

TESIS - CL255402

**ADAPTASI SISTEM KETENAGALISTRIKAN
TERHADAP RISIKO BANJIR AKIBAT PERUBAHAN
IKLIM DI DAS KAPUAS, KALIMANTAN BARAT**

KHOTIMAH RATNA INDRADJANUE

6014231063

DOSEN PEMBIMBING

Prof. Ir. JONI HERMANA, M.Sc.ES., Ph.D.

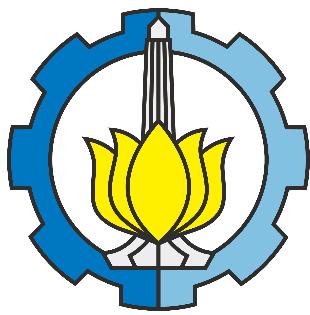
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN

FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN, DAN KEBUMIAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2026



TESIS - CL255402

ADAPTASI SISTEM KETENAGALISTRIKAN TERHADAP RISIKO BANJIR AKIBAT PERUBAHAN IKLIM DI DAS KAPUAS, KALIMANTAN BARAT

KHOTIMAH RATNA INDRADJANUE

6014231063

DOSEN PEMBIMBING

Prof. Ir. JONI HERMANA, M.Sc.ES., Ph.D

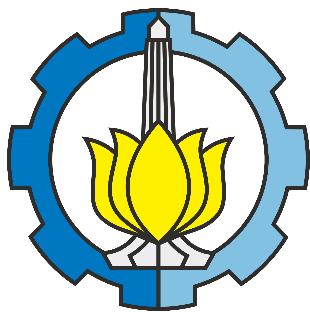
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN

FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN, DAN KEBUMIAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2026



THESIS - CL255402

CLIMATE CHANGE ADAPTATION OF THE ELECTRICITY INFRASTRUCTURE TO FLOOD RISK IN THE KAPUAS RIVER BASIN, WEST KALIMANTAN

KHOTIMAH RATNA INDRADJANUE

6014231063

SUPERVISOR

Prof. Ir. JONI HERMANA, M.Sc.ES., Ph.D

**DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
FACULTY OF CIVIL, PLANNING, AND GEO ENGINEERING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2026**

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Oleh:
KHOTIMAH RATNA INDRADJANUE
NRP: 6014231063

Tanggal Ujian: 13 Januari 2026
Periode Wisuda: April 2026

Disetujui oleh:
Pembimbing:

1. Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.ES., Ph.D
NIP: 196006181988031002

Pengaji:

1. Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si, MT
NIP: 197510182005011003

2. Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, ST, MEP
NIP: 198201192005011001

3. Ir. Mas Agus Mardyanto, M.E., PhD
NIP: 196208161990031004



Dr. Susi Agustina Wilujeng, ST., MT

NIP: 197108181994122001

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Khotimah Ratna Indradjanue/ 6014231063

Program Studi : Magister Perubahan Iklim dan Perdagangan Karbon

Dosen Pembimbing / NIP : Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.ES.,Ph.D / 196006181988031002

Dengan ini menyatakan bahwa Tesis dengan judul "Adaptasi Sistem Ketenagalistrikan Terhadap Risiko Banjir Akibat Perubahan Iklim di DAS Kapuas, Kalimantan Barat" adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 23 Januari 2026

Mengetahui,

Dosen Pembimbing

Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.ES.,Ph.D

NIP. 196006181988031002

Mahasiswa

Khotimah Ratna Indradjanue

NRP. 6014231063

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ADAPTASI SISTEM KETENAGALISTRIKAN TERHADAP RISIKO BANJIR AKIBAT PERUBAHAN IKLIM DI DAS KAPUAS, KALIMANTAN BARAT

Nama Mahasiswa : Khotimah Ratna Indradjanue
NRP : 6014231063
Pembimbing : Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.ES., Ph.D

ABSTRAK

Perubahan iklim telah meningkatkan frekuensi dan intensitas kejadian hidrometeorologi ekstrem, khususnya banjir, yang berpotensi mengganggu keandalan sistem ketenagalistrikan. Provinsi Kalimantan Barat, dengan Daerah Aliran Sungai (DAS) Kapuas sebagai DAS terbesar, memiliki tingkat kerentanan tinggi terhadap banjir akibat curah hujan yang tinggi, dominasi wilayah dataran rendah, serta perubahan tata guna lahan. Infrastruktur ketenagalistrikan seperti jaringan transmisi dan gardu induk yang umumnya berada di sepanjang koridor sungai dan dataran banjir menjadi sangat rentan terhadap genangan, yang dapat memicu gangguan operasi, pemadaman listrik, peningkatan *Energy Not Served* (ENS), serta kerugian ekonomi. Oleh karena itu, diperlukan kajian berbasis risiko iklim untuk mendukung perencanaan adaptasi sistem ketenagalistrikan yang lebih tangguh terhadap dampak perubahan iklim.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kondisi curah hujan historis dan proyeksi hingga tahun 2060, memetakan risiko banjir di DAS Kapuas, serta menilai dampaknya terhadap sistem ketenagalistrikan. Analisis curah hujan dilakukan menggunakan data satelit CHIRPS periode 2014–2024 dan data proyeksi iklim CMIP6 berdasarkan skenario SSP1-2.6, SSP2-4.5, dan SSP5-8.5 periode 2026–2060. Pemetaan risiko banjir dilakukan secara spasial menggunakan pendekatan *Weighted Linear Combination* (WLC) dengan parameter curah hujan, kemiringan lahan, tutupan lahan, dan tekstur tanah. Selanjutnya, peta risiko banjir dilakukan *overlay* dengan infrastruktur transmisi dan gardu induk di DAS Kapuas untuk mengidentifikasi tingkat kerentanan. Perumusan prioritas strategi adaptasi

dilakukan menggunakan integrasi metode SWOT dan *Analytical Hierarchy Process* (AHP).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa DAS Kapuas tetap berada pada kategori iklim sangat basah hingga tahun 2060, dengan jumlah hari hujan lebih dari 300 hari per tahun serta kecenderungan peningkatan intensitas hujan ekstrem, terutama pada skenario SSP5-8.5. Pemetaan risiko banjir memperlihatkan bahwa sebagian besar wilayah DAS Kapuas secara konsisten berada pada kategori risiko banjir tinggi hingga sangat tinggi, khususnya di wilayah hilir dan dataran rendah. Hasil overlay menunjukkan bahwa lebih dari 85% menara transmisi dan hampir seluruh gardu induk berada pada zona risiko banjir tinggi. Kondisi ini berimplikasi pada peningkatan potensi gangguan sistem, ENS, dan kerugian ekonomi dan berdampak pada lingkungan. Strategi adaptasi prioritas yang direkomendasikan meliputi penguatan standar desain teknis, integrasi risiko iklim dalam perencanaan aset ketenagalistrikan, serta peningkatan kesiapsiagaan dan respons operasional untuk meningkatkan ketahanan sistem ketenagalistrikan di DAS Kapuas.

Kata kunci: perubahan iklim, banjir, DAS Kapuas, ketenagalistrikan, adaptasi

CLIMATE CHANGE ADAPTATION OF THE ELECTRICITY INFRASTRUCTURE TO FLOOD RISK IN THE KAPUAS RIVER BASIN, WEST KALIMANTAN

By : Khotimah Ratna Indradjanue
Student's ID : 6014231063
Supervisor : Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.ES., Ph.D

ABSTRACT

Climate change has intensified the frequency and magnitude of extreme hydrometeorological events, particularly flooding, posing significant risks to the reliability of electricity systems. West Kalimantan, with the Kapuas River Basin as the largest watershed in the region, is highly vulnerable to flooding due to high rainfall intensity, extensive lowland topography, and ongoing land-use changes. Critical electricity infrastructure, including transmission lines and substations, is predominantly located along river corridors and floodplains, increasing its exposure to inundation. These conditions may lead to operational disruptions, power outages, increased Energy Not Served (ENS), and substantial economic losses. Therefore, climate risk-based assessments are essential to support climate-resilient electricity infrastructure planning.

This study aims to assess historical and projected rainfall conditions up to 2060, map flood risk in the Kapuas River Basin, and evaluate its impacts on the electricity system. Rainfall analysis was conducted using CHIRPS satellite data for the period 2014–2024 and CMIP6 climate projections under SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios for the period 2026–2060. Flood risk mapping was performed using a Geographic Information System (GIS)-based Weighted Linear Combination (WLC) approach integrating rainfall, slope, land use, and soil texture parameters. The resulting flood risk maps were overlaid with electricity transmission and substation infrastructure to assess vulnerability levels. Adaptation strategies were formulated using an integrated SWOT analysis and the Analytical Hierarchy Process (AHP).

The results indicate that the Kapuas River Basin will remain within a very wet climatic regime through 2060, with more than 300 rainy days per year and increasing rainfall intensity and variability, particularly under the high-emission SSP5-8.5 scenario. Flood risk mapping reveals that large portions of the basin consistently fall into high to very high flood risk categories, especially in downstream and lowland areas. Infrastructure analysis shows that more than 85% of transmission towers and nearly all substations are located in high-risk flood zones. These conditions imply an increased likelihood of system disruptions, higher ENS values, and greater economic losses. Priority adaptation strategies include strengthening technical design standards, integrating climate risk into electricity asset planning, and enhancing operational preparedness to improve the resilience of the electricity system in the Kapuas River Basin.

Keywords: climate change, flood risk, Kapuas River Basin, electricity system, adaptation

KATA PENGANTAR

Puji syukur Penulis hantarkan kepada Allah SWT. Yang senantiasa memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penyusunan tesis dengan judul “Adaptasi Sistem Ketenagalistrikan Terhadap Risiko Banjir Akibat Perubahan Iklim di DAS Kapuas, Kalimantan Barat” dapat terselesaikan dengan baik. Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.ES.,Ph.D selaku dosen pembimbing yang senantiasa dengan sabar dan dedikasinya memberikan ilmu, wawasan dan bimbingan selama penelitian dan penulisan laporan tesis.
2. Bapak Dr. Eng Arie Dipareza Syafei S.T., MEPM, Bapak Dr. Abdu Fadli Assomadi S. Si., M.T., dan Bapak Ir. Mas Agus Mardyanto, ME., PhD
3. Bapak Imam Muttaqien sebagai mentor dari PT PLN (Persero) yang telah memberikan arahan dan berbagi informasi serta ilmunya dalam proses penyusunan laporan tesis.
4. Suamiku Nizar Lazuardy Firmansyah yang selalu memberikan semangat, motivasi dan dukungan selama ini.
5. Orangtua, Mertua dan adiiku yang selalu mendoakan untuk kelancaran proses penyusunan laporan tesis.
6. Mbak Aprilia, Mas Sayid Romdhoni, Mas Eko Purwanto, rekan – rekan K3L dan keluarga besar PLN UIP KLB yang selalu mendukung, memberikan motivasi dan bantuan selama penelitian dan penyusunan tesis.
7. Mbak Ria, Ratna Maniz, Fathima dan Qisthi yang dengan ikhlas dan cepat membantu dalam proses penelitian dan penulisan laporan tesis ini.
8. Rekan – rekan PJJ S2 PLN Teknik Lingkungan yang senang berbagi ilmu, informasi, pengalaman ndan suka duka selama menjalani seluruh proses perkuliahan hingga penyusunan laporan tesis.

9. Bapak dan Ibu serta segenap keluarga besar Departemen Teknik Lingkungan ITS yang membantu proses kelancaran penelitian.
10. Seluruh pihak yang secara langsung maupun tidak langsung memberikan bantuan kepada Penulis sehingga proses penulisan tesis ini berjalan dengan lancar.

Laporan tesis ini tidak lepas dari kesalahan sehingga Penulis mohon maaf atas ketidaksempurnaan yang ada dan berharap adanya kritik yang membangun. Semoga laporan tesis ini dapat memberikan manfaat bagi pihak – pihak yang berkepentingan terutama untuk PT PLN (Persero) untuk memberikan pandangan baru mengenai strategi adaptasi perubahan iklim dan dinamika risiko lingkungan untuk pembangunan berkelanjutan di masa yang akan datang.

Surabaya, Januari 2026

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xviii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
 1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Ruang Lingkup	3
 BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1 Deskripsi Lokasi Penelitian	5
2.2 Infrastruktur Ketenagalistrikan	9
2.2.1 Sistem Transmisi Listrik	10
2.2.2 Gardu Induk	12
2.2.3 Sistem Ketenagalistrikan Kalimantan Barat	13
2.3 Perubahan Iklim.....	14
2.3.1 Kejadian Banjir Akibat Perubahan Iklim	14
2.3.2 Peristiwa Banjir di Kalimantan Barat	17
2.3.3 Dampak Perubahan Iklim pada Infrastruktur Ketenagalistrikan	20
2.4 Permodelan Perubahan Iklim.....	24
2.4.1 Skenario Permodelan Iklim	26
2.4.2 Indek Kerawanan Banjir	29
2.5 Pemetaan Risiko Banjir dengan Sistem Informasi Geografis	29
2.6 Adaptasi Perubahan Iklim	30

2.6.1	Analisis <i>SWOT</i> dan <i>Analytical Hierarchy Process</i> dalam Penentuan Strategi Adaptasi Perubahan Iklim	31
BAB 3	METODOLOGI	35
3.1	Kerangka Penelitian	35
3.2	Deskripsi Penelitian	36
3.3	Tahapan Penelitian.....	36
3.3.1	Tahap Persiapan.....	36
3.3.2	Tahap Pengumpulan Data	37
3.3.3	Tahap Analisis Data	37
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	45
4.1	Analisis Curah Hujan	45
4.1.1	Curah Hujan Historis DAS Kapuas	45
4.1.2	Analisis Curah Hujan Proyeksi DAS Kapuas	54
4.2	Analisis Indeks Kerawanan Banjir DAS Kapuas.....	67
4.2.1	Curah Hujan DAS Kapuas	68
4.2.2	Kemiringan Lahan DAS Kapuas.....	69
4.2.3	Tata Guna Lahan dan Tekstur Tanah DAS Kapuas	71
4.3	Analisis Spasial Risiko Banjir DAS Kapuas.....	76
4.3.1	Pemetaan Risiko Banjir SSP1-2.6.....	78
4.3.2	Pemetaan Risiko Banjir SSP2-4.5.....	83
4.3.3	Pemetaan Risiko Banjir SSP5-8.5.....	87
4.3.4	Hasil Analisis Indeks Kerawanan Banjir Skenario SSP.....	92
4.4	Dampak Risiko Kerawanan Banjir Terhadap Infrastruktur Ketenagalistrikan DAS Kapuas	94
4.5	Dampak Perubahan Iklim Bencana Banjir.....	108
4.5.1	Perhitungan Aspek Teknis Pembangunan	109
4.5.2	Perhitungan Potensi Dampak Sosial dan Ekonomi.....	114
4.5.3	Perhitungan Aspek Teknis Operasional	127
4.6	Strategi Adaptasi	132
4.6.1	Identifikasi SWOT	132
4.6.2	Strategi SO, ST, WO dan WT	137
4.6.3	Analisis Prioritas Strategi Menggunakan AHP	138

BAB 5_KESIMPULAN	149
5.1 Kesimpulan.....	149
5.2 Saran	151
DAFTAR PUSTAKA.....	152

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Peta Provinsi Kalimantan Barat (BNPB, 2021)	7
Gambar 2.2 Peta Pembagian DAS Wilayah Sungai Kapuas.....	8
Gambar 2.3 Sistem Ketenagalistrikan (PT PLN (Persero), 2021)	10
Gambar 2.4 Sistem Ketenegalistrikan Kalimantan Barat – Kalimantan Tengah ..	13
Gambar 2.5 Perbedaan Resolusi GCM dan RCM (www.ukm.my, 2025).....	25
Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian (Penulis, 2025).....	35
Gambar 4. 1 Curah Hujan Rata – Rata DAS Kapuas CHIRPS Tahun 2014 - 2024	47
Gambar 4. 2 Curah Hujan Tertinggi DAS Kapuas CHIRPS Tahun 2014 – 2024.	48
Gambar 4. 3 Hari Hujan DAS Kapuas CHIRPS Tahun 2014 – 2024	49
Gambar 4. 4 Jumlah Curah Hujan Tahunan DAS Kapuas CHIRPS Tahun 2014 – 2024.....	50
Gambar 4. 5 Tren Curah Hujan Stasiun Hujan Kalimantan Barat	53
Gambar 4. 6 Curah Hujan Rata – Rata Skenario SSP Tahun 2026 -2060.....	56
Gambar 4. 7 Curah Hujan Tertinggi Skenario SSP Tahun 2026 -2060.....	58
Gambar 4. 8 Jumlah Curah Hujan Skenario SSP Tahun 2026 -2060.....	60
Gambar 4. 9 Jumlah Hari Hujan Skenario SSP Tahun 2026 -2060	62
Gambar 4. 10 Peta Kemiringan Lahan DAS Kapuas.....	70
Gambar 4. 11 Peta Tutupan Lahan Lahan DAS Kapuas	72
Gambar 4. 12 Peta Jenis Tekstur Tanah DAS Kapuas	74
Gambar 4. 13 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP1-2.6 Tahun 2026 – 2030	79
Gambar 4. 14 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP1-2.6 Tahun 2031 – 2035	79
Gambar 4. 15 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP1-2.6 Tahun 2036 – 2040	80
Gambar 4. 16 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP1-2.6 Tahun 2041 - 2045	80

Gambar 4. 17 Peta Kerawan Banjir DAS Kapuas SSP1-2.6 Tahun 2045 - 2050	.....	81
Gambar 4. 18 Peta Kerawan Banjir DAS Kapuas SSP1-2.6 Tahun 2051 - 2055	.....	81
Gambar 4. 19 Peta Kerawan Banjir DAS Kapuas SSP1-2.6 Tahun 2056 - 2060	.....	82
Gambar 4. 20 Peta Kerawan Banjir DAS Kapuas SSP2-4.5 Tahun 2026 -2030	83	
Gambar 4. 21 Peta Kerawan Banjir DAS Kapuas SSP2-4.5 Tahun 2031 - 2035	.....	84
Gambar 4. 22 Peta Kerawan Banjir DAS Kapuas SSP2-4.5 Tahun 2036 – 2040	.....	84
Gambar 4. 23 Peta Kerawan Banjir DAS Kapuas SSP2-4.5 Tahun 2041 - 2045	.....	85
Gambar 4. 24 Peta Kerawan Banjir DAS Kapuas SSP2-4.5 Tahun 2046 - 2050	.....	85
Gambar 4. 25 Peta Kerawan Banjir DAS Kapuas SSP2-4.5 Tahun 2051 - 2055	.....	86
Gambar 4. 26 Peta Kerawan Banjir DAS Kapuas SSP2-4.5 Tahun 2055 - 2060	.....	86
Gambar 4. 27 Peta Kerawan Banjir DAS Kapuas SSP5-8.5 Tahun 2026 - 2030	.....	88
Gambar 4. 28 Peta Kerawan Banjir DAS Kapuas SSP5-8.5 Tahun 2031 – 2035	.....	88
Gambar 4. 29 Peta Kerawan Banjir DAS Kapuas SSP5-8.5 Tahun 2036 – 2040	.....	89
Gambar 4. 30 Peta Kerawan Banjir DAS Kapuas SSP5-8.5 Tahun 2041 - 2045	.....	89
Gambar 4. 31 Peta Kerawan Banjir DAS Kapuas SSP5-8.5 Tahun 2046 - 2050	.....	90
Gambar 4. 32 Peta Kerawan Banjir DAS Kapuas SSP5-8.5 Tahun 2051 – 2055	.....	90

Gambar 4. 33 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP5-8.5 Tahun 2056 - 2060	91
Gambar 4. 34 Peta Kerawanan Banjir Jalur Transmisi Ketenagalistrikan di DAS Kapuas SSP1-26 Tahun 2054.....	95
Gambar 4. 35 Peta Kerawanan Banjir Jalur Transmisi Ketenagalistrikan di DAS Kapuas SSP1-26 Tahun 2054.....	96
Gambar 4. 36 Peta Kerawanan Banjir Jalur Transmisi Ketenagalistrikan di DAS Kapuas SSP5-8.5 Tahun 2049.....	96
Gambar 4. 37 Peta Kerawanan Banjir Gardu Induk di DAS Kapuas SSP1-2.6 Tahun 2054.....	105
Gambar 4. 38 Peta Kerawanan Banjir Gardu Induk di DAS Kapuas SSP2-4.5 Tahun 2029	105
Gambar 4. 39 Peta Kerawanan Banjir Gardu Induk di DAS Kapuas SSP5-8.5 Tahun 2049.....	106
Gambar 4. 40 Kerugian Business Cost Skenario SSP1-2.6	124
Gambar 4. 41 Kerugian Business Cost Skenario SSP2-4.5	125
Gambar 4. 42 Kerugian Business Cost Skenario SSP5-8.5	125
Gambar 4. 43 ENS UP3 Pontianak dan UP3 Sanggau Tahun 2024.....	129

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Wilayah Administrasi DAS Kapuas	5
Tabel 2.2 Kemiringan DAS Kapuas.....	6
Tabel 2.3 Potensi Bahaya di DAS Kapuas, Kalimantan Barat.....	19
Tabel 2.4 Kelas Kerentanan Bencana Banjir DAS Kapuas, Kalimantan Barat	20
Tabel 2.5 Kelas Kerentanan Bencana Banjir DAS Kapuas, Kalimantan Barat	21
Tabel 2.6 Skenario Representative Concentration Pathways.....	26
Tabel 3. 1 Data Penelitian	37
Tabel 3. 2 Data Stasiun Hujan DAS Kapuas.....	39
Tabel 3. 3 Pembobotan Indeks Kerawanan Banjir	40
Tabel 3. 4 Matriks SWOT	44
Tabel 4. 1 Data Curah Hujan Harian Kalimantan Barat dan DAS Kapuas.....	45
Tabel 4. 2 Data Curah Hujan Harian Kalimantan Barat dan DAS Kapuas.....	51
Tabel 4. 3 Evaluasi Data Hujan Historis	53
Tabel 4. 4 Klasifikasi Curah Hujan	69
Tabel 4. 5 Kemiringan Lahan DAS Kapuas.....	69
Tabel 4. 6 Kemiringan Lahan DAS Kapuas.....	71
Tabel 4. 7 Jenis Tekstur Tanah DAS Kapuas	73
Tabel 4. 8 Pembobotan Indeks Kerawanan Banjir	76
Tabel 4. 9 Kategori Indeks Kerawanan Banjir	78
Tabel 4. 10 Luasan Kawasan Rawan Banjir DAS Kapuas SSP1-2.6.....	82
Tabel 4. 11 Luasan Kawasan Rawan Banjir DAS Kapuas SSP2-4.5.....	87
Tabel 4. 12 Luasan Kawasan Rawan Banjir DAS Kapuas SSP5-8.5.....	91
Tabel 4. 13 Gardu Induk dalam DAS Kapuas	94
Tabel 4. 14 Jalur Transmisi Ketenagalistrikan dalam DAS Kapuas	94
Tabel 4. 15 Kerawanan Banjir pada Jalur Transmisi Ketenagalistrikan DAS Kapuas	97
Tabel 4. 16 Kerawanan Banjir pada Jalur Transmisi Ketenagalistrikan DAS Kapuas berdasarkan SSP1-2.6 Tahun 2054	97

Tabel 4. 17 Kerawanan Banjir pada Jalur Transmisi Ketenagalistrikan DAS	
Kapuas berdasarkan SSP2-4.5 Tahun 2029	99
Tabel 4. 18 Kerawanan Banjir pada Jalur Transmisi Ketenagalistrikan DAS	
Kapuas berdasarkan SSP5-8.5 Tahun 2049	102
Tabel 4. 19 Kerawanan Banjir pada Gardu Induk DAS Kapuas.....	106
Tabel 4. 20 Referensi Penelitian Terdahulu	110
Tabel 4. 21 Capacity Factor Pembangkit.....	112
Tabel 4. 22 Energi yang Dihasilkan.....	113
Tabel 4. 23 Emisi yang Dihasilkan.....	113
Tabel 4. 24 Jumlah Pelanggan	114
Tabel 4. 25 Asumsi proyeksi pertumbuhan GDP	120
Tabel 4. 26 Pelanggan Terdampak Tahun 2024.....	121
Tabel 4. 27 Faktor Pengali Kerentanan Iklim.....	122
Tabel 4. 28 Perhitungan Kerugian Business Cost Skenario SSP1-2.6	123
Tabel 4. 29 Perhitungan Kerugian Business Cost Skenario SSP2-4.5	123
Tabel 4. 30 Perhitungan Kerugian Business Cost Skenario SSP5-8.5	124
Tabel 4. 31 Data ENS UP3 Tahun 2024	128
Tabel 4. 32 Nilai Kerugian Akibat ENS	131
Tabel 4. 33 Identifikasi Faktor Internal - Eksternal.....	133
Tabel 4. 34 Strategi SWOT.....	137
Tabel 4. 35 Pembobotan Faktor SWOT.....	139
Tabel 4. 36 Tabel Prioritas Keterkaitan Weighted Score dengan Strategi SWOT	140

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kalimantan Barat sangat rentan terhadap bencana akibat perubahan iklim. Perubahan iklim menyebabkan perubahan pola curah hujan dan peningkatan kejadian ekstrem seperti hujan intens yang memicu banjir. Berdasarkan data Badan Nasional Penganggulangan Bencana (BNPB), Provinsi Kalimantan Barat memiliki sejarah peristiwa banjir, tanah longsor, gelombang pasang/abrasi, angin puting beliung dan kebakaran hutan dan lahan. Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kalimantan Barat telah melakukan pencatatan kejadian bencana pada rentang tahun 2019 – 2023 diantara bencana banjir sebanyak 684 kejadian, tanah longsor 91 kejadian, puting beliung 52 kejadian dan kebakaran hutan lahan (karhutla) sebanyak 866 kejadian yang tersebar di 14 Kabupaten di Provinsi Kalimantan Barat. Dengan 609 kejadian banjir terjadi di DAS Kapuas. DAS Kapuas merupakan DAS terbesar di Kalimantan Barat yang melewati 11 dari 14 Kabupaten di Kalimantan Barat.

Kejadian banjir merupakan ancaman fisik yang signifikan bagi keandalan dan kontinuitas pasokan listrik karena banyak komponen kritis, seperti gardu induk, jaringan transmisi dan distribusi, serta fasilitas pembangkit, seringkali terletak di dataran rendah atau sepanjang koridor sungai yang rentan terhadap genangan. Literatur teknis menunjukkan bahwa banjir dapat menyebabkan kerusakan mekanik dan elektrikal pada peralatan seperti transformator, panel kontrol, dan sistem proteksi, serta meningkatkan risiko pemutusan operasional untuk alasan keselamatan, yang pada akhirnya memicu pemadaman listrik dan memperpanjang durasi gangguan layanan. Kejadian bencana banjir sangat berisiko terhadap keandalan sistem penyaluran kelistrikan yang dapat menyebabkan kerugian ekonomi dan sosial bagi wilayah yang terdampak. Peristiwa banjir yang terjadi di Jakarta pada tahun 2013 mengakibatkan pemadaman sekitar 1847 Gardu Induk di Jakarta dengan kerugian ekonomi yang dialami oleh PT PLN (Persero) sebesar 116 miliar rupiah (Kementerian ESDM, 2013). Kejadian banjir berdampak langsung

terhadap peningkatan durasi *outages* sistem listrik. Kejadian banjir yang terjadi di Kalimantan Barat menyebabkan pemadaman listrik yang membuat kegiatan perekonomian, Pendidikan, pemerintahan dan pelayanan kesehatan sejumlah wilayah terdampak menjadi terhenti (Wida Novianti & Cau Kim Jiu, 2024).

Kejadian banjir yang terjadi membuat infrastruktur kelistrikan tergenang sehingga penyiaran listrik harus dipadamkan. Terganggunya akses listrik karena pemadaman yang diakibatkan karena banjir membuat masyarakat tidak dapat menggunakan listrik untuk kegiatan ekonomi, sosial dan kehidupan sehari – hari. Kejadian banjir yang terjadi di Provinsi Kalimantan Barat disebabkan oleh tingginya curah hujan, volume debit air yang melebihi kapasitas sungai, pasang surut air laut dan kenaikan muka air laut. Selain itu faktor deforestasi juga dapat menyebabkan banjir. Merujuk pada riset *Global Forest Watch* (2021), dalam periode 2002 – 2020, Kalimantan Barat sudah kehilangan sekitar 1,25 Juta Hektar Hutan Primer.

Diperlukan kajian kerentanan infrastruktur ketenagalistrikan sebagai upaya adaptasi dampak yang ditimbulkan dari kejadian banjir sehingga penyiaran kelistrikan tetap berjalan andal, optimal dan berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan listrik di Provinsi Kalimantan Barat dengan permodelan proyeksi wilayah banjir dari data curah hujan di Provinsi Kalimantan Barat.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah untuk penelitian ini adalah:

1. Bagaimana perubahan iklim memengaruhi risiko kejadian banjir di DAS Kapuas, Provinsi Kalimantan Barat?
2. Bagaimana dampak yang ditimbulkan akibat terjadinya banjir pada sistem ketenagalistrikan di DAS Kapuas?
3. Bagaimana langkah adaptasi dampak peristiwa banjir terhadap infrastruktur ketenagalistrikan?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengkaji kondisi curah hujan berdasarkan skenario permodelan iklim SSP1-2.6, SSP2-4.5 dan SSP5-8.5 pada DAS Kapuas hingga tahun 2060.
2. Pemetaan risiko banjir dan dampak pada sistem ketenagalistrikan di DAS Kapuas, Kalimantan Barat.
3. Memberikan rekomendasi langkah adaptasi yang dapat diterapkan dari dampak peristiwa bencana banjir terhadap sistem ketenagalistrikan di DAS Kapuas, Kalimantan Barat

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini antara lain:

1. Memberikan informasi dan gambaran terkait potensi kerugian yang diakibatkan oleh peristiwa bencana perubahan iklim pada pembangunan infrastruktur dan operasional sistem transmisi ketenagalistrikan di masa yang akan datang.
2. Menjadi refensi dan rekomendasi bagi unit pembangunan dan pengelola sistem transmisi ketenagalistrikan dalam menyusun upaya adaptasi perubahan iklim khususnya terhadap bencana banjir terhadap keandalan sistem ketenagalistrikan.

1.5 Ruang Lingkup

Penelitian ini dibatasi pada:

1. Lingkup wilayah penelitian berada di DAS Kapuas Kalimantan Barat dengan studi kasus infrastruktur sistem kelistrikan Khatulistiwa Kalimantan Barat
2. Variabel iklim yang digunakan adalah variabel curah hujan historis dari CHIRPS dan Proyeksi berdasarkan CMIP6 dengan skenario SSP1-2.6, SSP2-4.5 dan SSP5-8.5 dan data karakteristik DAS Kapuas
3. Pengolahan data proyeksi curah hujan di Provinsi Kalimantan Barat menggunakan skenario *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP)

menggunakan data NASA NEX-GDDP-CMIP6 yang berasal dari *Google Earth Engine* yang dikembangkan secara resmi oleh NASA menggunakan metode *Bias Correction and Spatial Disaggregation* (BSCD) dan tidak dilakukan validasi terhadap curah hujan lokal DAS Kapuas.

4. Proyeksi banjir tanpa memperhitungkan kondisi kenaikan permukaan air laut dan karakteristik pasang surut air laut.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Deskripsi Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian dilakukan pada DAS Kapuas di Provinsi Kalimantan Barat. Berdasarkan data BNPB Tahun 2021, secara umum Provinsi Kalimantan Barat secara geografis terletak pada $2^{\circ} 08' \text{ LU}$ - $3^{\circ} 02' \text{ LS}$ antara $108^{\circ} 30' \text{ BT}$ - $114^{\circ} 10' \text{ BT}$. Kalimantan Barat memiliki luas wilayah seluas 147.352 km^2 yang memiliki ibukota di Kota Pontianak. Provinsi Kalimantan Barat terdiri dari 12 Kabupaten dan 2 Kota. DAS Kapuas sendiri merupakan DAS terluas di Kalimantan Barat yang memiliki luas $100.303.08 \text{ km}^2$ atau setara dengan 69,32% dari total keseluruhan luas DAS di Provinsi Kalimantan Barat (BPDASHL Kapuas, 2019).

DAS Kapuas melalui 11 dari 14 Kabupaten di Provinsi Kalimantan Barat yaitu Kabupaten Landak, Kabupaten Kapuas Hulu, Kabupaten Sintang, Kota Pontianak, Kabupaten Sekadau, Kabupaten Kubu Raya, Kabupaten Sanggau, Kabupaten Melawi dan sebagian melalui Kabupaten Ketapang, Kabupaten Mempawah dan Kabupaten Kayong Utara dengan rincian cakupan DAS Kapuas berdasarkan Kabupaten/Kota dapat dilihat pada Tabel 2.1. DAS Kapuas bermula di hulu yang berada di Kabupaten Kapuas Hulu dan hilir di Kabupaten Kubu Raya dan Kota Pontianak.

Tabel 2.1 Wilayah Administrasi DAS Kapuas

No	Kabupaten /Kota	Luas Administrasi (km^2)	Luas Dalam DAS Kapuas (km^2)	(%)
1	Kapuas Hulu	31.140,50	31.140,50	30,18
2	Sintang	22.154,35	22.154,35	21,47
3	Melawi	10.213,77	10.213,77	9,90
4	Sekadau	5.657,91	5.657,91	5,48
5	Sanggau	12.796,44	12.796,44	12,40
6	Kubu Raya	8.524,45	8.524,45	8,26
7	Landak	9.909,10	7.222,89	7,00

No	Kabupaten /Kota	Luas Administrasi (km ²)	Luas Dalam DAS Kapuas (km ²)	(%)
8	Kayong Utara	4.568,26	2.046,76	1,98
9	Ketapang	31.240,74	2.524,64	2,45
10	Mempawah	1.276,90	717,02	0,70
11	Kota Pontianak	166,78	166,78	0,16

Sumber: Analisis Rupa Bumi Indonesia, 2015

Topografi DAS Kapuas merupakan dataran rendah dengan sedikit berbukit dengan sebagian daerah datar merupakan rawa bercampur gambut dan hutan mangrove. Berdasarkan data DEM (*Digital Elevation Model*), dapat diketahui topografi kemiringan DAS Kapuas yang diklasifikasikan dalam kelas kemiringan yang dapat dilihat pada Tabel 2.2.

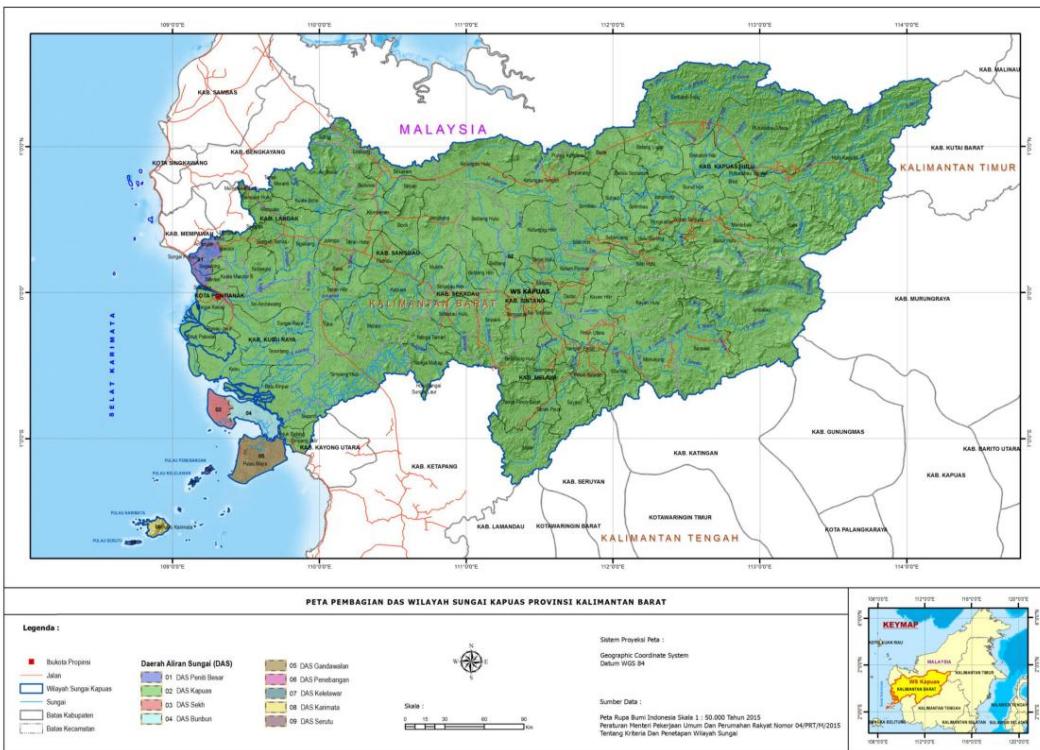
Tabel 2.2 Kemiringan DAS Kapuas

No	Kemiringan Lahan DAS Kapuas	Kategori Kemiringan	Luas (km ²)	Persentase Luas (%)
1	0 – 8 %	Datar	563,57	0,55
2	8 – 15 %	Landai	67.730,89	65,65
3	15 – 25 %	Agak Curam	14.001,30	13,57
4	25 – 40 %	Curam	12.300,23	11,92
5	> 40 %	Sangat Curam	8.569,51	8,31
	TOTAL		103.165,51	100,00

Sumber : Analisis Rupa Bumi Indonesia, 2015



Gambar 2.1 Peta Provinsi Kalimantan Barat (BNPB, 2021)



Gambar 2.2 Peta Pembagian DAS Wilayah Sungai Kapuas

(Lampiran Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 04/PRT/M/2015)

Iklim di Kalimantan Barat merupakan iklim tropis dengan suhu udara yang relatif tinggi dan kelembaban udara yang tinggi dengan rata – rata suhu sekitar $26,7^{\circ}$ C sampai dengan $27,8^{\circ}$ C (BNPB, 2021). Karakteristik curah hujan di Kalimantan Barat merupakan curah hujan ekuatorial dan monsunal. Pola curah hujan ekuatorial memiliki dua puncak musim penghujan yang biasanya terjadi pada bulan Maret dan September. Pola curah hujan monsunal memiliki ciri pola hujan unimodal dengan satu puncak musim penghujan yang terjadi pada bulan Desember, Januari dan Februari (Astarini et al., 2022).

