

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR SINGKATAN	xiii
INTISARI.....	xv
ABSTRACT	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah dan Batasan Masalah.....	3
I.3 Keaslian Penelitian	4
I.4 Tujuan Penelitian.....	5
I.5 Manfaat Penelitian.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	7
II.1 Tinjauan Pustaka	7
II.1.1 Penelitian terdahulu	7
II.1.2 Gap Penelitian	11
II.2 Landasan Teori.....	12
II.2.1 <i>Air Insulated Switchgear (AIS)</i>	12
II.2.2 <i>Gas Insulated Switchgear (GIS)</i>	14
II.2.3 Komponen Gardu Induk.....	16
II.2.4 Gas Sulfur Heksafleurida (SF ₆).....	18
II.2.5 <i>Life Cycle Assesment</i>	20
II.3 Pertanyaan Penelitian	27
II.4 Hipotesis	28
BAB III METODE PENELITIAN	29
III.1 Tempat Penelitian.....	29
III.2 Pengumpulan Data	29
III.2.1 Data Primer	29
III.2.2 Data Sekunder	29
III.3 Alat Penelitian.....	30
III.3.1 <i>Interface OpenLCA</i>	30
III.3.2 Pembuatan Database dan Pengimporan Data Sekunder	31
III.3.3 Penyusunan Aliran dan Proses	32

III.3.4	Pembangunan Sistem Produk.....	33
III.3.5	Pemilihan Metode Penilaian Dampak.....	34
III.3.6	Analisis Hasil dan Interpretasi	35
III.4	Kerangka Penelitian.....	36
III.5	Tahapan Penelitian	37
III.5.1	Penentuan <i>Goal dan Scope</i>	38
III.5.2	<i>Life Cycle Inventory</i>	39
III.5.3	<i>Life Cycle Impact Assesment (LCIA)</i>	39
III.5.4	Interpretasi Hasil.....	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		42
IV.1	Analisa Lokasi Penelitian	42
IV.1.1	GIS Braga.....	42
IV.1.2	<i>Single Line Diagram</i>	43
IV.1.3	Data Pembebanan	44
IV.1.4	Data Pengujian SF ₆	46
IV.1.5	Data peralatan GIS Braga.....	49
IV.2	<i>Life Cycle Assessment</i>	51
IV.2.1	Goal and Scope.....	51
IV.3	<i>Life Cycle Inventory</i>	54
IV.3.1	<i>LCI Gas Insulated Switchgear</i>	55
IV.3.2	<i>LCI Air Insulated Switchgear</i>	57
IV.3.3	Perhitungan Transportasi dan <i>Losses</i> yang terjadi	66
IV.4	<i>Life Cycle Impact Assesment</i>	76
IV.5	Interpretasi Hasil Komparasi Tipe Gardu Induk.....	79
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		85
V.1	Kesimpulan	85
V.2	Saran	85
Daftar Pustaka		87

DAFTAR TABEL

Tabel I.1 Matriks Penelitian Sebelumnya	4
Tabel II.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu.....	9
Tabel IV.1 Metode Pemeliharaan Preventif pada GIS.....	43
Tabel IV.2 Data pembebanan Trafo GIS 150 kV Braga.....	45
Tabel IV.3 Data load factor Trafo GIS 150 kV Braga.....	45
Tabel IV.4 Data beban penghantar GIS 150 kV Braga.....	45
Tabel IV.5 <i>Key Characteristic</i> 2 teknologi <i>Switchgear</i>	52
Tabel IV.6 Ringkasan tujuan dan spesifikasi 2 teknologi Gardu Induk	53
Tabel IV.7 Inventory Pembuatan 1 Bay GIS Kompartemen (Treier et al., 2022)	55
Tabel IV.8 Inventory Pembuatan 1 Unit Trafo (ABB, 2003b)	55
Tabel IV.9 Inventory Pembuatan 1 meter XLPE Cable	56
Tabel IV.10 Transportasi 1 Bay GIS Kompartemen (Google Maps).....	56
Tabel IV.11 Transportasi 1 Unit Trafo (Google Maps).....	56
Tabel IV.12 Transportasi 1 meter XLPE Kabel (Google Maps).....	57
Tabel IV.13 Inventory Instalasi GIS 150 kV Braga	57
Tabel IV.14 Inventory Operasi dan Pemeliharaan GIS 150 kV Braga.....	57
Tabel IV.15 Inventory Pembuatan 1 Unit Trafo (ABB, 2003b).....	58
Tabel IV.16 Inventory Pembuatan 1 Unit Circuit Breaker (ABB, 2007)	58
Tabel IV.17 Inventory Pembuatan 1 Unit Current Transformers (EPD Italy, 2023a).....	59
Tabel IV.18 Inventory Pembuatan 1 Unit Current Voltage Transformers (EPD Italy, 2023b)	60
Tabel IV.19 Inventory Pembuatan 1 Unit Disconnection Switch (ABB, 2003a) .	60
Tabel IV.20 Inventory Pembuatan 1 meter TAL 850 (Spesifikasi Teknis)	61
Tabel IV.21 Inventory Pembuatan 1 meter TAL 510 (Spesifikasi Teknis)	61
Tabel IV.22 Inventory Pembuatan 1 Unit Surge Arrester (Spesifikasi Teknis)...	61
Tabel IV.23 Inventory Transportasi 1 Unit Circuit Breaker (Google Maps).....	62
Tabel IV.24 Inventory Transportasi 1 Unit Trafo (Google Maps)	62
Tabel IV.25 Inventory Transportasi 1 Unit Current Transformer (Google Maps)	62



