PUBLISHING.

Horsthuis, E., & Lutters, E. (2024). Deliberate Decisions in Product Design: An Approach Inspired by Life Cycle Assessment Techniques. *Procedia CIRP*, *128*, 543–548. https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.06.030

Jumakir, Endrizal, & Taufiq Abdullah. (2021). Respons Pemberian Pupuk Hayati terhadap Peningkatan Produktivitas Kedelai di Lahan Rawa Pasang Surut. *PANGAN*, *30*(1), 23–30.

Kaman Nainggolan, & Muchjidin Rachmat. (2014). Prospek Swasembada Kedelai Indonesia. *PANGAN*, *23*(1), 83–92.

Klöpffer, W., Mary, ·, Curran, A., Hauschild, M. Z., & Huijbregts Editors, M. A. J. (2015). *LCA Compendium-The Complete World of Life Cycle Assessment Series Editors: Life Cycle Impact Assessment*. http://www.springer.com/series/11776

Leal Filho, W., Ng, A. W., Sharifi, A., Janová, J., Özuyar, P. G., Hemani, C., Heyes, G., Njau, D., & Rampasso, I. (2023). Global tourism, climate change and energy sustainability: assessing carbon reduction mitigating measures from the aviation industry. In *Sustainability Science* (Vol. 18, Issue 2, pp. 983–996). Springer. https://doi.org/10.1007/s11625-022-01207-x

Mejia, A., Harwatt, H., Jaceldo-Siegl, K., Sranacharoenpong, K., Soret, S., & Sabaté, J. (2018). Greenhouse Gas Emissions Generated by Tofu Production: A Case Study. *Journal of Hunger and Environmental Nutrition*, *13*(1), 131–142. https://doi.org/10.1080/19320248.2017.1315323

Nusantara, A. D., Bertham, Y. H., Junedi, A., Pujiwati, H., & Hartal, H. (2019). Pemanfaatan Mikroba Untuk Meningkatkan Pertumbuhan Dan Hasil Kedelai Di Tanah Pesisir. *Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian Indonesia*, *21*(1), 37–43. https://doi.org/10.31186/jipi.21.1.37-43

Permata Sari, I., Liling Sia, F., Nur Habyba, A., Kurniawan, W., & Teknik Industri, J. (2022). *Penilaian Dampak Lingkungan Proses Produksi Tahu di Jakarta Barat Menggunakan Metode Life Cycle Assessment Environmental Impact Assessment*

of Tofu Production Process in West Jakarta using Life Cycle Asessment Method. *18*(3).

PRé Sustainability. (2023). *https://support.simapro.com/s/article/SimaPro-Tutorial*.

Renzulli, P. A., Notarnicola, B., Tassielli, G., Arcese, G., & Di Capua, R. (2016). Life cycle assessment of steel produced in an Italian integrated steel mill. *Sustainability (Switzerland)*, *8*(8). https://doi.org/10.3390/su8080719

Roesch, A., Douziech, M., Mann, S., Lansche, J., & Gaillard, G. (2025). Consequences of the use or absence of life cycle assessment in novel environmental assessment methods and food ecolabels. *Cleaner Production Letters*, *8*. https://doi.org/10.1016/j.clpl.2024.100087

Sari, I. P., Kuniawan, W., & Sia, F. L. (2021). Environmental impact of tofu production in West Jakarta using a life cycle assessment approach. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *896*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/896/1/012050

Sari, I. P., Utami, I. W., Safitri, D. M., Adisuwiryo, S., & Farhan, A. (2024). Environmental impact assessment of rice production in Indonesia: A case study from Jatibarang, West Java. Songklanakarin Journal of Science and Technology, 46(6), 531–538.

Sun, Y. Y., & Drakeman, D. (2020). Measuring the carbon footprint of wine tourism and cellar door sales. *Journal of Cleaner Production*, *266*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121937

Xiong, J., Zhu, J., He, Y., Ren, S., Huang, W., & Lu, F. (2020). The application of life cycle assessment for the optimization of pipe materials of building water supply and drainage system. *Sustainable Cities and Society*, *60*(April), 102267. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102267

BAB 5
STANDAR MANAJEMEN LINGKUNGAN ISO 14000

Rencana Pembelajaran

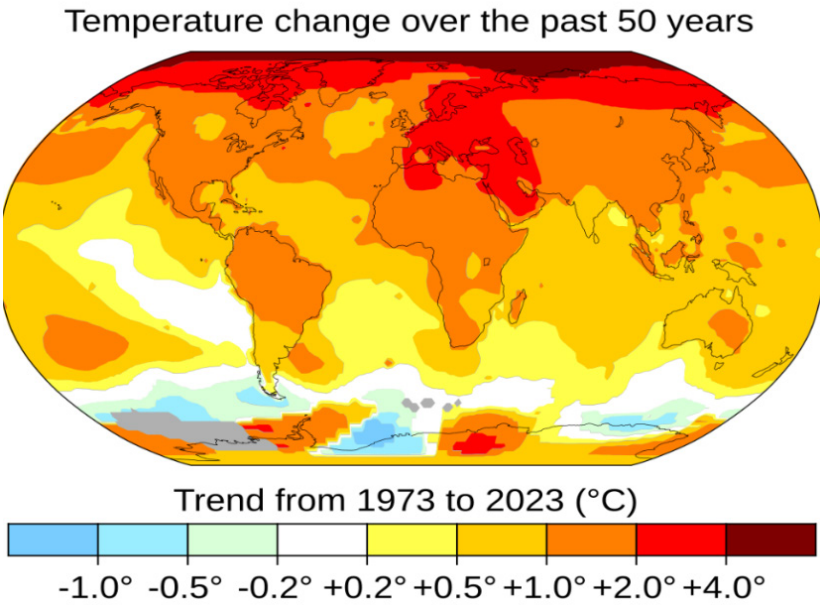
Tujuan	Mahasiswa mampu menguasai prinsip dan issue perkembangan ISO 14000 dan mengkomunikasikannya secara tulis dan lisan (CPMK1-Pc; CPMK2-Pd)
Capaian Pembelajaran	CPMK1: Mampu menguasai prinsip dan masalah terkini dalam ekonomi, sosial, ekologi secara umum (Pc). CPMK2: Mampu menguasai pengetahuan tentang teknik komunikasi dan perkembangan teknologi terbaru dan terkini dalam bidang ekonomi, sosial, ekologi secara umum (Pd).
Sub Pembahasan	1. Permasalahan lingkungan dunia 2. Organisasi ISO 3. Perbedaan ISO 14000 dan ISO 14001 4. ISO 14000 dan Siklus Plan, Do, Check, Action (PDCA) 5. Perbandingan Klausal ISO 14001:2004 dan 2015 6. Tahapan Penerapan ISO 14001:2015 7. Keterkaitan ISO 140001 dengan *Life Cycle Assessment*

5.1 Permasalahan Lingkungan Dunia

Latar belakang terbitnya dan urgensi penerapan standar IS0 14001 bagi industri, dipengaruhi permasalahan lingkungan yang semakin mengkhawatirkan. Beberapa permasalahan lingkungan di dunia saat ini seperti pemanasanan global; penipisan ozon; masalah produk Bahan Berbayaya dan Beracun (B3); hujan asam; serta kerusakan keanekaragaman hayati.

5.1.1 Pemanasan Global

Pemanasan global adalah proses meningkatnya suhu rata-rata udara, atmosfer, laut, dan daratan bumi. Periode perubahan iklim juga pernah terjadi di masa lalu, namun perubahan iklim yang terjadi pada saat ini jauh lebih cepat dan bukanlah dikarenakan oleh sebab-sebab alamiah. Penyebab utama yang menimbulkan pemanasan iklim pada saat ini ialah pencemaran gas rumah kaca, terutama karbon dioksida (CO_2) dan metana. Pembakaran bahan bakar fosil seperti batu bara, bensin, dan solar untuk produksi energi ialah pemasok terbesar dari pencemaran ini. Beberapa faktor tambahan lainnya ialah seperti sejumlah praktik pertanian tertentu, proses industri, dan penggundulan hutan. Gas rumah kaca (karena sifatnya transparan) dapat ditembus oleh sinar matahari sehingga memanaskan permukaan Bumi. Namun ketika gelombang *ultraviolet* dari sinar matahari diserap lalu dipancarkan kembali oleh permukaan bumi menjadi radiasi inframerah, gas-gas rumah kaca tersebut menyerapnya, memerangkap panas di sekitar permukaan bumi dan menyebabkan pemanasan global.



Gambar 5.1 Perbandingan suhu permukaan rata-rata selama periode 2011 sampai 2021 dengan suhu rata-rata dari 1956 sampai 1976

Di Indonesia, perkembangan agroindustri kelapa sawit sangat menarik untuk dicermati. Di satu pihak perkembangan ini membawa pengaruh positif terutama pada meningkatnya penghasilan petani kelapa sawit dan pengusaha yang terlibat dalam agroindustri ini, tetapi di pihak lain banyaknya masalah-masalah negatif yang muncul seperti masalah sengketa tanah perkebunan kelapa sawit serta masalah kerusakan lingkungan akibat pembukaan hutan untuk perkebunan kelapa sawit hingga isu pengaruhnya terhadap pemanasan global.

5.1.2 Penipisan Ozon

Penipisan ozon menggambarkan dua fenomena berbeda namun saling terkait yang diamati sejak akhir 1970-an. Penurunan jumlah total ozon di stratosfer Bumi (lapisan ozon) sekitar 4%,

serta penurunan ozon stratosferik yang jauh lebih besar di sekitar daerah kutub bumi pada musim semi. Fenomena yang terakhir disebut sebagai lubang ozon. Selain fenomena stratosfer terkenal ini, terdapat pula peristiwa penipisan ozon troposferik kutub pada musim semi.