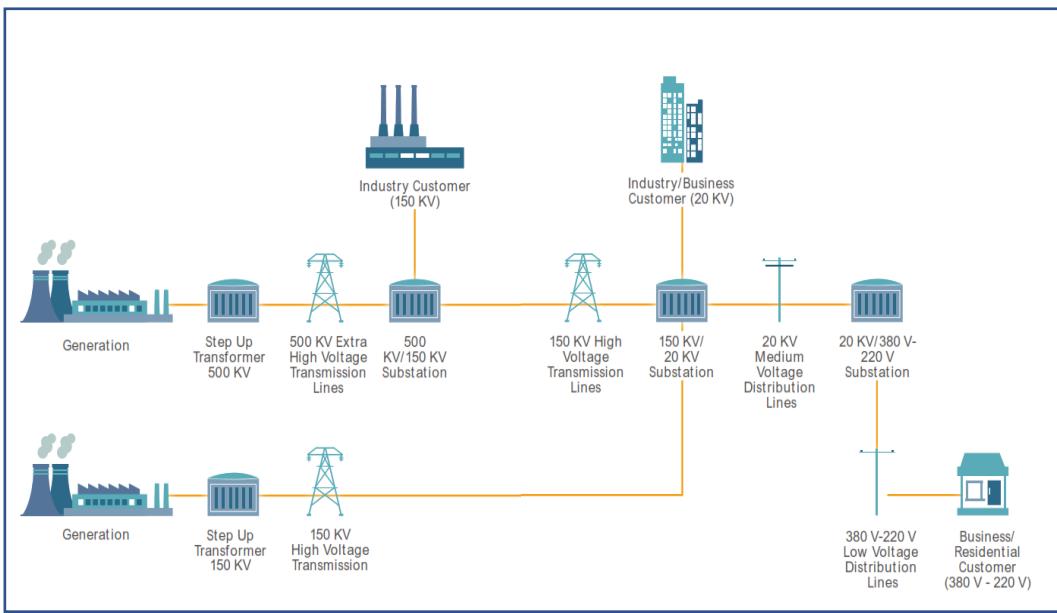
Karakteristik iklim pada DAS Kapuas dikategorikan iklim basah. Wilayah Kalimantan, termasuk DAS Kapuas, secara klimatologis menerima curah hujan tahunan yang relatif tinggi dibandingkan wilayah lain di Indonesia, dengan dominasi hujan sepanjang tahun dan kejadian hujan intensitas tinggi (Supari et al., 2016). Curah hujan pada DAS Kapuas tergolong sangat tinggi. Berdasarkan pada

data BMKG 10 tahun terakhir curah hujan pada beberapa stasiun hujan dalam area DAS Kapuas mencapai 4500 mm/tahun. Curah hujan tertinggi tahun 2020 tercatat pada stasiun hujan Nanga Pinoh, Kabupaten Melawi, yaitu sebesar 4458 mm/tahun atau mencapai 400mm/bulan.

Dalam beberapa dekade terakhir, kajian iklim menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan intensitas hujan ekstrem harian di wilayah Asia Tenggara, termasuk Kalimantan, yang berkaitan dengan pengaruh perubahan iklim global (IPCC, 2021). Akumulasi curah hujan yang tinggi dalam durasi singkat berdampak pada meningkatnya intensitas banjir yang terjadi. Faktor – faktor penting penyebab banjir diantaranya yaitu faktor hujan, retensi DAS, kesalahan perencanaan pembangunan alur sungai, pendangkalan sungai dan kesalahan tata wilayah dan pembangunan sarana dan prasarana (Muzdalifah, 2023). Potensi kejadian banjir terutama di wilayah tengah dan hilir DAS Kapuas yang didominasi oleh dataran rendah dengan sistem drainase alami yang lambat (Rahayu et al., 2019).

2.2 Infrastruktur Ketenagalistrikan

Energi listrik merupakan suatu komponen yang tidak dapat dipisahkan dari kegiatan di masyarakat saat ini. Teknologi pemanfaatan energi telah memegang peranan penting dalam berbagai sektor kehidupan yang berpengaruh dalam aspek sosial dan ekonomi dari skala kecil hingga skala besar. Listrik yang sampai kepada masyarakat disalurkan melalui sistem ketenagalistrikan yang bermula dari Unit Pembangkit Tenaga Listrik kemudian disalurkan melalui sistem transmisi listrik ke Gardu Induk dan didistribusikan melalui jaringan distribusi hingga akhirnya sampai kepada pengguna atau masyarakat. Secara umum, sistem kelistrikan meliputi sistem pembangkitan, sistem transmisi dan sistem distribusi (Ramadoni,2021). Sistem pembangkit listrik bertanggung jawab atas produksi daya, sistem transmisi berperan sebagai penghubung vital antara pusat – pusat pembangkit dan sistem distribusi, dan sistem distribusi yang menyalurkan daya ke berbagai bedan terpisah. Gambaran mengenai sistem kelistrikan dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Sistem Ketenagalistrikan (PT PLN (Persero), 2021)

2.2.1 Sistem Transmisi Listrik

Sistem transmisi listrik merupakan sistem penyaluran ketenagalistrikan yang berperan penting sebagai jembatan dalam mengalirkan daya dari pusat – pusat pembangkit ke sistem distribusi. Berdasarkan konstruksinya, saluran transmisi dibedakan atas saluran udara (*overhead lines*) dan saluran bawah tanah (*underground cable*). Pada saluran udara (*overhead lines*) energi listrik disalurkan melalui pengantar yang digantungkan pada menara atau tiang transmisi dengan perantaraan isolator. Sedangkan pada saluran bawah tanah (*underground cable*) energi listrik disalurkan melalui kabel – kabel yang ditanam di bawah permukaan tanah. Karena konstruksinya pada area yang terbuka, saluran udara sangat rentan terhadap cuaca buruk, badai, hujan deras, petir dan gangguan alam lainnya. Namun dari segi investasi, saluran udara lebih rendah dari saluran bawah tanah dan perbaikan pada gangguan yang terjadi lebih mudah. Standar tegangan tinggi yang berlaku di Indonesia mencakup rentang 30kV , 70kV dan 150kV. Berdasarkan kapasitas tegangan yang disalurkan, saluran transmisi terdiri dari:

- a. Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 200kV – 500kV
- b. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 30kV – 150kV
- c. Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT) 30kV – 150kV

Komponen utama saluran transmisi terdiri dari:

a. Menara transmisi atau tiang transmisi

Menara transmisi adalah bangunan penompang saluran transmisi yang berupa menara baja, tiang baja dan beton. Untuk saluran transmisi diatas 70kV menggunakan Menara baja.

b. Isolator

Isolator digunakan untuk mencegah hubung singkat antara kawat penghantar dengan menara transmisi. Jenis isolator yang digunakan pada saluran transmisi diantaranya adalah jenis porselin, gelas, polimer maupun epoksi resin. Berdasarkan penggunaan dan konstruksinya terdapat tiga jenis isolator, yaitu isolator jenis pasak, isolator jenis pos saluran dan isolator gantung.

c. Kawat penghantar (*conductor*)

Kawat penghantar atau konduktor adalah media untuk mengalirkan arus listrik dari pembangkit ke Gardu Induk yang terentang dari menara atau tower – tower transmisi. Jenis kawat penghantar pada saluran transmisi yaitu tembaga dengan konduktivitas 100%, tembaga dengan konduktivitas 97,5% dan alumunium dengan konduktivitas 61%. Kawat penghantar tembaga memiliki kelebihan dibandingkan dengan kawat penghantar alumunium karena memiliki konduktivitas dan kuat tarik yang kuat, tetapi memiliki kelemahan yaitu besar hambatan yang sama, berat dan harga yang lebih mahal sehingga kawat penghantar alumunium lebih banyak digunakan daripada kawat penghantar tembaga. Kawat penghantar alumunium terdiri dari berbagai jenis lempeng, yaitu:

- AAC = *All Aluminium Conductor* yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari alumunium
- AAAC = *All Aluminium Alloy Conductor* yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran alumunium
- ACSR = *Aluminium Conductor Steel Reinforced* yaitu kawat penghantar alumunium memiliki inti kawat baja

- ACAR = *Aluminium Conductor Alloy Reinforced* yaitu kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan campuran logam
- d. Kawat tanah (*ground wires*)
Kawat tanah disebut juga kawat pelindung (*shield wires*) yang berfungsi melindungi kawat – kawat penghantar terhadap sambaran petir. Kawat tanah umumnya menggunakan baja, namun sering juga digunakan kawat alumunium ACSR.
- e. *Arrester*
Arrester atau dikenal dengan *lightning arrester* memiliki peran dalam melindungi peralatan listrik dari potensi bahaya yang diakibatkan oleh tegangan yang berlebih, terutama saat terjadi lonjakan tegangan akibat petir yang dapat menyebabkan peralatan rusak. *Arrester* memungkinkan arus petir tersalurkan pada jalur khusus tanpa menciptakan tegangan berlebih pada peralatan listrik sehingga aliran listrik tetap stabil.

2.2.2 Gardu Induk

Gardu Induk (GI) merupakan satu kesatuan sebagai sistem penyaluran ketenagalistrikan yang mentransformasikan tegangan dari jaringan transmisi ke distribusi. Pada gardu induk terdapat transformator yang berfungsi mengubah tegangan tinggi menjadi tegangan yang lebih rendah sehingga aman untuk disalurkan melalui sistem distribusi untuk digunakan pada keperluan pelanggan listrik seperti rumah, kegiatan bisnis, industri dan sosial. Gardu induk juga berperan dalam mengatur beban di jaringan distribusi dengan mengoptimalkan penggunaan energi dan mengalokasikan daya dengan cerdas ke berbagai tujuan untuk mencegah kelebihan beban dan dapat menyebabkan pemadaman atau gangguan dalam aliran listrik. Gangguan listrik yang terjadi baik di sistem transmisi dan distribusi dapat ditangangi dengan menggunakan perangkat pemutus sirkuit pada gardu induk sehingga membantu menjaga kestabilan keandalan jaringan listrik.

2.2.3 Sistem Ketenagalistrikan Kalimantan Barat

Sistem ketenagalistrikan di Kalimantan Barat terdiri dari sistem interkoneksi 150 kV Khatulistiwa dengan beberapa sistem *isolated*. Sistem *isolated* merupakan sistem yang belum terinterkoneksi dari sistem ketenagalistrikan Khatulistiwa di Kalimantan Barat yang terdiri dari Sistem Sintang, Sistem Nanga Pinoh, Sistem Putussibau, Sistem Ketapang. Sistem Khatulistiwa terinterkoneksi juga dengan Sarawak melalui sistem transmisi 275 kV Bengkayang (Kalimantan Barat) – Mambong (Sarawak) yang meningkatkan keandalan Sistem Khatulistiwa hingga pembangunan proyek pembangkit non BBM di Kalimantan Barat selesai dikerjakan dan beroperasi seperti yang tertuang dalam Rencana usaha penyediaan tenaga listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021–2030. Pengembangan sistem transmisi di Kalimantan Barat direncanakan akan terinterkoneksi dengan Sistem Kalseltengtimra melalui pembangunan transmisi di Sukamara yang membentuk sistem interkoneksi Kalimantan secara utuh. Pengembangan sistem ketenagalistrikan di Kalimantan Barat dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Sistem Ketenegalistrikan Kalimantan Barat – Kalimantan Tengah

(PT PLN (Persero), 2025)

Pengembangan transmisi dan gardu induk di Kalimantan Barat ditujukan untuk memastikan ketersediaan tenaga listrik di setiap wilayah di Kalimantan Barat dengan melakukan transfer energi dari pusat pembangkit. Berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021 – 2030, pengembangan jaringan transmisi ketengalistrikan di Kalimantan Barat hingga tahun 2030 diperkirakan hingga 2.793 kms, sedangkan untuk pengembangan gardu induk direncanakan dengan kebijakan pembangunan satu GI di setiap Kabupaten dengan total perencanaan pembangunan hingga tahun 2030 adalah 690 MVA.

2.3 Perubahan Iklim

Perubahan iklim merupakan fenomena global yang ditandai oleh peningkatan suhu rata-rata permukaan bumi akibat aktivitas manusia, terutama emisi gas rumah kaca (GRK) dari pembakaran bahan bakar fosil, deforestasi, dan aktivitas industri. *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) dalam laporan terbarunya menegaskan bahwa sejak era pra-industri, suhu global telah meningkat sekitar 1,1°C akibat konsentrasi GRK yang terus bertambah di atmosfer. Perubahan iklim tidak terbatas pada peningkatan suhu, namun juga ditandai dengan peningkatan intensitas cuaca iklim, banjir, kekeringan serta kenaikan permukaan air laut. (IPCC, 2023). Perubahan iklim menurut *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) merupakan perubahan pada pola cuaca atau iklim baik secara langsung maupun tidak langsung yang disebabkan oleh aktivitas manusia yang menyebabkan perubahan pada komposisi atmosfir global. Dampak perubahan iklim meliputi peningkatan frekuensi dan intensitas cuaca ekstrem, kenaikan permukaan laut, serta gangguan terhadap ekosistem dan keanekaragaman hayati, di berbagai wilayah dunia (NASA, 2023).

2.3.1 Kejadian Banjir Akibat Perubahan Iklim

Banjir adalah suatu fenomena alam yang terjadi pada sungai-sungai di Indonesia dan umumnya terjadi di daerah dataran rendah yang merupakan dataran banjir (Irawan & Mulki, 2016). Definisi banjir yaitu meluapnya air sungai yang

mana disebabkan oleh debit sungai yang melampaui batas kapasitas dari sungai tersebut atau juga diartikan sebagai genangan pada daerah dataran rendah yang datar yang biasanya tidak mengalami genangan air banjir. Pada dasarnya banjir disebabkan karena tingginya curah hujan yang mengakibatkan sistem pangaliran air dan sistem drainase tidak mampu menampung akumulasi air hujan tersebut. (Andika et al., 2021). Pengertian banjir sendiri merupakan bencana dimana meluapnya air ke daratan yang biasanya kering. Banjir sering terjadinya akibat curah hujan yang tinggi, namun juga dapat diakibatkan oleh faktor yang tidak berhubungan dengan faktor cuaca (Doswell, 2003).

Perubahan iklim telah mengubah siklus hidrologi yang menyebabkan peristiwa hujan ekstrem dan risiko banjir yang tinggi (Tabari, 2020). Peristiwa banjir merupakan salah satu dampak perubahan iklim yang terjadi secara global. Perubahan iklim memicu peningkatan frekuensi dan intensitas kejadian cuaca ekstrem, seperti perubahan intensitas curah hujan, peningkatan suhu udara, intensitas badai, serta percepatan siklus hidrologi di permukaan bumi (Handoko, 2019). Peningkatan kejadian cuaca ekstrem akibat perubahan iklim global memungkinkan terjadinya bencana hidrometeorologi (IPCC, 2012). Berdasarkan publikasi Atlas Proyeksi Bencana Hidrometeorologi oleh BMKG, bencana hidrometeorologi berkaitan dengan curah hujan seperti kejadian banjir, banjir bandang, kekeringan, hujan ekstrem, tanah longsor, hujan es, puting beliung, angin kencang dan sebagainya (BMKG, 2022). Perubahan iklim mengakibatkan peningkatan intensitas curah hujan dan meningkatkan risiko banjir (Peng & Li, 2021).

Peningkatan curah hujan sebagai salah satu indikator penyebab peningkatan jumlah peristiwa banjir. Laju perubahan curah hujan tahunan yang diamati oleh BMKG dalam rentang tahun 1981 – 2023 menunjukkan bahwa laju perubahan curah hujan harian secara nasional telah mengalami peningkatan hingga 158 mm/30 tahun dan curah hujan tahunan tertinggi hingga 2784/30 tahun. Selain itu jumlah hari hujan juga meningkat hingga 129 hari/30 tahun dimana untuk hari hujan dengan curah hujan > 20 mm/hari mengalami peningkatan hingga 39 hari/30 tahun sehingga sangat mempengaruhi fungsi dan efektivitas saluran drainase yang ada (Panguriseng et al., 2024).

Perubahan kondisi lahan juga menjadi salah satu penyebab terjadinya banjir. Tingkat keparahan banjir dipengaruhi oleh perubahan struktur vegetasi, kualitas tanah dan luas Daerah Aliran Sungai (DAS) (Wells et al., 2016). Perubahan lahan yang beralih fungsi dari daerah resapan menjadi ladang serta lahan terbuka menyebabkan daerah tersebut memiliki daya serap yang kurang sehingga tidak mampu menyerap air dan menjadikan air hujan yang turun langsung menuju sungai dan menyebabkan sungai tidak mampu menampung dan menyebabkan terjadinya banjir (Fathi et al., 2019).

Indonesia sangat rentan terhadap dampak perubahan iklim seperti banjir, kekeringan, peningkatan muka air laut akibat perubahan curah hujan dan peningkatan suhu di atmosfer (World Bank, 2021). Indonesia memiliki banyak sungai sehingga diperlukan strategi yang sesuai dengan kondisi iklim yang terjadi saat ini. Dampak yang ditimbulkan dari peristiwa banjir mengakibatkan kerugian yang signifikan pada berbagai sektor. Banjir merupakan suatu peristiwa alam yang menyebabkan kerusakan yang meluas, berdampak buruk terhadap kehidupan sehari – hari dan menimbulkan kerentanan fisik, sosial, ekonomi dan lingkungan. Bencana banjir bukan hanya menimbulkan kerugian secara material tetapi juga mengakibatkan kerusakan lingkungan, sumber daya alam dan berpengaruh juga pada kesehatan manusia (Rakuasa et al., 2022). Berdasarkan Indonesia Disaster Management Reference Handbook, estimasi dampak banjir di Indonesia menunjukkan bahwa kejadian banjir berpotensi memengaruhi hingga sekitar 1,5 juta jiwa, dengan kerugian material mencapai sekitar USD 1,4 miliar, dan diproyeksikan meningkat hingga USD 6,1 miliar pada tahun 2030 (World Resources Institute, 2021). Banjir tidak hanya menyebabkan terendamnya permukiman penduduk, tetapi juga menimbulkan kerusakan pada bangunan serta mengganggu akses terhadap fasilitas umum. Banjir merupakan salah satu permasalahan sumber daya air yang paling signifikan di Indonesia karena menimbulkan korban jiwa dan kerugian ekonomi yang besar. Pada tahun 2019, tercatat sebanyak 4.756.929 orang terdampak banjir, termasuk korban meninggal, hilang, dan luka-luka, dengan total kerugian dan kerusakan harta benda mencapai sekitar USD 5,5 miliar (Chapman et al., 2021).

2.3.2 Peristiwa Banjir di Kalimantan Barat

Perubahan iklim menjadi perhatian global karena dampak yang signifikan pada berbagai aspek kehidupan salah satunya pada sistem kelistrikan. Kajian ilmiah oleh *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) menunjukkan bahwa peningkatan suhu global berkontribusi terhadap perubahan pola curah hujan dan kejadian cuaca ekstrem, terutama banjir yang dapat mengganggu infrastruktur energi. Perubahan iklim menyebabkan peningkatan curah hujan yang berimplikasi pada peningkatan kejadian banjir (Vij et al., 2017). Perubahan iklim yang terjadi dalam beberapa dekade terakhir merupakan salah satu yang berkontribusi terhadap peningkatan frekuensi dan intensitas bencana banjir di berbagai wilayah di bumi, termasuk di Indonesia dan di Provinsi Kalimantan Barat. Kenaikan suhu global menyebabkan perubahan pola curah hujan maupun gelombang panas yang dapat menjadi cuaca ekstrem. Pembangunan yang masif dengan eksploitasi lahan tanpa diimbangi dengan penghijauan yang seimbang maupun memperhatikan tata guna lahan mengakibatkan penurunan kapasitas lahan dan drainase untuk menyerap serta mengalirkan air hujan sehingga meningkatkan risiko banjir. Menurut penelitian Hirabayashi et al. (2013), perubahan iklim dapat meningkatkan risiko banjir di Asia, dengan proyeksi banjir dengan frekuensi yang lebih sering dan lebih parah di masa depan terutama pada wilayah yang rentan terhadap bencana alam.

Kalimantan Barat rentan terhadap bencana akibat perubahan iklim. Berdasarkan data Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) tahun 2016 menyatakan bahwa di Pulau Kalimantan, provinsi yang mengalami kerugian fisik, ekonomi dan jiwa terparah akibat peristiwa banjir adalah Provinsi Kalimantan Barat (Gultom et al., 2020). Provinsi Kalimantan Barat memiliki sejarah peristiwa banjir, tanah longsor, gelombang pasang/abrasi, angin puting beliung dan kebakaran hutan dan lahan. Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kalimantan Barat telah melakukan pencatatan kejadian bencana pada rentang tahun 2019 – 2023 diantara bencana banjir sebanyak 684 kejadian, tanah longsor 91 kejadian, puting beliung 52 kejadian dan kebakaran hutan lahan (karhutla) sebanyak 866 kejadian

yang tersebar di 14 Kabupaten di Provinsi Kalimantan Barat. Pencatatan dampak kejadian bencana Kalimantan Barat dalam rentang tahun 2009 – 2019, terdapat korban jiwa dengan total 63.212 jiwa yang mengungsi dan 11 orang meninggal serta hilang, jumlah fasilitas yang terdampak yaitu sejumlah 948 rumah, 227 unit fasilitas Pendidikan, 6 unit fasilitas kesehatan, 103 fasilitas peribadatan dan 49 jembatan terdampak banjir (BNPB, 2021).

Intensitas hujan ekstrem di Kalimantan Barat menunjukkan kecenderungan meningkat dari tahun ke tahun, yang mengindikasikan adanya pengaruh perubahan iklim terhadap karakteristik curah hujan regional (Ariyani et al., 2022). Hujan ekstrem menyebabkan bencana hidrometeorologi, yaitu salah satunya adalah banjir. faktor curah hujan menjadi acuan dalam memproyeksi kejadian banjir. Pola curah hujan di sebagian besar wilayah Kalimantan Barat merupakan pola hujan ekuatorial dan beberapa lainnya memiliki pola hujan monsoonal yang membentuk kecenderungan intensitas hujan ekstrem di Kalimantan Barat (Ariyani et al., 2022). Kejadian banjiri yang terjadi di Kalimantan Barat pada beberapa daerah hulu terjadi pasca saat musim hujan, sedangkan pada daerah pesisir dapat terjadi pada saat musim hujan maupun pasang surut air laut. Banjir bandang juga merupakan potensi bencana yang terjadi di Kalimantan Barat. Banjir bandang adalah banjir besar yang secara tiba – tiba karena meluapnya debit yang melebihi kapasitas sungai oleh intensitas yang tinggi.

Banjir yang terjadi di Kalimantan Barat merupakan kombinasi sifat alam yang rentan terhadap kondisi kewilayahan dan sistem sosial budaya serta politik masyarakat. Berdasarkan rangkuman dari BNPB, banjir yang terjadi di Kalimantan Barat tidak lepas dari kondisi tata ruang dan lingkungan antara lain buruknya saluran drainase, daerah resapan air yang kurang, penebangan pohon secara liar, sungai yang tidak terawat dan tidak adanya kesadaran dan kepedulian masyarakat atas sumbedaya alam dan lingkunga seta subsiden tanah akibat faktor antropogenik dari pengambilan air tanah yang berlebihan serta dampak pembebanan.

Kejadian banjir yang terjadi di Kota Sintang pada tahun 2008, 2010, 2016 dan 2021 yang merupakan luapan dari kedua sungai besar di Kota Sintang yaitu Sungai Kapuas dan Sungai Melawi. Banjir yang terjadi mengganggu semua sektor kehidupan akibat banjir yang menggenangi Kota Sintang sekitar 7 – 10 hari akibat

intensitas hujan yang tinggi dan kondisi alam Kota Sintang (Irawan & Mulki, 2016). Pada rentang tahun 2009 – 2019 terdapat perubahan tutupan lahan di Kota Sintang, sekitar 2% hutan primer, 10% hutan sekunder, 14% perkebunan dan 10% semak belukar hilang pada periode tersebut dan terdapat peningkatan luas perkebunan, pemukiman, lahan kosong dan pertambangan dengan masing – masing peningkatan sebesar 114%, 43% 59% dan 41%. Berkurangnya luas hutan yang bersamaan dengan peningkatan luas lahan kosong menyebabkan lahan menjadi rentan terdegradasi (Putra et al., 2022). Pada tahun 2021, kejadian banjir di Kota Sintang dengan kedalaman 1 hingga 3 meter mengakibatkan layanan tidak berfungsi dan berdampak pada lingkungan, sosial dan kesehatan dikarenakan kawasan penyanga dan daerah resapan air tidak bekerja dengan maksimal karena adanya alih fungsi hutan (Wida Novianti & Cau Kim Jiu, 2024).

BNPB telah melakukan analisis dan merangkum tingkat potensi kerawanan banjir, banjir bandang dan lingkungan serta tingkat kerugiannya di DAS Kapuas, Kalimantan Barat yang dapat dilihat pada Tabel 2.3. Kerentanan bencana banjir di DAS Kapuas dilihat dari jumlah penduduk yang terpapar, kerugian material dan kerentanan terhadap kerusakan lingkungan dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.3 Potensi Bahaya di DAS Kapuas, Kalimantan Barat

No	Kabupaten/Kota	Banjir	Banjir Bandang	Cuaca Ekstrem
1	Kabupaten Mempawah	Tinggi	NA	Sedang
2	Kabupaten Sanggau	Tinggi	Tinggi	Sedang
3	Kabupaten Ketapang	Tinggi	Tinggi	Tinggi
4	Kabupaten Sintang	Tinggi	Tinggi	Tinggi
5	Kabupaten Kapuas Hulu	Tinggi	Tinggi	Tinggi
6	Kabupaten Landak	Tinggi	Tinggi	Sedang
7	Kabupaten Sekadau	Tinggi	Tinggi	Tinggi
8	Kabupaten Melawi	Tinggi	Tinggi	Tinggi
9	Kabupaten Kayong Utara	Tinggi	Tinggi	Sedang
10	Kabupaten Kubu Raya	Sedang	NA	Tinggi
11	Kota Pontianak	Tinggi	Tinggi	Tinggi

Sumber: BNPB, 2021

Tabel 2.4 Kelas Kerentanan Bencana Banjir DAS Kapuas, Kalimantan Barat

No	Kabupaten/Kota	Penduduk Terpapar	Kerugian Materi	Kerusakan Lingkungan	Kelas Kerentanan
1	Kabupaten Mempawah	Sedang	Tinggi	Tinggi	Tinggi
2	Kabupaten Sanggau	Sedang	Tinggi	Tinggi	Tinggi
3	Kabupaten Ketapang	Sedang	Tinggi	Tinggi	Tinggi
4	Kabupaten Sintang	Sedang	Tinggi	Tinggi	Tinggi
5	Kabupaten Kapuas Hulu	Sedang	Tinggi	Tinggi	Tinggi
6	Kabupaten Landak	Sedang	Tinggi	Tinggi	Tinggi
7	Kabupaten Sekadau	Sedang	Tinggi	Tinggi	Tinggi
8	Kabupaten Melawi	Sedang	Tinggi	Tinggi	Tinggi
9	Kabupaten Kayong Utara	Sedang	Tinggi	Tinggi	Tinggi
10	Kabupaten Kubu Raya	Sedang	Tinggi	Tinggi	Sedang
11	Kota Pontianak	Sedang	Tinggi	Rendah	Sedang

Sumber: BNPB, 2021.

2.3.3 Dampak Perubahan Iklim pada Infrastruktur Ketenagalistrikan

Sistem ketenagalistrikan rentan terhadap dampak dari perubahan iklim yang terjadi. Cuaca ekstrem yang terjadi akibat perubahan iklim berdampak pada keandalan operasional sistem ketenagalistrikan (Handayani et al., 2019). Berdasarkan laporan dari *Asian Development Bank* (ADB), sistem ketenagalistrikan rentan terhadap beberapa hal berikut yang berhubungan dengan perubahan iklim:

- Peningkatan suhu udara dapat mengurangi efisiensi generator dan peningkatan permintaan pendinginan yang membebani kapasitas generator maupun jaringan distribusi;
- Peningkatan suhu air berdampak pada penurunan efisiensi generator;
- Cuaca ekstrem terutama pada perubahan frekuensi curah hujan dan kekeringan menyebabkan penurunan kuantitas sumber air untuk

pembangkit tenaga hidro serta sangat rentan terhadap kejadian banjir yang dapat menyebabkan kerusakan pada infrastruktur ketenagalistrikan.

Kenaikan muka air laut, badai, perubahan pola tutupan awan, banjir, dan kekeringan dapat berdampak signifikan terhadap desain, konstruksi, lokasi, serta operasional sistem ketenagalistrikan (ADB, 2021). Pemadaman listrik sering kali dilakukan sebagai langkah pengamanan akibat terjadinya bencana banjir besar. Banjir dapat menyebabkan korosi dan berbagai bentuk kerusakan pada peralatan kelistrikan, serta berpotensi menimbulkan pemadaman listrik skala luas (*blackout*) pada wilayah yang tergenang. Penelitian di Eropa menunjukkan bahwa peningkatan intensitas kejadian banjir dipengaruhi oleh meningkatnya aktivitas ekonomi di kawasan rawan banjir serta tingginya intensitas hujan (EEA, 2016). Sistem penyaluran tenaga listrik terbukti sangat rentan terhadap banjir, di mana pada 20 kejadian banjir besar di Eropa yang disebabkan oleh hujan lebat, seluruh jaringan listrik terdampak mengalami pemadaman dan dipulihkan secara bertahap (Karagiannis et al., 2017).

Sistem penyaluran ketenagalistrikan rentan terhadap bencana perubahan iklim seperti kenaikan muka air laut, banjir, gelombang panas serta badai dengan risiko moderat yang dapat memengaruhi keandalan serta keberlanjutan operasional sistem ketenagalistrikan (Johnston et al., 2012). Komisi Eropa telah merangkum dampak perubahan iklim pada sistem penyaluran ketenagalistrikan yang dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Kelas Kerentanan Bencana Banjir DAS Kapuas, Kalimantan Barat

Variabel Iklim	Dampak	Risiko
Angin kencang dan badai	Kerusakan pada saluran udara	Tingkat risiko dampak moderat hingga tinggi
	Kenaikan suhu akibat gesekan pada saluran udara	Peningkatan 20% suhu dari setiap kenaikan kecepatan angin m/s
Peningkatan Suhu	Penurunan efektivitas transformator	Berkurang 1% setiap kenaikan suhu 1°C

Variabel Iklim	Dampak	Risiko
	Penurunan konduktivitas pada saluran udara maupun saluran bawah tanah	Naiknya level hambatan sekitar 0,4% setiap kenaikan suhu 1°C
	Pemuaian kabel saluran udara	4,5 cm setiap kenaikan suhu 1°C
	Lapisan es yang mencair pada tiang maupun gardu	Pemadaman lokal
Kekeringan	Aliran kelembapan pada saluran kabel bawah tanah	Pengurangan kapasitas hingga 29%
	Pergerakan atau pergeseran tanah kering	Biaya perbaikan hingga 4.200 dolar pada setiap gangguan
Banjir	Gardu induk yang tergenang	Pemadaman
	Kerusakan pada kabel	Pemadaman

Sumber: Asian Development Bank, 2012.

Banjir merusak peralatan yang berkontak langsung dengan air. Peralatan yang terendam banjir dapat rusak dan lumpur dapat terperangkap pada *circuit breaker*, transformator, gedung control dan peralatan logam lainnya sehingga akan memerlukan pembersihan dan perbaikan yang memakan banyak waktu dan biaya. (Karagiannis et al., 2017).

Beberapa peristiwa banjir yang terjadi di Indonesia yang menyebabkan yang cukup besar pada sistem penyaluran kelistrikan yaitu pada tahun 2013 di Jakarta terjadi banjir yang mengakibatkan pemadaman pada 1847 Gardu Induk dengan total kerugian yang dialami oleh PT PLN (Persero) diperkirakan mencapai 116 miliar rupiah (Kementerian ESDM, 2013). Selain itu peristiwa banjir lainnya yang terjadi berada di Kabupaten Sintang, Kalimantan Barat pada tahun 2021 yang terjadi selama kurun waktu 4 minggu dan merendam sekitar 45 Gardu Distribusi (Wida Novianti & Cau Kim Jiu, 2024). Banjir yang terjadi menyebabkan kegagalan penyaluran listrik kepada pelanggan akibat tergenangnya sistem penyaluran ketenagalistrikan seperti gardu induk yang menyebabkan berbagai kerugian. Kegagalan penyaluran listrik menyebabkan energi tidak tersalurkan (*Energy Not Supplied*) akibat adanya pemadaman (*blackout*) yang menurukan indikator

keberhasilan penyaluran kelistrikan. *Energy Not Supplied* (ENS) merupakan sebuah istilah yang digunakan dalam industri kelistrikan untuk menggambarkan jumlah energi yang tidak tersalurkan kepada pelanggan selama suatu periode waktu tertentu. ENS diukur dalam unit energi seperti kilowatt-hour (kWh) atau megawatt-hour (MWh) untuk mengukur gangguan atau ketidaksediaan pasokan listrik pada sistem penyaluran ketenagalistrikan (Zahra & Hermana, 2024)

Berdasarkan penelitian oleh Zahra (2024), pemadaman sistem (*blackout*) yang terjadi pada gardu induk yang terhubung langsung pada pembangkit listrik. Apabila terjadi pemadaman, maka unit pembangkit harus melakukan asut gelap (*blackstart*) yang merupakan proses pengembalian kembali energi yang hilang akibat sistem yang gangguan atau karena pemadaman yang terjadi. Proses *blackstart* ini dapat meningkatkan emisi CO₂ karena memerlukan cadangan atau penggunaan bakar bakar yang memiliki emisi yang lebih tinggi.

Permasalahan banjir dapat menghambat pelaksanaan pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan, khususnya proyek transmisi. Keterlambatan pembangunan transmisi menyebabkan sistem kelistrikan tetap bergantung pada pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) sebagai sumber energi utama maupun cadangan. Penggunaan PLTD selama periode keterlambatan tersebut berpotensi meningkatkan emisi gas rumah kaca dan polutan udara lainnya, mengingat intensitas emisi PLTD jauh lebih tinggi dibandingkan pembangkit berbasis energi terbarukan atau sistem yang terhubung ke jaringan listrik yang lebih bersih. Meskipun PLTD berperan penting dalam menjaga keandalan sistem pada kondisi darurat atau saat infrastruktur transmisi belum tersedia, ketergantungan yang berkepanjangan menimbulkan beban lingkungan yang signifikan (Marqusee & Jenkins, 2020). Sebaliknya, percepatan pembangunan jaringan transmisi dapat menurunkan emisi karbon secara regional melalui peningkatan integrasi pembangkit rendah karbon ke dalam sistem ketenagalistrikan (Wang et al., 2023). Namun demikian, kajian yang secara spesifik mengkuantifikasi emisi PLTD akibat keterlambatan pembangunan transmisi masih terbatas, sehingga diperlukan pendekatan pemodelan sistem ketenagalistrikan untuk memperoleh estimasi emisi yang lebih akurat.

2.4 Permodelan Perubahan Iklim

Beberapa penelitian terkait pemodelan iklim sudah banyak dilakukan untuk mengetahui kondisi iklim yang akan terjadi di masa yang akan datang berdasarkan skenario aksi adaptasi dan mitigasi perubahan yang dilakukan. Pemodelan iklim dilakukan untuk mengetahui potensi kejadian bencana dimasa yang akan datang. Penggunaan permodelan atau skenario digunakan untuk mengeksplorasi emisi dimasa depan, perubahan iklim, dampak dan risiko terkait serta kemungkinan strategi adaptasi dan mitigasi berdasarkan asumsi berbagai variabel seperti sosio-ekonomi (IPCC, 2023).

Permodelan iklim merupakan sebuah alat yang digunakan untuk menyelidiki respon dari sistem iklim dari berbagai faktor yang mempengaruhinya sehingga iklim dapat diproyeksikan untuk masa yang akan datang. Permodelan iklim adalah representasi numerik dari sistem iklim berdasarkan interaksi dan kandungan komponen fisika, kimia dan biologi di atmosfer (Nurlatifah et al., 2023). Permodelan iklim mengintegrasikan berbagai proses fisik, kimia dan biologis yang mempengaruhi iklim termasuk interaksi atmosfer, lautan, es, dan biosfer. Permodelan iklim menggunakan data historis dan skenario permodelan sehingga dapat digunakan untuk memahami perubahan iklim dan dampaknya terhadap lingkungan. Permodelan iklim merupakan proyeksi iklim untuk masa yang akan datang pada skala lokal, regional maupun global untuk penilaian dampak perubahan iklim dan dampak yang mungkin akan ditimbulkan yang berpengaruh pada berbagai sektor kehidupan.