Tabel IV.26 Inventory Transportasi 1 Unit Current Voltage Transformer (Google Maps)	63
Tabel IV.27 Inventory Transportasi 1 Unit Disconnecting Switch (Google Maps)	63
Tabel IV.28 Inventory Transportasi 1 Meter TAL 850 (Google Maps)	63
Tabel IV.29 Inventory Transportasi 1 meter TAL 510 (Google Maps)	64
Tabel IV.30 Inventory Transportasi 1 Unit Surge Arrester (Google Maps)	64
Tabel IV.31 Inventory Instalasi AIS 150 kV Braga	65
Tabel IV.32 Inventory Operasi dan Pemeliharaan AIS 150 kV Braga.....	65
Tabel IV.33 Jarak Tempuh dari Setiap Perjalanan	69
Tabel IV.34 Berat kebocoran Gas SF ₆ pada Bay Kopel	71
Tabel IV.35 Berat kebocoran Gas SF ₆ pada Bay Trafo 1	72
Tabel IV.36 Berat kebocoran Gas SF ₆ pada Bay Trafo 2	72
Tabel IV.37 Berat kebocoran Gas SF ₆ pada Bay Cigereleng 1.....	73
Tabel IV.38 Berat kebocoran Gas SF ₆ pada Bay Cigereleng 2.....	73
Tabel IV.39 Rangkuman data kebocoran Gas SF ₆	73
Tabel IV.40 Tabel Penilaian Dampak Lingkungan Pada 2 Tipe Gardu Induk untuk 1 Functional Unit.....	78
Tabel IV.41 Kontribusi Electrical Losses terhadap Kategori Dampak	81
Tabel V.1 Hasil Dampak Lingkungan pada 2 Tipe Gardu Induk.....	85

DAFTAR GAMBAR

Gambar I.1 Pertumbuhan <i>Demand</i> Kelistrikan (TWh) (ESDM, 2024).....	1
Gambar I.2 Kapasitas Gardu Induk (MVA) (ESDM, 2024).....	2
Gambar II.1 <i>Air Insulated Substation</i> (AIS)	12
Gambar II.2 Layout <i>Air Insulated Switchgear</i> (AIS)	13
Gambar II.3 <i>Gas Insulated Switchgear</i> (GIS).....	14
Gambar II.4 Layout <i>Gas Insulated Substation</i> (GIS)	15
Gambar II.5 Gambar Section <i>Air Insulated Switchgear</i>	16
Gambar II.6 Gambar Section <i>Gas Insulated Switchgear</i> (<i>dribbble.com</i>)	17
Gambar II.7 Contoh Tegangan Tembus pada SF ₆ , Minyak Transformator, dan Udara Terkompresi dalam Medan Listrik Tidak Seragam (kiri) dan Kemampuan Pemadaman Busur SF ₆ dibandingkan Campuran SF ₆ Udara dan Udara Murni (kanan) (CIGRE, 2018).....	18
Gambar II.8 <i>Framework Life Cycle Assessment</i> (LCA) (<i>SNI-ISO 14040:2016</i>) ..	22
Gambar III.1 <i>User Interface</i> OpenLCA	31
Gambar III.2 Cara Import Database	32
Gambar III.3 Input Tahapan Product Flow pada salah satu proses	33
Gambar III.4 Tabel Input dan Output pada Salah Satu File Process	33
Gambar III.5 Produk Sistem dalam Bentuk Model Graph.....	34
Gambar III.6 Daftar <i>Impact Assessment</i> pada metode Recipe Midpoint (H).....	35
Gambar III.7 Hasil Penilaian Impact Assessment dari OpenLCA	36
Gambar III.8 <i>Flowchart</i> Penelitian.....	37
Gambar III.9 <i>Reference Flow Life Cycle Assesment</i>	39
Gambar IV.1 Lokasi GIS Braga (Google Maps).....	42
Gambar IV.2 Single Line Diagram GIS 150 kV Braga	44
Gambar IV.3 Pengujian Kualitas Gas SF ₆	46
Gambar IV.4 Hasil Pengujian Tekanan Gas SF ₆ tahun 2020, 2021, 2025.....	47
Gambar IV.5 Hasil Pengujian Kemurnian Gas SF ₆ tahun 2020, 2021, 2025	47
Gambar IV.6 Hasil Pengujian Dew Point Gas SF ₆ tahun 2020, 2021, 2025	48
Gambar IV.7 Data Berat SF ₆ pada setiap kompartemen (<i>as built drawing</i>).....	49