Penyebab utama penipisan ozon dan lubang ozon adalah berasal dari bahan-bahan kimia industri, terutama zat pendingin, pelarut, propelan, dan agen peniup-busa halokarbon (klorofluorokarbon (CFC), HCFC, halon), yang dirujuk sebagai zat penipis ozon (ozone-depleting substances; ODS). Senyawa ini dibawa oleh angin ke stratosfer setelah diemisikan dari permukaan. Setelah zat ini berada di stratosfer, mereka melepaskan atom halogen melalui fotodisosiasi, yang mengatalisis pemecahan ozon (O_3) menjadi oksigen (O_2). Kedua jenis penipisan ozon ini, terjadi peningkatan ketika emisi halokarbon yang meningkat.

5.1.3 Masalah Produk Bahan Berbahaya dan Beracun (B3)

Peraturan Pemerintah Nomor 101 tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun, mendefinisikan Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) sebagai zat, energen, dan/atau komponen lain yang karena sifat, konsentrasi, dan/atau jumlahnya, baik secara langsung maupun tidak langsung, dapat mencemarkan dan/atau merusak lingkungan hidup, dan/atau membahayakan lingkungan hidup, kesehatan, serta kelangsungan hidup manusia dan makhluk hidup lain.

Bahan-bahan tersebut selanjutnya dapat diklasifikasikan dalam kelompok-kelompok bahan yang bersifat:

- ✓ Mudah meledak (*explosive*);
- ✓ Pengoksidasi (*oxidizing*);
- ✓ Amat sangat mudah terbakar (*extremely*
- ✓ Beracun (*moderately toxic*);
- ✓ Berbahaya (*harmful*);
- ✓ Korosif (*corrosive*);
- ✓ Bersifat iritasi (*irritant*);
- ✓ Berbahaya bagi lingkungan

flammable);

- ✓ Amat mudah terbakar (*highly flammable*);
- ✓ Mudah terbakar (*flammable*);
- ✓ Amat sangat beracun (*extremely toxic*);
- ✓ Sangat beracun (*highly toxic*);
- (*dangerous to the environment*);
- ✓ Karsinogenik (*carcinogenic*);
- ✓ Teratogenik (*teratogenic*); serta
- ✓ Mutagenik (*mutagenic*).

5.1.4 Hujan Asam

Hujan asam merupakan hujan dengan nilai pH di bawah 5,6. Hujan secara alami bersifat asam (pH di bawah 6) karena karbondioksida (CO_2) di udara terlarut dengan air hujan sehingga terbentuk asam lemah. Jenis asam dalam hujan ini sangat bermanfaat karena membantu melarutkan mineral dalam tanah yang dibutuhkan oleh tumbuhan dan binatang.

Hujan asam disebabkan oleh belerang (sulfur) yang merupakan pengotor dalam bahan bakar fosil serta nitrogen di udara yang bereaksi dengan oksigen membentuk sulfur dioksida dan nitrogen oksida. Zat-zat ini berdifusi ke atmosfer dan bereaksi dengan air untuk membentuk asam sulfat dan asam nitrat yang mudah larut sehingga jatuh bersama air hujan. Air hujan yang asam tersebut akan meningkatkan kadar keasaman tanah dan air permukaan yang terbukti berbahaya bagi kehidupan ikan dan tanaman.Usaha untuk mengatasi hal ini saat ini sedang gencar dilaksanakan.

5.2 Organisasi ISO

"ISO" adalah nama Organisasi IOS dari Kata "ISOS" artinya "Sama". IOS (*The International Organization for Standardization*) adalah Federasi Internasional Badan-Badan Standard atau disebut

anggota Badan ISO (*ISO Member Bodies*). Jadi, meski yang betul itu IOS tapi untuk mempermudah dalam komunikasi masyarakat dunia pelafalannya dengan ISO.

Kantor pusat ISO terletak di Kota Jenewa (Swiss) dan berdiri tanggal 23 Februari 1947. ISO beranggotakan sebagai berikut:

1. Badan standardisai dari 170 negara, Indonesia diwakili oleh Badan Standardisasi Nasional (BSN).
2. Lembaga standardisasi nonpemerintah dari 27 negara.
3. Organisasi atau ahli terkait sistem standardisasi dari 13 negara.

Sampai tahun 2025, organisasi ISO telah menghasilkan 32.000 standar dan telah berhasil diterapkan di 327 perusahaan dan organisasi di 203 negara. Standar ISO pertama yang sukses diterapkan adalah standar ISO 9001 tentang sistem manajemen mutu. Dikatakan sukses, artinya standar ISO 9001 tersebut dapat diterapkan dengan baik di perusahaaan atau organisasi yang menerapkannya dan membawa kemajuan bagi perusahaan atau organisasi baik keuntungan finansial maupun peruhaban sikap dan perilaku ke arah yang lebih baik un]tuk kemajuan perusahaan atau organisasi. Oleh karena itu, dengan melihat keberhasilan penerapan ISO 9001, maka organisasi ISO selanjutnya memperkenalkan standar manajemen lingkungan ISO 14001.

ISO 14000

ISO 14000 adalah kumpulan standar dalam bidang lingkungan hidup. Standar-standar ISO 14000 terkait dengan cara sebuah perusahaan atau organisasi untuk mencegah kerusakan lingkungan seminimal mungkin akibat aktivitasnya. Perusahaan juga berkewajiban memantau dan meningkatkan aktivitas kerja lingkungannya.

5.3 Perbedaan ISO 14000 dan ISO 14001

ISO 14001 merupakan seri dari ISO 14000. ISO 14001 adalah sertifikasi standar internasional yang membantu mengendalikan sistem manajemen lingkungan bagi perusahaan. Tujuan penerapan sertifikasi ini adalah untuk menghindari risiko pencemaran lingkungan hidup oleh perusahaan.

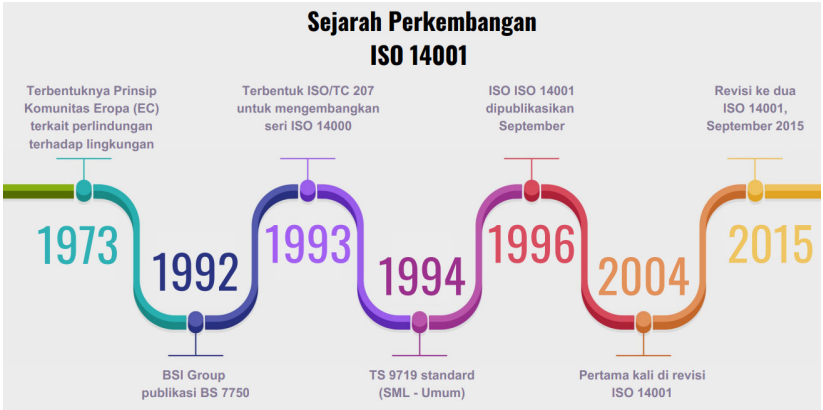
Tabel 5.1 Seri Iso 14000

ISO Seri 14001	: Sistem Manajemen Lingkungan (SML)
ISO seri 14010-14015	: Audit Lingkungan
ISO seri 14020-14024	: Label Lingkungan
ISO seri 14031	: Evaluasi Kinerja Lingkungan
ISO seri 14040-14044	: Assesment/Analisis Berkelanjutan
ISO seri 14060	: Aspek Lingkungan dari Produk

ISO 14001 tentang Sistem Manajemen Lingkungan ini adalah seri yang paling banyak dikenal karena sertifikasi sebenarnya adalah sertifikasi untuk ISO 14001 ini.

Perkembangan ISO 14001

Perkembangan ISO 14001 dari mulai ide pentingnya standar manajemen lingkungan sampai revisi standar ini dapat dilihat pada gambar berikut ini.