Perkembangan permodelan iklim sangat luas dengan menggunakan metode pendekatan permodelan iklim:

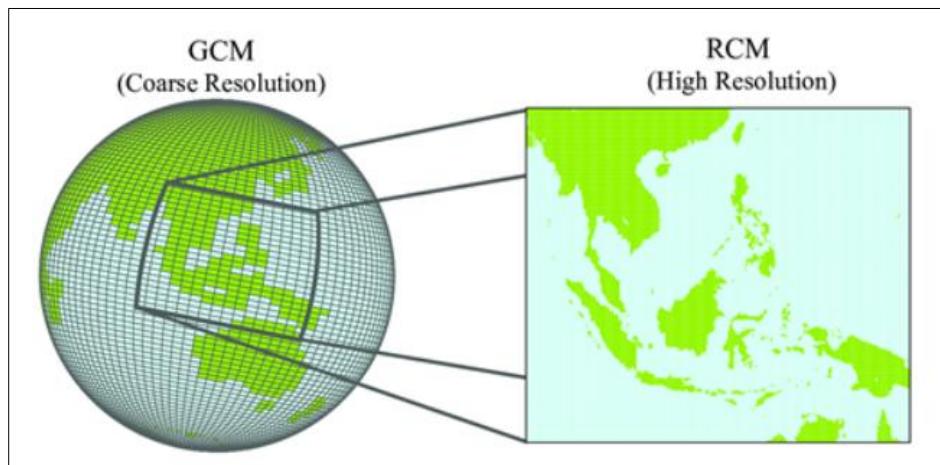
a. *Global Climate Model (GCM)*

Global Climate Model atau disebut juga *General Circulation Model* merupakan permodelan iklim matematis yang mensimulasikan iklim global dengan kondisi atmosfer bumi dengan mempertimbangkan kondisi laut, darat, biosfer, lapisan es dan emisi gas rumah kaca dalam skala waktu yang panjang. Pada pendekatan GCM infomasi iklim yang dihasilkan berskala 1000 km sehingga resolusi yang dihasilkan masih kasar sehingga belum cukup mampu memberikan analisis yang komprehensif mengenai kondisi

iklim dalam skala regional. Data GCM diperlukan sebagai masukan model iklim regional untuk membantu analisis iklim dan proyeksi data iklim di masa yang akan datang (Nurlatifah et al., 2023). Kekurangan lainnya, GCM memerlukan sumber daya komputasi yang sangat besar mengingat proses perhitungan data algoritma dan kalkulasi yang sangat kompleks (BMKG, 2022).

b. *Regional Climate Model* (RCM)

Regional Climate Model (RCM) merupakan pendekatan *downscaling* yang mensimulasikan pola iklim berdasarkan data GCM pada skala lokal atau regional (BMKG, 2022). RCM merupakan pendekatan permodelan iklim pada Batasan regional dengan menggunakan inputan data GCM. RCM memiliki resolusi yang lebih tinggi daripada GCM sehingga dapat memproyeksikan pemodelan yang lebih akurat.



Gambar 2.5 Perbedaan Resolusi GCM dan RCM (www.ukm.my, 2025)

Permodelan iklim yang banyak digunakan adalah GCM yang menjadi dasar pengembangan CMIP (*Coupled Model Intercomparison Project*) yang telah berkembang hingga saat ini yaitu CMIP6. CMIP6 merupakan proyek yang dikembangkan oleh *World Climate Research Programme* (WCRP) yang dirancang untuk memproyeksikan perubahan iklim di masa depan dengan skenario yang lebih akurat dengan mensimulasikan suhu, curah hujan, variabel iklim global yang lebih baik dibandingkan CMIP5.

2.4.1 Skenario Permodelan Iklim

Permodelan iklim merupakan pendekatan kuantitatif yang digunakan untuk memproyeksikan respons sistem iklim global terhadap perubahan konsentrasi gas rumah kaca (GRK) di atmosfer. Dalam pengembangan skenario iklim global, dua kerangka utama yang banyak digunakan adalah *Representative Concentration Pathways* (RCP) dan *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP), yang dikembangkan dan direkomendasikan oleh *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) pada fase yang berbeda dalam pengembangan model iklim global. Dalam pemodelan iklim atau proyeksi iklim mengacu pada skenario yang merepresentasikan aksi adaptasi dan mitigasi yang dilakukan.

A. *Representative Concentration Pathways* (RCP)

Representative Concentration Pathways (RCP) merupakan skenario konsentrasi GRK yang dikembangkan untuk mendukung eksperimen pemodelan iklim pada fase CMIP5. RCP tidak secara eksplisit mendeskripsikan dinamika sosial-ekonomi, melainkan merepresentasikan perubahan *radiative forcing* (W/m^2) hingga tahun 2100, tanpa harus mengikat pada dinamika sosial-ekonomi tertentu (Vuuren & Carter, 2014; Meinshausen et al., 2011). Empat skenario utama RCP yang umum digunakan meliputi:

Tabel 2.6 Skenario *Representative Concentration Pathways*

Kategori RCP	<i>radiative forcing</i> (W/m^2)	Keterangan
RCP2.6	2,6	Mitigasi sangat ketat; Pemanasan global $<\sim 2^\circ\text{C}$, kenaikan hujan global & ekstrem paling kecil
RCP4.5	4,5	Stabilitas menengah; Pemanasan sekitar $2\text{--}3^\circ\text{C}$; hujan global naik $\sim 4\%$, peningkatan ekstrem sedang
RCP6.0	6,0	kebijakan lemah/tertunda; Pemanasan $\sim 3\text{--}4^\circ\text{C}$.
RCP8.5	8,5	<i>Business-as-usual</i> tinggi; emisi terus naik sepanjang abad

Sumber: Baek, H., et al, 2013.

B. Shared Socioeconomic Pathways (SSP)

Shared Socioeconomic Pathways (SSP) adalah skenario perkembangan masyarakat dan ekosistem global abad ke-21 yang menggambarkan berbagai jalur sosial-ekonomi tanpa memasukkan kebijakan iklim maupun dampak perubahan iklim. SSP dipakai sebagai analisis faktor sosial-ekonomi dalam kerangka skenario iklim modern untuk analisis dampak, adaptasi, dan mitigasi (O'Neill et al, 2014).

Terdapat 5 (lima) skenario SSP yang dikembangkan dalam kerangka CMIP6 dan IPCC AR6 yang menggambarkan hingga tahun 2100, diantaranya yaitu:

- **SSP1 (*Sustainability*)**

SSP1 menggambarkan dunia yang mengarah pada pembangunan berkelanjutan, dengan fokus pada pengurangan ketimpangan, transisi energi bersih, dan konservasi ekosistem. Negara-negara bekerja sama secara global, mengutamakan efisiensi sumber daya, teknologi hijau, dan pendidikan tinggi. Emisi GRK menurun drastis sejak awal abad ke-21, dan target *net-zero* tercapai di pertengahan abad (K. Riahi et al, 2017).

- **SSP2 (*Middle of the Road*)**

SSP2 merepresentasikan dunia yang melanjutkan tren saat ini, di mana tidak ada perubahan besar dalam pola pembangunan atau kebijakan iklim. Pertumbuhan ekonomi, penduduk, dan penggunaan energi berlangsung moderate, dengan ketimpangan sosial masih ada, namun tidak meningkat drastis. Pemerintah menjalankan kebijakan iklim secara parsial dan bertahap (Fricko et al, 2017).

- **SSP3 (*Regional Rivalry*)**

SSP3 menggambarkan dunia yang terpecah secara politik dan ekonomi, dengan meningkatnya nasionalisme, konflik antarwilayah, dan melemahnya kerja sama internasional. Pertumbuhan ekonomi global lambat, teknologi rendah karbon berkembang sangat terbatas, dan ketimpangan antara negara maju dan berkembang meningkat.

Konsumsi energi fosil tetap tinggi karena kurangnya koordinasi global dalam mitigasi (Fujimori et al., 2017).

- **SSP4 (*Inequality*)**

SSP4 menggambarkan dunia yang mengalami ketimpangan sosial dan ekonomi yang sangat tajam. Negara dan kelompok kaya memiliki akses tinggi terhadap teknologi maju dan mitigasi iklim, sementara negara miskin tetap bergantung pada energi konvensional dan rentan terhadap bencana iklim. Adaptasi dan mitigasi hanya efektif di sebagian wilayah, sehingga ketimpangan risiko iklim meningkat tajam (Calvin et al., 2017)

- **SSP5 (*Fossil-fueled Development*)**

SSP5 menggambarkan dunia yang sangat fokus pada pertumbuhan ekonomi cepat dan kemajuan teknologi, tetapi tetap mengandalkan energi fosil sebagai sumber utama. Konsumsi energi meningkat pesat, dan meskipun teknologi berkembang, transisi menuju energi terbarukan tertunda (Kriegler et al., 2016).

Dalam permodelan perubahan iklim, RCP digunakan untuk memproyeksikan perubahan fisik seperti curah hujan dan debit banjir, sedangkan SSP digunakan untuk memproyeksikan eksposur dan kerentanan masyarakat terhadap risiko banjir. Hubungan antara RCP dan SSP sangat penting dalam menilai risiko banjir di masa depan, karena kombinasi keduanya menentukan baik besarnya perubahan curah hujan maupun dampak sosial-ekonomi yang ditimbulkan. Kombinasi RCP-SSP digunakan dalam model iklim (GCM/CMIP6) untuk memproyeksikan perubahan curah hujan dan suhu.

Penelitian menunjukkan bahwa integrasi skenario *Representative Concentration Pathways* (RCP) dan *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) sangat penting untuk menghasilkan proyeksi risiko banjir yang komprehensif. RCP merepresentasikan perubahan komponen fisik iklim, seperti curah hujan dan debit aliran, sementara SSP menggambarkan dimensi sosial-ekonomi, termasuk tingkat eksposur, kerentanan, dan potensi kerugian. Kombinasi RCP-SSP memungkinkan penilaian risiko banjir yang lebih konsisten dan relevan terhadap berbagai tujuan

penelitian serta perumusan kebijakan adaptasi perubahan iklim (Chen et al., 2020). Kombinasi RCP–SSP didasarkan pada konsistensi antara jalur emisi dan narasi sosial-ekonomi, serta relevansi untuk berbagai tujuan penelitian dan kebijakan.

2.4.2 Indek Kerawanan Banjir

Dalam perencanaan sistem tata kota, diperlukan analisis terhadap potensi kejadian banjir yang mungkin terjadi. Analisis indeks kerawanan banjir merupakan bagian dari analisis hidrologi yang bertujuan untuk menilai respons suatu daerah terhadap kejadian hujan ekstrem. Kejadian banjir memiliki keterkaitan yang erat dengan pola dan intensitas curah hujan. Permodelan hidrologi digunakan untuk mensimulasikan kejadian banjir pada Daerah Aliran Sungai (DAS) dengan mempertimbangkan pengaruh perubahan iklim, perubahan tata guna lahan, serta penggunaan sumber daya air. Perubahan iklim memengaruhi proses limpasan permukaan dan aliran sungai, sehingga diperlukan evaluasi dan pemodelan banjir sebagai dasar dalam analisis dampak perubahan iklim terhadap sistem hidrologi (Bai et al., 2019).

2.5 Pemetaan Risiko Banjir dengan Sistem Informasi Geografis

Pemetaan daerah banjir merupakan dasar untuk memberikan informasi untuk strategi mitigasi risiko banjir. Peta kerawanan banjir dapat diidentifikasi secara cepat, mudah dan akurat melalui Sistem Informasi Geografis (SIG) terhadap parameter banjir. Penggunaan SIG sudah banyak diterapkan karena aplikasi ini dapat secara eksplisit menangani data spasial dan data non-spasial (Andika et al., 2021). Pemetaan spasial dapat digunakan untuk menganalisis dan memprediksi tingkat kerawanan suatu bencana alam yang akan terjadi sebagai langkah awal dalam upaya mitigasi (Rakuasa et al., 2022). Sistem Informasi Geografis (SIG) yang digunakan dalam analisa spasial merupakan sistem yang saling berhubungan yang bertujuan untuk menampilkan informasi geografis. SIG merupakan penerapan teknologi yang membantu dalam mengolah, mengumpulkan, menyimpan, menganalisis dan menampilkan kondisi – kondisi alam dengan bantuan data atribut keruangan (Seprianto et al., 2024). SIG adalah alat untuk membuat peta secara digital dengan mengikutsertakan data-data atribut atau keterangan atau data tabular

dari peta tersebut sehingga dari setiap peta terdapat informasi terhadap atributnya tematiknya.

Peta risiko dapat diidentifikasi dengan menggunakan SIG melalui metode *overlay* atau tumpang susun terhadap parameter-parameter yang dianggap mempengaruhi fenomena banjir. Pemetaan risiko banjir terhadap daerah rawan banjir dapat membantu mengidentifikasi dampak serta untuk mempersiapkan tindakan pencegahan (Seprianto et al., 2024). Risiko banjir dapat dinilai tingkatannya berdasarkan besar kecilnya tingkat ancaman, kerentanan dan kapasitas pada suatu wilayah. Peta bahaya banjir sangat diperlukan untuk mengetahui seberapa besar potensi risiko yang akan diminimalisir.

2.6 Adaptasi Perubahan Iklim

Adaptasi merupakan proses penyesuaian terhadap dampak pada kondisi aktual ataupun yang akan datang untuk mengurangi dampak buruk atau untuk memanfaatkan peluang yang menguntungkan yang mungkin terjadi (IPCC, 2023). Berdasarkan Rencana Aksi Nasional Adaptasi Perubahan Iklim (RAN-API), adaptasi merupakan upaya penyesuaian strategi, kebijakan, pengelolaan menjajemen, teknologi dan sikap agar dampak negative dari perubahan iklim dapat dikurangi seminimal mungkin dan dapat memaksimalkan dampak positif sehingga dampak akibat perubahan iklim baik secara langsung maupun tidak langsung dapat dikurangi (Bappenas, 2014).

PT PLN (Persero) sebagai Badan Usaha Milik Negara (BUMN), dalam Rencana Jangka Panjang (RJP) tahun 2024 – 2028, memiliki Visi yaitu menjadi Perusahaan Global Top 500 dan #1 pilihan pelanggan untuk solusi energi dengan beberapa misi, berupa:

1. Menjalankan bisnis kelistrikan dan bidang lain yang terkait, berorientasi pada kepuasan pelanggan, anggota perusahaan dan pemegang saham;
2. Menjadikan tenaga listrik sebagai media untuk meningkatkan kualitas kehidupan masyarakat;
3. Mengupayakan agar tenaga listrik menjadi pendorong kegiatan ekonomi;
4. Menjalankan kegiatan usaha yang berwawasan lingkungan.

PT PLN (Persero) menyadari bahwa untuk mencapai tujuan perusahaan yang sejalan dengan komitmen misinya, diperlukan langkah – langkah strategis yang berkelanjutan dengan memperhatikan kondisi global, salah satunya dengan mempertimbangkan potensi risiko dan tantangan dari perubahan iklim yang terjadi sehingga dapat dijadikan peluang yang baik bagi citra perusahaan. Langkah adaptasi yang dilakukan PT PLN (Persero) untuk mencapai target NZE yaitu dengan penerapan *Accelerated Renewable Energy Development* (ARED) dimana PT PLN (Persero) akan menambah kapasitas pembangkit EBT dengan kapasitas hingga 42 GW hingga tahun 2034 dengan sistem penyaluran ketenagalistrikannya dengan pembuatan *Green Enabling Super Grid* transmisi untuk mengevakuasi permintaan energi dari pembangkit EBT yang tersebar di Kalimantan, Sulawesi dan Nusa Tenggara ke pusat – pusat permintaan.

2.6.1 Analisis *SWOT* dan *Analytical Hierarchy Process* dalam Penentuan Strategi Adaptasi Perubahan Iklim

Analisis SWOT merupakan sebuah metode strategis yang digunakan untuk menilai faktor internal maupun eksternal dalam suatu sistem atau organisasi. SWOT sendiri merupakan singkatan dari *Strengths* (kekuatan), *Weaknesses* (kelemahan), *Opportunities* (peluang), dan *Threats* (ancaman). Metode ini awalnya dikembangkan dalam konteks dunia bisnis sebagai alat bantu pengambilan keputusan strategis. Namun, seiring perkembangan waktu, penerapannya meluas ke berbagai bidang, termasuk perumusan kebijakan lingkungan dan analisis perubahan iklim (Pesonen & Horn, 2014).

Setiap elemen dalam analisis SWOT memiliki peran spesifik dalam mengidentifikasi kondisi suatu organisasi atau sistem. *Strengths* merepresentasikan keunggulan atau faktor internal positif yang dapat mendukung keberhasilan strategi, sedangkan *weaknesses* merupakan keterbatasan internal yang berpotensi menghambat pencapaian tujuan. *Opportunities* mengacu pada peluang eksternal yang dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan kinerja organisasi, sementara *threats* merupakan faktor eksternal yang berpotensi menimbulkan risiko atau hambatan terhadap pencapaian tujuan strategis. Keempat komponen tersebut dianalisis secara

komprehensif untuk memahami keterkaitannya dalam perumusan strategi yang optimal. Metode SWOT digunakan dengan mengumpulkan data melalui wawancara, survei, dan analisis literatur untuk mengidentifikasi faktor-faktor internal dan eksternal yang relevan. Faktor internal (kekuatan dan kelemahan) dianalisis berdasarkan kapabilitas organisasi atau komunitas yang bersangkutan, sedangkan faktor eksternal (peluang dan ancaman) ditentukan melalui evaluasi tren lingkungan, sosial, dan finansial. Hasil analisis kemudian disusun dalam matriks SWOT yang digunakan untuk merancang strategi berdasarkan kombinasi faktor yang ada.

Analytical Hierarchy Process (AHP) merupakan Teknik pengambilan keputusan berbagai variasi atau alternatif pilihan yang ada untuk digunakan dalam analisis kebijakan yang komprehensif dengan memperhitungkan hal – hal yang bersifat kualitatif dan kuantitatif. Prinsip kerja AHP adalah penyederhanaan suatu persoalan kompleks yang tidak terstruktur dan dinamik menjadi bagian-bagian yang tertata dalam suatu hierarki berdasarkan tingkat kepentingan yang diberi nilai sesuai variabel. *Analytic Hierarchy Process* (AHP) dikembangkan oleh Thomas L. Saaty sebagai suatu model pendukung pengambilan keputusan multikriteria. Keunggulan metode AHP adalah kemampuannya untuk menguraikan masalah kompleks menjadi struktur hierarki yang mencakup tujuan, kriteria, sub-kriteria, dan alternatif sehingga setiap elemen dapat dianalisis secara sistematis. Metode ini juga mempertimbangkan validitas penilaian melalui indeks konsistensi yang mengevaluasi sejauh mana perbandingan berpasangan konsisten dalam pengambilan keputusan (Saaty, 2008; Stofkova, 2022)

Penggunaan analisis SWOT dalam perumusan strategi perubahan iklim dapat dikombinasikan dengan metode pengambilan keputusan multikriteria, seperti *Analytic Hierarchy Process* (AHP), untuk meningkatkan efektivitas dan objektivitas perencanaan. Integrasi metode SWOT–AHP memungkinkan pembobotan kuantitatif terhadap setiap faktor kekuatan, kelemahan, peluang, dan ancaman, sehingga proses penentuan prioritas strategi menjadi lebih sistematis dan terukur. Pendekatan ini telah diterapkan dalam berbagai studi untuk menentukan prioritas kebijakan mitigasi perubahan iklim, termasuk pengurangan emisi karbon

dan peningkatan efisiensi energi pada sektor industri (Fahmi et al., 2017; Kurttila et al., 2000).

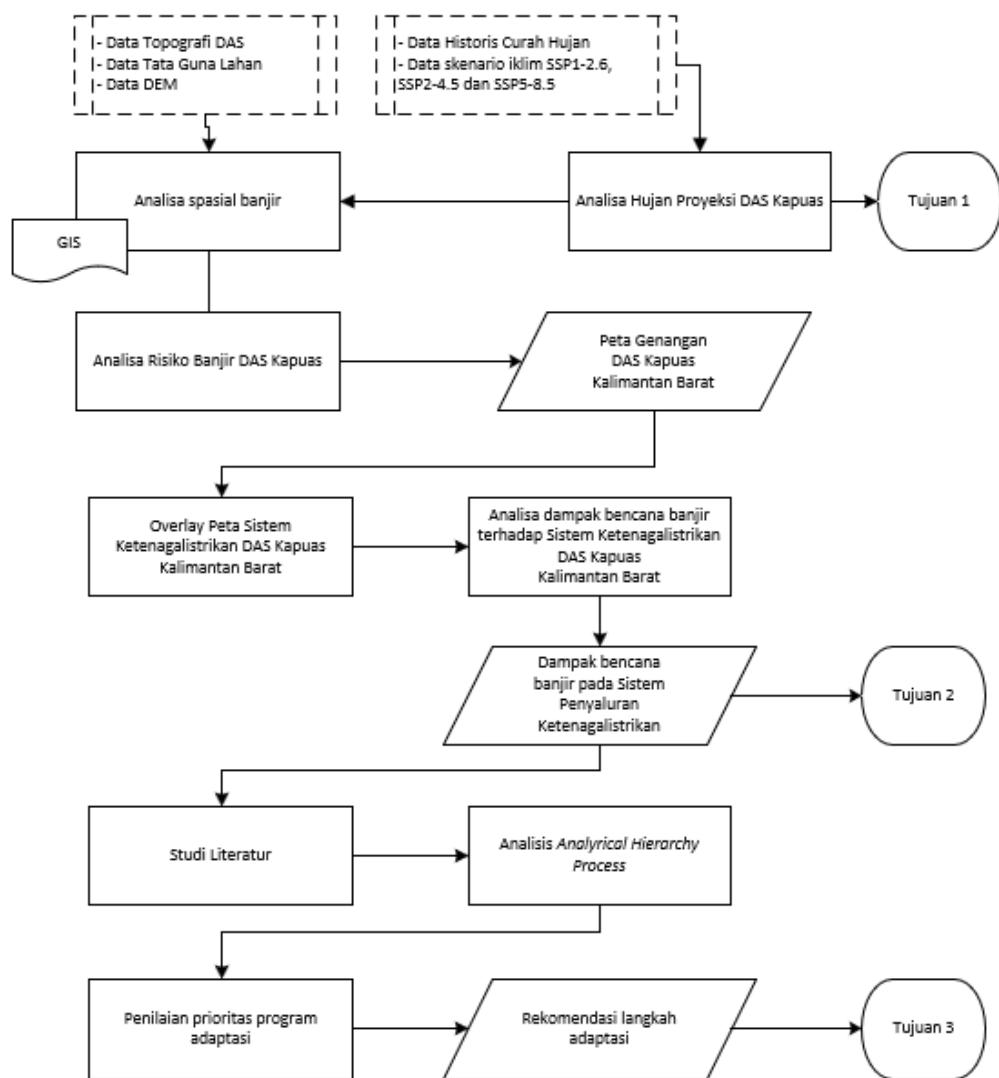
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 3

METODOLOGI

3.1 Kerangka Penelitian

Kerangka alur penelitian yang digunakan penulis pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian

3.2 Deskripsi Penelitian

Penelitian ini mengkaji dampak kejadian banjir pada sistem ketenagalistrikan pada DAS Kapuas di Provinsi Kalimantan Barat untuk menjadi acuan penentuan langkah adaptasi perubahan iklim yang diakibatkan oleh kejadian banjir yang akan datang untuk mengantisipasi kerugian yang akan timbul. Penelitian ini memproyeksikan kejadian banjir dan luas banjir pada periode yang akan datang dengan aplikasi skenario *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) yaitu SSP1-2.6, SSP2-4.5, SPP5-8.5 menggunakan indikator curah hujan atau presipitasi.

Hasil simulasi yang diperoleh selanjutnya diolah untuk melakukan pemodelan wilayah terdampak banjir menggunakan perangkat lunak pengolahan data spasial QGIS. Output dari pemodelan ini digunakan sebagai dasar dalam mengidentifikasi wilayah yang rentan terhadap banjir, sehingga dapat mendukung perencanaan strategi adaptasi pada sistem ketenagalistrikan. Penentuan prioritas adaptasi dilakukan menggunakan metode *Analytic Hierarchy Process* (AHP). AHP merupakan metode pengambilan keputusan multikriteria yang dikembangkan oleh Thomas L. Saaty untuk menganalisis dampak suatu fenomena secara sistematis. Keunggulan metode AHP terletak pada kemampuannya dalam menyusun struktur hierarki yang terdiri atas tujuan, kriteria, subkriteria, dan alternatif, serta mengevaluasi tingkat konsistensi penilaian hingga batas toleransi inkonsistensi dalam proses pengambilan keputusan (Saaty, 1980; Pratama et al., 2017).

3.3 Tahapan Penelitian

3.3.1 Tahap Persiapan

Tahap persiapan merupakan langkah awal dalam pelaksanaan penelitian ini untuk mendapatkan gambaran teori untuk mendukung analisa studi. Tahapan persiapan mencakup melakukan studi literatur terkait perubahan iklim dan jumlah kejadian banjir yang terjadi. Selanjutnya dilakukan studi terkait analisa proyeksi dan permodelan banjir yang terjadi di Indonesia dan studi penerapan adaptasi yang telah dilakukan sebelumnya pada sektor ketenagalistrikan di Indonesia maupun di wilayah studi Kalimantan Barat.

Lingkup wilayah studi dilakukan di tahap ini yaitu dengan batas wilayah di Provinsi Kalimantan Barat dengan variabel penelitian untuk prediksi kejadian dan

lokasi banjir yang diakibatkan oleh curah hujan tanpa mempertimbangkan kenaikan muka air laut.

3.3.2 Tahap Pengumpulan Data

Pada tahap pengumpulan data dilakukan dengan studi literatur dari berbagai sumber baik data primer maupun data sekunder. Data yang diperlukan dalam penelitian ini terlihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Data Penelitian

No	Jenis Data	Rentang Waktu	Sumber
A	Data Sekunder		
1	Curah Hujan Satelit	2012 – 2021	CHIRPS
3	Data DEM dengan resolusi spasial 8,29 m/px	Aktual	INA Geospasial
4	Batas DAS	Aktual	KLHK
5	Peta Operasional dan Rencana Sistem Penyaluran Ketenagalistrikan Kalimantan Barat	2024 - 2030	PT PLN (Persero)
6	Data curah hujan model iklim global GCM CMIP6 SSP1-2.6, SSP2-4.5 dan SSP5-8.5	2026 - 2060	Google Earth Engine
B	Data Primer		
1	Data pendapat ahli	2025	Kuisisioner

Sumber: Penulis, 2025.

3.3.3 Tahap Analisis Data

a. Analisa Curah Hujan

Prediksi banjir dilakukan dengan menggunakan analisa hidrologi dan hidrolika dari data curah hujan harian historis melalui satelit CHIRPS dan NASA. Data curah hujan yang digunakan menggunakan data curah hujan harian dan bulanan dari 7 stasiun klimatologis dan hujan di Kalimantan Barat yang lokasinya dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Data CHIRPS (*Climate Hazardz Groups Infrared Precipitatuon with Stasiuns*) merupakan data satelit gabungan data *multi-satelit* dan hujan observasi yang dikembangkan oleh *United States Geological Surveys* dan *University of California*. Data CHIRPS mencakup wilayah 50° LU - 50° LS dengan resolusi spasial 0,05 dalam waktu harian dan bulanan (Suryanto et al., 2023). Data CHIRPS banyak digunakan dalam penelitian dalam bidang hidroklimatologi karena memiliki resolusi spasial dan temporal yang tinggi dan tersedia dalam periode yang panjang mulai tahun 1981 hingga sekarang dan dapat diakses secara gratis. Data CHIRPS yang digunakan menggunakan data harian dengan resolusi 0,05° periode 2002 – 2021 yang diunduh pada website https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS2.0/global_daily/netcdf/p05/.

Data NASA yang digunakan berasal dari *Power Data Access Viewer* (DAV) untuk menganalisa meteorologi dan parameter yang terkait data surya yang diformulasikan untuk menilai dan merancang sistem energi terbarukan. Data yang tersedia dalam bentuk grid lintang dan bujur asli dari sumbernya yang meliputi tingkat temporal seperti data jam, harian, bulanan, tahunan dan klimatologi yang dapat diambil dari data titik, tunggal, regional, dan global. Format data yang dapat diperoleh dari NASA berupa NetCDF, CSV, ASCII, geoJSON, ICASA dan EPW. Data – data meteorologi berasal dari:

- NASA's GMAO MERRA-2 dalam rentang tahun 1 Januari 1981 sampai 3 bulan dari waktu aktual
- NASA GEOS 5.12.4 FP-IT yang merupakan rentang dari akhir MERRA2 hingga waktu aktual.

Data NASA yang digunakan merupakan data curah hujan (presipitasi) harian yang didapatkan dengan memasukkan data lokasi stasiun klimatologi yang ada di Kalimantan Barat berdasarkan Tabel 3.2 pada website NASA *POWER Data Access Viewer* (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>).

Tabel 3. 2 Data Stasiun Hujan DAS Kapuas

No	Nama Stasiun	Elevasi	Jarak ke Garis Pantai	Koordinat	
		(m.dpl)	(km)	Lintang(°)	Bujur(°)
1	Nangapinoh	40	219,07	-0,42	111,47
2	Pangsuma	43	429,15	0,84	112,93
3	Supadio	3	34,12	-0,14	109,45
4	Susilo	31	218,38	0,06	111,47

Sumber: Suryanto et al., 2023

Penggunaan data curah hujan CHIRPS di Kalimantan telah dilakukan validasi berdasarkan penelitian oleh Joko Suryanto (2023) dari 7 stasiun hujan dan klimatologi di Kalimantan Barat pada Tabel 3.2 Yang dibandingkan dengan data pengukuran BMKG dalam rentang periode Januari 2002 hingga Desember 2021. Berdasarkan validasi yang dilakukan menggunakan metode *point to pixel* dimana penggunaan metode tersebut bertujuan untuk menghindari kekeliruan *error* data ketika menggunakan metode interpolasi stasiun hujan. Akurasi data CHIRPS di Kalimantan Barat dengan data BMKG tergolong sangat baik dengan persentase bias sekitar 9,92%, MAE 12,17 mm dan RMSE sekitar 19,82 mm, namun memiliki korelasi lemah dengan $R = 0,25$. Data CHIRPS mampu mengestimasi kejadian hujan di Kalimantan Barat dengan baik dengan hasil validasi kontinu menunjukkan CHIRPS mempunyai akurasi lebih tinggi pada daerah di dekat garis pantai (Suryanto et al., 2023). Data CHIRPS mampu dijadikan acuan data satelit dalam penelitian.

Data proyeksi iklim dari curah hujan prediksi harian sesuai dengan skenario SSP1-2.6, SSP2-4.5 dan SSP5-8.5 periode tahun 2026 – 2060 yang diunduh pada website Google Earth Engine (https://developers.google.com/earthengine/datasets/catalog/NASA_GDDP_CMIP6)

b. Analisa Indeks Kerawanan Banjir

Menentukan indeks risiko banjir dilakukan dengan menentukan wilayah rawan banjir. Langkah pertama yang perlu dilakukan adalah menentukan Daerah Aliran Sungai (DAS) dengan melihat informasi geomorfologi data topografi atau *Digital Elevation* (DEM). Risiko banjir didasarkan pada analisa hidrologi dan hidrolika yang dilakukan sebelumnya yang kemudian dilakukan pemetaan risiko banjir berdasarkan klasifikasi pembobotan risiko pada Tabel 3.3. Pembobotan dengan skoring digunakan untuk menghitung data dan menentukan peringkatnya untuk memberikan nilai pada masing – masing atribut parameter sehingga dapat diidentifikasi wilayah yang rawan banjir dengan klasifikasinya (Seprianto et al., 2024).

Tabel 3. 3 Pembobotan Indeks Kerawanan Banjir

No	Variabel	Klasifikasi	Hazard Indeks	Bobot	Sumber
1	Curah Hujan Tahunan	>3000 (Sangat Basah) 2501 – 3000 (Basah) 2001 – 2500 (Sedang) 1501 – 2000 (Kering) <1500 (Sangat Kering)	5 4 3 2 1	0,30	Yassar et al., 2020
2	Tutupan Lahan/Tata Guna Lahan	Badan Air Bandara / Pelabuhan Belukar Hutan Lahan Kering Primer Hutan Lahan Kering Sekunder Hutan Tanaman Permukiman Perkebunan Pertambangan Pertanian Lahan Kering Pertanian Lahan Kering Campur Sawah Tanah Terbuka	9 9 5 1 1 7 3 9 7 7 9 9	0,30	Yassar et al., 2020
3	Kemiringan %	0 – 8 (Datar) > 8 – 15 (Landai) > 15 – 25 (Agak curam) > 25 – 40 (Curam)	5 4 3 2	0,20	Seprianto et al., 2024

No	Variabel	Klasifikasi	Hazard Indeks	Bobot	Sumber
		> 40 (Sangat curam)	1		Darmawan et al., 2017
4	Infiltrasi dan Tekstur Tanah	Tidak Peka (Kasar) Agak Peka (Agak Kasar) Kepekaan Sedang (Sedang) Peka (Agak Halus) Sangat Peka (Halus)	5 4 3 2 1	0,20	Darmawan el al., 2017

Hazard Indeks merupakan merupakan parameter kuantitatif yang digunakan untuk merepresentasikan tingkat potensi bahaya banjir berdasarkan karakteristik wilayah. Setiap kelas dalam masing-masing variabel diberikan nilai hazard indeks dengan rentang nilai tertentu di mana nilai yang lebih tinggi merepresentasikan kondisi yang secara fisik lebih mendukung terjadinya banjir. Oleh karena itu, wilayah dengan nilai hazard indeks tinggi dikategorikan sebagai wilayah dengan tingkat kerawanan banjir yang lebih besar dibandingkan wilayah dengan nilai indeks yang lebih rendah.

Penentuan nilai risiko banjir dihitung dengan menjumlahkan semua skor setiap parameter dengan menggunakan persamaan berikut (Hariyanto et al., 2023):

$$K = Wi \times X_i \quad \dots \dots \dots \quad (3.1)$$

Keterangan:

K = Nilai Kerawanan

Wi = Bobot untuk parameter ke-i

X_i - Skor untuk parameter ke-i

c. Peta Kerawanan Banjir

Pemetaan genangan banjir dapat dilakukan melalui tahapan metode yang mengakomodir keterbatasan, yaitu:

- Mengidentifikasi daerah potensi genangan banjir dengan pendekatan geomorfologi wilayah sungai yang dapat dikalibrasi dengan ketersediaan data area dampak yang pernah terjadi
- Mengestimasi ketinggian genangan berdasarkan tinggi elevasi di atas permukaan sungai di dalam area potensi genangan pada tahap sebelumnya.

Pemetaan genangan banjir menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG) menggunakan aplikasi QGIS. Pemetaan dengan menggunakan SIG sangat efektif dalam pemetaan risiko banjir dimana dapat memperkirakan area yang rentan terhadap risiko banjir dan membantu perencanaan sumber daya air serta untuk pengambilan keputusan yang berfokus pada area tertentu (Purwanto et al., 2022).

Penelitian ini dilakukan untuk memprediksi kejadian banjir dan wilayah rawan banjir di Provinsi Kalimantan Barat yang akan dilakukan *overlay* dengan sistem penyaluran kelistrikan yang sudah beroperasi dengan perencanaan pembangunan sesuai dengan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL).

d. Dampak Perubahan Iklim Terdapat Sistem Ketenagalistrikan

Dalam penelitian ini, dampak perubahan iklim akan dianalisis berdasarkan tiga aspek utama, yaitu aspek teknis, aspek lingkungan, dan aspek finansial. Pendekatan ini bertujuan untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai bagaimana perubahan iklim dapat mempengaruhi sistem kelistrikan di DAS Kapuas, Kalimantan Barat

1 Aspek Teknis

Aspek teknis berupa gangguan sistem penyaluran kelistrikan akibat banjir berdasarkan ENS.

2 Aspek Lingkungan

Analisa aspek lingkungan dilakukan untuk mengetahui kerugian lingkungan terkait adanya penambahan emisi pemakaian PLTD saat keterlambatan COD (*Commercial of Date*) pekerjaan pembangunan

infrastruktur kelistrikan yang diakibatkan oleh bencana alam atau banjir.

3 Aspek Sosial dan Ekonomi

Penelitian ini akan menganalisis dampak sosial-ekonomi yang dialami masyarakat dengan cara memperhitungkan aktivitas ekonomi dan bisnis harian yang berhenti akibat tidak adanya suplai listrik yang stabil

Dengan mempertimbangkan ketiga aspek ini secara menyeluruh, akan didapatkan gambaran terkait dampak perubahan iklim pada sistem ketenagalistrikan di DAS Kapuas Kalimantan Barat

e. Analisis SWOT – AHP untuk Strategi Adaptasi

Dalam penentuan strategi adaptasi perubahan iklim dilakukan analisis SWOT dan AHP. Analisa AHP melalui kuisioner kepada narasumber ahli maupun pemangku kepentingan yang terdiri dari manajemen dan *senior officer* di PT PLN (Persero) untuk mendapatkan gambaran terkait langkah – langkah adaptasi yang mungkin dilakukan untuk menghadapi bahaya akibat bencana banjir yang terjadi dan berdampak pada sistem penyaluran ketenagalistrikan di Kalimantan Barat.

Analisis SWOT mempertimbangkan faktor kekuatan (*strengths*), kelemahan (*weaknesses*), peluang (*opportunities*), dan ancaman (*threats*) dalam rangka memilih dan menerapkan strategi yang paling efektif untuk mencapai tujuan organisasi. Strategi yang dirumuskan diharapkan mampu memaksimalkan kekuatan dan peluang yang dimiliki, sekaligus meminimalkan kelemahan serta mengendalikan potensi ancaman yang dapat menghambat pencapaian tujuan (Abdel-Basset et al., 2018).

Tabel 3. 4 Matriks SWOT

Internal Eksternal	Kekuatan (<i>Strengths</i>)	Kelemahan (<i>Weaknesses</i>)
Peluang (<i>Opportunities</i>)	SO, merancang strategi dengan mengoptimalkan kekuatan untuk mengambil manfaat dari peluang yang tersedia	WO, menyusun strategi dengan meminimalkan kelemahan agar dapat lebih efektif dalam memanfaatkan peluang yang tersedia.
Ancaman (<i>Threats</i>)	ST, mengembangkan strategi yang memanfaatkan kekuatan guna menghadapi atau mengatasi potensi ancaman.	WT, menerapkan strategi yang berfokus pada pengurangan kelemahan sekaligus menghindari atau menekan dampak ancaman yang mungkin terjadi.