Gambar IV.8 Gambar Potongan Bangunan GIS 150 kV Braga (<i>as built drawing</i>)	50
Gambar IV.9 Layout GIS 150 kV Braga (<i>as built drawing</i>).....	51
Gambar IV.10 <i>System Boundary</i> Penelitian.....	54
Gambar IV.11 Jarak dari Pabrikasi GIS Kompartemen ke Pelabuhan Marseille ..	66
Gambar IV.12 Jarak dari Pabrikasi Peralatan ke Pelabuhan Mumbai.....	66
Gambar IV.13 Jarak dari Pelabuhan Marseille ke Pelabuhan Tanjung Priok	67
Gambar IV.14 Jarak dari Pelabuhan Mumbai ke Pelabuhan Tanjung Priok	67
Gambar IV.15 Jarak dari Pelabuhan Tanjung Priok ke GIS Braga	68
Gambar IV.16 Jarak dari Pabrikasi Kabel ke GIS Braga	68
Gambar IV.17 <i>Nameplate</i> Kompartemen GIS Braga	70
Gambar IV.18 Kebutuhan pengisian tekanan berdasarkan fungsi tekanan atmosfer dan temperatur	70
Gambar IV.19 Spesifikasi Teknis <i>Guaranteed Load Losses</i>	75
Gambar IV.20 Spesifikasi Teknis <i>No Load Losses</i>	75
Gambar IV.21 Spesifikasi Teknis dari konduktor TAL 510 dan TAL 850	76
Gambar IV.22 Perbandingan Dampak Lingkungan pada 2 Tipe Gardu Induk.....	80
Gambar IV.23 Dampak Lingkungan pada GIS untuk setiap tahapan daur hidup .	81
Gambar IV.24 Penyebab <i>Climate Change</i> pada GIS (kg CO ₂ -eq).....	82
Gambar IV.25 Penyebab <i>Climate Change</i> pada AIS (kg CO ₂ -eq)	82

DAFTAR SINGKATAN

GIS	<i>Gas Insulated Switchgear</i>
AIS	<i>Air Insulated Switchgear</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
LCI	<i>Life Cycle Inventory</i>
LCIA	<i>Life Cycle Impact Assessment</i>
CB	<i>Circuit Breaker</i>
PMT	Pemutus Tegangan
CT	<i>Current Transformers</i>
CVT	<i>Constant Voltage Transformers</i>
DS	<i>Disconnecting Switch</i>
PMS	Pemisah
LA	<i>Ligthning Arrester</i>
GCB	<i>Gas Circuit Breakers</i>
LTB	<i>Live Tank Breakers</i>
DTB	<i>Dead Tank Breakers</i>
GIL	<i>Gas Insulated Lines</i>
GVT	<i>Gas Voltage Transformers</i>
GIT	<i>Gas Insulated Transformers</i>
GIR	<i>Gas Insulated Reactors</i>
NDC	<i>Nationally Determined Contributions</i>
CC	<i>Climate Change</i>
FD	<i>Fossil Depletion</i>
HT	<i>Human Toxicity</i>
MD	<i>Metal Depletion</i>
PMF	<i>Particulate Matter Formation</i>
TA	<i>Terrestrial Acidification</i>
EPD	<i>Environmental Product Declaration</i>
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
WSF	<i>Water Scarcity Formation</i>
ADP	<i>Abiotic Depletion Potential</i>



UNIVERSITAS
GADJAH MADA

Analisa Dampak Lingkungan Pada Air Insulated Switchgear dan Gas Insulated Switchgear dengan Pendekatan Life Cycle Assessment

Fakhrul Hidayat, Ir. Agus Prasetya, M.Eng.Sc., Ph.D; Dr. rer. nat. Rio Aryapratama, S.T., M.Eng., MSc.

Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari <http://etd.repository.ugm.ac.id/>

AP

Acidification Potential

POX

Photochemical Oxidant Formation