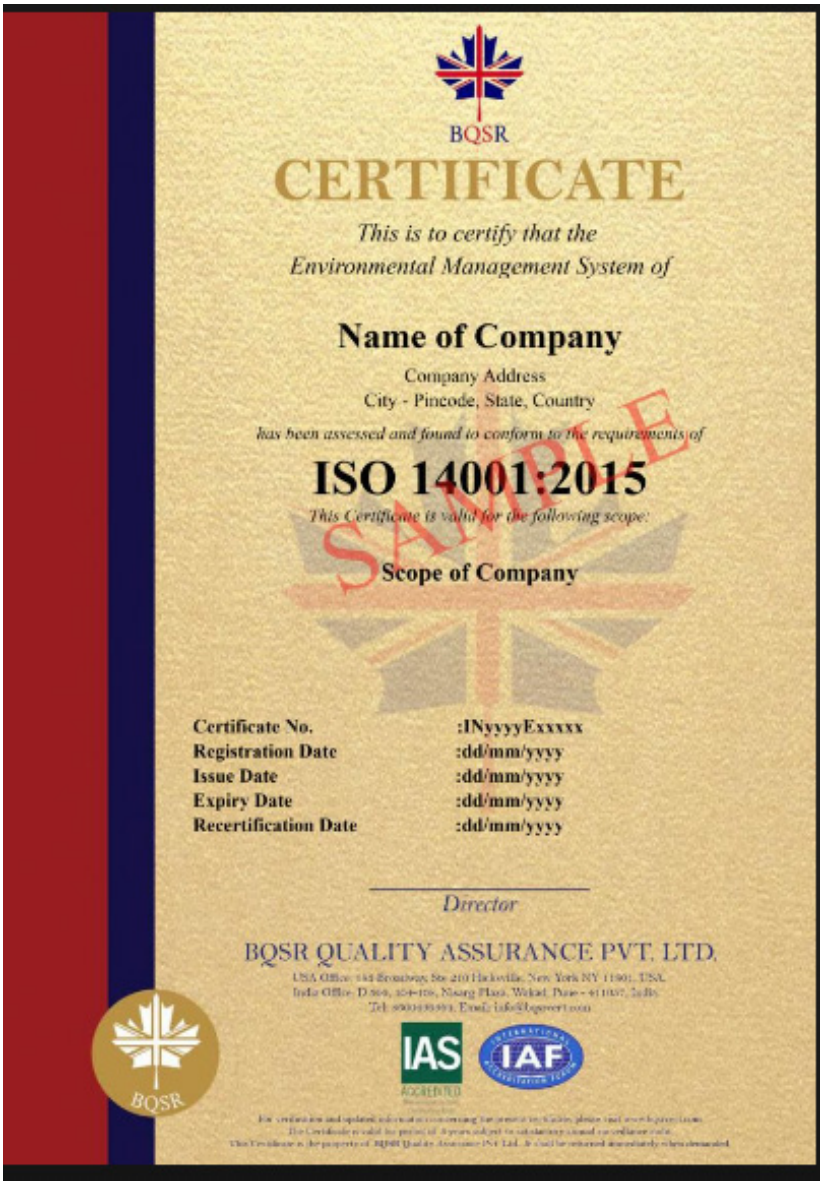


Gambar 5.2 Perkembangan Sejarah ISO 14001

Berdasarkan gambar tersebut, dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Pada tahun 1973, terbentuknya Komunitas Eropa (EC) terkait perlindungan terhadap lingkungan.
- Tahun 1992, British Standards Institution (BSI) merupakan badan standar nasional Inggris, yang menerbitkan standar teknis untuk berbagai produk dan layanan, melayani sertifikasi dan layanan standar untuk bisnis. Pada tahun 1992, BSI menerbitkan standar pengelolaan lingkungan (*environmental management standard*) pertama di dunia yakni BS 7750. Kemudian dilanjutkan ke penerbitan standar pengelolaan lingkungan internasional pertama yakni ISO 14001, pada tahun 1996.ISO 14001 adalah standar internasional mengenai Sistem Manajemen Lingkungan (SML) atau *Environment Management System* (EMS) yang diteritkan lembaga ISO.
- Pada tahun 1993, terbentuk ISO/TS 207.

  ISO/TC 207 singkatan dari *International Organization for Standardization Technical Committee* 207. ISO/TS 207 merupakan organisasi internasional yang fokus pada standarisasi di bidang lingkungan. ISO/TC 207 bertanggung jawab untuk mengembangkan dan memelihara standar internasional yang berkaitan dengan manajemen lingkungan, kinerja lingkungan, dan aspek-aspek lain terkait lingkungan.
- ISO/TC 207 berperan penting dalam mengembangkan standar lingkungan internasional yang relevan dan efektif. Dengan adanya standar ini, dunia dapat bekerja sama secara lebih efisien untuk melindungi lingkungan, mengelola risiko, dan mempromosikan keinginan dalam konteks global. Standarisasi lingkungan tidak hanya memberikan panduan praktis, tetapi juga mendukung upaya untuk mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan secara menyeluruh.



BQSR

CERTIFICATE

This is to certify that the
Environmental Management System of

Name of Company

Company Address
City - Pincode, State, Country

has been assessed and found to conform to the requirements of

ISO 14001:2015

This Certificate is valid for the following scope:

Scope of Company

SAMPLE

Certificate No.	**:INyyyyExxxxx**
Registration Date	**:dd/mm/yyyy**
Issue Date	**:dd/mm/yyyy**
Expiry Date	**:dd/mm/yyyy**
Recertification Date	**:dd/mm/yyyy**

Director

BQSR QUALITY ASSURANCE PVT. LTD.

BQSR

IAS ACCREDITED

IAF

Gambar 5.3 Sampel Sertifikat ISO 14001

Manfaat penerapan ISO 14000 antara lain:

1. Meningkatkan Citra Organisasi

   Perusahaan yang telah menerapkan ISO 14000 berarti perusahaan tersebut telah berhasil menerapkan prinsip-prinsip sistem manajemen lingkungan dimana produk atau jasa yang dihasilkan tidak mencemari lingkungan baik dari proses hulu maupun ke hilir proses produksinya sehingga dapat meningkatkan citra organisasi yang telah berhasil menerapkan sistem manajemen lingkungan secara holistik.

2. Meningkatkan Kinerja Lingkungan Organisasi

   Salah satu prinsip penerapan ISO 14000, adalah keinginan organisasi untuk perbaikan kinerja lingkungan organisasi. *Environmental performance* atau kinerja lingkungan adalah upaya keras perusahaan dalam mengimplementasikan lingkungan yang baik (*green*), dengan upaya monitoring aspek-aspek lingkungan seperti kebijakan lingkungan, sasaran lingkungan dan target lingkungan. *Environmental performance* berperan aktif dari perusahaan untuk melestarikan lingkungan dengan melaksanakan aktivitas dan menggunakan bahan-bahan yang tidak merusak lingkungan.

3. Meningkatkan Penaatan terhadap Ketentuan Peraturan Perundang-Undangan

   Organisasi yang ingin mendapatkan sertifikasi ISO 14001, wajib telah menaati seluruh ketentuan perindangan yang berlaku. Perusahaan dianggap memenuhi kriteria ini jika seluruh aktivitasnya sudah dinaungi dalam dokumen pengelolaan lingkungan baik berupa dokumen Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL), Dokumen Pengelolaan dan Pemantauan Kualitas Lingkungan (UKL/UPL), atau dokumen pengelolaan lain yang relevan. Selanjutnya dilakukan penilaian terhadap ketaatan perusahaan dalam melakukan pelaporan terhadap pengelolaan lingkungan yang dipersyaratkan dalam AMDAL

dan UKL/UPL.

4. Meningkatkan Daya Saing

   Organisasi dengan upaya maksimal untuk efisiensi sumber daya maka perusahaan akan dapat mengurangi biaya operasional dan mengurangi secara nyata dampak pada lingkungan. Upaya keras ini tidak hanya untuk memenuhi berbagai peraturan perundang-undangan tentang lingkungan, tetapi juga meningkatkan daya saing organisasi.

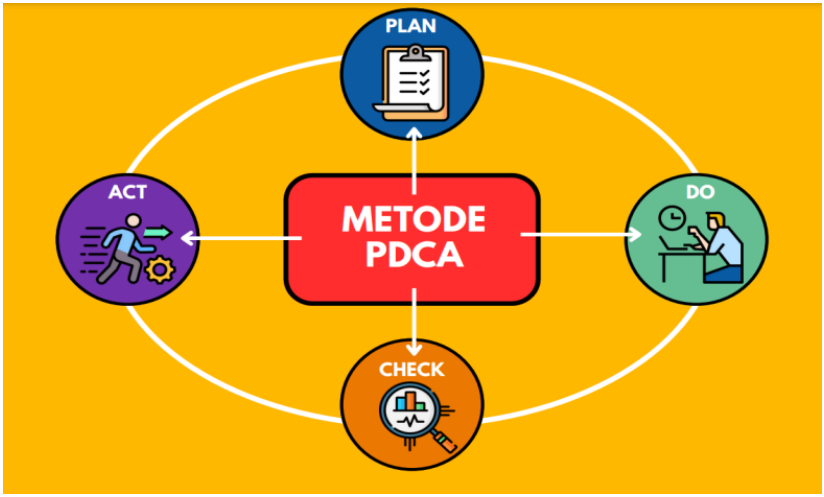
5. Meningkatkan Komunikasi Internal dan Eksternal Organisasi

   Organisasi yang ingin meraih ISO 14000 dan mempertahankan raihan sertifikat tersebut, harus mempunyai sistem komunikasi internal dan eksternal yang baik. Komunikasi internal artinya, organisasi mampu memproses komunikasi yang terjadi dalam perusahaan. Komunikasi internal terdiri dari membangun motivasi, stimulasi ide, dan pencapaian dari target bersama dalam hal ini dlam rangka organisasi meraih dan mempertahankan setifikasi ISO 14000. Komunikasi eksternal sangat penting bagi perusahaan untuk melakukan pertukaran informasi dengan pihak di luar perusahaan, seperti konsumen, pemerintah, masyarakat umum, dan media massa untuk tercapainya tujuan implementasi prinsip-

prinsip SML.

5.4 ISO 14000 dan Siklus Plan, Do, Check, Action (PDCA)

Semua standar ISO baik ISO 9000, 14000 dan yang lainnya memakai prinsip *Plan, Do, Check, Action* (PDCA). PDCA adalah suatu proses pemecahan masalah empat langkah iteratif yang umum digunakan dalam pengendalian kualitas.



Gambar 5.4 Siklus PDCA

Metode ini dikenalkan oleh W. Edwards Deming, salah seorang tokoh pengendalian kualitas modern, oleh karena itu dinamakan Deming. Deming terinspirasi dari siklus Shewhart, dari nama Walter A. Shewhart. Belakanga. Fokus utama dari Siklus Deming adalah kestabilan proses perbaikan terus-menerus siklus berkelanjutan (*continuous improvement*).

Oleh karena itu, ISO 14000 mengikuti prinsip PDCA ini difokuskan menjadi enam prinsip dasar EMS, yaitu:

1. Kebijakan Lingkungan

   Kebijakan lingkungan wajib terdokumentasi dan dikomunikasikan kepada pihak internal (semua karyawan) dan pihak eksternal. Selain itu komitmen terhadap perbaikan berkelanjutan, pencegahan pencemaran, dan patuh pada peraturan serta menjadi kerangka kerja bagi penetapan tujuan dan sasaran.