Sumber: Batukh, 2022

Dalam melakukan pemilihan strategi, tahapan pelaksanaan AHP yaitu menentukan tujuan, melakukan identifikasi para pemangku kepentingan yang berkaitan, membuat struktur hierarki, kriteria dan alternatif, memberikan kuisioner kepada pemangku kepentingan yang telah diidentifikasi sebelumnya dan melakukan analisis konsistensi untuk memverifikasi kestabilan hasil AHP.

f. Tahap Penarikan dan Rekomendasi Penelitian

Pada akhir penelitian dilakukan penarikan kesimpulan sebagai tahap terakhir. Sebagai jawaban atas permasalahan akan ditarik kesimpulan berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan sebelumnya. Berdasarkan hasil penelitian tersebut, sebagai bahan pertimbangan bagi pemerintah ataupun PLN akan diberikan rekomendasi strategi adaptasi sistem ketenagalistrikan di DAS Kapuas, Kalimantan Barat terhadap adanya perubahan iklim.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Curah Hujan

4.1.1 Curah Hujan Historis DAS Kapuas

Kalimantan Barat mengalami variasi curah hujan yang fluktuatif selama periode 2014–2024 berdasarkan data curah hujan harian dari *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station* (CHIRPS). Data CHIRPS merupakan dataset curah hujan resolusi tinggi ($\sim 0,05^\circ$) yang dikembangkan oleh *Climate Hazards Group* UCSB bekerja sama dengan USGS. CHIRPS dibangun dari kombinasi klimatologi curah hujan, observasi satelit inframerah berbasis *Cold Cloud Duration*, produk hujan TRMM 3B42, medan presipitasi model atmosfer NOAA-CFS, dan ribuan stasiun hujan permukaan yang kemudian digabungkan melalui algoritma interpolasi khusus menjadi deret waktu curah hujan berbasis grid jangka panjang sejak 1981 (Funk et al., 2015)

Data curah hujan Kalimantan Barat dan DAS Kapuas berdasarkan data CHIRPS tahun 2014 – 2024 dapat dilihat pada Tabel 4.1. Nilai curah hujan tertinggi pada wilayah Kalimantan Barat dan DAS Kapuas dapat menunjukkan besaran yang sama, karena kejadian curah hujan maksimum pada tahun tersebut terjadi di dalam wilayah DAS Kapuas, yang secara administratif merupakan bagian dari Provinsi Kalimantan Barat.

Tabel 4. 1 Data Curah Hujan Harian Kalimantan Barat dan DAS Kapuas

Tahun	Curah Hujan Tertinggi (mm)		Curah Hujan Rata - Rata (mm)		Bulan Hujan Tertinggi	
	Kalimantan Barat	DAS Kapuas	Kalimantan Barat	DAS Kapuas	Kalimantan Barat	DAS Kapuas
2014	138,34	138,33	6,37	8,75	Mei	Mei
2015	171,92	155,74	6,50	9,15	Februari	Februari
2016	192,26	192,26	9,54	11,37	Februari	Februari
2017	155,11	155,11	8,50	11,17	Februari	Februari
2018	137,34	136,17	8,07	10,00	Februari	Maret
2019	151,76	151,76	7,50	8,866	Februari	Februari
2020	167,97	167,97	9,99	10,90	Februari	Februari

Tahun	Curah Hujan Tertinggi (mm)		Curah Hujan Rata - Rata (mm)		Bulan Hujan Tertinggi	
	Kalimantan Barat	DAS Kapuas	Kalimantan Barat	DAS Kapuas	Kalimantan Barat	DAS Kapuas
2021	192,62	160,68	9,72	10,88	Februari	Februari
2022	128,79	128,79	10,12	11,61	Mei	Mei
2023	145,44	145,44	8,02	9,65	Desember	Desember
2024	156,09	156,09	9,36	11,23	Februari	Februari

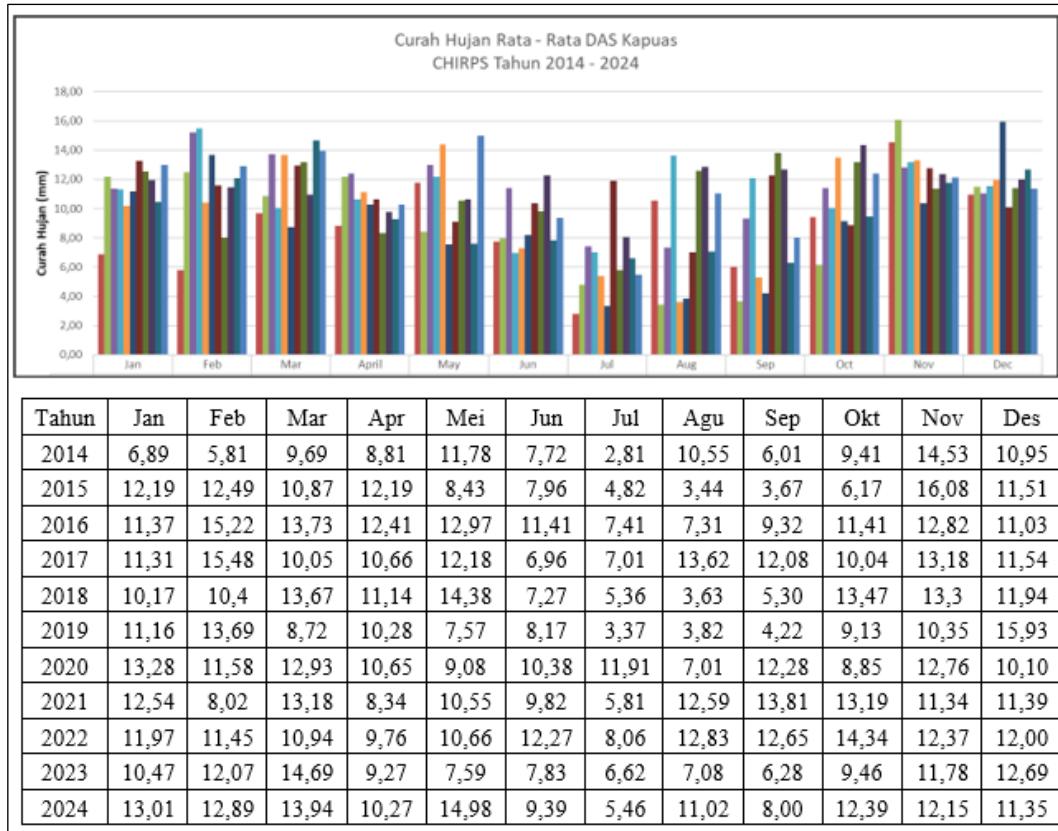
Sumber: CHIRPS

Berdasarkan hasil analisis data curah hujan harian CHIRPS periode 2014–2024, baik pada skala provinsi Kalimantan Barat maupun DAS Kapuas, terlihat pola yang menunjukkan keterkaitan spasial dan temporal yang kuat antara kedua wilayah tersebut. Mengingat DAS Kapuas merupakan sistem hidrologi utama yang mencakup sebagian besar wilayah Kalimantan Barat, sehingga dinamika curah hujan sangat berpengaruh terhadap fluktuasi curah hujan di tingkat DAS. Secara umum, nilai curah hujan maksimum tahunan di Kalimantan Barat dan DAS Kapuas menunjukkan pola puncak yang terjadi pada bulan Februari, yang bertepatan dengan puncak musim hujan barat di wilayah Kalimantan. Pada kedua wilayah kajian, nilai curah hujan tertinggi tercatat pada tahun 2016 sebesar 192,26 mm, sementara pada tahun 2021 kembali teridentifikasi kejadian curah hujan maksimum yang mencerminkan adanya hujan ekstrem dengan periode ulang sekitar lima tahunan. Pola ini konsisten dengan studi dinamika musim hujan di wilayah Kalimantan yang menunjukkan bahwa periode monsun musim dingin Asia (sekitar November–Maret) ditandai peningkatan aktivitas konvektif dan curah hujan lebat akibat interaksi angin monsun, *cold surge*, dan *Borneo vortex* di Laut Cina Selatan dan Kalimantan Barat (Winarso & Shanas, 2017).

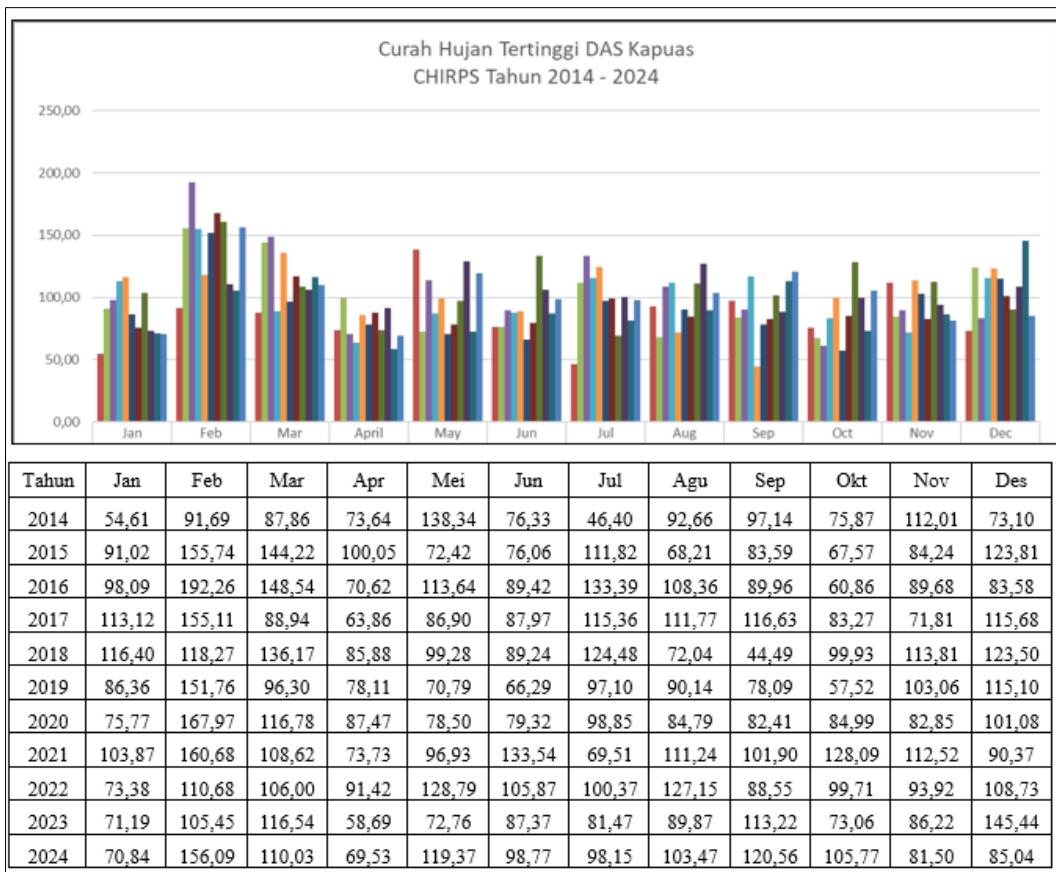
Rata-rata curah hujan tahunan, nilai di DAS Kapuas berkisar antara 8,75–11,23 mm/hari/tahun, sedikit lebih tinggi dibandingkan rerata di Kalimantan Barat yang berada pada kisaran 6,37–10,12 mm/hari/tahun. Hal ini menunjukkan bahwa intensitas hujan di wilayah DAS Kapuas relatif lebih besar, sejalan dengan karakteristik topografi DAS yang didominasi oleh dataran rendah dan lembah

sungai yang menerima suplai uap air dari arah barat dan selatan. Penelitian Aldrian & Susanto (2003) dalam *International Journal of Climatology* juga menegaskan bahwa distribusi spasial curah hujan di Kalimantan sangat dipengaruhi oleh pola sirkulasi monsun dan daerah aliran sungai besar seperti Kapuas.

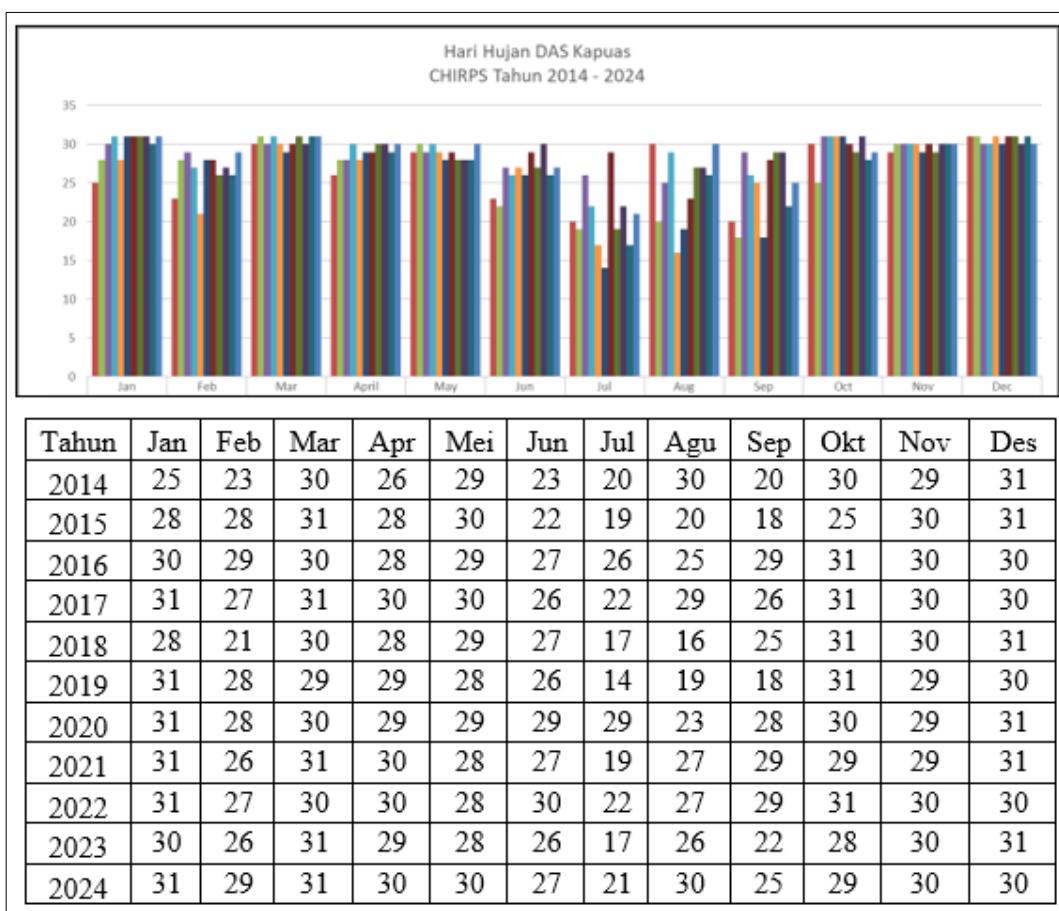
Pola curah hujan bulanan data CHIRPS tahun 2014 – 2024 dapat dilihat pada Gambar 4.1 hingga Gambar 4.3.



Gambar 4. 1 Curah Hujan Rata – Rata DAS Kapuas CHIRPS Tahun 2014 - 2024



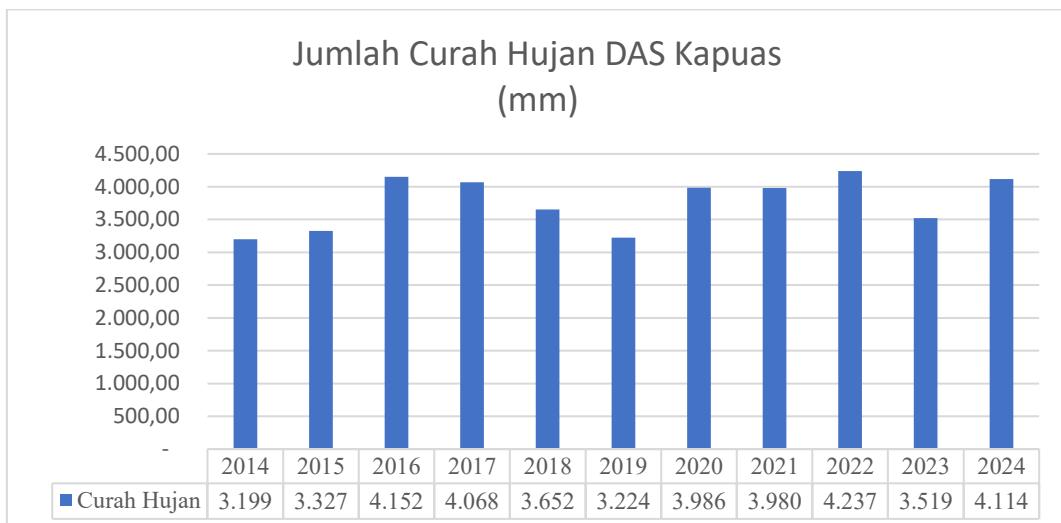
Gambar 4. 2 Curah Hujan Tertinggi DAS Kapuas CHIRPS Tahun 2014 – 2024



Gambar 4. 3 Hari Hujan DAS Kapuas CHIRPS Tahun 2014 – 2024

Berdasarkan grafik pola curah hujan bulanan DAS Kapuas CHIRPS tahun 2014 – 2024, rata – rata curah hujan bulanan DAS Kapuas berada pada kisaran 6–15 mm/hari, dengan pola yang cukup konsisten setiap tahunnya. Hari hujan rata-rata tahunan sekitar 27–28 hari hujan/bulan, artinya sekitar 330 hari hujan/tahun, menandakan iklim sangat basah dalam klasifikasi Köppen-Geiger. Klasifikasi Koppen-Geiger adalah sistem klasifikasi iklim global yang mengelompokkan iklim berdasarkan pola suhu dan curah hujan rata – rata jangka panjang. Tidak ada bulan benar-benar kering (<10 hari hujan), yang berarti hujan turun hampir setiap minggu sepanjang tahun. Bulan Juli–September hanya relatif kering, tetapi masih memiliki hujan lebih dari 20 hari pada sebagian besar tahun. Kalimantan Barat secara klimatologis termasuk ke dalam iklim tropis basah (Af), yang ditandai oleh tidak adanya bulan kering dan curah hujan minimum bulanan umumnya melebihi 60 mm, sehingga hujan terjadi hampir sepanjang tahun (Peel et al., 2007).

DAS Kapuas memiliki pola bimodal yaitu dua puncak hujan diantara Bulan Februari – Maret dan November – Desember, yang berkaitan dengan pergerakan Zona Konvergensi Intertropis (ITCZ) serta pengaruh monsun Asia–Australia di wilayah Kalimantan Barat (Aldrian & Susanto, 2003). Nilai rata-rata ekstrem yang tinggi (≥ 100 mm/hari) menandakan potensi besar untuk banjir bandang dan limpasan tinggi, terutama di sub-DAS berlereng datar seperti Kapuas Tengah–Hilir khususnya ketika hujan ekstrem berlangsung dalam durasi singkat (Fowler et al., 2021). Penelitian DAS Jemelak, Sub-DAS Kapuas, Kalimantan Barat menunjukkan bahwa kenaikan hujan harian maksimum meningkatkan debit puncak dan jika melampaui kapasitas sungai akan menimbulkan banjir lokal (Auliyani & Nugrahanto, 2020)



Gambar 4. 4 Jumlah Curah Hujan Tahunan DAS Kapuas CHIRPS Tahun 2014 – 2024

Berdasarkan grafik curah hujan tahunan DAS Kapuas periode 2014–2024, terlihat bahwa wilayah ini memiliki curah hujan tahunan yang sangat tinggi, dengan kisaran nilai sekitar 3.200–4.200 mm/tahun, yang menegaskan karakter DAS Kapuas sebagai daerah beriklim basah tropis dengan suplai hujan yang dominan sepanjang tahun (Aldrian & Susanto, 2003). Peningkatan curah hujan yang signifikan dengan nilai di atas 4.000 mm/tahun, mengindikasikan fase iklim basah

yang berpotensi meningkatkan debit sungai dan limpasan permukaan. Kondisi ini berimplikasi langsung terhadap peningkatan risiko banjir.

Selanjutnya dilakukan validasi berdasarkan data curah hujan dari stasiun hujan di Kalimantan Barat yang berada di dalam DAS Kapuas. Stasiun hujan yang berada di dalam DAS Kapuas yaitu:

- 1) Stasiun Hujan Supadio di Kabupaten Kubu Raya
- 2) Stasiun Hujan Nangapinoh di Kabupaten Melawi
- 3) Stasiun Hujan Susilo di Kabupaten Sintang
- 4) Stasiun Hujan Pangsuma di Kabupaten Kapuas Hulu

Adapun analisa data curah hujan tahunan pada stasiun hujan tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.2:

Tabel 4. 2 Data Curah Hujan Harian Kalimantan Barat dan DAS Kapuas

Tahun	Stasiun Hujan Pangsuma (mm)		Stasiun Hujan Susilo (mm)		Stasiun Hujan Nangapinoh (mm)		Stasiun Hujan Supadio (mm)	
	BMKG	CHIRPS	BMKG	CHIRPS	BMKG	CHIRPS	BMKG	CHIRPS
2014	3.595,5	4.189,5	2.015,7	2.346,5	3.150,0	2.868,7	2.961,8	2.792,1
2015	4.129,2	4.208,2	2.460,8	2.548,5	3.743,1	3.178,7	2.675,9	2.646,9
2016	4.666,0	4.977,6	3.773,4	3.880,0	3.175,9	3.946,0	4.907,6	4.013,8
2017	4.603,0	5.218,2	3.004,0	3.346,0	2.705,0	3.838,9	3.448,0	3.365,2
2018	5.084,0	4.569,7	3.250,0	3.336,8	3.057,0	3.280,0	3.829,0	3.278,8
2019	3.596,0	3.832,5	2.733,0	3.245,6	3.402,0	3.005,9	2.996,0	2.966,9
2020	4.513,8	4.777,7	3.970,0	4.355,4	4.430,5	3.739,7	3.423,2	3.761,7
2021	4.337,7	4.857,2	4.373,0	4.205,7	4.401,0	3.984,0	3.301,4	3.500,0

Sumber: BMKG dan CHIRPS

Evaluasi data curah hujan satelit CHIRPS terhadap data observasi BMKG dilakukan dengan empat parameter statistik utama, yaitu Korelasi Pearson (r), *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE) dan Bias.

a. Koefisien Korelasi Pearson (r)

Koefisien korelasi digunakan untuk mengukur kekuatan dan arah hubungan linear antara dua dataset (BMKG dan CHIRPS).

$$r = \frac{\sum ((P_{CHIRPS,i} - \bar{P}_{CHIRPS})(P_{BMKG,i} - \bar{P}_{BMKG}))}{\sqrt{(\sum (P_{CHIRPS,i} - \bar{P}_{CHIRPS})^2 \times \sum (P_{BMKG,i} - \bar{P}_{BMKG})^2)}} \quad (4.1)$$

Nilai r berada pada rentang $-1 \leq r \leq +1$, dengan interpretasi hubungan:

- $r > 0.7$ (hubungan kuat)
- $0.4 \leq r \leq 0.7$ (sedang)
- $r < 0.4$ (lemah).

b. *Root Mean Square Error* (RMSE)

RMSE digunakan untuk mengukur deviasi kuadrat rata-rata antara dua dataset dan lebih sensitif terhadap error besar.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum (P_{\text{CHIRPS},i} - P_{\text{BMKG},i})^2 \right)} \quad (4.2)$$

c. *Mean Absolute Error* (MAE)

MAE menunjukkan rata-rata besar kesalahan absolut antara kedua dataset tanpa memperhatikan arah deviasinya.

$$\text{MAE} = \left(\frac{1}{n} \sum |P_{\text{CHIRPS},i} - P_{\text{BMKG},i}| \right) \quad (4.3)$$

d. Bias

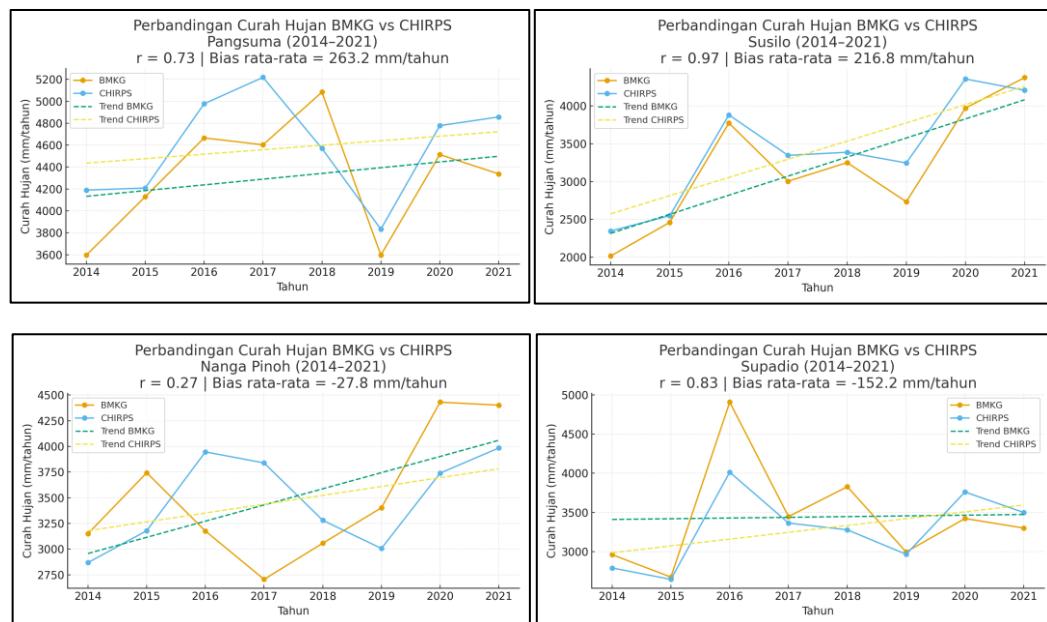
Bias digunakan untuk mengetahui perbedaan rata-rata antara data CHIRPS dan BMKG. Nilai positif menunjukkan *overestimasi* (CHIRPS lebih tinggi dari BMKG), sedangkan nilai negatif menunjukkan *underestimate*

$$\text{Bias} = \left(\frac{1}{n} \sum (P_{\text{CHIRPS},i} - P_{\text{BMKG},i}) \right) \quad (4.4)$$

Evaluasi data curah hujan satelit CHIRPS terhadap data observasi BMKG dapat dilihat pada Tabel 4.3

Tabel 4. 3 Evaluasi Data Hujan Historis

Stasiun Hujan	Korelasi (r)	RMSE (mm)	MAE (mm)	Bias (mm)
Pangsuma	0,731	432,23	391,75	+263,17
Susilo	0,964	294,16	252,40	+210,57
Nangapinoh	0,129	700,20	631,58	-99,83
Supadio	0,844	249,51	182,46	-48,19



Gambar 4. 5 Tren Curah Hujan Stasiun Hujan Kalimantan Barat

Hasil evaluasi statistik menunjukkan bahwa data CHIRPS memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap data observasi BMKG di DAS Kapuas, khususnya pada Stasiun Hujan Susilo ($r = 0,964$) dan Supadio ($r = 0,844$), dengan nilai RMSE dan MAE yang relatif rendah (<300 mm). Sebaliknya, pada Stasiun Hujan Nangapinoh ditemukan korelasi yang lemah ($r = 0,129$) serta nilai error yang tinggi, yang mengindikasikan ketidaksesuaian antara estimasi curah hujan satelit dan data observasi. Perbedaan ini diduga dipengaruhi oleh faktor topografi, keterbatasan resolusi grid CHIRPS, serta dominasi hujan konvektif lokal yang tidak sepenuhnya terekam oleh sensor satelit. Nilai bias positif di Stasiun Pangsuma dan Susilo menunjukkan kecenderungan CHIRPS untuk melebihikan estimasi curah

hujan, sedangkan bias negatif di Stasiun Nangapinoh dan Supadio mengindikasikan underestimasi. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian Toté et al. (2015), yang melaporkan bahwa kinerja CHIRPS di wilayah tropis umumnya baik, namun sangat dipengaruhi oleh kepadatan stasiun pengamatan dan kondisi topografi lokal. Bias negatif di Stasiun Nangapinoh dan Supadio mengindikasikan nilai yang cenderung lebih rendah dibandingkan pengamatan, yang dapat dikaitkan dengan rendahnya representasi hujan intensitas tinggi berdurasi pendek pada sistem satelit. Fenomena ini telah banyak dilaporkan dalam studi validasi CHIRPS di wilayah tropis dan ekuatorial, di mana kinerja produk satelit sangat bergantung pada kepadatan stasiun hujan, kondisi topografi lokal, dan karakteristik hujan konvektif (Funk et al., 2015).

Berdasarkan keempat metode validasi yang digunakan, korelasi (r) menjadi indikator utama dalam menilai kelayakan penggunaan data CHIRPS karena merepresentasikan kemampuan data dalam menangkap variabilitas temporal curah hujan. Sementara itu, bias, RMSE, dan MAE berfungsi sebagai indikator pendukung untuk mengidentifikasi arah dan besaran kesalahan. Dengan nilai korelasi yang umumnya kuat serta pola bias yang konsisten dan dapat dijelaskan, data CHIRPS dinilai layak digunakan untuk analisis hidrologi dan kajian perubahan iklim pada skala DAS. Namun demikian, perbedaan kecil (bias) yang muncul mengindikasikan perlunya proses kalibrasi lokal atau *bias correction* sebelum data CHIRPS digunakan untuk aplikasi model hidrologi atau proyeksi perubahan iklim.

4.1.2 Analisis Curah Hujan Proyeksi DAS Kapuas

Analisis curah hujan proyeksi dilakukan untuk memetakan potensi risiko banjir di DAS Kapuas. Data proyeksi curah hujan yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari dataset NEX-GDDP-CMIP6 yang dikembangkan oleh NASA dan tersedia melalui platform Google Earth Engine. Dataset ini merupakan hasil *downscaling* dan *bias correction* terhadap keluaran model iklim global CMIP6 menggunakan metode *Bias-Correction Spatial Disaggregation* (BCSD), yang secara khusus dirancang untuk mendukung analisis dampak perubahan iklim pada skala regional hingga sub-regional. Pengembangan NEX-GDDP-CMIP6 bertujuan menyediakan data proyeksi iklim yang lebih representatif secara spasial dan siap

digunakan dalam kajian sektor sumber daya air, risiko bencana, dan perencanaan adaptasi perubahan iklim (Thrasher et al., 2022).

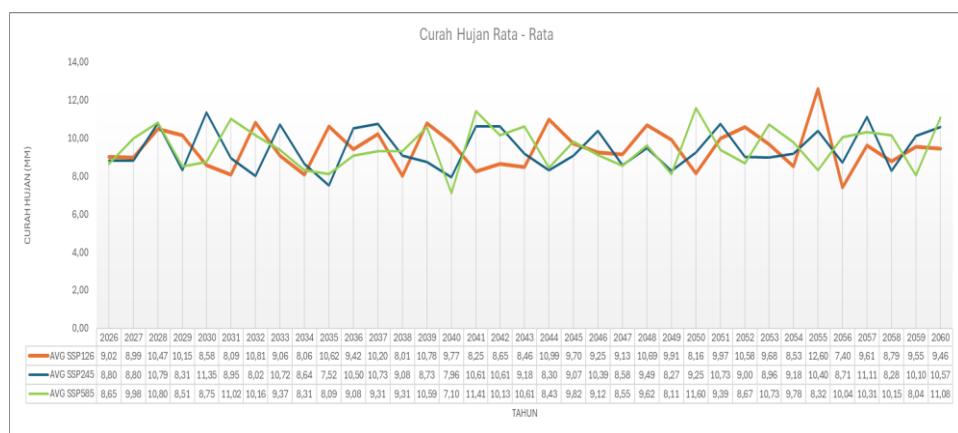
Penggunaan NEX-GDDP-CMIP6 telah diterapkan secara luas dalam berbagai studi ilmiah, termasuk analisis tren curah hujan ekstrem, perubahan pola dan musim hujan, serta evaluasi potensi peningkatan frekuensi kejadian banjir di berbagai wilayah dunia. Sejumlah penelitian memanfaatkan dataset ini secara langsung tanpa menerapkan koreksi bias tambahan, khususnya untuk analisis klimatologi jangka panjang dan evaluasi tren perubahan iklim pada skala regional. Chen et al. (2021) dan Sun et al. (2022), misalnya, menggunakan data *bias-corrected* CMIP6 dalam analisis ekstrem hujan dan perubahan pola presipitasi tanpa koreksi lanjutan, dengan pertimbangan bahwa koreksi bias telah dilakukan pada tahap penyusunan dataset dan tujuan analisis difokuskan pada tren dan perbandingan relatif antarperiode waktu.

Data proyeksi curah hujan untuk skenario SSP1-2.6, SSP2-4.5, dan SSP5-8.5 pada penelitian ini digunakan tanpa koreksi bias, karena fokus analisis adalah pada perubahan relatif dan tren jangka panjang, bukan pada reproduksi nilai absolut yang cocok dengan observasi. Sejumlah kajian menunjukkan bahwa koreksi bias, terutama yang bersifat deterministik seperti quantile mapping, tidak mampu secara andal mengoreksi tren perubahan iklim dan bahkan dapat mengubah atau mendistorsi sinyal perubahan yang disimulasikan model, termasuk tren, struktur spasial-temporal, serta karakteristik ekstrem. Selain itu, penerapan koreksi bias dapat mengganggu konsistensi fisik antar variabel sehingga menimbulkan sinyal perubahan yang tidak logis untuk aplikasi jangka panjang (Maraun, D., 2016). Oleh karena itu, untuk tujuan kajian perubahan iklim skala regional yang menekankan anomali dan pergeseran relatif dibanding periode dasar, penggunaan keluaran model mentah tanpa koreksi bias dinilai lebih tepat agar sinyal perubahan jangka panjang tetap konsisten secara dinamis dan fisik (Maraun et al., 2017). Laporan IPCC AR6 *Working Group I* juga menegaskan bahwa proyeksi iklim berbasis CMIP6 yang telah dikoreksi bias sangat sesuai untuk analisis perubahan statistik iklim, termasuk intensitas dan frekuensi kejadian ekstrem, pada skala regional hingga global (IPCC, 2021).

Penggunaan data NEX-GDDP-CMIP6 tanpa koreksi bias tambahan dalam penelitian ini dinilai relevan dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah, mengingat fokus analisis diarahkan pada evaluasi tren curah hujan dan implikasinya terhadap potensi peningkatan risiko banjir akibat perubahan iklim pada skala DAS. Namun demikian, pendekatan ini tetap mempertimbangkan keterbatasan dataset, sehingga hasil analisis ditafsirkan sebagai indikasi perubahan iklim jangka panjang, bukan sebagai representasi kejadian banjir individual secara deterministik.

Tren prediksi curah hujan DAS Kapuas tahun 2026 – 2060 berdasarkan skenario SSP1-2.6, SSP2-4.5 dan SSP5-8.5 yaitu:

a. Curah Hujan Rata – Rata



Gambar 4. 6 Curah Hujan Rata – Rata Skenario SSP Tahun 2026 -2060

Berdasarkan analisa rata – rata curah hujan proyeksi skenario SSP dapat dilihat rentang curah hujan rata – rata pertahunnya dari ketiga skenario tersebut dari tahun 2026 – 2060. secara umum, curah hujan rata-rata tahunan pada periode 2026–2059 menunjukkan pola fluktuatif antar-tahun dengan kisaran nilai yang relatif stabil, berada pada rentang sekitar 8–12 mm/hari. Ketiga skenario SSP memperlihatkan variabilitas interannual yang cukup tinggi, namun tanpa indikasi tren peningkatan atau penurunan yang sangat tajam dalam jangka panjang.

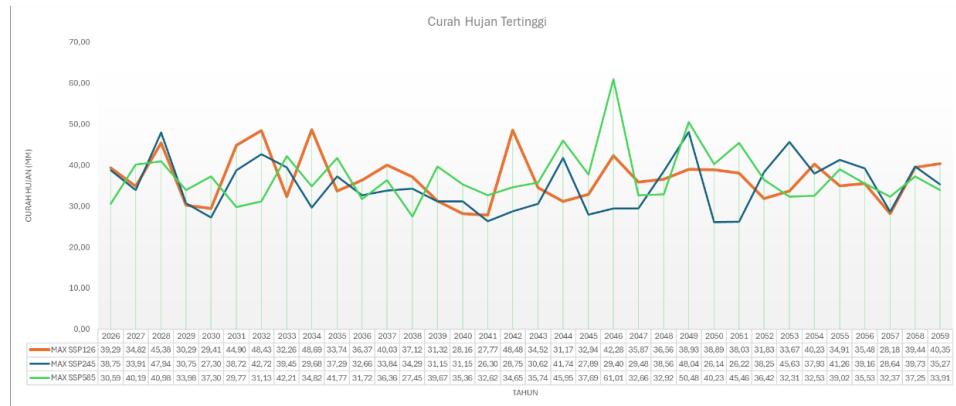
Pada skenario SSP1-2.6, curah hujan rata-rata cenderung berada pada kisaran 8,0–10,5 mm/hari, dengan beberapa tahun tertentu menunjukkan anomali peningkatan hingga sekitar 12,6 mm/hari. Pola

ini mencerminkan kondisi iklim dengan tingkat mitigasi emisi yang relatif tinggi, sehingga perubahan curah hujan berlangsung lebih moderat dan stabil. Skenario SSP2-4.5 sedikit lebih tinggi dengan nilai curah hujan rata-rata berkisar antara 7,5–11,3 mm/hari. Sementara itu, skenario SSP5-8.5 menunjukkan variabilitas paling tinggi di antara ketiga skenario, dengan kisaran curah hujan rata-rata sekitar 7,1–11,6 mm/hari. Pola ini merefleksikan kondisi iklim dengan tingkat emisi tinggi, yang cenderung meningkatkan ketidakpastian iklim dan fluktuasi curah hujan antar-tahun, meskipun nilai rata-ratanya tidak selalu lebih tinggi dibandingkan skenario lain.

SSP5-8.5 cenderung menghasilkan nilai rata-rata curah hujan yang sedikit lebih tinggi dan lebih fluktuatif dibandingkan SSP1-2.6 dan SSP2-4.5, terutama pada periode tahun 2050–2060. Kondisi ini sejalan dengan temuan bahwa skenario emisi tinggi meningkatkan kandungan uap air atmosfer, sehingga memperbesar potensi hujan lebat meskipun kenaikan rata-rata tidak selalu signifikan secara statistik (Trenberth et al., 2011; Westra et al., 2014).

Secara umum, rata-rata curah hujan proyeksi masih berada pada kisaran yang sama dengan data historis CHIRPS, tetapi amplitudo fluktuasi meningkat, terutama pada skenario emisi tinggi SSP5-8.5. Hal ini menandakan bahwa frekuensi hujan ekstrem akan meningkat, meskipun rata-rata tahunan tidak berubah secara drastis. Nilai rata-rata hujan proyeksi tahunan tampak stabil di bawah 11 mm/hari, menunjukkan bahwa hujan masa depan di DAS Kapuas akan lebih tidak menentu, dengan intensitas tinggi dalam waktu singkat, terutama di skenario SSP5-8.5 karena potensi peningkatan signifikan pada intensitas curah hujan setelah tahun 2040, sejalan dengan pemanasan global.

b. Nilai Curah Hujan Tertinggi



Gambar 4. 7 Curah Hujan Tertinggi Skenario SSP Tahun 2026 -2060

Curah hujan tertinggi tahunan pada periode 2026–2060 menunjukkan variabilitas antar-tahun yang signifikan pada seluruh skenario SSP, dengan nilai maksimum harian umumnya berada pada kisaran ± 26 –61 mm/hari. Pola ini konsisten dengan proyeksi CMIP6 yang menemukan bahwa intensitas dan frekuensi hujan harian ekstrem meningkat dan tetap muncul secara episodik, sementara perubahan curah hujan rata-rata lebih kecil namun tetap berpotensi meningkatkan risiko banjir (Almazroui et al., 2021).

Pada skenario SSP1-2.6, curah hujan maksimum tahunan umumnya berada pada rentang sekitar 29–49 mm/hari. Nilai puncak tertinggi tercatat mencapai sekitar 49,21 mm/hari. Skenario SSP2-4.5 memperlihatkan rentang ekstrem yang lebih lebar, dengan curah hujan maksimum tahunan berkisar antara ± 28 –60 mm/hari. Nilai tertinggi mencapai sekitar 60,10 mm/hari, yang merupakan salah satu nilai maksimum tertinggi di antara seluruh skenario. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kondisi emisi menengah, potensi kejadian hujan ekstrem dapat meningkat secara sporadis dan lebih intens dibandingkan SSP1-2.6. Sementara itu, skenario SSP5-8.5 menunjukkan variabilitas dan intensitas ekstrem paling tinggi, dengan curah hujan maksimum tahunan berada pada kisaran ± 29 –61 mm/hari. Nilai puncak tertinggi tercatat mencapai sekitar 61,01 mm/hari, mencerminkan peningkatan potensi hujan ekstrem pada skenario emisi

tinggi. Selain itu, frekuensi kemunculan nilai di atas 45–50 mm/hari tampak lebih sering dibandingkan dua skenario lainnya.

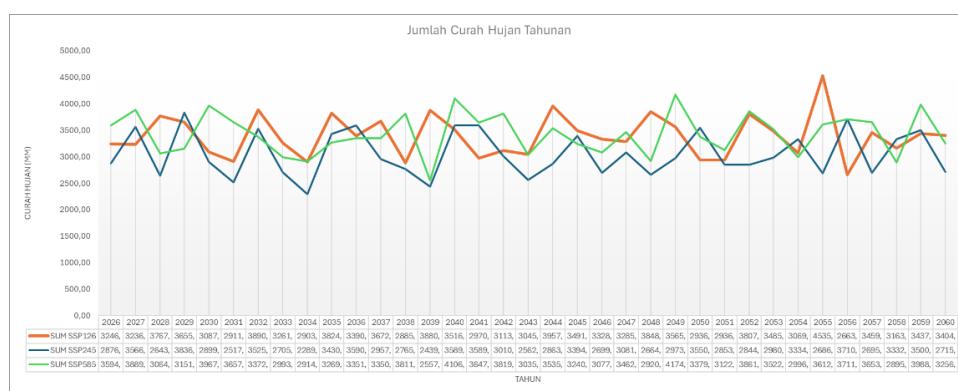
Perbedaan utama antar skenario SSP pada curah hujan tertinggi bukan hanya pada nilai rata-rata maksimum, tetapi pada besarnya puncak ekstrem dan variabilitas antar-tahun, dengan skenario emisi tinggi menunjukkan intensitas dan frekuensi ekstrem paling besar. Pola ini konsisten dengan proyeksi CMIP6 global dan regional, yang menemukan peningkatan kuat pada indeks hujan harian ekstrem ($Rx1day$, $R99p$) dan karakteristik banjir ekstrem berdasarkan periode ulang, terutama di bawah SSP5-8.5, sehingga meningkatkan risiko limpasan permukaan, genangan, dan kegagalan sistem drainase (Scoccimarro et al., 2020).

Nilai curah hujan tertinggi harian hasil observasi CHIRPS menunjukkan nilai yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan hasil proyeksi skenario SSP karena CHIRPS merupakan data berbasis satelit yang telah dikoreksi dengan pengamatan stasiun hujan permukaan dan mampu merekam kejadian hujan ekstrem aktual pada skala lokal, termasuk hujan konvektif intens berdurasi singkat yang umum terjadi di wilayah tropis (Funk et al., 2015). Sebaliknya, data proyeksi SSP yang bersumber dari *General Circulation Models* (GCM) CMIP6 memiliki resolusi spasial yang lebih kasar dan tidak dirancang untuk merepresentasikan kejadian ekstrem harian secara eksplisit, sehingga hujan harus diparameterisasi dan cenderung menghasilkan *underestimation* terhadap intensitas hujan ekstrem (IPCC, 2021). Keterbatasan parameterisasi konversi ini secara luas diakui sebagai penyebab utama rendahnya nilai curah hujan maksimum harian pada hasil simulasi iklim global, khususnya di wilayah tropis dan maritim seperti Indonesia (Sun et al., 2022).

Perbedaan di mana curah hujan historis CHIRPS tampak lebih besar dibandingkan curah hujan proyeksi CMIP6 dapat dijelaskan oleh kombinasi bias produk observasi dan model, perbedaan skala spasial, serta tren yang disimulasikan model. Sejumlah studi menunjukkan bahwa CHIRPS dan CMIP6 memiliki bias berbeda terhadap dataset dan bahwa CMIP6 cenderung menghasilkan estimasi curah hujan dan kejadian

ekstrem yang lebih rendah di sejumlah wilayah tropis (Addisu, A., et al, 2025). Oleh karena itu, perbedaan nilai absolut curah hujan maksimum antara CHIRPS dan proyeksi SSP dalam penelitian ini tidak dianggap sebagai kelemahan metodologis, melainkan sebagai refleksi dari perbedaan fungsi dataset, dimana data observasi digunakan sebagai referensi historis sedangkan data SSP digunakan untuk menilai perubahan relatif risiko hidrometeorologi di masa depan (IPCC, 2021).

c. Jumlah Curah Hujan Tahunan



Gambar 4. 8 Jumlah Curah Hujan Skenario SSP Tahun 2026 -2060

Jumlah curah hujan tahunan pada periode 2026–2060 menunjukkan fluktuasi antar-tahun yang cukup tinggi pada seluruh skenario SSP, dengan kisaran nilai umumnya berada antara ±2.500–4.500 mm/tahun. Variabilitas ini menegaskan bahwa perubahan iklim tidak hanya memengaruhi intensitas hujan harian, tetapi juga akumulasi curah hujan tahunan yang relevan terhadap neraca air dan potensi banjir jangka panjang.

Pada skenario SSP1-2.6, jumlah curah hujan tahunan berkisar antara sekitar 2.585–4.492 mm/tahun. Nilai terendah tercatat sekitar 2.585 mm/tahun, sedangkan nilai tertinggi mencapai sekitar 4.492 mm/tahun. Sebagian besar tahun berada pada rentang 3.000–3.700 mm/tahun. Skenario SSP2-4.5 menunjukkan rentang yang sebanding, dengan jumlah curah hujan tahunan berada pada kisaran sekitar 2.640–

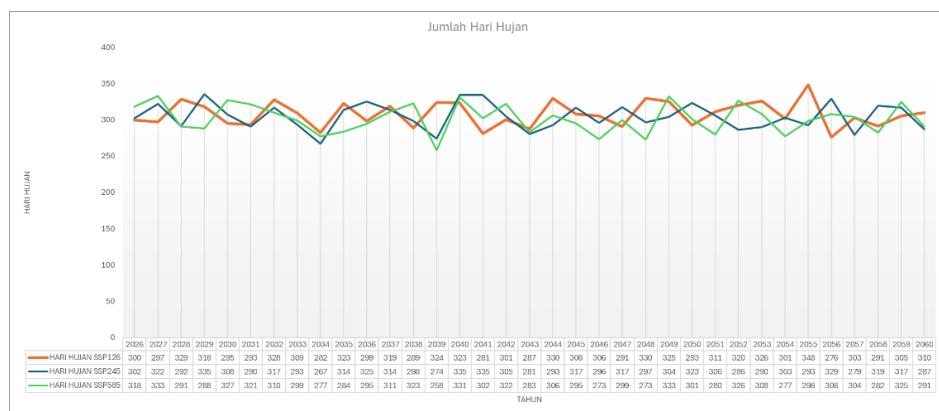
4.340 mm/tahun di mana akumulasi curah hujan tahunan cenderung lebih tidak stabil dibandingkan SSP1-2.6, dengan beberapa tahun menunjukkan peningkatan yang cukup signifikan. Sementara itu, skenario SSP5-8.5 memperlihatkan variabilitas dan akumulasi tahunan yang relatif paling tinggi, dengan jumlah curah hujan tahunan berkisar antara sekitar 2.900–4.360 mm/tahun. Nilai tertinggi mencapai sekitar 4.360 mm/tahun, dan nilai tahunan di atas 3.800 mm/tahun muncul lebih sering dibandingkan dua skenario lainnya. Hal ini mencerminkan pengaruh skenario emisi tinggi yang cenderung meningkatkan ketidakpastian iklim dan potensi akumulasi hujan tahunan yang besar.

Jumlah curah hujan tahunan hasil observasi CHIRPS di DAS Kapuas pada periode historis menunjukkan nilai yang relatif tinggi, berkisar antara 3.800–4.100 mm/tahun, yang mencerminkan karakter iklim ekuatorial basah dengan dominasi hujan sepanjang tahun (Funk et al., 2015). Hasil proyeksi jumlah curah hujan tahunan berdasarkan skenario SSP periode 2026–2060 menunjukkan nilai yang sedikit lebih rendah dibandingkan rata-rata historis CHIRPS, dengan kisaran sekitar 3.600–4.000 mm/tahun, namun tetap mempertahankan pola fluktuasi antar-tahun yang serupa (IPCC, 2021).

Perbedaan nilai absolut antara jumlah curah hujan CHIRPS dan proyeksi SSP terutama disebabkan oleh resolusi spasial dan keterbatasan *General Circulation Models* (GCM) dalam merepresentasikan proses hujan konvektif lokal yang berkontribusi signifikan terhadap akumulasi hujan tahunan di wilayah tropis (Fiedler et al., 2020). Selain itu, proses *downscaling* dan adanya bias struktural pada model iklim sering menyebabkan nilai total curah hujan tahunan menjadi lebih rendah dari kondisi sebenarnya, meskipun pola tren dan variasi relatif antar-skenario masih dapat dipertahankan. Oleh karena itu, perbedaan antara nilai curah hujan CHIRPS dan SSP masih berada dalam batas ketidakpastian yang umum ditemukan dalam berbagai studi evaluasi model iklim di wilayah Asia Tenggara (IPCC, 2021).

Meskipun demikian, skenario emisi tinggi SSP5-8.5 menunjukkan kecenderungan jumlah curah hujan tahunan yang lebih tinggi dibandingkan SSP2-4.5 dan SSP1-2.6, yang mengindikasikan potensi peningkatan akumulasi hujan di masa depan seiring dengan peningkatan suhu global (IPCC, 2021). Pemanasan atmosfer berpotensi meningkatkan intensitas dan frekuensi hujan lebat di daerah tropis (Allan, R., et al, 2008). Peningkatan jumlah curah hujan tahunan tersebut dapat memperbesar kejemuhan tanah dan debit dasar sungai, sehingga meningkatkan risiko banjir luas dan berkepanjangan di DAS Kapuas (Wu, Y., et al, 2024). Oleh karena itu, meskipun jumlah curah hujan tahunan hasil proyeksi SSP sedikit lebih rendah dibandingkan data observasi historis, secara konsisten menunjukkan bahwa DAS Kapuas tetap berada dalam kategori wilayah dengan iklim sangat basah dan memiliki kerentanan tinggi terhadap risiko banjir di masa depan (IPCC, 2021).

d. Jumlah Hari Hujan



Gambar 4. 9 Jumlah Hari Hujan Skenario SSP Tahun 2026 -2060

Jumlah hari hujan tahunan pada periode 2026–2060 menunjukkan bahwa wilayah kajian didominasi oleh kondisi sangat basah, dengan total hari hujan yang secara konsisten tinggi pada seluruh skenario SSP. Secara umum, jumlah hari hujan berada pada kisaran ±270–345 hari/tahun, yang mengindikasikan bahwa hujan terjadi hampir

sepanjang tahun, meskipun dengan intensitas yang bervariasi. Pada skenario SSP1-2.6, jumlah hari hujan tahunan berkisar antara sekitar 280–345 hari/tahun. Nilai tertinggi mencapai sekitar 345 hari/tahun, sementara nilai terendah berada di kisaran ±280 hari/tahun. Mayoritas tahun menunjukkan jumlah hari hujan di atas 300 hari/tahun, yang mencerminkan kondisi iklim dengan frekuensi hujan tinggi namun relatif stabil. Skenario SSP2-4.5 memperlihatkan pola yang sebanding, dengan jumlah hari hujan tahunan berada pada rentang ±275–335 hari/tahun. Nilai maksimum tercatat sekitar 335 hari/tahun. Sementara itu, skenario SSP5-8.5 menunjukkan kisaran jumlah hari hujan antara ±270–335 hari/tahun, dengan beberapa tahun mencapai nilai di atas 330 hari/tahun. Meskipun skenario ini sering diasosiasikan dengan peningkatan ekstrem iklim, hasil proyeksi menunjukkan bahwa peningkatan risiko hidrometeorologi lebih didorong oleh intensitas hujan dan akumulasi tahunan, bukan oleh peningkatan jumlah hari hujan secara signifikan.

Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa frekuensi hujan di wilayah kajian sudah sangat tinggi pada seluruh skenario, sehingga peningkatan risiko banjir di masa depan lebih dipengaruhi oleh kenaikan intensitas hujan harian dan akumulasi curah hujan tahunan, bukan oleh bertambahnya jumlah hari hujan. Temuan ini penting dalam konteks analisis kerawanan banjir, karena kombinasi antara banyaknya hari hujan (>300 hari/tahun) dan kejadian hujan ekstrem harian berpotensi mempercepat kejemuhan tanah dan meningkatkan limpasan permukaan.

Jumlah hari hujan tahunan di DAS Kapuas berdasarkan data observasi CHIRPS pada periode historis menunjukkan nilai yang sangat tinggi, yakni sekitar 320–340 hari hujan per tahun, yang mencerminkan karakter iklim ekuatorial basah dengan curah hujan yang terdistribusi hampir sepanjang tahun (Funk et al., 2015). Hasil proyeksi jumlah hari hujan tahunan berdasarkan skenario SSP periode 2026–2060 menunjukkan sedikit penurunan dibandingkan periode historis, dengan

jumlah hari hujan berkisar sekitar 290–310 hari per tahun, namun tetap berada dalam kategori wilayah dengan frekuensi hujan sangat tinggi (IPCC, 2021). Penurunan jumlah hari hujan ini tidak serta-merta menunjukkan penurunan kondisi kebasahan wilayah, melainkan mengindikasikan terjadinya redistribusi hujan, di mana hujan cenderung terjadi dengan intensitas yang lebih tinggi dalam durasi waktu yang lebih singkat (Allan et al., 2008).

Berdasarkan analisis proyeksi iklim CMIP6 pada skenario SSP1-2.6, SSP2-4.5, dan SSP5-8.5 periode 2026–2060, karakteristik curah hujan di wilayah kajian menunjukkan kondisi sangat basah dengan variabilitas iklim yang tinggi. Secara rata-rata, curah hujan harian berada pada kisaran ±8–12 mm/hari pada seluruh skenario SSP. Nilai ini relatif stabil antar-skenario dan antar-tahun, menunjukkan bahwa tidak terjadi peningkatan linier yang signifikan pada curah hujan rata-rata. Namun demikian, stabilitas nilai rata-rata ini tidak merepresentasikan risiko hidrometeorologi secara utuh, karena tidak menangkap dinamika kejadian ekstrem. Hal tersebut tercermin dari curah hujan tertinggi (maksimum harian) yang menunjukkan variasi jauh lebih besar, dengan kisaran nilai mencapai ±26–61 mm/hari. Pada skenario SSP5-8.5, nilai maksimum harian tertinggi tercatat hingga sekitar 61 mm/hari, sementara pada SSP2-4.5 mencapai sekitar 60 mm/hari, dan pada SSP1-2.6 sekitar 49 mm/hari. Kejadian hujan ekstrem harian ≥50 mm/hari ini memiliki kontribusi dominan terhadap peningkatan limpasan permukaan dan potensi banjir, meskipun tidak terjadi setiap tahun.

Dari sisi akumulasi, jumlah curah hujan tahunan berada pada kisaran ±2.500–4.500 mm/tahun, dengan beberapa tahun pada seluruh skenario melampaui 4.000 mm/tahun. Nilai akumulasi tahunan yang tinggi ini menunjukkan bahwa wilayah DAS Kapuas berada pada kondisi kelebihan air secara hidrologis, sehingga kondisi tanah cenderung jenuh dalam jangka panjang, terutama ketika hujan ekstrem terjadi secara berurutan. Sementara itu, jumlah hari hujan tahunan tergolong sangat tinggi, yakni berada pada kisaran ±270–345 hari/tahun, dengan mayoritas tahun mencatat lebih dari 300 hari hujan. Hal ini mengindikasikan bahwa

hujan terjadi hampir sepanjang tahun, sehingga waktu pemulihan tanah dan sistem drainase menjadi sangat terbatas.

Secara keseluruhan, data historis CHIRPS (2014–2024) dan data proyeksi iklim CMIP6 (2026–2060) menunjukkan korelasi pola hujan yang konsisten dalam merepresentasikan karakteristik iklim basah di DAS Kapuas, khususnya pada curah hujan rata-rata, jumlah hari hujan, dan akumulasi curah hujan tahunan, yang berada pada kisaran nilai yang relatif sebanding. CHIRPS berperan sebagai *baseline observational* yang menangkap variabilitas hujan aktual, termasuk kejadian hujan ekstrem dengan intensitas tinggi, sementara CMIP6 mampu merepresentasikan kecenderungan iklim jangka menengah hingga panjang namun dengan kecenderungan underestimasi intensitas hujan ekstrem harian akibat resolusi spasial dan temporal model. Dengan demikian, meskipun nilai curah hujan maksimum harian pada CMIP6 lebih rendah dibandingkan CHIRPS, kesesuaian pola dan besaran akumulasi hujan menunjukkan bahwa CMIP6 layak digunakan untuk analisis proyeksi, sepanjang dikombinasikan dengan data CHIRPS sebagai referensi historis untuk interpretasi risiko banjir dan penilaian dampak hidrologis secara lebih realistik.

Perbedaan data curah hujan historis CHIRPS dengan curah hujan proyeksi CMIP6 didasarkan pada resolusi spasial yang digunakan. Model iklim global CMIP6 memiliki resolusi spasial yang relatif kasar, yaitu sekitar $\pm 100\text{--}250$ km pada GCM asli dan sekitar ± 25 km pada produk hasil *downscaling* seperti NEX-GDDP. Dengan resolusi tersebut, kejadian hujan ekstrem yang bersifat lokal dan konvektif akan dirata-ratakan di dalam satu grid model. Akibatnya nilai curah hujan cenderung menjadi lebih rendah, terutama di wilayah tropis maritim yang didominasi oleh hujan konvektif berintensitas tinggi dan berdurasi singkat, seperti Indonesia dan Kalimantan Barat. Sebaliknya, CHIRPS sebagai produk curah hujan berbasis penginderaan jauh dengan resolusi spasial tinggi ($\sim 0,05^\circ$ atau ± 5 km) dirancang untuk menangkap variabilitas hujan lokal dan kejadian ekstrem harian. CHIRPS mengombinasikan data satelit inframerah dengan koreksi berbasis stasiun hujan, sehingga memiliki sensitivitas yang lebih tinggi terhadap puncak intensitas hujan konvektif. Sejumlah studi validasi menunjukkan bahwa CHIRPS mampu merepresentasikan hujan ekstrem harian dengan lebih baik dibandingkan GCM,

meskipun pada kondisi tertentu berpotensi sedikit overestimate intensitas ekstrem (Funk et al., 2015; Dinku et al., 2018).

Dalam konteks penelitian banjir dan risiko infrastruktur ketenagalistrikan di Kalimantan Barat, perbedaan antara Rx1day CHIRPS dan SSP perlu diperlakukan secara metodologis, bukan diseragamkan. CHIRPS lebih representatif sebagai data dasar (*baseline*) untuk mengkarakterisasi hujan ekstrem historis, sedangkan data SSP lebih tepat digunakan untuk mengidentifikasi arah dan besaran perubahan relatif hujan ekstrem di masa depan. Pendekatan ini sejalan dengan rekomendasi IPCC dan praktik umum dalam kajian dampak perubahan iklim pada risiko hidrometeorologi (IPCC, 2021; Teutschbein & Seibert, 2012).

Perbandingan antara data historis CHIRPS (2014–2024) dan proyeksi CMIP6 (2026–2060) menunjukkan bahwa pola iklim basah di DAS Kapuas tetap bertahan, ditandai oleh curah hujan rata-rata harian, jumlah hari hujan, dan akumulasi curah hujan tahunan yang berada pada kisaran nilai yang relatif sebanding. Pada DAS Kapuas, dampak perubahan iklim tidak secara langsung tercermin sebagai kenaikan linier curah hujan rata-rata atau frekuensi hujan, yang menyebabkan indikasi perubahan iklim menjadi kurang menonjol apabila hanya dievaluasi menggunakan parameter nilai rata-rata. Namun demikian, indikasi perubahan iklim menjadi jelas ketika dianalisis dari aspek variabilitas dan ekstrem hujan. Data CHIRPS merekam kejadian hujan ekstrem harian dengan intensitas sangat tinggi (hingga ± 190 mm/hari), sementara CMIP6 menunjukkan peningkatan variabilitas antar-tahun dan kemunculan hujan ekstrem harian (≥ 50 – 60 mm/hari) yang lebih sering, meskipun dengan intensitas maksimum yang lebih rendah akibat keterbatasan resolusi model. Selain itu, pada CMIP6 terlihat kecenderungan akumulasi curah hujan tahunan tinggi yang muncul lebih sporadis namun berulang, yang berimplikasi pada peningkatan kejemuhan tanah dalam jangka panjang.

Beberapa kajian terbaru mendukung pernyataan bahwa dampak perubahan iklim di Daerah Aliran Sungai (DAS) Kapuas dan wilayah tropis serupa lebih tercermin pada perubahan distribusi, variabilitas, dan intensitas kejadian hujan ekstrem, bukan pada perubahan signifikan rata-rata curah hujan. Studi di Kapuas menunjukkan bahwa risiko banjir di masa depan terutama dipicu oleh peningkatan kejadian hujan ekstrem dan variabilitas curah hujan, sementara rata-rata tahunan

cenderung stabil atau hanya berubah sedikit (Sampurno et al., 2022). Literatur global dan regional juga menegaskan bahwa sinyal perubahan iklim di daerah tropis sering kali lebih kuat pada kejadian ekstrem dan ketidakpastian iklim, yang berdampak langsung pada risiko banjir meskipun rata-rata curah hujan relatif stabil (Gimeno et al., 2022). Hal ini konsisten dengan temuan di berbagai DAS tropis lain, di mana perubahan distribusi dan intensitas hujan lebih berdampak pada banjir daripada perubahan rata-rata (Wang et al., 2021). Dengan demikian, hasil perbandingan ini menunjukkan bahwa perubahan iklim di DAS Kapuas lebih tercermin sebagai perubahan distribusi, variabilitas, dan intensitas kejadian hujan, bukan sebagai perubahan signifikan pada rata-rata hujan. Temuan ini konsisten dengan literatur perubahan iklim di wilayah tropis, yang menyatakan bahwa sinyal perubahan iklim sering kali lebih kuat pada kejadian ekstrem dan ketidakpastian iklim, sehingga berdampak langsung terhadap peningkatan risiko banjir meskipun curah hujan rata-rata relatif stabil.

4.2 Analisis Indeks Kerawanan Banjir DAS Kapuas

Analisis Indeks Kerawanan Banjir (IKB) menggunakan pendekatan spasial berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) dengan bantuan perangkat lunak QGIS. Pendekatan ini mengintegrasikan berbagai faktor fisik dan lingkungan yang memengaruhi kejadian banjir ke dalam suatu indeks komposit melalui metode *Multi-Criteria Analysis* (MCA), yang secara luas digunakan dalam pemetaan kerawanan banjir karena kemampuannya menggabungkan berbagai variabel dengan tingkat kepentingan yang berbeda secara kuantitatif dan spasial. *GIS-based Multi-Criteria Analysis* (MCA) telah banyak digunakan untuk menyusun indeks kerawanan/risiko banjir dengan cara mengintegrasikan berbagai faktor fisik dan lingkungan ke dalam satu indeks komposit berbasis spasial. Berbagai studi mengombinasikan data penginderaan jauh dan Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk membangun layer tematik seperti elevasi, kemiringan lereng, jarak ke sungai, curah hujan, kerapatan drainase, jenis tanah, penggunaan lahan, serta indikator sosial-ekonomi, kemudian menimbangnya dengan metode *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA) atau *Analytical Hierarchy Process* (AHP) guna menghasilkan peta kerawanan atau risiko banjir terklasifikasi (Chen, Y., 2022).

Proses utama *Multi-Criteria Analysis* dilakukan menggunakan metode *Weighted Linear Combination* (WLC) di aplikasi SIG, misalnya melalui fungsi *Raster Calculator* atau *weighted overlay/weighted sum*. Pada tahap ini, setiap raster hasil scoring kriteria dikalikan dengan bobot variabel yang bersesuaian, kemudian seluruh hasil perkalian dijumlahkan untuk menghasilkan raster indeks komposit kerawanan atau bahaya/risko banjir (Wang et al., 2018). Dalam banyak studi, bobot kriteria diperoleh melalui AHP/ANP atau MCDA lain, lalu digabungkan dengan skema WLC sehingga Indeks Kerawanan Banjir dapat dipetakan secara kontinu dan kemudian diklasifikasikan ke dalam kelas sangat rendah hingga sangat tinggi (Dash et al., 2020). Metode WLC dipandang populer karena sederhana, transparan, dan mudah diimplementasikan di SIG, sekaligus menghasilkan peta indeks yang intuitif dan mudah diinterpretasi secara spasial oleh pengambil keputusan. Beberapa penelitian juga mengembangkan varian WLC lokal atau probabilistik untuk menangani ketidakpastian dan heterogenitas spasial, namun tetap mempertahankan prinsip dasar perkalian bobot-skor dan penjumlahan untuk memperoleh nilai indeks akhir.

Banyak penelitian di Indonesia menggunakan MCDA berbasis GIS, khususnya AHP dan WLC, untuk pemetaan kerawanan dan risiko banjir. Proses umumnya meliputi penentuan bobot faktor seperti curah hujan, kemiringan, penggunaan lahan, jarak ke sungai, normalisasi/skorering raster, lalu penggabungan dengan metode *weighted overlay* (WLC) di aplikasi pengolahan data spasial untuk menghasilkan indeks kerawanan banjir.

4.2.1 Curah Hujan DAS Kapuas

Curah hujan menjadi faktor yang penting dalam analisis risiko banjir. Curah hujan yang tinggi meningkatkan volume limpasan permukaan dan potensi terjadinya genangan, khususnya pada wilayah dengan kapasitas infiltrasi terbatas. Klasifikasi curah hujan dibagi menjadi lima kelas, berdasarkan Tabel 4.4. Curah hujan yang digunakan adalah curah hujan berdasarkan proyeksi jumlah curah hujan skenario SSP pada DAS Kapuas.

Tabel 4. 4 Klasifikasi Curah Hujan

No	Jumlah Curah Hujan Tahunan (mm)	Keterangan	Nilai	Bobot
1	>3000	>Sangat Basah	5	0,3
2	2501 – 3000	Basah	4	
3	2001 – 2500	Sedang	3	
4	1501 – 2000	Kering	2	
5	<1500	Sangat Kering	1	

Sumber: Yassar et al., 2020

4.2.2 Kemiringan Lahan DAS Kapuas

Kemiringan lahan menjadi faktor dalam pemetaan risiko banjir. Semakin tinggi kemiringan lahan, maka air yang berada di lahan tersebut akan diteruskan ke tempat dengan kemiringan yang lebih rendah. Kemiringan yang tinggi membuat air lebih cepat mengalir dibandingkan dengan kemiringan lahan yang rendah atau lebih landai. Kemiringan lahan DAS Kapuas dapat dilihat berdasarkan data *Digital Elevation Model* (DEM) yang didapatkan dari laman InaGeoportal (Badan Informasi Geospasial, 2023) dan hasil analisa luasan kemiringan lahan DAS Kapuas dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Kemiringan Lahan DAS Kapuas

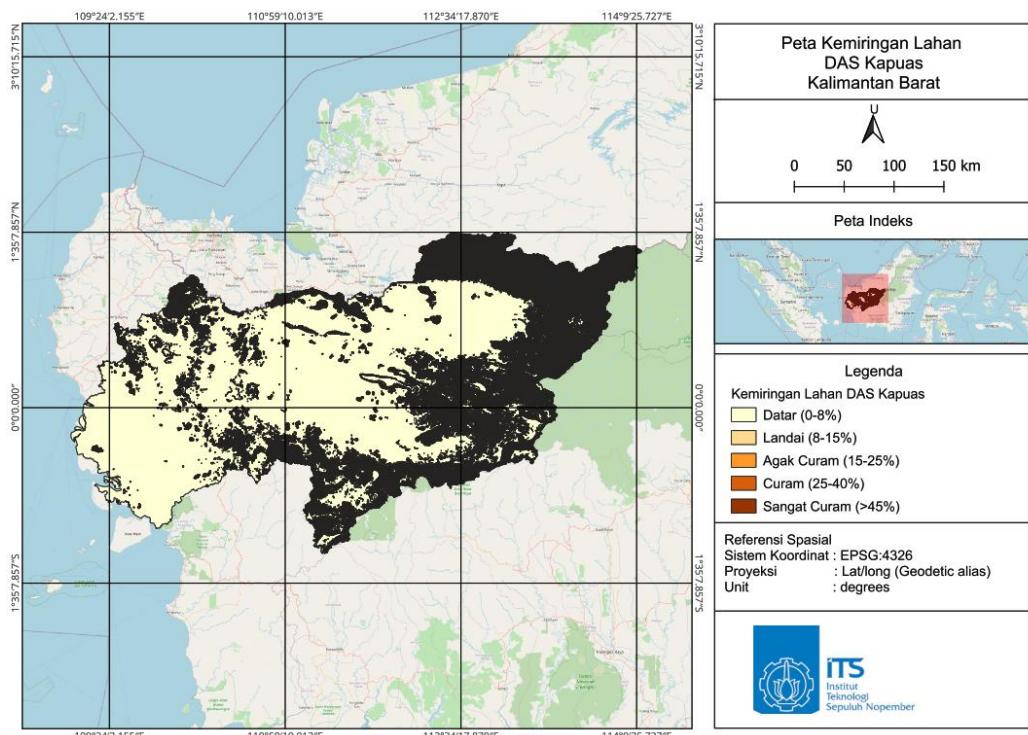
No	Kemiringan	Keterangan	Nilai	Bobot	Luas (km ²)
1	0 – 8	Datar	5	0,2	68.500,33
2	8 – 15	Landai	4		11.815,54
3	15 – 25	Agak Curam	3		11.462,52
4	25 – 40	Curam	2		7.022,26
5	>40	Sangat Curam	1		1.260,67
Jumlah					100,061,32

Sumber: Darmawan dan Suprayogi, 2017.

Secara umum DAS Kapuas didominasi oleh lahan datar hingga landai dengan kemiringan 0 – 8% dengan luas 68,500,33 km² atau lebih dari 68% total luasan DAS Kapuas. Kondisi ini menggambarkan karakter topografi dataran yang luas terutama pada bagian hilir di wilayah Kabupaten Kubu Raya, Pontianak dan Mempawah. Selanjutnya, wilayah dengan kemiringan 8–25% (kategori landai hingga curam) mendominasi bagian tengah DAS seperti Kabupaten Sintang,

Sekadau, dan Melawi, dengan luas total sekitar 18.800 km². Daerah ini merupakan zona transisi topografi, yang berperan penting dalam pengendalian aliran permukaan dan infiltrasi air tanah.

Sementara itu, wilayah dengan kemiringan di atas 25% (kategori curam dan sangat curam) mencakup sekitar 8.200 km² dan terletak di bagian hulu DAS Kapuas, khususnya di kawasan Pegunungan Müller dan Taman Nasional Betung Kerihun. Kawasan ini berfungsi sebagai zona tangkapan air utama (*recharge area*) dan memiliki peran ekologis penting sebagai daerah konservasi serta penyangga hidrologis. Dengan dominasi topografi datar, DAS Kapuas termasuk dalam kelompok DAS dengan kecepatan aliran permukaan relatif rendah di hilir, namun berpotensi tinggi mengalami akumulasi limpasan dari daerah hulu yang lebih curam, sehingga menimbulkan risiko banjir musiman pada wilayah rendah seperti Kabupaten Kubu Raya, Kabupaten Mempawah, Kota Pontianak, dan Kabupaten Kayong Utara. Peta kemiringan lahan DAS Kapuas dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Peta Kemiringan Lahan DAS Kapuas

4.2.3 Tata Guna Lahan dan Tekstur Tanah DAS Kapuas

Penggunaan lahan atau tata guna lahan merupakan salah satu faktor penting dalam menentukan tingkat risiko banjir suatu wilayah. Perubahan tata guna lahan, terutama dari hutan atau vegetasi alami menjadi lahan terbangun, pertanian intensif, maupun perkebunan, dapat mengubah keseimbangan hidrologi daerah aliran sungai (DAS) secara signifikan. Penurunan tutupan vegetasi menyebabkan berkurangnya infiltrasi air hujan ke dalam tanah dan meningkatnya aliran permukaan (*runoff*), sehingga memperbesar potensi terjadinya banjir (Putra et al., 2021).

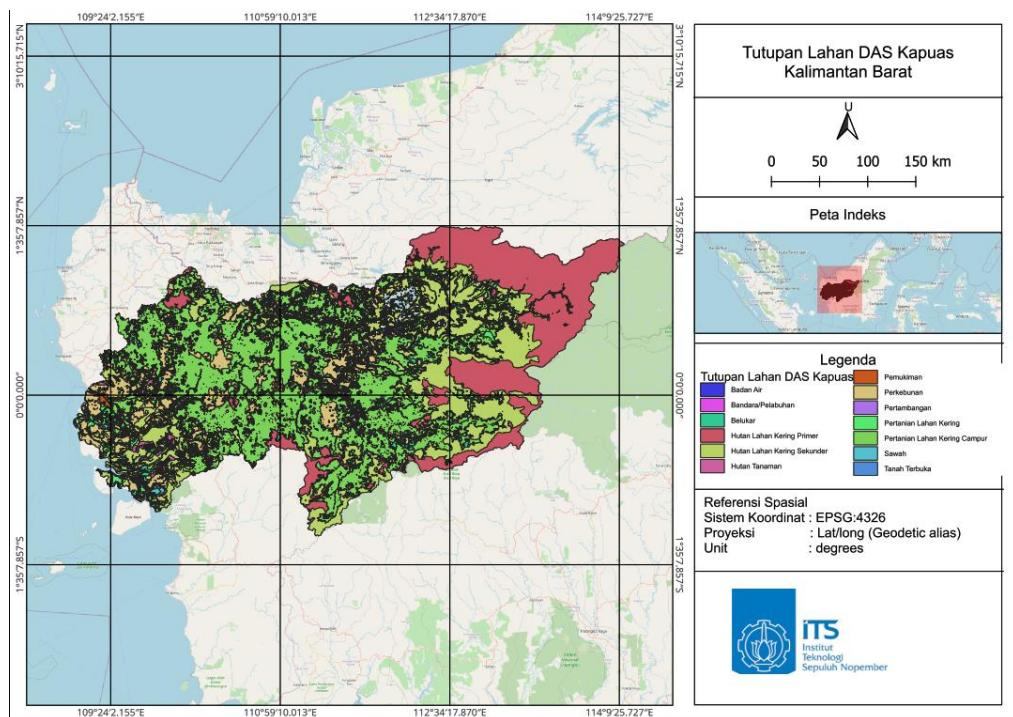
Dalam beberapa dekade terakhir, DAS Kapuas mengalami perubahan tata guna lahan yang cukup besar, terutama berupa konversi hutan rawa di bagian barat daya dan timur laut menjadi lahan pertanian dan perkebunan. Transformasi ini berkontribusi pada peningkatan kejadian bulan kering dan perubahan distribusi spasial neraca air, meskipun secara umum DAS Kapuas masih berada pada kondisi surplus air tahunan (Fibriantika et al., 2021). Pada skala hulu, perubahan penggunaan lahan antara 2012–2022 meningkatkan koefisien limpasan dari sekitar 0,13 menjadi 0,15, yang menunjukkan penurunan kapasitas infiltrasi dan peningkatan aliran permukaan (Goewin et al., 2024). Luasan kategori tutupan lahan DAS Kapuas berdasarkan data Kementerian Lingkungan Hidup dan analisa penulis dapat dilihat pada Tabel 4.6 dan Gambar 4.11.