2. Perencanaan

   Perencanaan dalam ISO 14000 terdiri dari kemampuan identifikasi aspek lingkungan dari kegiatan organisasi, mengetahui semua perundang-undangan yang berkaitan dengan lingkungan, serta adanya kebijakan yang jelas untuk perbaikan sistem manajemen lingkungan organisasi.

3. Implementasi dan Operasi

   Implementasi dan operasi meliputi pembuatan definisi pekerjaan yang jelas, sistem pelatihan sesuai standar, memastikan adanya komunikasi internal dan eksternal, adanya prosedur pengendalian operasi dan prosedur tindakan darurat. Semua hal dalam kaitannya dengan implementasi dan operasi wajib terdokumentasi dan memiliki sistem prosedur pengendalian dokumen yang baik.

4. Pemeriksaan dan Tindakan Perbaikan

   Pemeriksaaan dan tindakan penrbaikan meliputi sistem prosedur untuk kegiatan monitoring dan dapat mengukur keberhasilan dari kegiatan dan operasi, memiliki prosedur yang standar untuk situasi ketidaksesuaian, serta adanya prosedur pemeliharaan catatan spesifik dan prosedur audit kenerja sistem manajemen lingkungan.

5. Tinjauan Ulang Manajemen

   Tinjauan ulang manajemen berarti adanya kemampuan monitoring dan evaluasi secara periodik sistem manajemen lingkungan keseluruhan agar sesuai dengan sistem manajemen

lingkungan yang ditetapkan dan tanggap terhadap perubahan yang terjadi.

6. Penyempurnaan Terus Menerus

   Prinsip utama dari siklus Deming adalah sistem manajemen perbaikan terus menerus (*continuous improvement*), hal ini sesuai gambar siklus Deming yang berupa siklus perbaikan. Jika suatu organisasi sudah mempunyai visi, misi, dan kebijakan mutu lingkungan yang jelas, fokus dan terarah, maka perbaikan sekecil apapun (asal konsisten) merupakan hal yang sangat penting untuk kemajuan setiap organisasi.

Perubahan seri ISO 14001 ke standar 14001:2015 sangat dipengaruhi oleh standar ISO 9001:2018. Hal ini dapat dilihat antara lain:

1. Kelompok klausul menjadi 7 klausul dari 5 klausul versi ISO 9001:2008.
2. Jumlah sub klausul 64 dari 47 klausul versi ISO 9001:2008.
3. Penambahan 13 sub klausul, perubahan nama sub klausul dan penghilangan sub klausul.
4. Penegasan dan penjabaran dari sub klausul 9001:2008.
5. Pergeseran tempat sub klausul 9001:2008 pada sub kalusul 2015.

Makna bahwa ISO 14001:2015 sangat dipengaruhi oleh ISO 9001:2008, adalah sistem manajemen lingkungan (SML) jika ingin beradaptasi sesuai keadaan lingkungan berkelanjutan perlu didukung oleh suatu sistem manajemen mutu yang handal dan modern sehingga perusahaan dapat menghasilkan produk yang ramah lingkungan dengan sistem manajemen mutu sesuai standar internasional.

5.5 Perbandingan Klausal ISO 14001:2004 dan 2015

Sebelum melakukan perbandingan, ada beberapa hal mendasar yang perlu diperhatikan, yaitu pentingnya penguasaan manajemen bisnis yang baik dan pemahaman yang baik tentang organisasi bisnis, sehingga dapat menguntungkan dan berkelanjutan. Pada ISO 14001:2004, masalah keberlangungan organisasi tidak fokus diperhatikan. Hal ini menjadi kekhawatiran jika ada organisasi yang sudah mendapat sertifikasi ISO 14001 tetapi tidak menguntungkan secara bisnis dan tidak dapat melangsungkan keberlanjutan organisasinya bahkan organisasi bengkrut. Dengan adanya keharusan pemahaman akan proses bisnis yang baik maka pencapaian standar ISO 14001 diharapkan organisasi dapat terus berkarya nyata dengan memperhatikan sistem manajemen lingkungan.

Hal penting lainnya adalah organisasi perlu menerapkan manajemen resiko yang efektif agar suatu organisasi dapat terus berkelanjutan. Manajemen risiko sendiri merupakan suatu pendekatan terstruktur atau metodologi dalam mengelola ketidakpastian yang berkaitan dengan ancaman; suatu rangkaian aktivitas manusia termasuk: penilaian risiko, pengembangan strategi untuk mengelolanya dan mitigasi risiko dengan menggunakan pemberdayaan atau pengelolaan sumberdaya. Strategi yang dapat diambil antara lain adalah memindahkan risiko kepada pihak lain, menghindari risiko, mengurangi efek negatif risiko, dan menampung sebagian atau semua konsekuensi risiko tertentu.

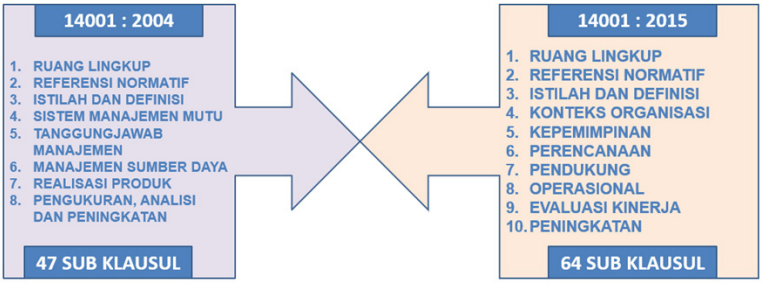
Tabel 5.5 Perbandingan ISO 14001:2015 dan ISO 14001:2004

ISO 14001:2015		ISO 14001:2004	
Clause title	**Clause number**	**Clause number**	**Clause title**
Introduction	0	0	Introduction
Scope	1	1	Scope
Normative references	2	2	Normative references
Terms and definitions	3	3	Terms and definitions
Context of the organization (title only)	4		
		4	Environmental management system requirements (title only)
Understanding the organization and its context	4.1		
Understanding the needs and expectations of interested parties	4.2		
Determining the scope of the environmental management system	4.3	4.1	General requirements
Environmental management system	4.4	4.1	General requirements
Leadership (title only)	5		
Leadership and commitment	5.1		
Environmental policy	5.2	4.2	Environmental policy
Organizational roles, responsibilities and authorities	5.3	4.4.1	Resources, roles, responsibility and authority
Planning (title only)	6	4.3	Planning (title only)
Actions to address risks and opportunities (title only)	6.1		
General	6.1.1		
Environmental aspects	6.1.2	4.3.1	Environmental aspects
Compliance obligations	6.1.3	4.3.2	Legal and other requirements

ISO 14001:2015		ISO 14001:2004	
Clause title	**Clause number**	**Clause number**	**Clause title**
Planning action	6.1.4		
Environmental objectives and planning to achieve them (title only)	6.2	4.3.3	Objectives, targets and programme(s)
Environmental objectives	6.2.1		
Planning actions to achieve environmental objectives	6.2.2		
Support (title only)	7	4.4	Implementation and operation (title only)
Resources	7.1	4.4.1	Resources, roles, responsibility and authority
Competence	7.2	4.4.2	Competence, training and awareness
Awareness	7.3		
Communication (title only)	7.4	4.4.3	Communication
General	7.4.1		
Internal communication	7.4.2		
External communication	7.4.3		
Documented information (title only)	7.5	4.4.4	Documentation
General	7.5.1		
Creating and updating	7.5.2	4.4.5	Control of documents
		4.5.4	Control of records
Control of documented information	7.5.3	4.4.5	Control of documents
		4.5.4	Control of records
Operation (title only)	8	4.4	Implementation and operation (title only)
Operational planning and control	8.1	4.4.6	Operational control
Emergency preparedness and response	8.2	4.4.7	Emergency preparedness and response
Performance evaluation (title only)	9	4.5	Checking (title only)
Monitoring, measurement, analysis and evaluation (title only)	9.1	4.5.1	Monitoring and measurement
General	9.1.1		

ISO 14001:2015		ISO 14001:2004	
Clause title	Clause number	Clause number	Clause title
Evaluation of compliance	9.1.2	4.5.2	Evaluation of compliance
Internal audit (title only)	9.2	4.5.5	Internal audit
General	9.2.1		
Internal audit programme	9.2.2		
Management review	9.3	4.6	Management review
Improvement (title only)	10		
General	10.1		
Nonconformity and corrective action	10.2	4.5.3	Nonconformity, corrective action and preventive action
Continual improvement	10.3		
Guidance on the use of this International Standard	Annex A	Annex A	Guidance on the use of this International Standard
Correspondence between ISO 14001:2015 and ISO 14001:2004	Annex B		
		Annex B	Correspondence between ISO 14001:2004 and ISO 9001:2000
Bibliography			Bibliography
Alphabetical index of terms	Index		

Berdasarkan Tabel 5.2 dapat disimpulkan perbandingan ISO 140001:2014 dan 2004



Gambar 5.5 Perbandingan Klausul 14001: 2015 dan 2004

5.6 Tahapan Penerapan ISO 14001:2015

Penerapan ISO 14001:2015 memerlukan tekad kuat dan konsisten dalam proses pencapaian pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan dan terstruktur. Sistem Manajemen Lingkungan (SML) merupakan panduan bagi organisasi untuk mencegah dan mengendalikan dampak lingkungan. Keterlibatan semua pihak terkait, mulai dari manajemen puncak hingga karyawan di semua level wajib untuk ikut serta dalam fokus pencapaian sertifikasi ISO 14001 ini. Berikut adalah tahapan penerapan ISO 14001:2015.