Tabel 4. 6 Tata Guna Lahan DAS Kapuas

No	Jenis Tutupan Lahan	Kategori Tutupan Lahan	Nilai	Bobot	Luas (km ²)
1	Hutan Lahan Primer	Hutan Lahan Kering Primer	1	0,30	19337,691
2	Hutan Lahan Sekunder	Hutan Lahan Kering Sekunder	1		714,941
3	Hutan Rawa Sekunder	Hutan Lahan Kering Sekunder	1		7584,416
4	Hutan Tanaman	Hutan Tanaman	1		498,552
5	Hutan Rawa Primer	Hutan Lahan Kering Primer	1		72.009
6	Hutan Lahan Kering Sekunder	Hutan Lahan Kering Sekunder	1		13686,318
7	Perkebunan	Perkebunan	3		9234,509
8	Belukar	Belukar	5		1917,151

No	Jenis Tutupan Lahan	Kategori Tutupan Lahan	Nilai	Bobot	Luas (km ²)
9	Belukar Rawa	Belukar	5		2177,931
10	Permukiman	Pemukiman	7		321,707
11	Pertanian Lahan Kering Campuran	Pertanian Lahan Kering Campur	7		39462,558
12	Transmigrasi	Pemukiman	7		86,418
13	Pertanian Lahan Kering	Pertanian Lahan Kering	7		903,574
14	Bandara/Pelabuhan	Bandara/Pelabuhan	9		0,575
15	Tanah Terbuka	Tanah Terbuka	9		1472,983
16	Tambak	Badan Air	9		23,541
17	Pertambangan	Pertambangan	9		405,070
18	Sawah	Sawah	9		339,421

Sumber: Yassar et al., 2020



Gambar 4. 11 Peta Tutupan Lahan DAS Kapuas

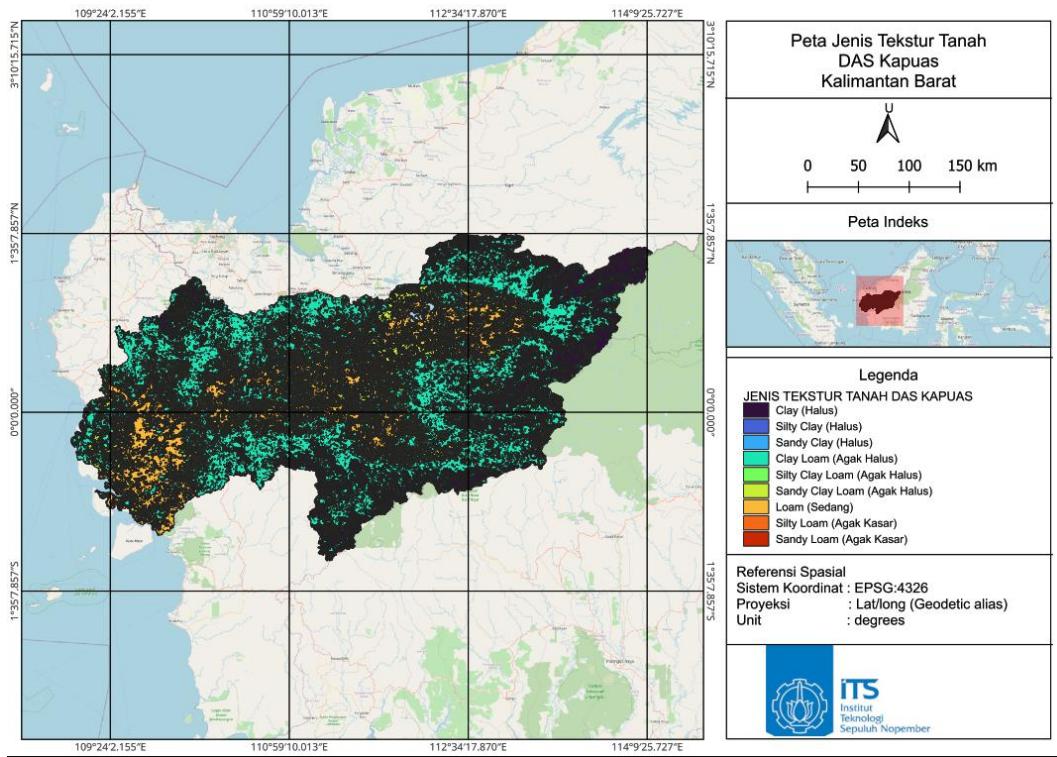
Faktor lain yang memperkuat dampak penggunaan lahan terhadap risiko banjir adalah tekstur tanah dan topografi. Pada wilayah datar dengan tanah bertekstur halus seperti lempung atau lempung liat, infiltrasi air cenderung lebih

rendah, sehingga perubahan kecil pada tutupan lahan dapat secara drastis meningkatkan limpasan. Tekstur tanah DAS Kapuas dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan Gambar 4.12.

Tabel 4. 7 Jenis Tekstur Tanah DAS Kapuas

No	Tekstur Tanah	Kategori Tekstur Tanah	Nilai	Bobot	Luas (km ²)
1	(Cl) <i>Clay</i>	Halus - Tidak Peka	5	0,20	12090,223
2	(SiCl) <i>Silty Clay</i>	Halus - Tidak Peka	5		0,788
3	(SaCl) <i>Sandy Clay</i>	Halus - Tidak Peka	5		129,683
4	(ClLo) <i>Clay Loam</i>	Agak Halus - Tidak Peka	5		58786,508
5	(SiClLo) <i>Silty Clay Loam</i>	Agak Halus - Agak Peka	4		1,973
6	(SaClLo) <i>Sandy Clay Loam</i>	Kehalusan Sedang - Agak Peka	4		9400,432
7	(Lo) <i>Loam</i>	Kehalusan Sedang - Kepkaan Sedang	3		18752,591
8	(SiLo) <i>Silty Loam</i>	Kehalusan Sedang - Kepkaan Sedang	3		0,054
9	(SaLo) <i>Sandy Loam</i>	Agak Kasar - Peka	2		84,245

Sumber: Darmawan dan Suprayogi, 2017



Gambar 4. 12 Peta Jenis Tekstur Tanah DAS Kapuas

Analisa tekstur tanah di wilayah DAS Kapuas:

- Wilayah hulu dan tengah DAS Kapuas, khususnya pada kawasan perbukitan dan pegunungan Kapuas Hulu, didominasi oleh tekstur tanah *Clay Loam* (lempung berliat) dan *Loam* (lempung). Jenis tekstur tanah ini masih memungkinkan terjadinya infiltrasi air pada tingkat sedang, sehingga potensi terjadinya banjir relatif lebih rendah. Namun demikian, kondisi tersebut tetap memiliki kerentanan terhadap proses erosi dan kejadian longsor apabila tutupan vegetasi mengalami penurunan atau hilang
- Wilayah hilir dan dataran rendah DAS Kapuas, yang meliputi Kabupaten Kubu Raya, Kota Pontianak, dan Kabupaten Mempawah, didominasi oleh tekstur tanah *Clay* (lempung halus) dan *Silty Clay* (lempung berdebu) yang memiliki tingkat permeabilitas sangat rendah. Kondisi tersebut menyebabkan laju infiltrasi air menjadi terbatas, sehingga wilayah ini rentan mengalami genangan saat terjadi curah hujan tinggi akibat lambatnya sistem drainase dan terjadinya akumulasi limpasan permukaan

- Wilayah sepanjang pesisir dan kawasan rawa-rawa di sekitar DAS Kapuas didominasi oleh tekstur tanah *Sandy Clay Loam* (lempung pasir liat) yang bersifat agak peka. Tekstur tanah ini memiliki kemampuan infiltrasi yang relatif lebih baik dibandingkan tanah berliat murni, namun tetap menunjukkan kerentanan terhadap proses erosi serta akumulasi sedimentasi, terutama pada kondisi aliran permukaan yang tinggi

Tekstur tanah merupakan salah satu parameter penting dalam analisis hidrologi dan kerawanan banjir karena berpengaruh langsung terhadap kemampuan infiltrasi, kapasitas simpan air, serta pembentukan limpasan permukaan. Tekstur tanah ditentukan oleh proporsi fraksi pasir (*sand*), debu (*silt*), dan liat (*clay*), di mana tanah dengan dominasi fraksi liat umumnya memiliki pori mikro yang lebih banyak sehingga permeabilitas dan laju infiltrasinya rendah. Kondisi ini menyebabkan air hujan lebih mudah tertahan di permukaan tanah dan meningkatkan potensi limpasan serta genangan. Oleh karena itu, tanah bertekstur sangat halus seperti *clay* (lempung halus), *silty clay* (lempung berdebu), dan *sandy clay* (lempung berpasir) dikategorikan sebagai tanah dengan tingkat kerawanan tinggi terhadap banjir dan diberi nilai tertinggi, yaitu 5. Tanah dengan tekstur agak halus seperti *clay loam* (lempung liat) dan *silty clay loam* (lempung berpasir) memiliki kemampuan infiltrasi yang sedikit lebih baik dibandingkan tanah liat murni, namun masih cenderung menahan air dalam jumlah besar, terutama pada kondisi hujan berintensitas tinggi. Kelompok tekstur ini tetap diklasifikasikan sebagai tanah yang berkontribusi signifikan terhadap limpasan permukaan dan diberi nilai tinggi hingga menengah-tinggi (nilai 4–5). Selanjutnya, tanah bertekstur sedang seperti *sandy clay loam* (lempung liat berpasir), *loam* (lempung), dan *silty loam* (lempung berdebu), memiliki keseimbangan antara fraksi pasir, debu, dan liat, sehingga menunjukkan kemampuan infiltrasi dan kapasitas simpan air yang relatif moderat. Tekstur ini dikategorikan memiliki tingkat kerentanan sedang terhadap pembentukan limpasan dan diberikan nilai menengah (nilai 3–4).

Sebaliknya, tanah bertekstur agak kasar hingga kasar seperti *sandy loam* (lempung berpasir) didominasi oleh fraksi pasir yang memiliki pori makro lebih

besar, sehingga air hujan dapat meresap dengan cepat ke dalam tanah. Karakteristik ini menyebabkan limpasan permukaan relatif rendah dan potensi genangan menjadi kecil, sehingga tanah bertekstur kasar dikategorikan memiliki tingkat kerawanan rendah dan diberikan nilai terendah (nilai 2).

Pemberian nilai tekstur tanah tersebut didasarkan pada prinsip bahwa semakin halus tekstur tanah, semakin rendah kemampuan infiltrasi dan semakin tinggi potensi limpasan permukaan. Dalam analisis ini, tekstur tanah diberi bobot sebesar 0,20 yang menunjukkan bahwa variabel ini memiliki peran penting dalam menentukan kerawanan banjir, namun tetap berinteraksi dengan parameter lain seperti curah hujan, tutupan lahan, dan topografi dalam sistem penilaian berbasis *multi-criteria analysis* (MCA).

4.3 Analisis Spasial Risiko Banjir DAS Kapuas

Penentuan tingkat kerawanan banjir dalam penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan *Weighted Linear Combination* (WLC) berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG). Metode WLC mengintegrasikan berbagai parameter fisik utama penyebab banjir dengan memberikan bobot relatif pada setiap faktor sesuai dengan tingkat pengaruhnya terhadap kejadian banjir, sehingga menghasilkan nilai kerawanan spasial yang bersifat kuantitatif dan terukur (Tehrany et al., 2017). Pendekatan serupa juga telah diterapkan dalam studi kerawanan banjir di tingkat regional di Indonesia (Aldiansyah et al., 2023).

Penilaian potensi risiko banjir rencana berdasarkan skenario iklim SSP dilakukan menggunakan aplikasi pengolahan data spasial QGIS dengan melakukan overlay dari data yang telah dianalisa sebelumnya yaitu data:

Tabel 4. 8 Pembobotan Indeks Kerawanan Banjir

No	Jenis Data	Bobot
1	Curah Hujan Proyeksi SSP1-2.6, SSP2-4.5 dan SSP5-8.5	0,30
2	Tutupan Lahan	0,30
3	Kemiringan Lahan	0,20
4	Tekstur Tanah	0.20

Sumber : Analisis Penulis, 2025

Setiap parameter kerawanan banjir diklasifikasikan ke dalam lima hingga sembilan kelas, dengan skala nilai yang menunjukkan bahwa semakin tinggi skor,

maka tingkat kerawanan banjir semakin besar. Penentuan bobot masing-masing parameter dilakukan berdasarkan tinjauan literatur terhadap berbagai studi pemetaan bahaya banjir (*flood hazard mapping*) di Indonesia dan kawasan Asia Tenggara. Bobot yang digunakan dalam penelitian ini meliputi curah hujan sebesar 0,30, tutupan lahan sebesar 0,30, kemiringan lereng sebesar 0,20, dan jenis tanah sebesar 0,20. Kombinasi bobot tersebut mencerminkan dominasi faktor hidrometeorologis dan karakteristik penutup lahan dalam memengaruhi tingkat risiko banjir, dengan curah hujan sebagai faktor yang paling berpengaruh (Ariyani et al., 2024).

Nilai Indeks Kerawanan Banjir (IKB) dihitung menggunakan pendekatan *weighted linear combination* (WLC), yaitu dengan menjumlahkan hasil perkalian antara bobot dan skor masing-masing parameter penyusun kerawanan banjir. Pendekatan ini umum digunakan dalam pemetaan bahaya banjir berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) karena mampu merepresentasikan kontribusi relatif setiap parameter terhadap tingkat kerawanan secara kuantitatif (Tehrany et al., 2017). Nilai Indeks Kerawanan Banjir (IKB) dihitung menggunakan persamaan berbobot berikut:

$$IKB = (0,30 \times H) + (0,30 \times L) + (0,20 \times S) + (0,20 \times T) \quad (4.5)$$

Keterangan:

H = Curah Hujan Tahunan

L = Tutupan Lahan/Tata Guna Lahan

S = Kemiringan

T = Infiltrasi dan Tekstur Tanah

Nilai Indeks Kerawanan Banjir (IKB) yang diperoleh dari hasil overlay berbobot memiliki rentang 1,00–6,20. Untuk memudahkan interpretasi, nilai tersebut dinormalisasi ke dalam skala 0–100 menggunakan metode min–max normalization berdasarkan perumusan:

$$IKB_{norm} = \frac{IKB - 1,00}{6,20 - 1,00} \times 100 \quad (4.6)$$

Nilai hasil perhitungan IKB kemudian dinormalisasi ke skala 0–100 menggunakan fungsi *scale_linear* pada apliasi QGIS untuk memudahkan interpretasi spasial dan perbandingan antar-wilayah, sebagaimana juga diterapkan oleh Olii et al. (2021) dan Ariyani et al. (2024). Skala 0–100 dikategorikan menjadi empat tingkat kerawanan banjir, yaitu:

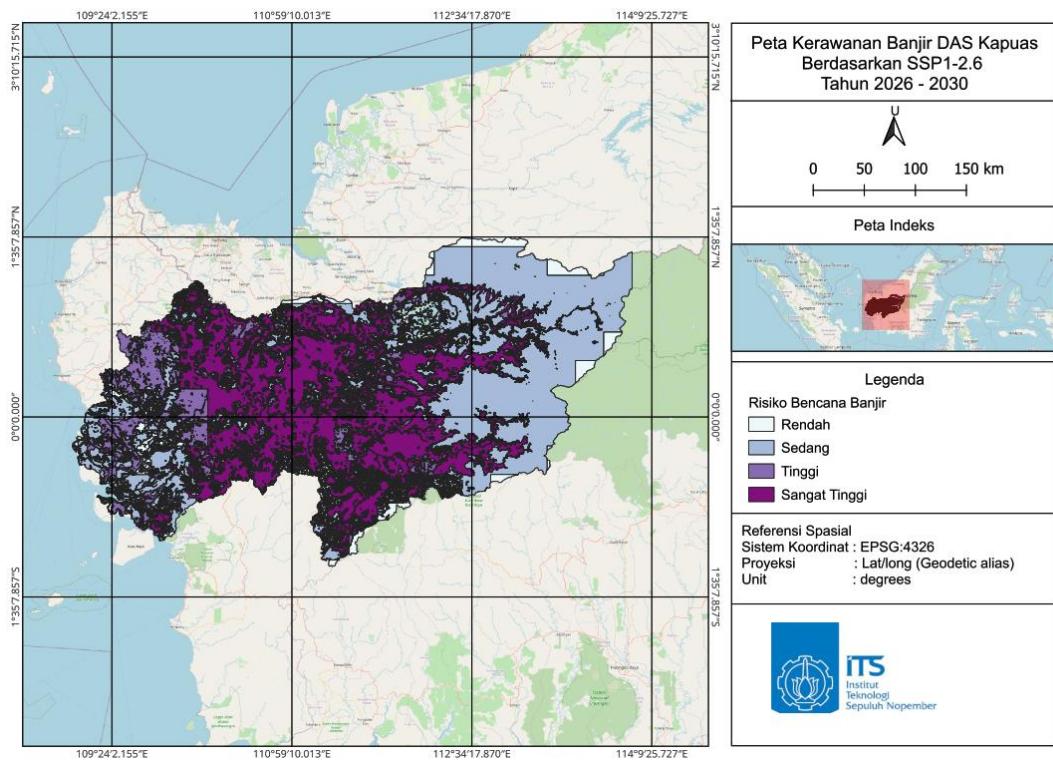
Tabel 4. 9 Kategori Indeks Kerawanan Banjir

No	Rentang IKB	Rentang IKB Normalisasi	Kategori
1	1,00 – 2,30	0 – 25	Rendah
2	>2,30 – 3,60	25 – 50	Sedang
3	>3,60 – 4,90	50 – 75	Tinggi
4	>4,90 – 6,20	75 - 100	Sangat Tinggi

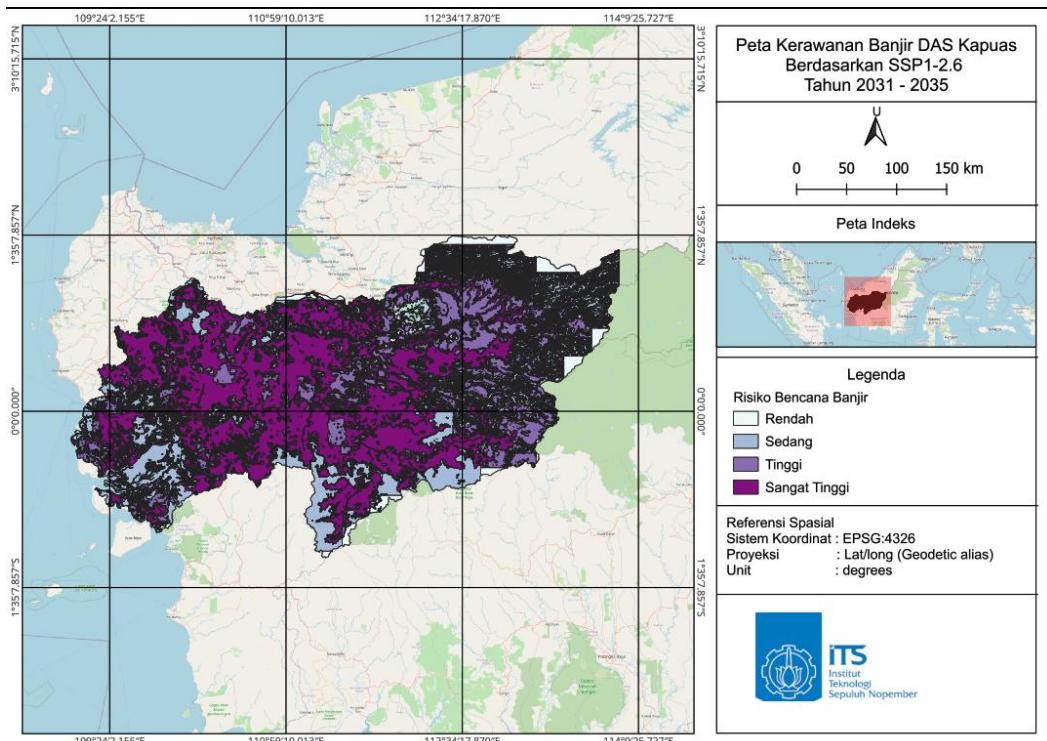
Sumber : Analisis Penulis, 2025

4.3.1 Pemetaan Risiko Banjir SSP1-2.6

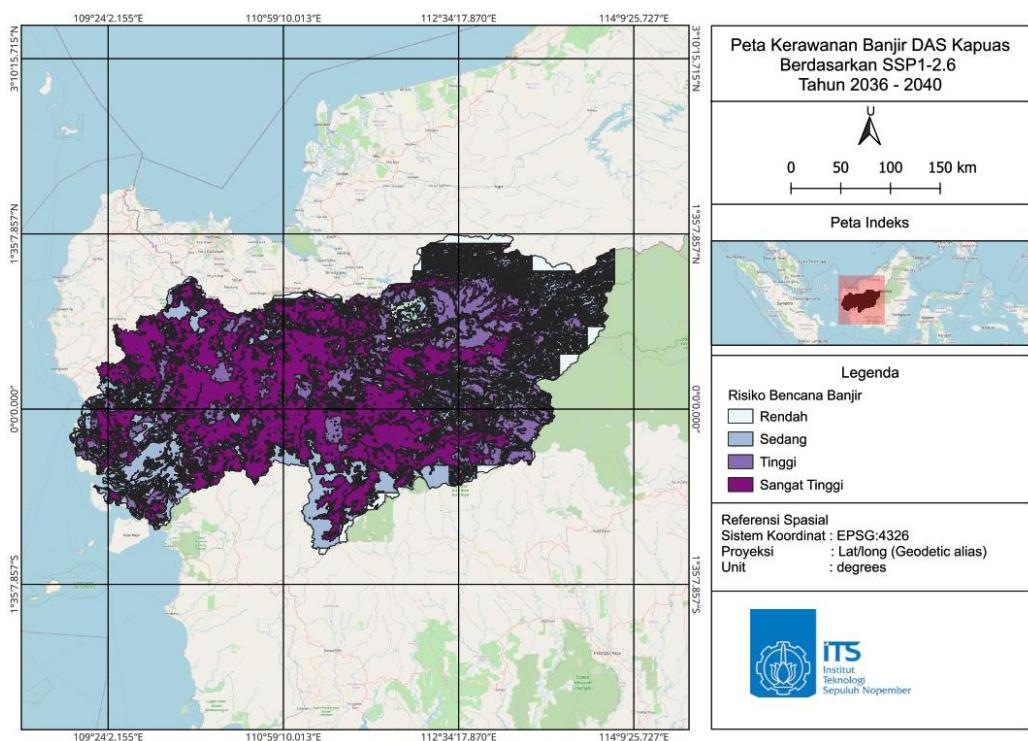
Pemetaan risiko kerawanan banjir dibagi per 5 tahunan dari tahun 2026 – 2060 dengan luasan lahan banjir (km^2) sesuai dengan kategori IKB yaitu dapat dilihat pada Gambar 4.13 hingga 4.19 dengan ringkasan luasan rawan banjir DAS Kapuas dapat dilihat pada Tabel 4.10.



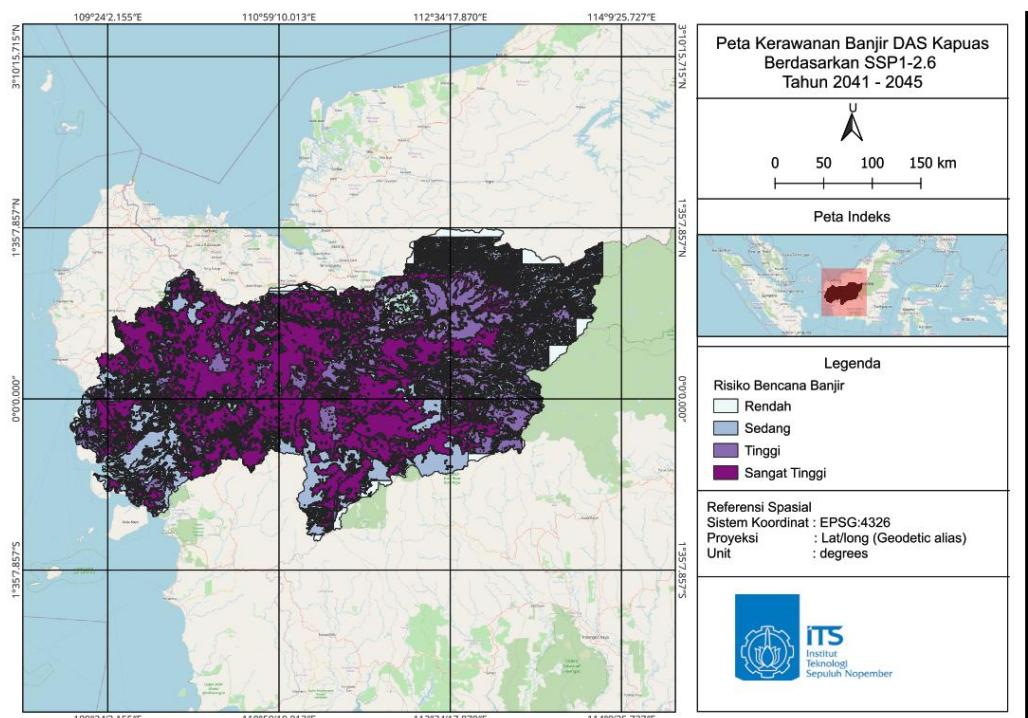
Gambar 4. 13 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP1-2.6 Tahun 2026 – 2030



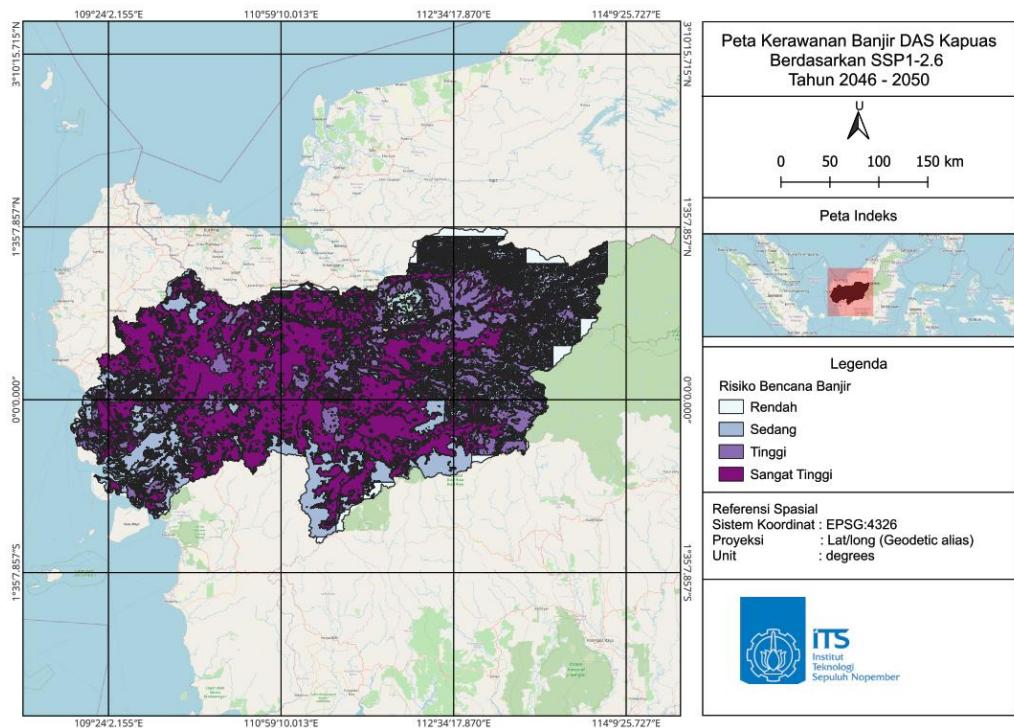
Gambar 4. 14 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP1-2.6 Tahun 2031 – 2035



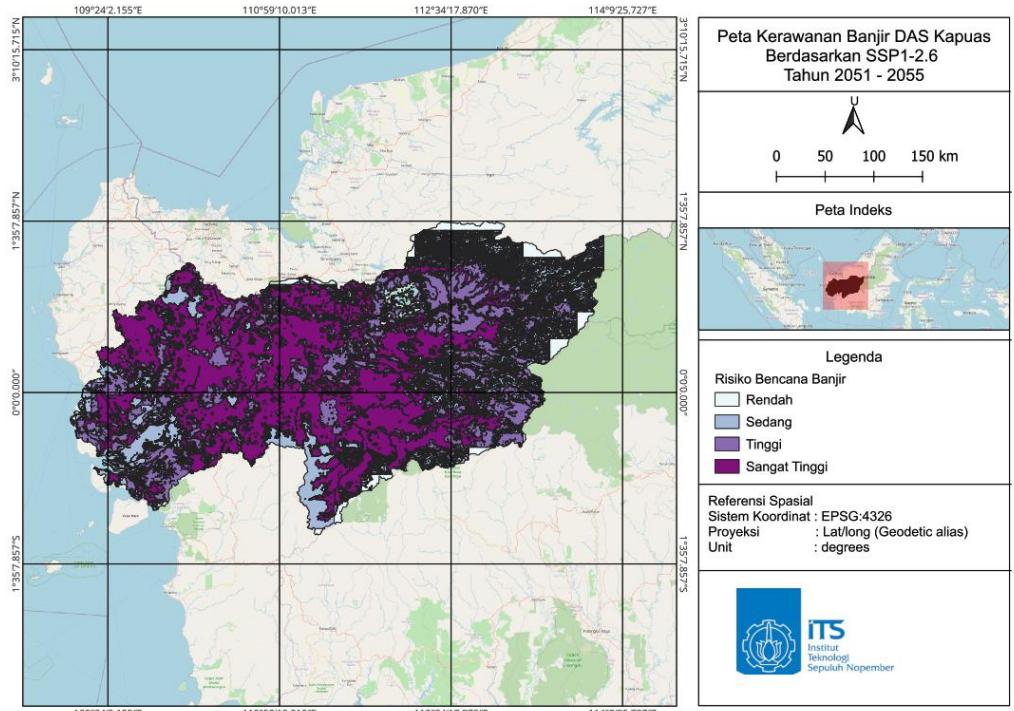
Gambar 4. 15 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP1-2.6 Tahun 2036 – 2040



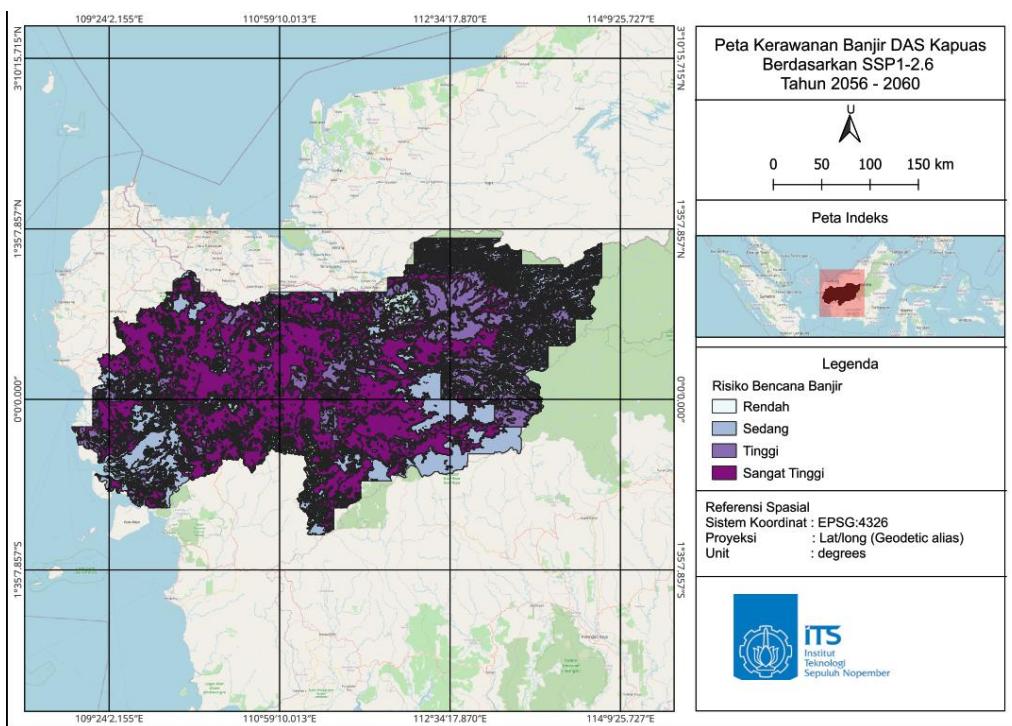
Gambar 4. 16 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP1-2.6 Tahun 2041 - 2045



Gambar 4. 17 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP1-2.6 Tahun 2045 - 2050



Gambar 4. 18 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP1-2.6 Tahun 2051 - 2055



Gambar 4. 19 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP1-2.6 Tahun 2056 - 2060

Tabel 4. 10 Luasan Kawasan Rawan Banjir DAS Kapuas SSP1-2.6

Kategori IKB SSP1-2.6	Luas (km ²)			
	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi
2026 - 2030	6.521,53	39.929,23	15.368,31	35.605,10
2031 - 2035	2.664,96	24.949,47	26.115,79	43.693,94
2036 - 2040	2.452,84	23.175,62	27.473,93	44.321,78
2041 - 2045	2.942,35	25.067,58	26.021,91	43.392,32
2046 - 2050	2.453,45	24.313,48	26.511,73	44.145,51
2051 - 2055	2.417,92	20.359,88	29.642,43	45.003,93
2056 - 2060	26.497,91	42.848,48	1.509,44	23.289,10

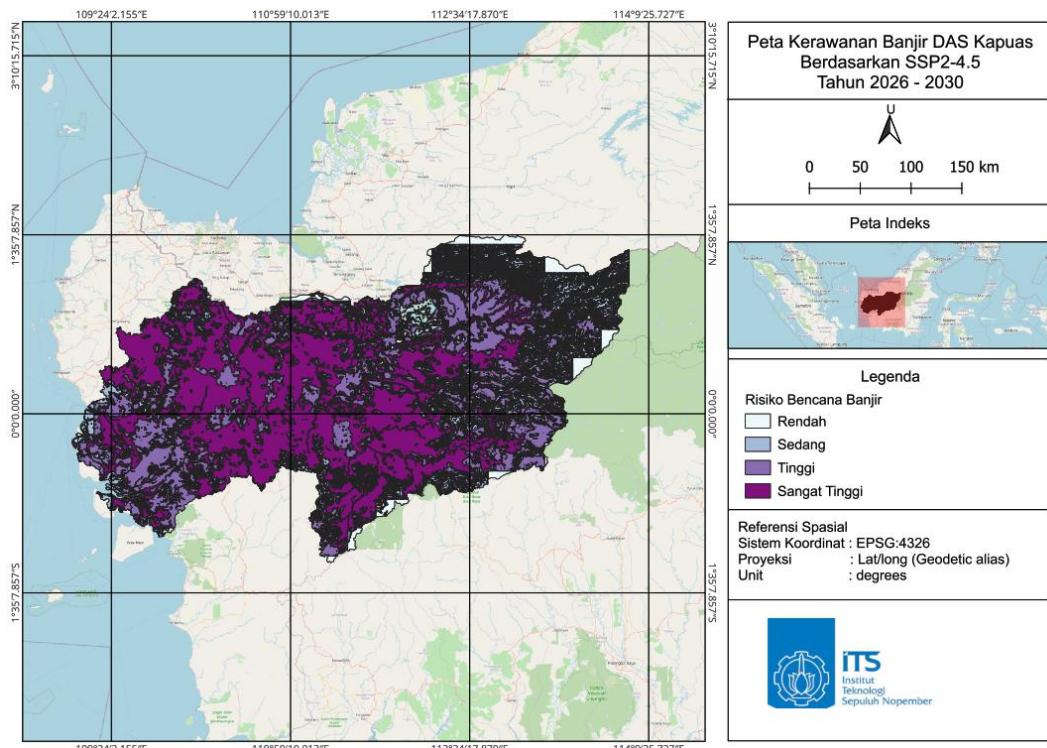
Sumber: Analisis Penulis, 2025

Berdasarkan proyeksi SSP1-2.6, luasan wilayah dengan tingkat kerawanan banjir tinggi hingga sangat tinggi mengalami fluktuasi signifikan sepanjang tahun 2026 -2060. Awal periode (2026–2030) menunjukkan luasan cukup besar pada kategori sedang (39.929 km^2) dan sangat tinggi (35.605 km^2). Namun pada periode 2031–2050, terjadi peningkatan bertahap pada kategori tinggi dan sangat tinggi, menandakan bahwa wilayah dengan potensi banjir semakin meluas meskipun

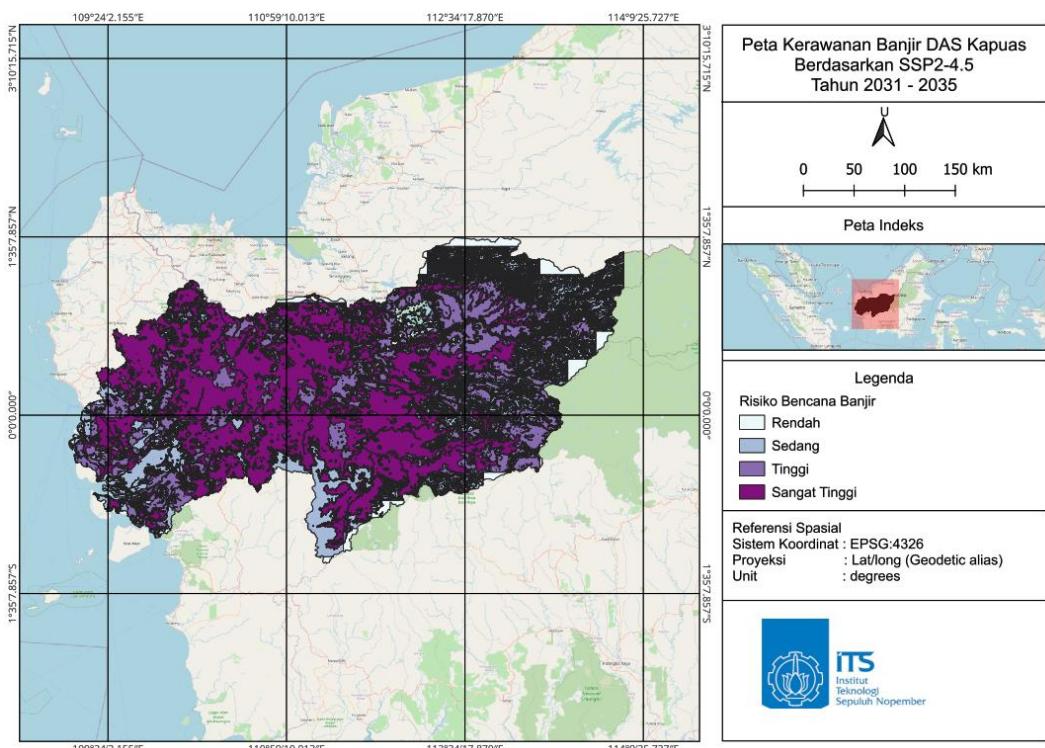
SSP1-2.6 menggambarkan skenario mitigasi iklim yang optimistis. Puncak kerawanan banjir terjadi sekitar 2050–2055, dengan total luasan tinggi dan sangat tinggi > 74.000 km². Penurunan signifikan pada 2056–2060 menandakan adanya efek mitigasi jangka panjang sesuai dengan skenario SSP1-2.6.

4.3.2 Pemetaan Risiko Banjir SSP2-4.5

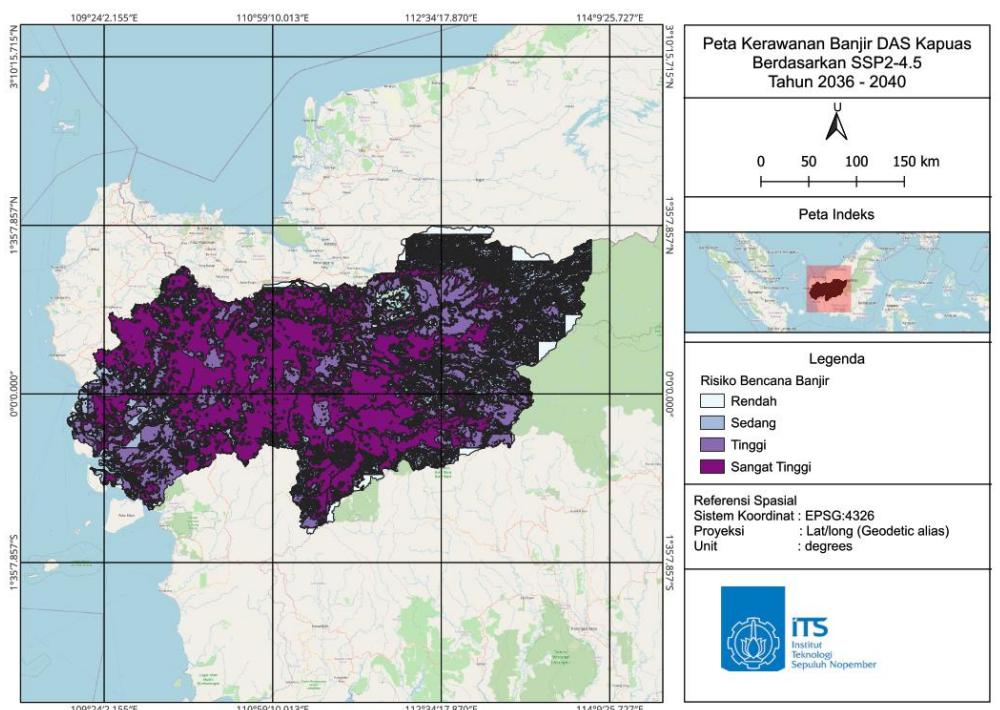
Skenario SSP2-4.5 menggambarkan kondisi “*intermediate pathway*”, yaitu jalur pembangunan moderat dengan emisi yang belum sepenuhnya terkendali. Hasilnya, fluktuasi hujan ekstrem dan potensi banjir di DAS Kapuas tetap signifikan sepanjang 2026–2060. Peta luasan wilayah kerawanan risiko banjir skenario SSP2-4.5 dapat dilihat pada Gambar 4.20 hingga 4.26 dan ringkasan luasan kawasan rawan banjir pada SSP2-4.5 dapat dilihat pada Tabel 4.11.



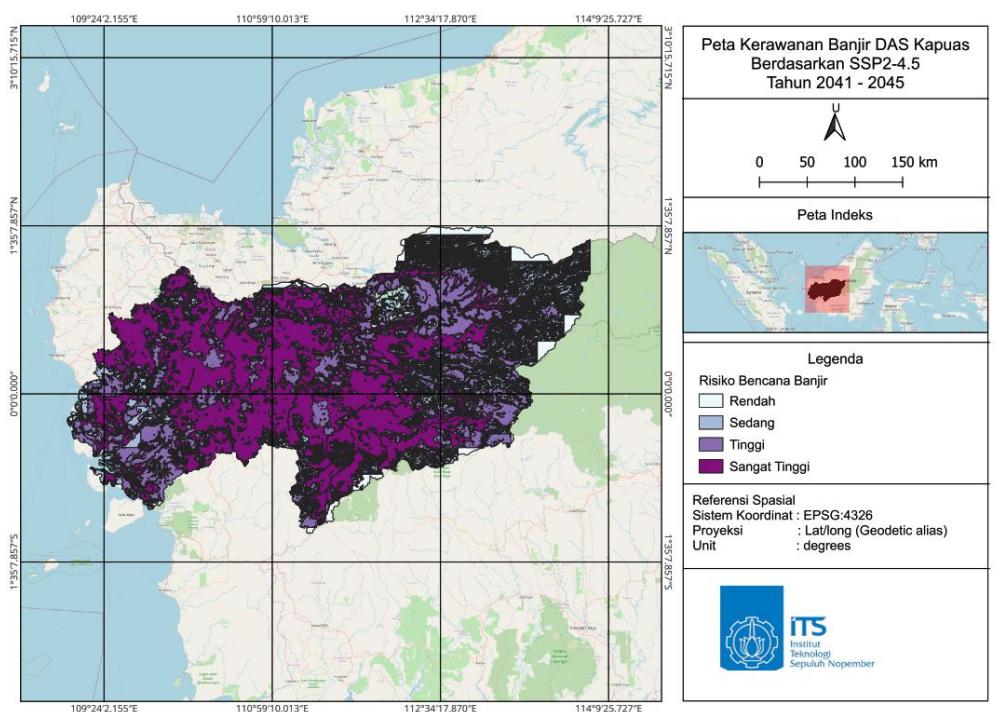
Gambar 4. 20 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP2-4.5 Tahun 2026 -2030



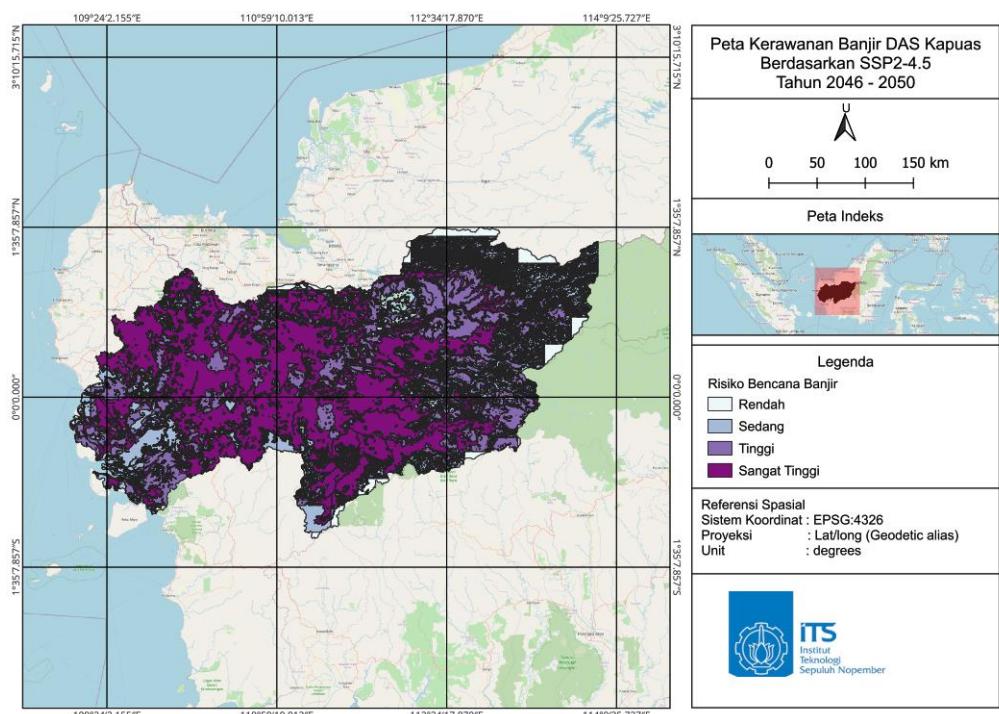
Gambar 4. 21 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP2-4.5 Tahun 2031 - 2035



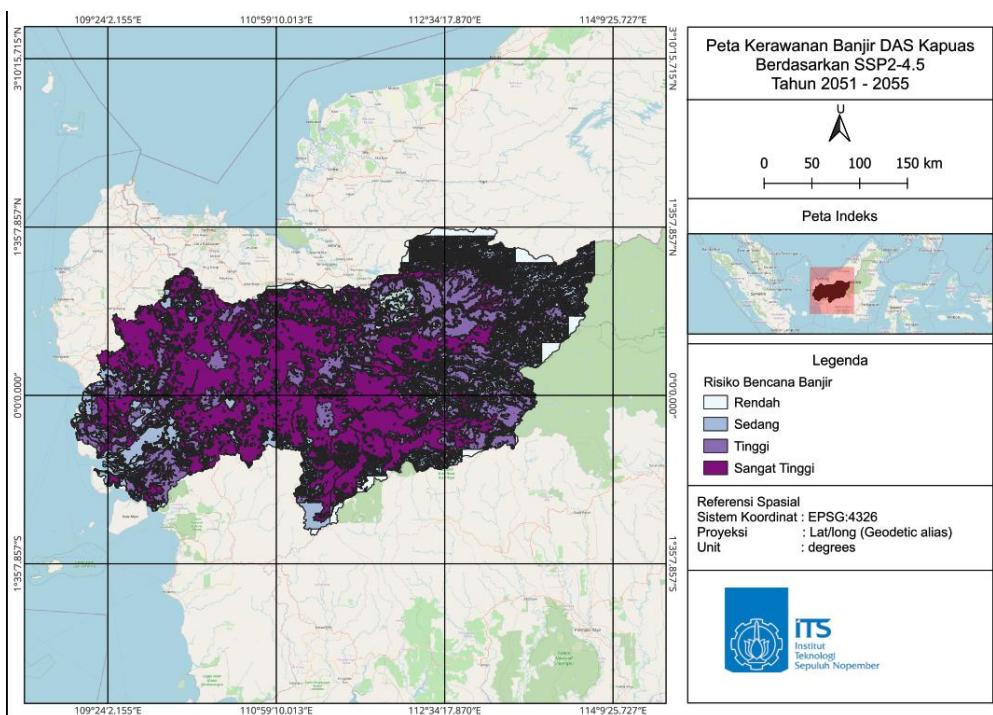
Gambar 4. 22 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP2-4.5 Tahun 2036 – 2040



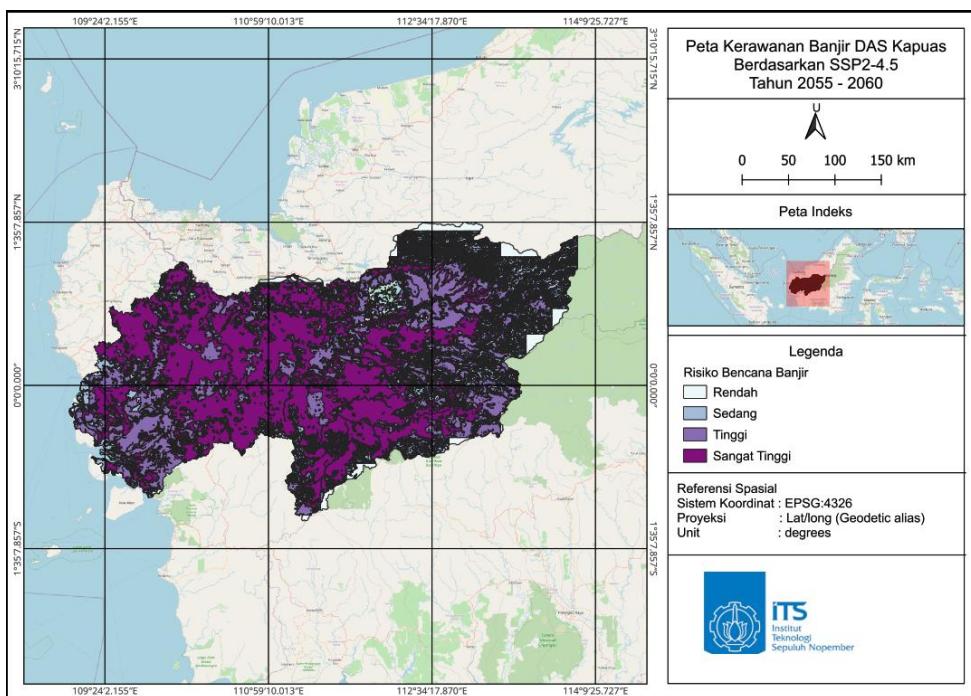
Gambar 4. 23 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP2-4.5 Tahun 2041 - 2045



Gambar 4. 24 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP2-4.5 Tahun 2046 - 2050



Gambar 4. 25 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP2-4.5 Tahun 2051 - 2055



Gambar 4. 26 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP2-4.5 Tahun 2055 - 2060

Tabel 4. 11 Luasan Kawasan Rawan Banjir DAS Kapuas SSP2-4.5

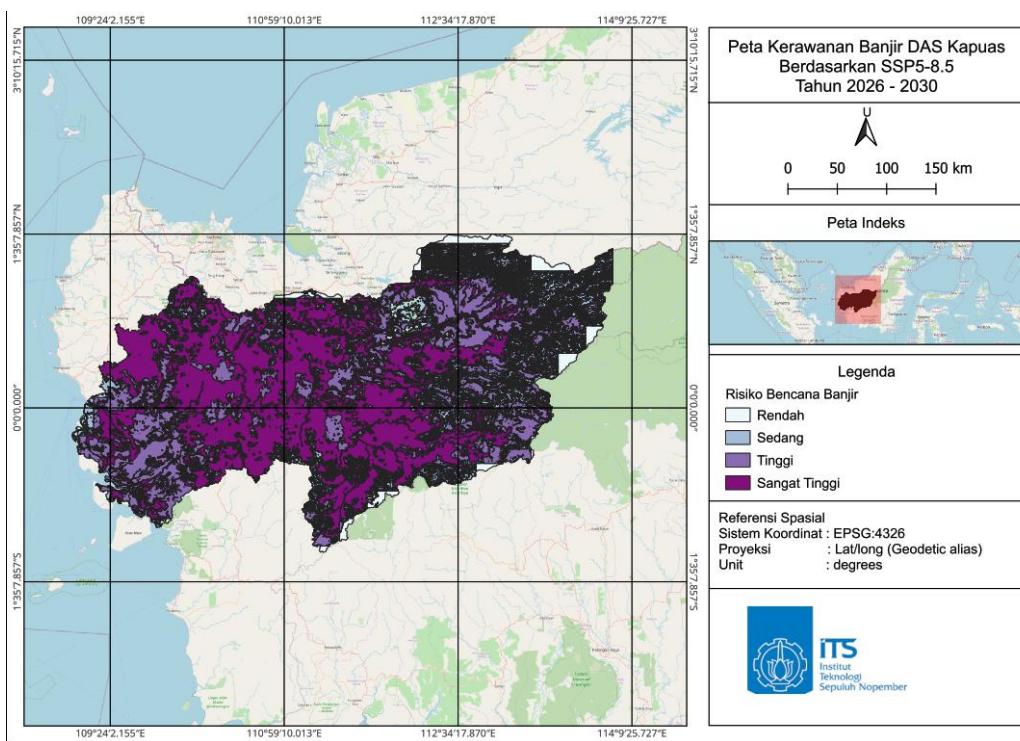
Kategori IKB SSP2-4.5	Luas (km ²)			
	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi
2026 - 2030	2.417,79	15.967,18	33.077,77	45.961,43
2031 - 2035	2.417,89	20.229,90	29.720,46	45.055,92
2036 - 2040	2.417,79	17.124,00	32.362,10	45.520,28
2041 - 2045	2.417,79	17.124,29	32.290,41	45.591,67
2046 - 2050	2.417,89	19.108,42	30.714,92	45.182,94
2051 - 2055	2.417,85	19.168,55	30.645,44	45.192,32
2056 - 2060	2.417,79	16.152,58	32.929,89	45.923,91

Sumber: Analisis Penulis, 2025

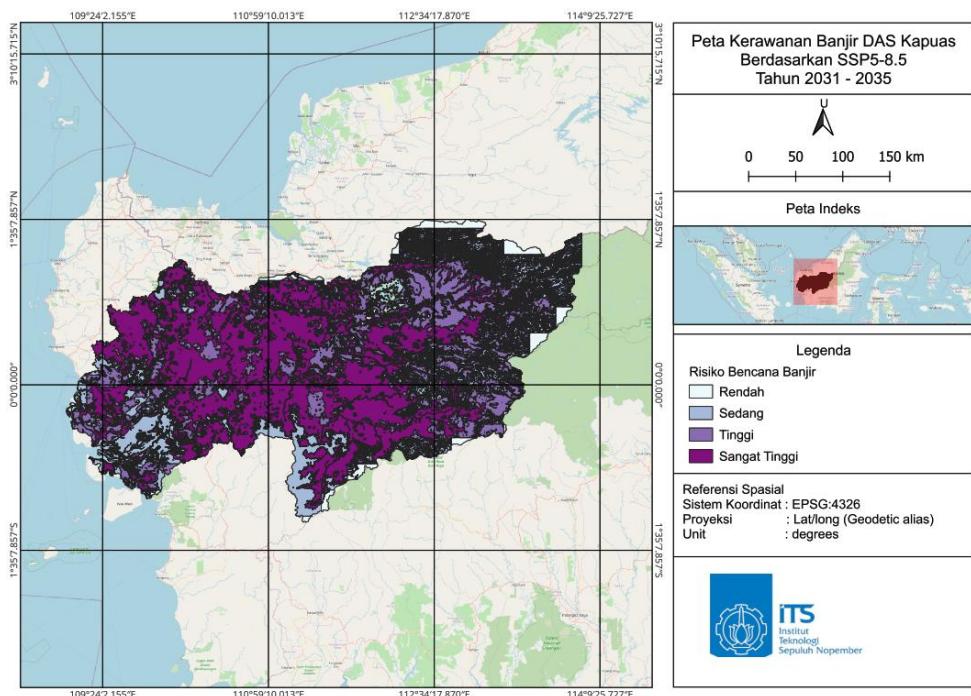
Berdasarkan analisa luasan banjir skenario SSP2-4.5 DAS Kapuas, wilayah dengan kategori rendah tetap tetap konstan di sekitar 2.417 km² menunjukkan area ini relatif stabil dan kecil. Wilayah dengan kategori banjir tinggi dan sangat tinggi mendominasi luas total banjir (>30.000 km² dan >45.000 km²). Tidak ada penurunan signifikan hingga 2060, artinya risiko banjir akan bersifat konstan di bawah skenario SSP2-4.5.

4.3.3 Pemetaan Risiko Banjir SSP5-8.5

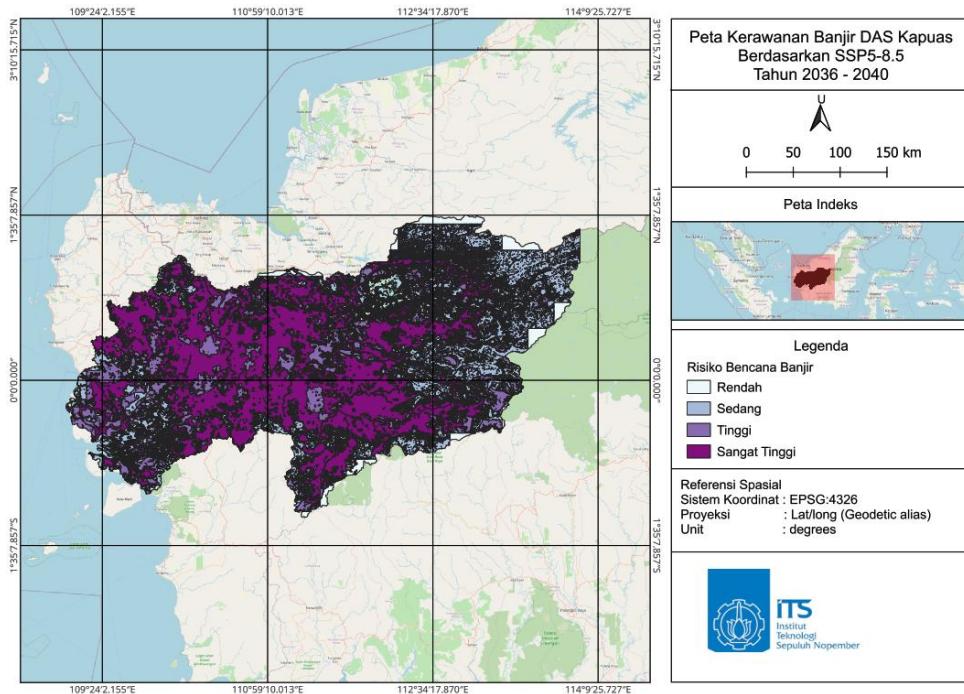
Skenario SSP5-8.5 menggambarkan kondisi dunia dengan pertumbuhan ekonomi tinggi namun ketergantungan besar terhadap bahan bakar fosil, sehingga emisi gas rumah kaca meningkat pesat. Dampaknya adalah kenaikan suhu global >4°C pada akhir abad, disertai anomali curah hujan ekstrem yang lebih sering dan intens di wilayah tropis, termasuk Kalimantan Barat. Peta luasan wilayah kerawanan risiko banjir skenario SSP5-8.5 dapat dilihat pada Gambar 4.27 hingga Gambar 4.33 dan luasan kawasan kerawanan banjir pada SSP5-8.5 dapat dilihat pada Tabel 4.12.



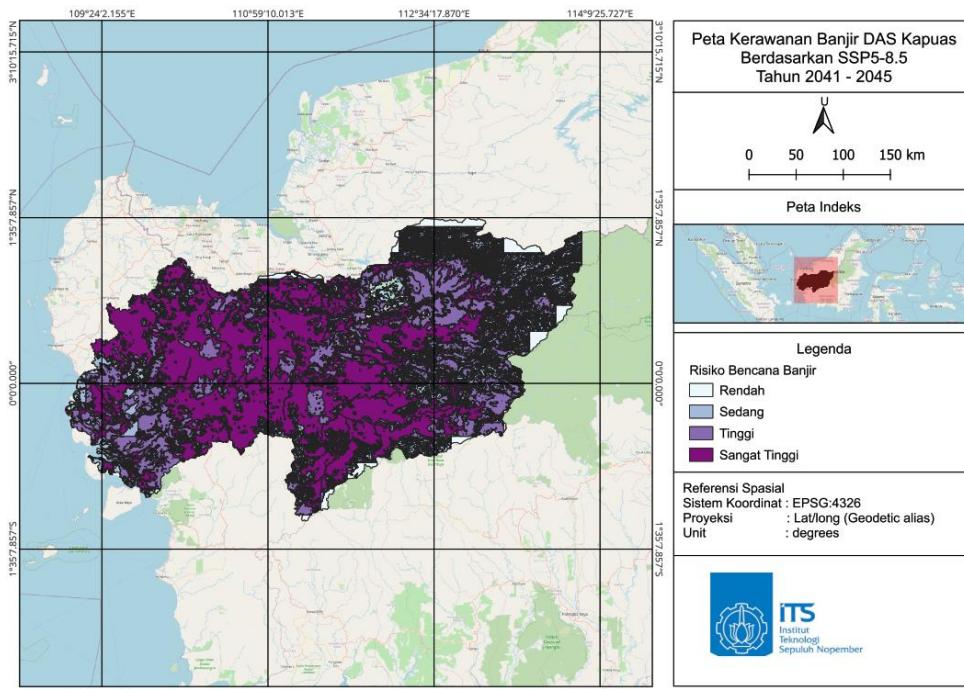
Gambar 4. 27 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP5-8.5 Tahun 2026 - 2030



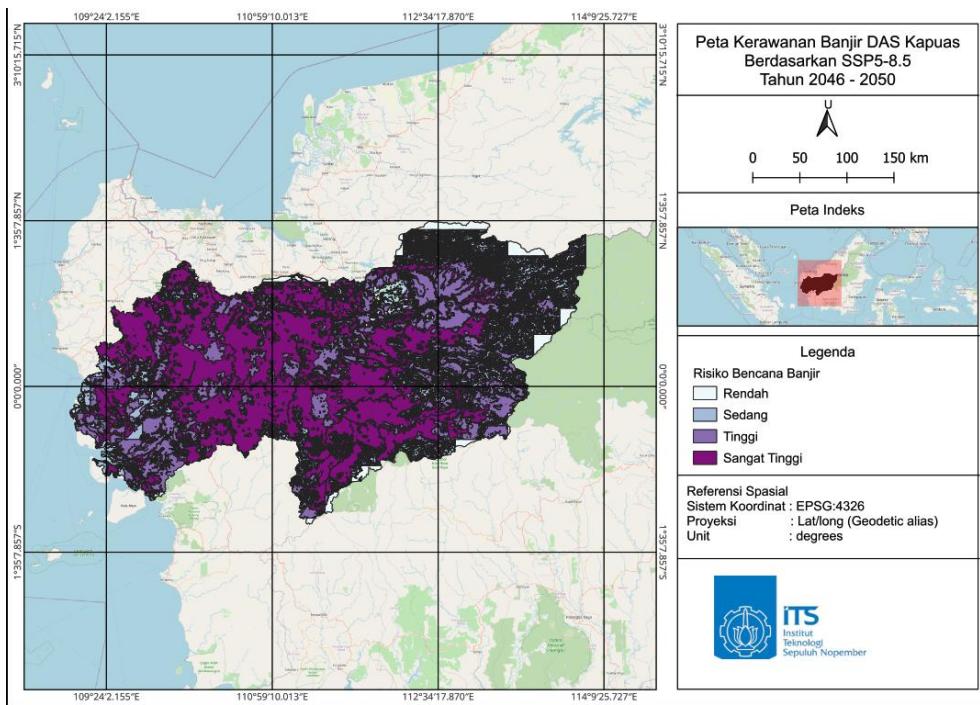
Gambar 4. 28 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP5-8.5 Tahun 2031 – 2035



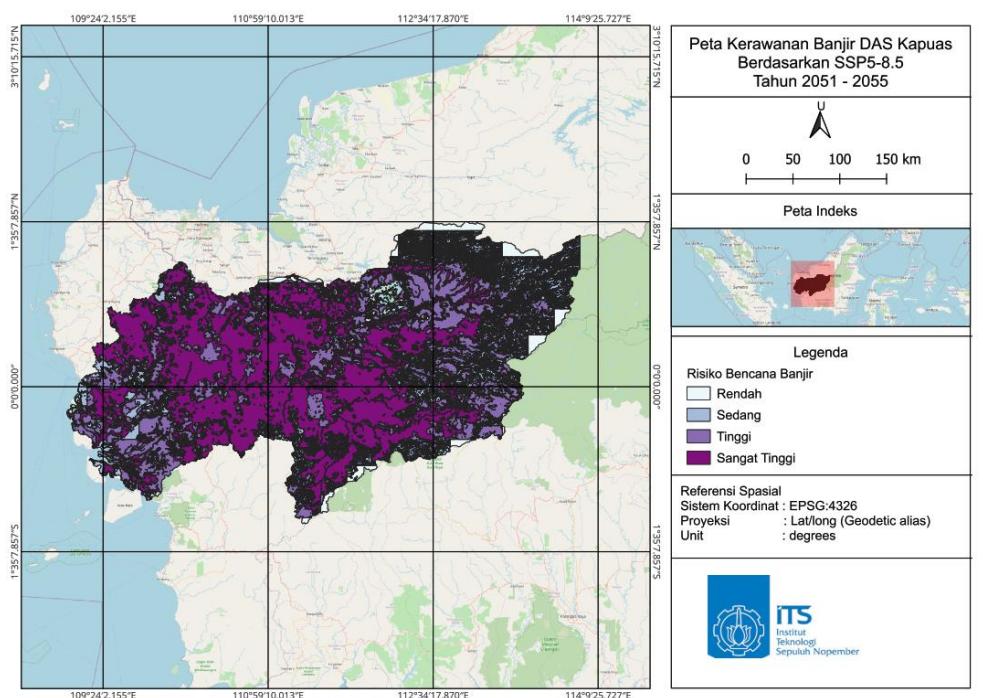
Gambar 4. 29 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP5-8.5 Tahun 2036 – 2040



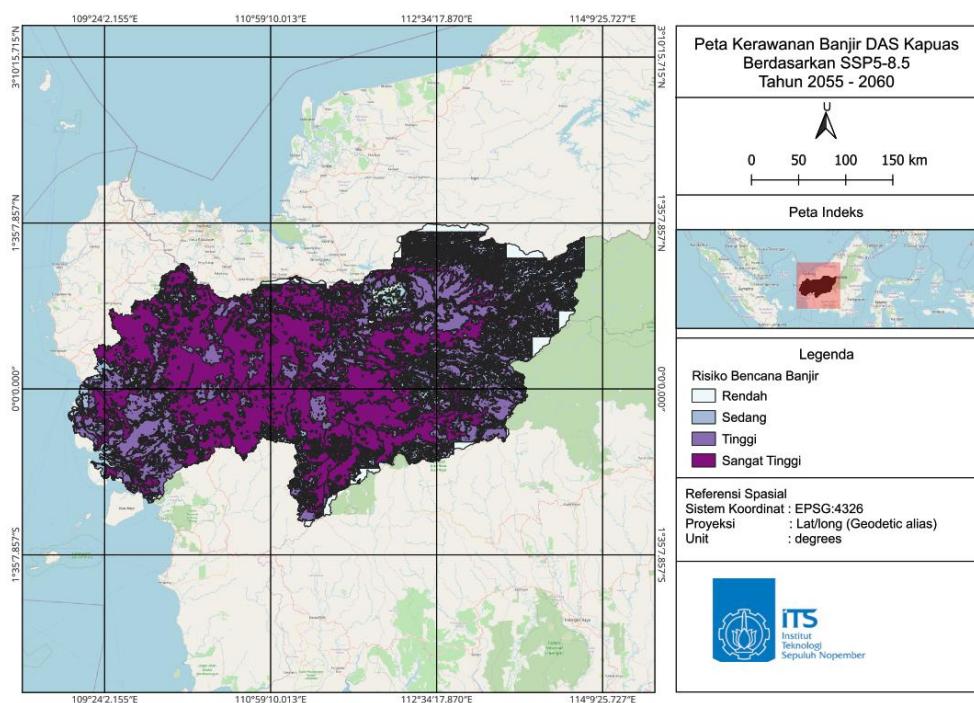
Gambar 4. 30 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP5-8.5 Tahun 2041 - 2045



Gambar 4. 31 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP5-8.5 Tahun 2046 - 2050



Gambar 4. 32 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP5-8.5 Tahun 2051 – 2055



Gambar 4. 33 Peta Kerawanan Banjir DAS Kapuas SSP5-8.5 Tahun 2056 - 2060

Pada analisa DAS Kapuas, hasil perhitungan IKB menunjukkan bahwa sepanjang periode 2026–2060, wilayah dengan kategori tinggi dan sangat tinggi mendominasi wilayah rawan banjir (>75% total area rawan). Tidak tampak tren penurunan signifikan hingga akhir periode, menunjukkan risiko banjir kronis dan berulang. Skenario SSP5-8.5 menunjukkan tingkat risiko banjir tertinggi dan paling stabil di antara semua skenario.

Tabel 4. 12 Luasan Kawasan Rawan Banjir DAS Kapuas SSP5-8.5

Kategori IKB SSP5-8.5	Luas (km ²)			
	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi
2026 - 2030	2.417,75	15.499,76	33.423,43	46.083,23
2031 - 2035	2.417,89	21.322,36	28.772,30	44.911,62
2036 - 2040	2.417,74	28.262,87	23.632,55	43.111,01
2041 - 2045	2.417,79	16.755,30	32.504,12	45.746,96
2046 - 2050	2.417,79	17.113,37	32.286,17	45.606,84
2051 - 2055	2.417,79	17.232,74	32.188,40	45.585,23
2056 - 2060	24.17,79	15.967,75	33.083,08	45.955,55

Sumber : Analisis Penulis, 2025

4.3.4 Hasil Analisis Indeks Kerawanan Banjir Skenario SSP

Secara keseluruhan, hasil analisis Indeks Kerawanan Banjir di DAS Kapuas menunjukkan bahwa kelas kerawanan banjir Tinggi dan Sangat Tinggi mendominasi luasan DAS Kapuas pada seluruh skenario SSP, dengan variasi dinamika antarperiode dan antar skenario. Luasan kategori Rendah relatif stabil dan kecil (sekitar 2.417–2.649 km²), menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah DAS Kapuas secara struktural tetap rentan terhadap banjir dalam jangka panjang. Pada skenario SSP1-2.6, kategori Sangat Tinggi mengalami penurunan signifikan pada akhir periode. Luas kawasan Sangat Tinggi menurun dari 35.605,10 km² (2026–2030) menjadi 23.289,10 km² (2056–2060), atau berkurang sekitar 12.316 km² (~34,6%). Sebaliknya, kategori Tinggi meningkat tajam, dari 15.368,31 km² menjadi 51.509,44 km² pada periode yang sama. Hal ini mengindikasikan adanya pergeseran tingkat risiko dari sangat ekstrem ke tinggi, bukan eliminasi risiko banjir. Kategori Sedang berfluktuasi dan mencapai nilai maksimum 42.848,48 km² (2056–2060), menunjukkan redistribusi spasial kerawanan akibat dinamika curah hujan dan respon hidrologi.

Pada SSP2-4.5, kategori Sangat Tinggi tetap dominan dan relatif stabil sepanjang periode, dengan luasan berkisar antara 45.055,92–45.961,43 km². Kategori Tinggi juga konsisten tinggi, meningkat dari 33.077,77 km² (2026–2030) menjadi 32.929,89 km² (2056–2060), dengan fluktuasi antarperiode namun tanpa tren penurunan yang jelas. Sementara itu, kategori Sedang cenderung menurun dari 15.967,18 km² menjadi 16.152,58 km² pada akhir periode. Pola ini menunjukkan bahwa risiko banjir tinggi–sangat tinggi bersifat persisten pada skenario emisi menengah, mencerminkan kondisi iklim yang relatif stagnan tanpa mitigasi kuat.

Sedangkan pada skenario SSP5-8.5, kategori Sangat Tinggi mencapai nilai tertinggi dibandingkan skenario lain, dengan luasan awal 46.083,23 km² (2026–2030) dan tetap tinggi hingga 45.955,55 km² (2056–2060). Kategori Tinggi juga konsisten besar, berada pada kisaran 28.772,30–33.423,43 km². Kategori Sedang berfluktuasi cukup besar, mencapai puncak 28.262,87 km² (2036–2040) sebelum menurun kembali. Pola ini menegaskan bahwa skenario emisi tinggi mempertahankan tingkat kerawanan banjir ekstrem yang luas dan stabil,

mencerminkan intensifikasi hujan ekstrem dan keterbatasan kapasitas sistem hidrologi DAS Kapuas.

Jika dibandingkan analisis lintas skenario, SSP1-2.6 menunjukkan potensi penurunan kawasan Sangat Tinggi, meskipun diimbangi peningkatan kategori Tinggi. SSP2-4.5 dan SSP5-8.5 secara konsisten mempertahankan luasan kawasan Sangat Tinggi di atas 45.000 km², menandakan risiko banjir ekstrem yang bersifat struktural dan jangka panjang. Dengan demikian, jalur mitigasi iklim berperan penting dalam menurunkan tingkat ekstremitas banjir, meskipun tidak serta-merta mengurangi total luas kawasan rawan banjir di DAS Kapuas.

luasan kawasan rawan banjir DAS Kapuas periode 2026–2060, terlihat bahwa luasan banjir lebih sensitif terhadap karakter hujan ekstrem dibandingkan hujan rata-rata atau jumlah hari hujan. Pada seluruh skenario SSP, curah hujan rata-rata relatif stabil pada kisaran 8,5–11,8 mm/hari, sementara jumlah hari hujan juga tidak menunjukkan perubahan signifikan, yaitu sekitar 277–349 hari/tahun. Namun demikian, pada skenario SSP5-8.5, peningkatan curah hujan maksimum harian hingga sekitar 60 mm/hari berasosiasi dengan persistensi luasan kawasan banjir kategori Sangat Tinggi yang tetap berada di atas ±45.000 km² hingga akhir periode proyeksi. Sebaliknya, pada skenario SSP1-2.6, meskipun total curah hujan tahunan masih dapat mencapai >3.800–4.000 mm/tahun, luasan kawasan banjir Sangat Tinggi menurun signifikan dari ±35.600 km² menjadi ±23.300 km², disertai peningkatan kategori Tinggi hingga >50.000 km², yang menunjukkan pergeseran tingkat risiko dari ekstrem ke tinggi. Pada SSP2-4.5, dengan curah hujan maksimum harian berkisar 30–49 mm/hari, luasan kawasan banjir Sangat Tinggi relatif stabil pada kisaran ±45.000–46.000 km², mencerminkan kondisi risiko banjir yang persisten. Secara kuantitatif, hasil ini menegaskan bahwa intensifikasi hujan ekstrem harian sebesar ±10–15 mm berkontribusi langsung terhadap perluasan dan keberlanjutan kawasan banjir ekstrem, sementara perubahan hujan rata-rata dan frekuensi hari hujan berperan sekunder dalam mengontrol dinamika luasan banjir DAS Kapuas.