Gambar 5.6 Tahapan Penerapan ISO 14001;2015

Berikut penjelasan dari gambar:

- Tahap 1 Komitmen dan Perencanaan

Komitmen manajemen puncak sangat penting untuk kemajuan suatu organisasi atau industri yang ditunjukkan dengan

pembuatan kebijakan lingkungan yang jelas, terarah dan dan diukur.

Contoh: pengurangan emisi gas rumah kaca sebesar 7% dalam 5 tahun.

- Tahap 2: Penilaian Resiko dan Peluang

Tahap terpenting dari penilaian risiko dan peluang adalah kemampuan mengidentifikasi risiko dan peluang yang terkait dengan dampak lingkungan. Setelah melakukan identifikasi, langkah selanjutnya melakukan kegiatan analisis risiko dan menetapkan kontrol yang ketat.

Contoh: perusahaan menagadakan analisis risiko terhadap kemungkinan pencemaran hasil dari produksi UKM industri tape. Maka, kontrol yang dilakukan adalah kontrol berupa teknologi pengolahan limbah ramah lingkungan.

- Tahap 3: Pengembangan dan Implementasi Sistem

Keberhasilan penerapan Sistem Manjemen Lingkungan (SML) sangat didukung oleh pembuatan, penerapan berbagai prosedur, instruksi kerja, dan sistem dokumentasi yang handal agar pengelolaan aspek dan dampak lingkungan dapat mencapat target yang diiginkan.

- Tahap 4: Pelatihan dan Komunikasi

Kegiatan pelatihan kepada karyawan tentang SML harus sesuai dengan standar kegiatan pelatihan agar tujuan dari pelatihan tercapai. Misalnya instrukturnya harus yang sudah bersertifikat baik sebagai pelatih maupun mengetahui segala prosedur dan kebijakan tentang SML. Pelatihan dimulai dari sosialisasi hingga memastikan bahwa semua karyawan memahami arah dan tujuan perusahaan menerapkan SML ini.

- Tahap 5: Pemantauan dan Pengukuran

Pemantauan dan pengukuran merupakan kegiatan yang penting untuk mengetahui sejauh mana suatu kegiatan berhasil

atau tidak sesuai tujuan yang ditetapkan. Penerapan metode sistem pemantauan dan pengukuran kinerja lingkungan, serta mengumpulkan data yang relevan dilakukan oleh karyawan yang sudah mengikuti pelatihan dan bersertifikat.

- Tahap 6: Peninjauan dan Peningkatan

Tahap peninjauan dibagi dua (2) kegiatan yaitu internal dan eksternal terhadap SML secara berkala. Kegiatan peninjauan internal (audit) yang kritis dan sesuai prosedur audit akan memudahkan proses audit lainnya yaitu audit eksternal. Jika audit internal tidak benar dan teliti, akan menyulitkan pada saat audit eksternal. Kegiatan selanjutnya tentu harus ada valuasi kinerja lingkungan, dan dengan menerapkan program peningkatan berkelanjutan.

- Tahap 7: Sertifikasi

Perusahaan mengajukan sertifikasi ISO 14001:2015 kepada lembaga sertifikasi yang terakreditasi dan independen seperti Rheinland SGS.

5.7 Keterkaitan ISO 14001 dan *Life Cycle Assesment* (LCA)

Salah satu pembeda terbitnya ISO 14001:2015 dan IISO 14001:2004 adalah dalam standar iISO 14001:2015 yang memasukkan perspektif siklus hidup (*Life Cycle Assesment*) pada saat tahap mengidentifikasi dan mengembangkan mekanisme kendali operasional.

Meskipun ISO 14001:2015 tidak mewajibkan LCA secara tegas, tapi standar ini menyarankan dilakukannya evaluasi yang melibatkan banyak komponen LCA. Artinya pada tahap identifikasi dan kendali operasional setiap perusahaan boleh menggunakan metode identifikasi lain. Sebelum metode LCA, pengukuran dalam standar ISO 14000 menggunakan pendekatan yang lebih

sederhana dan berfokus pada pengelolaan lingkungan daripada penilaian siklus hidup secara komprehensif. Berikut beberapa metode atau pendekatan yang digunakan:

1. *Environmental Performance Evaluation* (EPE) - ISO 14031

   Sebelum LCA, pengukuran lebih banyak dilakukan melalui evaluasi kinerja lingkungan. ISO 14031 menyediakan kerangka kerja untuk organisasi guna mengevaluasi kinerja lingkungan mereka berdasarkan indikator tertentu, seperti efisiensi penggunaan energi, pengelolaan limbah, dan emisi.

2. Audit Lingkungan (*Environmental Auditing*)

   Standar ISO juga mendukung audit lingkungan untuk mengevaluasi sejauh mana sebuah organisasi mematuhi peraturan dan kebijakan lingkungan. Audit ini mencakup:

   a. Audit kepatuhan terhadap regulasi.
   b. Audit proses operasional dan prosedur terkait lingkungan.

3. *Focus on Eco-Labeling and Environmental Claims*

   Standar lain dalam ISO 14.000, seperti ISO 14020 (eco-labeling), menilai produk berdasarkan klaim lingkungan tertentu, tetapi tanpa analisis siklus hidup yang mendalam. Contohnya adalah penilaian keberlanjutan berdasarkan bahan baku atau daur ulang produk.

4. *Input-Output Analysis*

   Dalam beberapa kasus, pendekatan berbasis analisis input-output digunakan untuk memahami dampak lingkungan dari proses ekonomi tertentu, meskipun tidak selengkap LCA.

Penerapan LCA dalam sistem manajemen lingkungan ISO 14001:2015 di suatu perusahaan, berperan penting dalam mengambil keputusan berdasarkan bukti dan berkelanjutan. Pemahaman dampak lingkungan dari produk atau layanan perusahaan dapat membuat strategi terkait manajemen

pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan. Penerapan SML yang konsisten, transparan, dan dipercaya masyarakat diharapkan meningkatkan kinerja lingkungan baik di dalam maupun di luar perusahaan. Adanya kepercayaan masyarakat akan kinerja lingkungan yang baik diharapkan akan berdampak pada selain citra perusahaan juga keuntungan finansial perusahaan.

5.8 Integrasi ISO 14001, ISO 14001, dan HACCP

Manfaat penerapan integrasi beberapa sistem standar antara lain:

1. Mengurangi Tumpang Tindih dan Redundansi

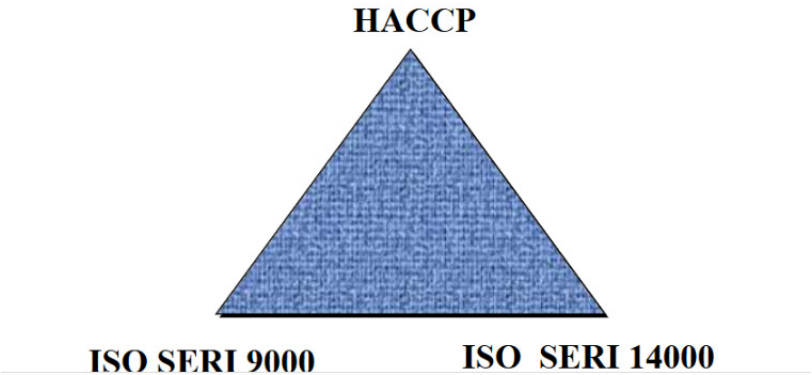
Integrasi beberapa standar memungkinkan organisasi menghilangkan tumpang tindih dalam proses dan dokumentasi. Tim ISO yang sebelumnya terpisah dapat diarahkan dengan mengintegrasikan persyaratan yang serupa, seperti pemantauan kinerja, pelaporan, dan penilaian risiko. Keuntungannya dapat menghindari pengulangan pekerjaan, dokumen, menghemat waktu dan sumber daya serta biaya.

2. Peningkatan Efisiensi Operasional

Upaya penerapan integrasi beberapa standar memungkinkan organisasi berkoordinasi yang efektif dan efisien. Misalnya, dalam proses perencanaan produksi kelapa sawit dapat mempertimbangkan aspek keselamatan, mutu, dan lingkungan secara bersamaan. Keuntungan dapat menghemat biaya produksi dan mengurangi risiko insiden serta meningkatkan kinerja manajemen mutu.

Urgensi penerapan integrasi beberapa sistem standar misalnya integrasi sistem manajemen mutu ISO 9000, lingkungan dan keamanan pangan dalam suatu industri pangan (agroindustri) merupakan sistem saling terkait. Dalam agroindustri, ketiga sistem tersebut dinamakan Manajemen Mutu Paripurna. Hal ini dikarenakan untuk produk-produk pertanian

tidak cukup hanya manajemen mutu saja, tetapi juga produk pertanian menyangkut keamanan produk untuk dikonsumsi sekaligus dalam proses dari mulai pembukaan lahan, pembibitan, proses penanaman, proses produksi harus ramah lingkungan. Oleh karena itu, sertifikasi mutu untuk produk agroindustri termasuk kelapa sawit harus memperhatikan ketiga sistem ini sebagai satu kesatuan.



Gambar 5.7 Fokus Sertifikasi Mutu Produk Agribisnis/ Agroindustri

Penerapan ketiga sistem mutu tersebut, dapat diintegrasikan untuk mempermudah bagi pihak-pihak yang berkepentingan, misalnya industri pertanian (kelapa sawit) dalam penerapan sistem manajemen mutu. Penerapan manajemen mutu secara kompehensif atau paripurna sangat diperlukan untuk menjawab tantangan globalisasi dan peningkatan daya saing baik industri pertanian (agroindustri) maupun industri lainnya.

Berikut contoh sertifikat untuk ISO 14001:2015; ISO 9001:2015 dan 45001:2018

Gambar 5.7 Contoh sertifikat untuk ISO 14001:2015; ISO 9001:2015 dan 45001:2018

Penugasan

Langkah Penugasan

Bagian 1: Pemahaman Konsep ISO

1. Membaca referensi:
   - ▢ Mahasiswa diminta membaca literatur terkait ISO 9000, ISO 14000, ISO 14001, dan LCA dari buku ajar, artikel ilmiah, atau standar resmi.
   - ▢ Minimal 2 sumber rujukan yang dicatat dalam daftar pustaka.
2. Menjawab pertanyaan konsep:
   - ▢ Soal 1: Tuliskan perbedaan utama ISO 9000 dan ISO 14000.
   - ▢ Soal 2: Jelaskan fokus utama ISO 14001.
   - ▢ Soal 3: Analisis keterkaitan ISO 14001 dengan Life Cycle Assessment (LCA).
   - ▢ Soal 4: Buat urutan tahapan untuk memperoleh sertifikat ISO 14001 (dilengkapi dengan penjelasan singkat tiap tahapan).

Bagian 2: Studi Kasus Perusahaan (Individual)

1. Membuat profil perusahaan (imajiner atau nyata):
   - ▢ Nama perusahaan.
   - ▢ Jenis usaha/produksi (misalnya: manufaktur, makanan-minuman, tekstil, elektronik, jasa, energi, dan sebagainya).
   - ▢ Lokasi dan skala usaha.

     (Setiap mahasiswa wajib membuat profil berbeda untuk menghindari duplikasi).
2. Merancang dokumen manajemen lingkungan perusahaan:
   - ▢ Visi perusahaan terkait keberlanjutan dan tanggung jawab lingkungan.

- ▢ Misi perusahaan yang menekankan pada peningkatan kualitas dan kepedulian lingkungan.
- ▢ Kebijakan lingkungan (*environmental policy*) yang memuat komitmen terhadap pencegahan pencemaran, pemenuhan regulasi, dan perbaikan berkelanjutan.
- ▢ Sasaran lingkungan (*environmental objectives*) yang spesifik, terukur, dan realistis (misalnya: pengurangan emisi, efisiensi energi, pengelolaan limbah).

3. Penyusunan laporan singkat (maksimal 5 halaman):
   - ▢ Halaman 1: Jawaban soal 1–4.
   - ▢ Halaman 2–4: Studi kasus perusahaan (profil, visi, misi, kebijakan, sasaran).
   - ▢ Halaman 5: Daftar pustaka.

Bagian 3: Presentasi (Opsional/Tugas Kelompok)

1. Diskusi kelas:
   - ▢ Mahasiswa mempresentasikan profil perusahaan masing-masing secara singkat (3–5 menit).
   - ▢ Dosen memberi umpan balik terkait konsistensi visi, misi, kebijakan, dan sasaran dengan prinsip ISO 14001.

Referensi

Abbasi, T., Poornima, P., Kannadasan, T., & Abbasi, S. A. (2013). Acid rain: past, present, and future. International Journal of Environmental Engineering, 5(3), 229. https://doi.org/10.1504/ijee.2013.054703

Agnes Sri Mulyani, 2021, Antisipasi Terjadinya Pemanasan Global Dengan Deteksi Dini

Alexander, Carol and Sheedy, Elizabeth (2004). The Professional Risk Managers' Handbook: A Comprehensive Guide to Current Theory and Best Practices (1st ed.). Wilmington, DE: PRMIA Publications. ISBN 0-9766097-0-3.

Deming, W. Edwards (1986). Out of the Crisis. MIT Center for Advanced Engineering Study. ISBN 0-911379-01-0

Departemen Perindustrian. 2007. Pelatihan *Hazard Analyis Critical Control Point* (HACCP) Bagi Dunia Usaha dan Aparat. 21-25 Mei 2007. Bandung

Gumbira-Sa'id,E. 2006. Globalisasi Dan Tantangan Peningkatan Dayasa ingIndustri Pangan Dan Pertanian Melalui Kinerja Mutu. TIP. IPB.

Hadiwiarjo, BH. 2020. *ISO 14001: Pamduan Penerapan Sistem Manajmen Lingkungan.* Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.

https://committee.iso.org/files/live/sites/tc207sc1/files/Mapping%20ISO%2014001_2015%20to%20ISO%2014001_2004.pdf

https://id.images.search.yahoo.com/search/images;_ylt=AwrKA48lGChnpR0EG6TLQwx.;_ylu=Y29sbwNzZzMEcG9zAzEEdnRpZAMEc2VjA3BpdnM?p=contoh+sertifikat+iso+9000+dan+iso+14000&fr2=piveb&type=E210ID105G0&fr=mcafee#id=14&iurl=https%3A%2F%2Fkiscerti.co.id%2Fupload%2Fimages%2FSertifikat-ISO Akreditasi-Internasional.png&action=click

https://id.images.search.yahoo.com/search/images;_ylt=AwrPrXMY8UxnhQIAQ0rLQwx.;_ylu=Y29s-

bwNzZzMEcG9zAzEEdnRpZAMEc2VjA3Bpdn-M?p=Sample+sertifikat+ISO+14001&fr2=piv-web&type=E210ID105G0&fr=mcafee#id=9&i-url=https%3A%2F%2Fkonsultansertifikasiiso.com%2Fwpcontent%2Fuploads%2F2021%2F09%2F-Wa-0812-3579-2800-sertifikasi-ISO-14001-724x1024.jp-g&action=click

https://id.wikipedia.org/wiki/Bahan_berbahaya_dan_beracun

https://id.wikipedia.org/wiki/Pemanasan_global

https://www.cambridge.org/core/books/abs/inputoutput-analysis/environmental-inputoutput-analysis/CB543CE-3AE77039671D7AF19C4C1F3BD

https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:14031:ed-3:v1:en

https://www.iso.org/standards/popular/iso-14000-family

https://www.unep.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/responsibleindustry/eco-labelling

Kementrian Lingkungan Hidup (2013). "Prinsip-prinsip dan Pedoman Umum Pelaksanaan Audit Lingkungan

Kurniawan, W. 2018. Urgensi penerapan ISO 9000, ISO 14000 dan Hazards Analytical Critical Control Point pada agroindustri kelapa sawit. ISBN: 978-979-99735-4-2. Hal: A-32-2 --A-32-6

Kurniawan, Wawan. 2012. *Urgensi Pembangunan Agroindustri Kelapa Sawit Berkelanjutan Untuk Mengurangi Pemanasan Global.* Jurnal Teknik Industri 2 (1), ISSN:1411-6340. Halaman : 74-83

Roan, Sharon (1989) Ozone crisis: The 15-year evolution of a sudden global emergency, New York: Wiley, p. 56 ISBN 0-471-52823-4

Suhadi, 2012 Mengawal limbah bahan berbahaya danberacun di kawasan sekaran untuk masadepan yang lebih baik. Indonesian Journal of Conservation, 1 (1): 87-94

Suhu Permukaan Air Menggunakan Data Satelit, Jurnal Centech, Volume 2

INDEKS

A

Analisis Aliran Bahan 82

B

Barriers 35, 44, 45, 65

Berkelanjutan xiii, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 19, 21, 22, 25, 27, 29, 30, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 46, 47, 50, 51, 52, 57, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 75, 77, 79, 80, 113, 121, 122, 134, 136, 194, 198, 199, 200, 201, 205, 207, 208, 209, 213, 218, 222, 223, 227

D

Dampak sosial 13, 20, 27, 36

Drivers 35, 44, 65

E

Ekologi xiii, xiv, 1, 21, 35, 71, 72, 119, 135, 187, 218, 222

Ekologi industri xiii, 1, 27

Ekonomi xiii, 1, 4, 5, 6, 7, 9, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 32, 35, 36, 37, 38, 39, 41, 42, 47, 52, 59, 63, 64, 71, 72, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 81, 84, 86, 109, 113, 119, 131, 187, 208, 218, 223

Ekonomi sirkular 1, 9, 22, 27, 28, 37, 74, 79, 113, 223

Energi xiii, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 18, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 29, 30, 36, 37, 45, 47, 48, 52, 53, 57, 59, 67, 76, 78, 79, 98, 99, 106, 107, 113, 114, 115, 120, 121, 122, 125, 126, 129, 130, 133, 134, 136, 138, 140, 146, 150, 163, 164, 165, 188, 208, 212, 213, 219, 222, 225, 226

G

Green Society v, 14, 15, 16, 29, 30, 46

H

HACCP vi, 209, 227

I

ISO 14000 vi, xiii, 187, 192, 193, 196, 197, 198, 199, 207, 212, 218

ISO 14001 vi, ix, x, 8, 31, 187, 192, 193, 194, 195, 196, 200, 201, 202, 205, 207, 208, 209, 211, 212, 213, 227

K

Keberlanjutan xiv, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 21, 27, 28, 29, 30, 36, 38, 39, 40, 44, 45, 46, 47, 50, 52, 53, 57, 59, 60, 61, 62, 65, 66, 67, 78, 111, 115, 121, 133, 134, 135, 163, 179, 201, 208, 212, 218, 219, 221, 223, 226

L

Life Cycle Assesment vi, 207

Lingkungan vii, ix, x, xiii, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 27, 28, 29, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 51, 52, 57, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 67, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 84, 85, 87, 93, 120, 121, 122, 124, 125, 127, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 140, 145, 146, 150, 151, 156, 157, 163, 164, 166, 169, 171, 173, 175, 176, 177, 178, 179, 187, 188, 189, 190, 192, 193, 194, 196, 197, 199, 200, 201, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 212, 213, 218, 219, 221, 222, 223, 227

M

Material Flow Analysis xiii, 22, 25, 72, 82, 86, 93, 98, 113, 116, 184, 218

O

Organisasi ISO vi, 187, 191

P

PDCA vi, ix, 187, 198, 218

R

Revolusi Industri xiii, 2, 3, 28

S

Simapro vi, 119, 136, 137, 151, 171, 173, 178

STAN v, vii, 71, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 101, 103, 104, 108, 113, 114, 115, 116, 117, 184, 218

Sustainability 16, 30, 69, 137, 183, 185, 186, 221, 224

Sustainable development 31, 35

Sustainable Product Design v, xiii, 38, 39, 44, 50, 59, 65, 68

T

Transformasi Teknologi xiii, 29

GLOSARIUM

Barang: entitas nyata yang memiliki nilai ekonomi, terdiri dari satu atau lebih jenis substansi, dan dapat bernilai positif (produk) maupun negatif (limbah).

Ekologi Industri: disiplin yang menggabungkan prinsip ekologi dengan aktivitas industri untuk menciptakan sistem produksi yang berkelanjutan.

Industri berwawasan lingkungan: pendekatan yang mengedepankan upaya untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan yang ditimbulkan oleh proses produksi, tanpa mengabaikan keberlanjutan ekonomi dan sosial.

ISO 14000: kumpulan standar dalam bidang lingkungan hidup.

Life Cycle Assessment (LCA): penilaian siklus hidup adalah alat teoritis yang digunakan untuk mengevaluasi potensi dampak lingkungan.

Material Flow Analysis (MFA): sebuah metodologi penting dalam ekologi industri yang digunakan untuk menilai aliran dan akumulasi material dalam suatu sistem tertentu secara sistematis.

PDCA: suatu proses pemecahan masalah empat langkah iteratif yang umum digunakan dalam pengendalian kualitas.

Pemanasan global: proses meningkatnya suhu rata-rata udara, atmosfer, laut, dan daratan Bumi.

STAN (subSTance flow ANalysis): perangkat lunak gratis yang mudah digunakan yang mendukung pelaksanaan analisis aliran material sesuai dengan standar Austria ÖNORM S 2096.

Substansi/zat: unsur kimia atau senyawa yang terdiri dari unit-unit seragam dan homogen dengan komposisi yang khas dan konsisten.

Sustainable product design: pendekatan terintegrasi yang mencakup semua aspek keberlanjutan dalam siklus hidup produk, mulai dari pemilihan bahan baku yang ramah lingkungan, proses produksi yang efisien, distribusi produk yang hemat energi, hingga tahap akhir penggunaan di mana produk dapat didaur ulang atau diperbaiki.

PROFIL PENULIS

Emelia Sari

Emelia Sari adalah dosen dan peneliti di Departemen Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Trisakti. Beliau menjabat sebagai Kepala Pusat Pengembangan Inkubator Bisnis di LPPM Universitas Trisakti. Selain itu, beliau aktif sebagai anggota Departemen Industri Hijau dan Keberlanjutan pada Badan Kejuruan Teknik Industri - Persatuan Insinyur Indonesia (BKTI-PII), dan menjadi Trisakti PIC untuk *Uni Incubator Consortium Asia*–Africa yang berfokus pada penguatan ekosistem kewirausahaan hijau lintas negara. Latar belakang akademiknya mencakup gelar Sarjana Teknik Industri dari Universitas Andalas, Magister Teknik Industri dari Universitas Indonesia (*cum laude*), dan Doktor bidang *Materials, Manufacturing*, *and Industrial Engineering* dari Universiti Teknologi Malaysia, tempat beliau meraih penghargaan *Merit Thesis Award*.

Sebagai GRI *Certified Sustainability Professional, Certified Entrepreneurship Educator, dan Certified Project Management Associate*, Emelia Sari telah lama berfokus pada riset dan pengembangan *sustainable competitive manufacturing and business strategies*. Beliau aktif terlibat dalam berbagai proyek nasional dan internasional, termasuk program Erasmus+ EcoGREEN (Uni Eropa) dan Eurasia *Foundation* – Japan, yang berorientasi pada kolaborasi transdisipliner dan penguatan kewirausahaan hijau.

Karya ilmiah dan patennya berkontribusi pada pengembangan konsep *sustainable manufacturing and business* di Indonesia, khususnya dalam menghubungkan efisiensi sumber daya, inovasi teknologi, dan keberlanjutan industri. Melalui buku Ekologi Industri ini, beliau berupaya menjembatani teori dan praktik dalam membangun sistem industri yang lebih berdaya saing, efisien, dan ramah lingkungan.

Astri Rinanti

Astri Rinanti adalah Profesor Teknik Lingkungan di Universitas Trisakti dan menjabat sebagai Direktur Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Trisakti. Beliau merupakan akademisi dan peneliti dengan kepakaran di bidang bioteknologi lingkungan, rekayasa remediasi, mikrobiologi lingkungan, energi terbarukan, dan teknologi lingkungan berkelanjutan.

Prof. Astri menyelesaikan pendidikan Sarjana Biologi (1994), Magister Teknik Lingkungan (2001), dan Doktor Teknik Lingkungan (2014) di Institut Teknologi Bandung (ITB). Sebagai Insinyur Profesional Madya (IPM) dan ASEAN Engineer (ASEAN Eng.), beliau juga memperoleh berbagai sertifikasi profesional, termasuk Research Reviewer Certification (ISO/IEC 17024:2012) dan Sertifikasi AMDAL Dasar dari Universitas Indonesia.

Beliau aktif sebagai Editor-in-Chief Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology (terindeks Scopus Q2) serta anggota dewan redaksi JUARA: Jurnal Wahana Abdimas Sejahtera. Dalam bidang penelitian, Prof. Astri telah menghasilkan lebih dari 100 publikasi internasional bereputasi dengan h-index Scopus 11, lebih dari 75 publikasi nasional, 12 buku, dan 10 paten (HKI) yang mendukung pengembangan riset di bidang ekoteknologi.

Sebagai peneliti utama, beliau telah memimpin berbagai proyek riset nasional dan internasional di bidang bioremediasi limbah plastik, biosorpsi logam berat, energi berbasis mikroalga, dan mitigasi perubahan iklim, dengan total pendanaan riset dan kolaborasi lebih dari Rp 7 miliar. Kontribusi ilmiahnya juga terpublikasi dalam buku Springer Nature berjudul Algae as a Natural Solution for Challenges in the Water–Food–Energy Nexus: Toward Carbon Neutrality (2024).

Kepakarannya dalam pengelolaan lingkungan dan teknologi hijau menjadikan Prof. Astri sebagai salah satu akademisi terkemuka di Indonesia dalam pengembangan ilmu ekoteknologi dan ekologi industri. Melalui karya dan risetnya, beliau berkomitmen untuk mendorong transformasi menuju sistem industri dan lingkungan yang berkelanjutan.

Indah Permata Sari

Indah Permata Sari adalah dosen dan peneliti di Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Trisakti. Beliau aktif dalam kegiatan penelitian dan pengembangan bidang rekayasa proses berkelanjutan yang berfokus pada pengolahan air limbah, khususnya air asam tambang, serta penerapan *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk menilai dampak lingkungan dan meningkatkan efisiensi sumber daya dalam sistem industri. Latar belakang akademiknya mencakup Sarjana Pendidikan Kimia dari Universitas Negeri Jakarta, Magister Kimia dari Universitas Indonesia, dan saat ini beliau sedang menempuh Program Doktor di Departemen Teknik Industri Pertanian, Institut Pertanian Bogor.

Bidang keahlian dan riset yang digeluti meliputi LCA dan sustainability assessment, dengan fokus penelitian doktoral pada analisis keberlanjutan dan penerapan ekonomi sirkular dalam produksi biochar berbasis limbah tandan kosong kelapa sawit untuk aplikasi pengolahan air limbah. Beliau telah melakukan berbagai kajian LCA pada produk tahu dan tempe, baja, serta sistem budidaya padi dan sayuran untuk menilai dampak lingkungan dan mengidentifikasi peluang peningkatan efisiensi sumber daya di sektor industri dan pertanian. Selain itu, beliau merupakan penerima hibah penelitian BIMA dan pemegang paten sederhana terkait pengembangan karbon aktif untuk remediasi air asam tambang. Melalui buku *Ekologi Industri* ini, beliau berupaya mendorong penerapan prinsip keberlanjutan dan pemanfaatan limbah industri sebagai strategi menuju sistem produksi yang efisien, inovatif, dan berwawasan lingkungan.

Tiena Gustina Amran

Tiena Gustina Amran adalah dosen, peneliti dan konsultasn di Departemen Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Trisakti dan beberapa insitusi Pendidikan selama hampir 40 tahun. Beliau pernah menjabat sebagai wakil Direktur Badan Penjaminan Mutu Universitas Trisakti, Ketua Unit Inovasi dan Pemberdayaan Sumber Universitas Trisakti, Ketua Pusat Studi Energi dan Energi Terbarukan Universitas Trisakti, Ketua Jurusan Teknik Industri Universitas Trisakti, Ketua Laboratorium Perancangan Industri dan Pengembangan Bisnis Inkubator Maira Jurusan Teknik Industri di Universitas Trisakti. Selain itu, beliau pernah aktif sebagai ketua *Center for Development Economic and Enterprenunuership* (CEED) Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatulah (UIN) di Jakarta, Pendiri dan pelopor Pengembangan Kegiatan Insinyur Perempuan Indonesia Timur Universitas Muslim Indonesia (UMI) Makasar, salah seorang pendiri Al Azhar *Enterpreunership University (UAI)* di Jakarta Selatan, dan anggota *Business Inovation Center* (BIC) Indonesia.

Beliau aktif dan salah seorang pendiri, Pembina, Pengurus Badan Kejuruan Teknik Industri - Persatuan Insinyur Indonesia (BKTI-PII). Menjadi anggota Majelis Uji Kompetensi (MUK-BKTI PII) dan sebagai anggota serta Ketua Majelis Kehormatan Etik Persatuan Insinyur Indonesia (MKE-PII). Beliau salah seorang angggota *Uni Incubator Consortium* Asia–Africa untuk Trisakti yang berfokus pada penguatan ekosistem kewirausahaan hijau lintas negara. Beliau juga anggota dari *Global Sustainability Education* UNICEF PBB. Menjadi anggota dan pengurus *Women Engineer Forum Federation Engineer Asia Pasific Organization* (WEAFEO) serta anggota aktif didalam *Sustainable and Innovation Technology Working Group* Asia Pacific Federation of Engineer Organization (AFEO). Beliau adalah salah seorang pendiri Yayasan *PolyTech Economic Circular* sebuah *Living Laboratory di* Nambo Kelapa nunggal Bogor untuk pemberdayaan petani dan industri kecil dengan

teknologi solven. Sebagai Ketua Yayasan Komunitas Teknik Industri Indonesia (YKTII) dan pendiri serta coordinator *International Industrial System and Engineering and Data Center* (IISDEC) bidang energi hijau, hilirisasi Industri dan produktivitas sumber daya manusia dan industry skala nasional dan global.

Beliau juga sebagai pendiri dan Pembina Asosiasi Pengusaha Enginering Karawang (APEK). Latar belakang akademik mencakup gelar Sarjana Muda dan Sarjana Teknik Industri dari Institute Teknologi Bandung, dan Doktor bidang *Electrical and Electric System Engineering* serta *Post Doctoral* dari Universiti Kebangsaan Teknologi Malaysia, menjadi salah seorang pakar peneliti *Quality Improvement in Part and Component Automotive Manufacturer* Indonesia Malaysia Thailand.

Beliau pernah aktif sebagai anggota Ikatan Ahli Otomotif Indonesia (IATO), IPOMS (Indonesia Professional Operation Management and Strategic), ALI (Asosiasi Logistik Indonesia), Ikatan Sarjana dan Logistik Indonesia (ISLI), Supply Chain Management Indonesia (SCM). Sebagai *Certified Supply Chain Professional (CSCP), Certified Entrepreneurship Educator, dan Certified Professional Management Logistic (CPML)*, Asesor Kompetensi Badan Nasional Standar Profesi (BNSP) dalam 15 skema kompetensi yaitu Pengelolaan produksi, Pengelolaan persediaan, Pengelolaan pengadaan, Pengelolaan Gudang, Pengelolaan delivery, Manajer Gudang, Manajer perencana material, Manajer logistic, Manajer pengadaan, Supervisi kaizen lean, Management kaizen lean, Warehouse operation officer, Procurement supervisor, Kewirausahaan, Manager Human Capital. Asesor Kompetensi Komite Akreditasi Nasional (KAN), Asesor Kompetensi *British Standard International* (BSI).

Tiena Gustina Amran telah lama berfokus pada riset industri otomotif, *solid waste*, kesehatan dan rumah sakit serta pengembangan kewirausahaan berbasis teknologi, *automotive industry manufacturing and business strategies, innovation and technology*. Beliau aktif terlibat dalam berbagai proyek nasional bidang industry komponen otomotif, dan Kesehatan dan Rumah Sakit dan internasional, *Enterpreunuership* (APU) dan *Women Engineer Forum Asia Pasific Organization*, yang berorientasi pada kolaborasi multidisiplinary dan penguatan energi baru dan

terbarukan (EBT), *Net Zero Emission* (NZE), kewirausahaan, industri hilir hijau dan produktivitas. Karya ilmiah dan pengembangan laboratorium berkontribusi pada pengembangan konsep technopreunuership, manufaktur, energi, Kesehatan, solis waste dan strtategi organisasi di Indonesia, khususnya dalam pemberdayaan sumber daya, inovasi teknologi, dan keberlanjutan industri lintas bidang ilmu. Melalui buku Ekologi Industri ini, beliau berupaya membangun, mengembangkan penerapan berdampak dalam membangun sistem keteknik industrian konplek yang menekankan kepada kualitas, produktivitas, efisien sumber daya, keberlanjutan dan daya saing nasional.

Wawan Kurniawan

Wawan Kurniawan adalah dosen di Departemen Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Trisakti. Beliau menjabat sebagai Kepala Pusat Kuliah Usaha Mandiri-Ilmu Teknologi Terapan LPPM Universitas Trisakti. Latar belakang akademiknya gelar Sarjana Pertanian dari Universitas Lampung dan Magister Teknik Mesin (kekhususan Teknik Industri) dari Universitas Indonesia.

Berpengalaman membantu berbagai UMKM, industri dan koperasi meraih ISO 9001, ISO 14001, HACCP dan ISO 2200 di berbagai daerah seperti Kintamani dan Jimbaran Bali serta di Medan Sumatera Utara. Capaian perolehan hibah pengabdian masyarakat sebanyak 8 hibah dari kemenristekdikti (2 diantaranya tentang kemasan ramah lingkungan), 1 hibah dari PT Pegadaian (Pengelolaan sampah di Pantai Panimbang Pandeglang) dan 4 kali mendapat PSBI untuk kegiatan KUM-ITT dari Bank Indonesia. Sebagai Juara 1 dan 2 Tim PKM Terbaik Tahun 2021 di Usakti dan Dosen Pendamping Lapangan Terbaik KUM-ITT tahun 2022. Selain itu mendapat Paten sederhana tentang formula pakan ternak udang berkelanjutan.

Annisa Dewi Akbari

Annisa Dewi Akbari adalah dosen Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Trisakti yang menjabat sebagai Kepala Laboratorium Rekayasa Kualitas di Jurusan Teknik Industri sekaligus Sekretaris Pusat Pengembangan Inkubator Bisnis di LPPM Universitas Trisakti. Beliau meraih gelar Sarjana Teknik Industri (2012) dan Magister Teknik Industri (2020) dari Universitas Gadjah Mada. Sebelum bergabung di dunia akademik, beliau berkarier selama enam tahun di PT Astra Daihatsu Motor yaitu sebuah perusahaan manufaktur otomotif, sebagai *product planner, marketing product planner*, dan *chief engineer* dalam proyek *production preparation*.

Bidang penelitian yang digeluti meliputi *Sustainable Business and Manufacturing, Organizational Resilience,* dan *Engineering Management*. Beliau aktif dalam kolaborasi riset internasional, di antaranya melalui *University Incubator Consortium* (UNIIC), sebuah konsorsium inkubator Universitas di Asia dan Afrika yang berfokus pada penguatan ekosistem kewirausahaan hijau, serta kerja sama riset dengan Universitas Kitakyushu, Jepang, dengan tema *Business Model for Sustainable Circular Economy in Plastic Waste Management*. Selain itu, Annisa juga pernah menerima hibah Pengabdian kepada Masyarakat (PkM) BIMA dari Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi. Melalui buku Ekologi Industri ini, beliau berupaya mendorong pengembangan sistem industri yang berdaya saing dengan menekankan penerapan prinsip keberlanjutan serta pemanfaatan limbah sebagai sumber daya inovatif.

EKOLOGI INDUSTRI

Buku Ekologi Industri: Strategi Menuju Industri Berkelanjutan menghadirkan pemahaman menyeluruh mengenai bagaimana teknologi modern, desain produk, dan manajemen lingkungan dapat membentuk sistem industri yang lebih efisien, aman, dan ramah lingkungan. Dimulai dari evolusi Revolusi Industri hingga hadirnya *Society* 5.0, buku ini menjelaskan bagaimana transformasi teknologi mengubah pola produksi, konsumsi, serta mendorong pentingnya keberlanjutan pada berbagai sektor industri.

Pembaca akan diperkenalkan pada prinsip *Sustainable Product Design* yang mempertimbangkan seluruh daur hidup produk, mulai dari pemilihan material, proses manufaktur, penggunaan, hingga potensi daur ulang. Buku ini juga membahas dua metode analitis utama: *Material Flow Analysis* (MFA) dan *Life Cycle Assessment* (LCA) yang digunakan untuk menilai efisiensi aliran material, energi, dan dampak lingkungan dari suatu produk atau proses industri.

Selain itu, buku ini menguraikan penerapan Standar Manajemen Lingkungan ISO 14000 sebagai panduan bagi organisasi dalam meningkatkan kinerja lingkungan dan memenuhi regulasi berkelanjutan. Berbagai studi kasus penelitian, pelatihan, dan kegiatan pengabdian masyarakat yang dilakukan penulis turut disertakan sebagai ilustrasi nyata penerapan konsep ekologi industri dalam konteks Indonesia.
Dengan penyajian yang ringkas, aplikatif, dan mudah dipahami, buku ini menjadi referensi penting bagi mahasiswa, akademisi, dan praktisi yang ingin memahami strategi dan instrumen utama dalam membangun industri yang kompetitif sekaligus bertanggung jawab terhadap lingkungan.

ISBN 978-623-224-816-8
9 786232 248168