4.4 Dampak Risiko Kerawanan Banjir Terhadap Infrastruktur Ketenagalistrikan DAS Kapuas

Peta kerawanan banjir DAS Kapuas selanjutnya ditimpa dengan peta infrastruktur transmisi ketenagalistrikan yang berada di DAS Kapuas. Beberapa jalur transmisi dan gardu induk yang berada di batas DAS Kapuas yaitu dapat dilihat pada Tabel 4.13 dan 4.14.

Tabel 4. 13 Gardu Induk dalam DAS Kapuas

No.	Nama Gardu Induk	Status
1	Gardu Induk Parit Baru	Operasi
2	Gardu Induk Kota Baru	Operasi
3	Gardu Induk Siantan	Operasi
4	Gardu Induk Sei Raya	Operasi
5	Gardu Induk Ngabang	Operasi
6	Gardu Induk Tayan	Operasi
7	Gardu Induk Sanggau	Operasi
8	Gardu Induk Sekadau	Operasi
9	Gardu Induk Sintang	Operasi
10	Gardu Induk Cendana	Operasi
11	Gardu Induk Ambawang	Konstruksi
12	Gardu Induk Putussibau	Rencana
13	Gardu Induk Badau	Rencana

Sumber : PT PLN (Persero)

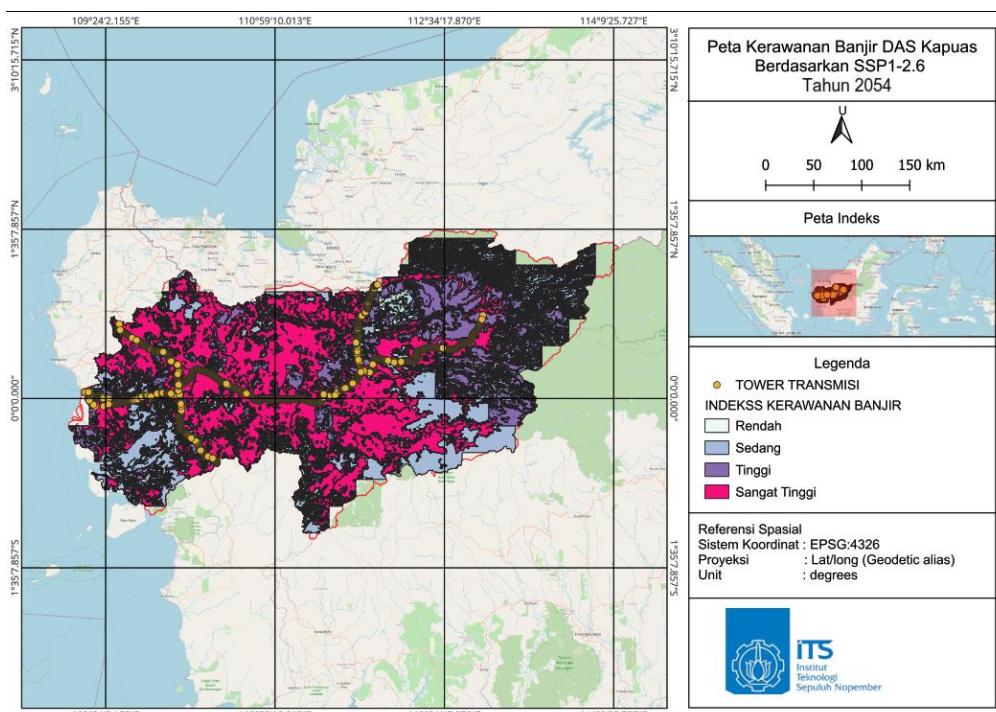
Tabel 4. 14 Jalur Transmisi Ketenagalistrikan dalam DAS Kapuas

No.	Nama Jalur Transmisi Listrik	Status
1	SUTT 150kV Silat - Badau	Rencana
2	SUTT 150kV Silat - Putussibau	Rencana
3	SUTT 150kV Sintang - Silat	Rencana
4	SUTT 150kV Tayan - Sandai	Konstruksi
5	SUTT 150kV Ambawang - Tx	Konstruksi
6	SUTT 150kV Sanggau - Sekadau	Operasi
7	SUTT 150kV Tayan - Sanggau	Operasi
8	SUTT 150kV Sekadau - Sintang	Operasi
9	SUTT 150kV Parit Baru – Kota Baru	Operasi
10	SUTT 150kV Parit Baru – Senggiring	Operasi
11	SUTT 150kV Siantan – Parit Baru	Operasi
12	SUTT 150kV Cendana - Tx	Operasi
13	SUTT 150kV Sei Raya - Siantan	Operasi
14	SUTT 150kV Siantan - Tayan	Operasi

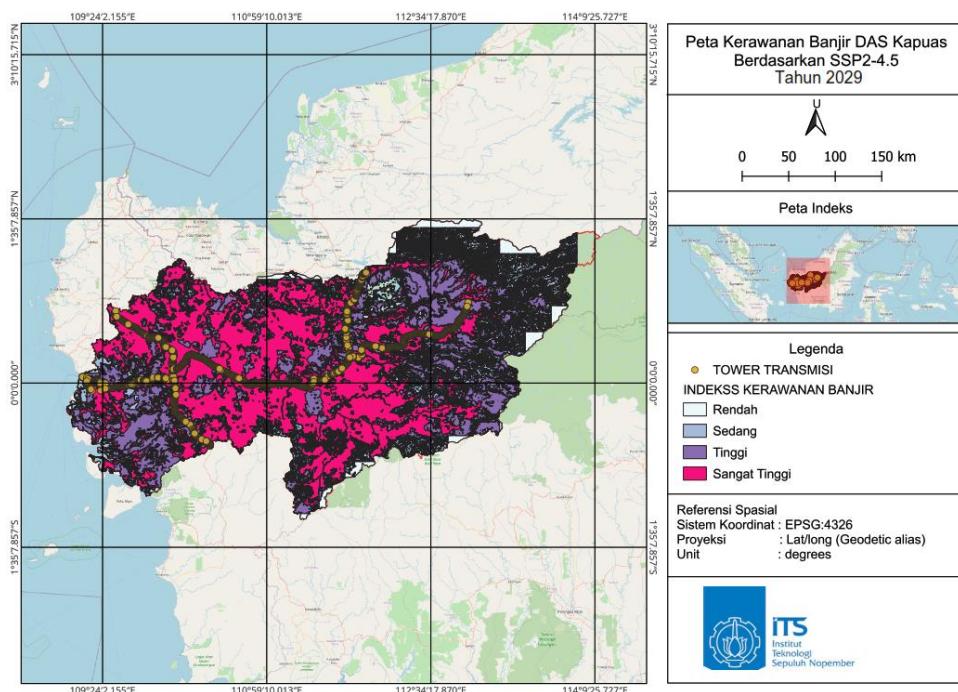
No.	Nama Jalur Transmisi Listrik	Status
15	SUTT 150kV Bengkayang - Ngabang	Operasi
16	SUTT 150kV Tayan - Ngabang	Operasi

Sumber : PT PLN (Persero)

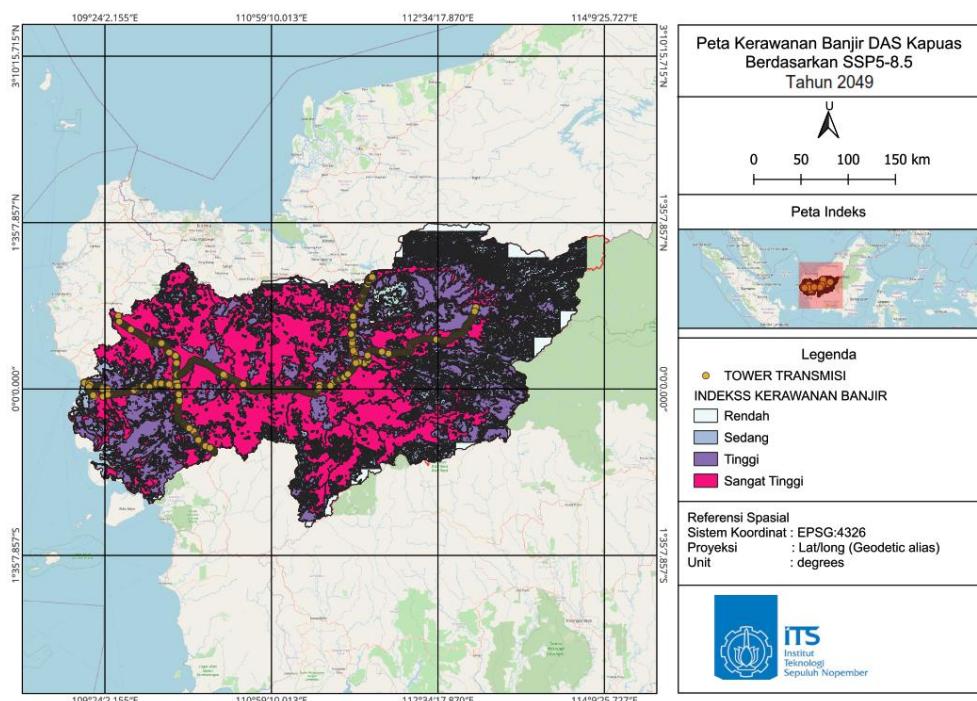
Selanjutnya, peta jalur transmisi dilakukan *overlay* dengan Peta Kerawanan Banjir berdasarkan skenario iklim SSP yang telah dilakukan sebelumnya pada periode rentang tahun dengan jumlah curah hujan tertinggi dari masing – masing skenario SSP. Pada skenario SSP1-2.6, curah hujan tertinggi diproyeksikan pada tahun 2054 dengan jumlah curah hujan mencapai 4535,35 mm/tahun. Skenario SSP2-4.5 memiliki jumlah curah hujan tertinggi pada tahun 2029 dengan jumlah curah hujan tertinggi mencapai 3836,96 mm/tahun. Pada skenario SSP5-8.5 menggunakan proyeksi curah hujan pada tahun 2049 dengan jumlah curah hujan 4174,32 mm/tahun. Berdasarkan jumlah curah hujan pada tahun tersebut, jumlah menara transmisi yang masuk dalam kawasan rawan banjir rendah hingga sangat tinggi dapat dilihat pada Gambar 4.35 hingga Gambar 4.37 dan juga Tabel 4.13.



Gambar 4. 34 Peta Kerawanan Banjir Jalur Transmisi Ketenagalistrikan di DAS Kapuas SSP1-26 Tahun 2054



Gambar 4. 35 Peta Kerawanan Banjir Jalur Transmisi Ketenagalistrikan di DAS Kapuas SSP1-26 Tahun 2054



Gambar 4. 36 Peta Kerawanan Banjir Jalur Transmisi Ketenagalistrikan di DAS Kapuas SSP5-8.5 Tahun 2049

Tabel 4. 15 Kerawanan Banjir pada Jalur Transmisi Ketenagalistrikan DAS Kapuas

Tingkat Kerawanan Banjir	SSP1-2.6 2054	SSP2-4.5 2029	SSP5-4.5 2049
Rendah	87	8	8
Sedang	83	54	54
Tinggi	428	480	475
Sangat Tinggi	1962	2018	2023
Jumlah Menara Transmisi	2560	2560	2560

Tingkat kerawanan banjir pada transmisi ketenagalistrikan berdasarkan skenario perubahan iklim SSP, yaitu:

a. Kerawanan Banjir Transmisi Ketenagalistrikan SSP1-2.6

Kerawanan banjir pada infrastruktur transmisi ketenagalistrikan di DAS Kapuas berdasarkan skenario SSP1-2.6 pada tahun 2054 dapat dilihat pada Tabel 4.16.

Tabel 4. 16 Kerawanan Banjir pada Jalur Transmisi Ketenagalistrikan DAS Kapuas berdasarkan SSP1-2.6 Tahun 2054

No	Jalur Transmisi	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi	Jumlah Menara
1	SUTT Tayan - Sandai	1	3	23	201	228
2	SUTT Ambawang - Tx	-	-	-	14	14
3	SUTT Simpang Silat - Badau	33	9	100	161	303
4	SUTT Simpang Silat - Putussibau	-	2	38	444	484
5	SUTT Sintang - Simpang Silat	1	7	44	110	162
6	SUTT Siantan - Tayan	-	44	76	182	302
7	SUTT Bengkayang - Ngabang	-	3	40	161	204
8	SUTT Cendana - Tx	-	-	2	-	2

No	Jalur Transmisi	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi	Jumlah Menara
9	SUTT Parit Baru - Kota Baru	29	6	21	7	63
10	SUTT Parit Baru - Senggiring	3	-	-	-	3
11	SUTT Sanggau - Sekadau	-	-	-	125	125
12	SUTT Sekadau - Sintang	-	4	11	173	188
13	SUTT Sungai Raya - Siantan	1	5	36	23	65
14	SUTT Siantan - Parit Baru	16	-	17	21	54
15	SUTT Tayan - Sanggau	-	-	7	228	235
16	SUTT Tayan - Ngabang	-	-	13	115	128
Jumlah		84	83	428	1965	2560

Sumber: Analisis Penulis, 2025

Berdasarkan hasil analisis kerawanan banjir pada jalur transmisi ketenagalistrikan di DAS Kapuas untuk skenario SSP1-2.6 tahun 2054, teridentifikasi total 2.560 menara transmisi yang tersebar pada berbagai tingkat kerawanan banjir. Secara kuantitatif, kelas kerawanan sangat tinggi mendominasi, dengan jumlah 1.965 menara SUTT (76,8%), diikuti oleh kerawanan tinggi sebanyak 428 menara SUTT (16,7%). Sementara itu, kelas kerawanan rendah dan sedang masing-masing hanya mencakup 84 menara SUTT (3,3%) dan 83 menara SUTT (3,2%), menunjukkan bahwa sebagian besar infrastruktur transmisi berada pada wilayah dengan potensi genangan banjir yang signifikan.

Jika ditinjau per jalur transmisi, konsentrasi kerawanan sangat tinggi paling menonjol pada jalur SUTT Simpang Silat – Putussibau dengan 444 menara SUTT pada kelas sangat tinggi dari total 484 menara SUTT, diikuti oleh jalur SUTT Tayan – Sanggau dengan 228 menara SUTT berada pada wilayah kerawanan banjir sangat tinggi, serta SUTT Simpang Silat – Badau dengan 161 menara SUTT pada wilayah kerawanan banjir sangat tinggi. Jalur SUTT Siantan – Tayan dan SUTT Bengkayang – Ngabang juga menunjukkan

kerentanan yang tinggi terhadap banjir, masing-masing memiliki 182 dan 161 menara dalam kategori sangat tinggi. Kondisi ini mengindikasikan bahwa jalur-jalur tersebut melintasi dataran banjir utama, daerah aluvial, dan wilayah dengan kapasitas drainase alami yang terbatas.

Sebaliknya, jalur transmisi dengan tingkat kerawanan relatif lebih rendah, seperti SUTT Parit Baru – Kota Baru dan SUTT Sungai Raya – Siantan, masih menunjukkan keberadaan menara SUTT pada wilayah dengan kerentanan banjir rendah dan sedang, meskipun tetap terdapat menara pada wilayah kerawanan banjir dengan kategori tinggi dan sangat tinggi. Hal ini mengindikasikan heterogenitas kondisi topografi dan hidrologi sepanjang jalur transmisi tersebut. Secara keseluruhan, meskipun skenario SSP1-2.6 merepresentasikan jalur pembangunan beremisi rendah dan mitigasi iklim yang kuat, hasil ini menegaskan bahwa kerentanan banjir di DAS Kapuas lebih dipengaruhi oleh karakteristik fisik wilayah seperti topografi dataran rendah, jaringan sungai besar, dan sifat tanah dibandingkan oleh perubahan iklim semata.

b. Kerawanan Banjir Transmisi Ketenagalistrikan SPP2-4.5

Tingkat kerawanan banjir pada infrastruktur transmisi ketenagalistrikan di DAS Kapuas berdasarkan skenario SSP2-4.5 pada tahun 2029 dapat dilihat pada Tabel 4.17.

Tabel 4. 17 Kerawanan Banjir pada Jalur Transmisi Ketenagalistrikan DAS
Kapuas berdasarkan SSP2-4.5 Tahun 2029

No	Jalur Transmisi	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi	Jumlah Menara
1	SUTT Tayan - Sandai	-	-	24	204	228
2	SUTT Ambawang - Tx	-	-	-	14	14
3	SUTT Simpang Silat - Badau	-	6	136	161	303
4	SUTT Simpang Silat - Putussibau	-	-	37	447	484

No	Jalur Transmisi	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi	Jumlah Menara
5	SUTT Sintang - Simpang Silat	-	-	39	123	162
6	SUTT Siantan - Tayan	-	10	94	198	302
7	SUTT Bengkayang - Ngabang	-	-	42	162	204
8	SUTT Cendana - Tx	-	-	2	-	2
9	SUTT Parit Baru - Kota Baru	-	25	31	7	63
10	SUTT Parit Baru - Senggiring	-	-	-	3	3
11	SUTT Sanggau - Sekadau	-	-	-	125	125
12	SUTT Sekadau - Sintang	-	-	8	180	188
13	SUTT Sungai Raya - Siantan	-	-	42	23	65
14	SUTT Siantan - Parit Baru	-	-	33	21	54
15	SUTT Tayan - Sanggau	-	-	1	234	235
16	SUTT Tayan - Ngabang	-	-	6	122	128
Jumlah		0	41	495	2024	2560

Sumber: Analisis Penulis, 2025

Pada skenario SSP2-4.5 tahun 2029 teridentifikasi total 2.560 menara transmisi di DAS Kapuas yang seluruhnya telah mengalami pergeseran distribusi kerawanan menuju kelas sedang hingga sangat tinggi. Secara kuantitatif, kelas kerawanan sangat tinggi mendominasi dengan 2.024 menara SUTT (79,1%), diikuti oleh kerawanan tinggi sebanyak 495 menara SUTT (19,3%). Sementara itu, kerawanan sedang hanya tercatat pada 41 menara SUTT (1,6%), dan tidak ditemukan menara pada kelas kerawanan rendah (0%). Pola ini menunjukkan eskalasi risiko banjir yang lebih nyata dibandingkan dengan skenario SSP1-2.6.

Jika ditinjau per jalur transmisi, konsentrasi kerawanan sangat tinggi paling menonjol pada jalur SUTT Simpang Silat – Putussibau dengan 447 menara SUTT pada tingkat kerentanan sangat tinggi dari total 484 menara SUTT, diikuti oleh jalur SUTT Tayan – Sanggau sebanyak 234 menara SUTT sangat tinggi, serta SUTT Sekadau – Sintang dengan 180 menara SUTT sangat tinggi. Jalur SUTT Siantan – Tayan, SUTT Bengkayang – Ngabang, dan SUTT Simpang Silat – Badau juga menunjukkan dominasi tingkat kerentanan terhadap banjir sangat tinggi, masing-masing mencatat 198, 162, dan 161 menara SUTT pada kategori tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar jalur transmisi melintasi wilayah dataran banjir aktif dan zona akumulasi limpasan yang semakin intensif di bawah skenario iklim menengah.

Meskipun kelas kerawanan sedang hanya pada SUTT Parit Baru – Kota Baru (25 menara SUTT dengan kerawanan banjir sedang) dan SUTT Simpang Silat – Badau (6 menara SUTT dengan tingkat kerawanan banjir sedang)—menunjukkan adanya zona transisi hidrologis, di mana karakteristik topografi dan drainase lokal masih mampu meredam sebagian dampak peningkatan curah hujan. Namun demikian, dominasi kelas kerentanan banjir tinggi dan sangat tinggi secara keseluruhan mengindikasikan bahwa peningkatan curah hujan ekstrem dan jumlah hari hujan pada skenario SSP2-4.5 telah berdampak signifikan terhadap perluasan area genangan dan banjir periodik.

c. Kerawanan Banjir Transmisi Ketenagalistrikan SPP5-8.5

Tingkat kerawanan banjir pada infrastruktur transmisi ketenagalistrikan di DAS Kapuas berdasarkan skenario SSP5-8.5 pada tahun 2049 dapat dilihat pada Tabel 4.18.

Tabel 4. 18 Kerawanan Banjir pada Jalur Transmisi Ketenagalistrikan DAS

Kapuas berdasarkan SSP5-8.5 Tahun 2049

No	Jalur Transmisi	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi	Jumlah Menara
1	SUTT Tayan - Sandai	-	-	24	204	228
2	SUTT Ambawang - Tx	-	-	-	14	14
3	SUTT Simpang Silat - Badau	-	6	136	161	303
4	SUTT Simpang Silat - Putussibau	-	-	37	447	484
5	SUTT Sintang - Simpang Silat	-	-	39	123	162
6	SUTT Siantan - Tayan	-	10	89	203	302
7	SUTT Bengkayang - Ngabang	-	-	42	162	204
8	SUTT Cendana - Tx	-	-	2	-	2
9	SUTT Parit Baru - Kota Baru	-	25	31	7	63
10	SUTT Parit Baru - Senggiring	-	-	-	3	3
11	SUTT Sanggau - Sekadau	-	-	-	125	125
12	SUTT Sekadau - Sintang	-	-	8	180	188
13	SUTT Sungai Raya - Siantan	-	-	42	23	65
14	SUTT Siantan - Parit Baru	-	13	20	21	54
15	SUTT Tayan - Sanggau	-	-	1	234	235
16	SUTT Tayan - Ngabang	-	-	6	122	128
Jumlah		0	54	480	2026	2560

Sumber: Analisis Penulis, 2025

Pada skenario SSP5-8.5 tahun 2049, tingkat kerawanan banjir pada infrastruktur transmisi di DAS Kapuas menunjukkan kondisi paling ekstrem dibandingkan skenario lainnya. Dari total 2.560 menara transmisi, 2.026 menara SUTT (79,1%) berada pada kelas kerawanan sangat tinggi, diikuti oleh 480 menara SUTT (18,8%) pada kelas kerawanan tinggi, dan hanya 54 menara SUTT (2,1%) yang berada pada kelas kerawanan sedang. Tidak terdapat menara yang tergolong dalam kelas kerawanan rendah. Distribusi ini menegaskan bahwa lebih dari 97% menara transmisi berada pada kategori tinggi hingga sangat tinggi, mencerminkan eskalasi risiko banjir yang sangat signifikan di bawah skenario emisi tinggi.

Secara spasial, jalur transmisi dengan dominasi kerawanan banjir sangat tinggi paling menonjol adalah pada jalur SUTT Simpang Silat – Putussibau, dengan 447 menara SUTT pada kelas kerawanan banjir sangat tinggi dari total 484 menara SUTT, disusul oleh jalur SUTT Tayan – Sanggau dengan 234 menara SUTT sangat tinggi, serta jalur SUTT Sekadau – Sintang dengan 180 menara SUTT pada kerentanan banjir sangat tinggi. Jalur lain seperti SUTT Siantan – Tayan, SUTT Bengkayang – Ngabang, dan SUTT Simpang Silat – Badau juga menunjukkan kerentanan terhadap banjir yang sangat tinggi, masing-masing mencatat 203, 162, dan 161 menara pada kelas sangat tinggi. Pola ini menunjukkan bahwa hampir seluruh koridor transmisi utama melintasi dataran banjir aktif dan wilayah dengan akumulasi limpasan ekstrem.

Dibandingkan skenario SSP1-2.6 dan SSP2-4.5, terjadi peningkatan jumlah menara pada kelas kerawanan sedang, dari sebelumnya 41 menara SUTT menjadi 54 menara SUTT, namun peningkatan ini tidak mencerminkan penurunan risiko, melainkan menunjukkan pelebaran zona transisi hidrologis akibat intensifikasi hujan ekstrem. Secara keseluruhan, dominasi kelas sangat tinggi tetap konsisten dan bahkan lebih menguat, mengindikasikan bahwa kenaikan intensitas curah hujan, frekuensi hujan ekstrem, serta durasi genangan pada SSP5-8.5 telah melampaui ambang adaptif alami sistem DAS Kapuas.

Hasil analisis Indeks Kerawanan Banjir pada infrastruktur transmisi SUTT di DAS Kapuas berdasarkan skenario perubahan iklim SSP1-2.6, SSP2-4.5 dan SSP5-8.5 menunjukkan tren peningkatan terhadap kerentanan banjir yang konsisten seiring peningkatan tingkat emisi dan intensitas perubahan iklim. Analisis lintas skenario menunjukkan bahwa terdapat sejumlah jalur transmisi yang secara konsisten mengalami dominasi tingkat kerawanan banjir tinggi hingga sangat tinggi pada ketiga skenario SSP, sehingga dapat dikategorikan sebagai jalur kritis banjir (*flood-critical corridors*). Jalur yang selalu menunjukkan kerawanan sangat tinggi secara dominan meliputi:

- Jalur SUTT Simpang Silat – Putussibau

Lebih dari 90% menara SUTT berada pada kelas kerawanan banjir sangat tinggi pada seluruh skenario SSP

- Jalur SUTT Tayan – Sanggau

Konsisten memiliki >200 menara SUTT pada kelas kerawanan banjir sangat tinggi pada seluruh skenario SSP.

- Jalur SUTT Sekadau – Sintang

Dominasi menaras SUTT pada kelas kerawanan banjir sangat tinggi yang stabil dari SSP1-2.6 hingga SSP5-8.5.

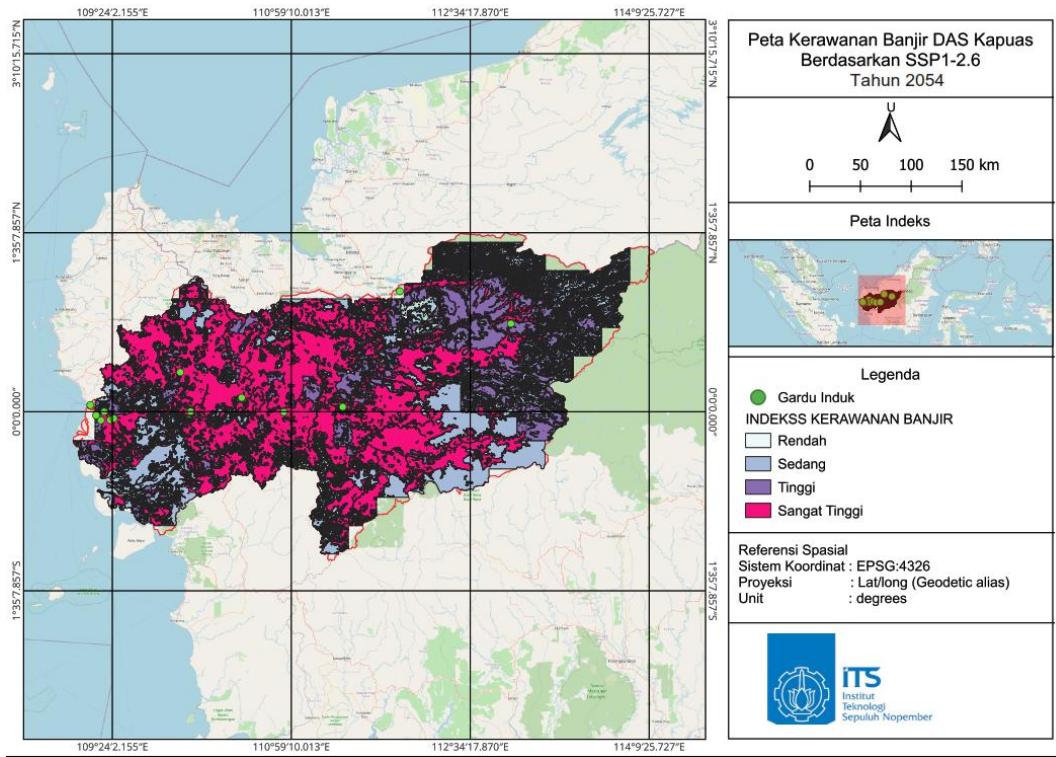
- Jalur SUTT Siantan – Tayan dan SUTT Bengkayang – Ngabang

Menunjukkan eksposur tinggi terhadap banjir pada seluruh skenario, khususnya pada kelas sangat tinggi.

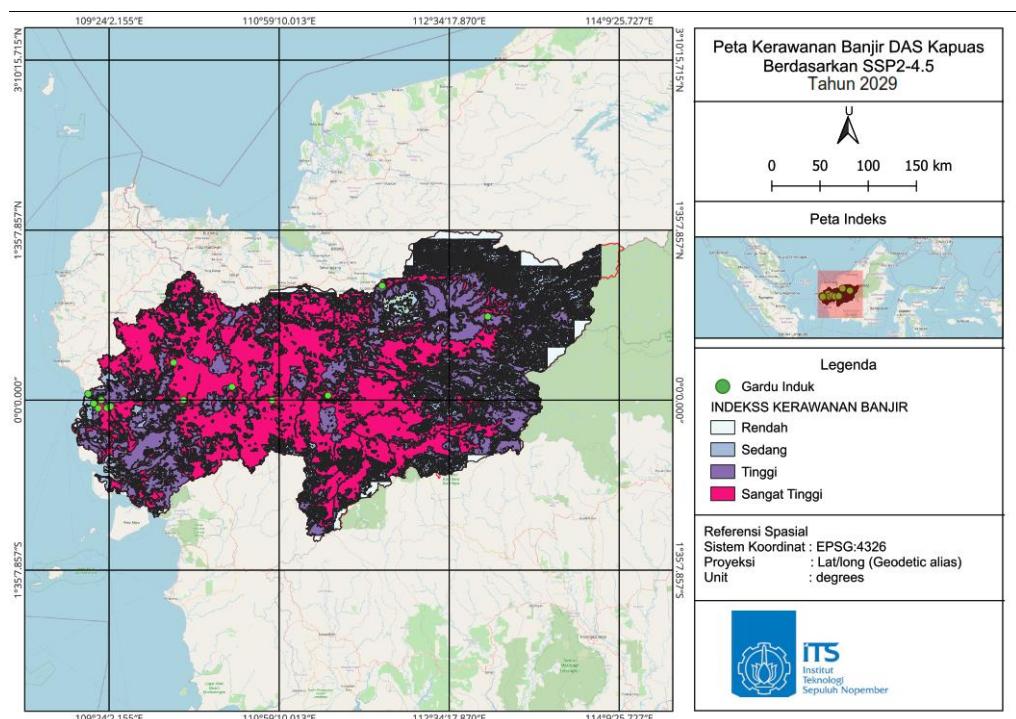
- Jalur SUTT Parit Baru – Kota Baru dan Jalur SUTT Sungai Raya – Siantan

Memiliki menara SUTT yang berada pada kelas kerawanan banjir sedang hingga sangat tinggi.

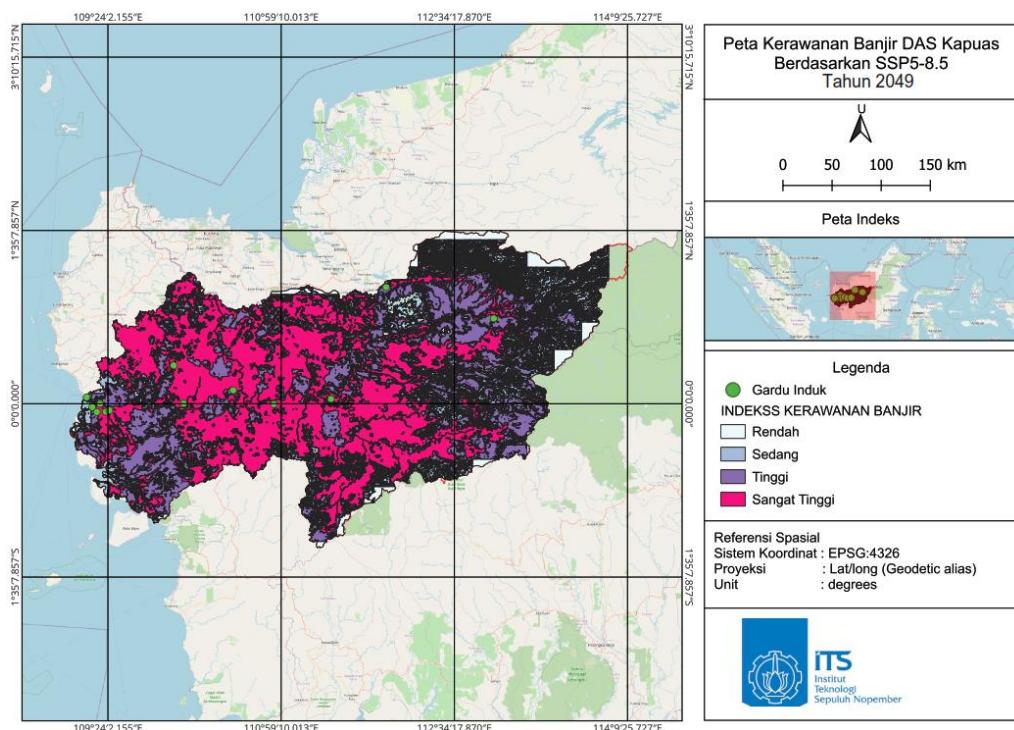
Selanjutnya dilakukan analisis Indek Kerawanan Banjir dengan infrastruktur Gardu Induk yang berada di DAS Kapuas. Berdasarkan jumlah curah hujan pada tahun dengan jumlah curah hujan tertinggi pada setiap skenario SSP, jumlah Gardu Induk yang masuk dalam kawasan rawan banjir rendah hingga sangat tinggi hingga Gambar 4.37 hingga Gambar 4.39 dan juga Tabel 4.19.



Gambar 4. 37 Peta Kerawanan Banjir Gardu Induk di DAS Kapuas SSP1-2.6 Tahun 2054



Gambar 4. 38 Peta Kerawanan Banjir Gardu Induk di DAS Kapuas SSP2-4.5 Tahun 2029



Gambar 4. 39 Peta Kerawanan Banjir Gardu Induk di DAS Kapuas SSP5-8.5
Tahun 2049

Tabel 4. 19 Kerawanan Banjir pada Gardu Induk DAS Kapuas

Tingkat Kerawanan Banjir	SSP1-2.6 2054	SSP2-4.5 2029	SSP5-4.5 2049
Gardu Induk Parit Baru	Rendah	Tinggi	Tinggi
Gardu Induk Kota Baru	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi
Gardu Induk Siantan	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi
Gardu Induk Sei Raya	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi
Gardu Induk Ngabang	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi
Gardu Induk Tayan	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi
Gardu Induk Sanggau	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi
Gardu Induk Sekadau	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi
Gardu Induk Sintang	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi
Gardu Induk Cendana	Tinggi	Tinggi	Tinggi
Gardu Induk Ambawang	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi
Gardu Induk Putussibau	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi
Gardu Induk Badau	Rendah	Tinggi	Tinggi

Sumber: Analisis Penulis, 2025

Berdasarkan hasil penilaian kerawanan banjir terhadap 13 Gardu Induk di DAS Kapuas, terlihat bahwa tingkat kerentanan banjir bersifat sangat tinggi dan konsisten pada sebagian besar GI, bahkan sejak skenario iklim paling optimistis. Pada SSP1-2.6 tahun 2054, sebanyak 10 dari 13 GI (76,9%) telah berada pada kategori sangat tinggi, sementara 1 GI (7,7%) berada pada kategori tinggi, dan 2 GI (15,4%) masih tergolong rendah. Hal ini menunjukkan bahwa, meskipun berada pada skenario mitigasi kuat, mayoritas GI telah terletak pada wilayah yang secara geomorfologis dan hidrologis sangat rentan terhadap banjir.

Pada SSP2-4.5 tahun 2029, terjadi eskalasi risiko yang signifikan, ditandai dengan hilangnya seluruh kategori rendah. Sebanyak 10 GI (76,9%) tetap berada pada kategori sangat tinggi, sementara 3 GI (23,1%) bergeser ke kategori tinggi. Pergeseran ini mengindikasikan bahwa peningkatan curah hujan ekstrem dan akumulasi limpasan pada skenario emisi menengah telah melampaui ambang adaptif alami wilayah sekitar gardu induk, khususnya pada GI yang sebelumnya masih berada pada kategori rendah.

Kondisi paling kritis tetap bertahan hingga SSP5-8.5 tahun 2049, di mana distribusi kerawanan tidak menunjukkan perbaikan, melainkan mengukuhkan pola risiko tinggi yang bersifat struktural. Pada skenario ini, 10 GI (76,9%) berada pada kategori sangat tinggi dan 3 GI (23,1%) pada kategori tinggi, tanpa satu pun GI yang tergolong rendah. Konsistensi ini menunjukkan bahwa eksposur gardu induk terhadap banjir bersifat permanen dan sistemik, terutama bagi GI yang berlokasi di dataran rendah, kawasan aluvial, dan zona dekat sungai utama DAS Kapuas.

Sebagian besar GI, seperti GI Kota Baru, Siantan, Sei Raya, Ngabang, Tayan, Sanggau, Sekadau, Sintang, Ambawang, dan Putussibau—secara konsisten berada pada kategori sangat tinggi pada ketiga skenario, menandakan lokasi-lokasi ini sebagai titik kritis banjir (*flood-critical nodes*) dalam sistem ketenagalistrikan regional. Sementara itu, GI Parit Baru dan GI Badau menunjukkan peningkatan kerawanan dari rendah menjadi tinggi, sedangkan GI Cendana secara konsisten berada pada kategori tinggi, namun tetap tidak pernah masuk kategori rendah pada seluruh horizon waktu analisis skenario perubahan iklim.

Analisis kerentanan banjir pada infratruktur gardu induk pada ketiga skenario perubahan iklim SSP1-2.6, SSP2-4.5 dan SSP5-8.5 menegaskan bahwa

lebih dari 75% gardu induk di DAS Kapuas berada pada tingkat kerawanan banjir sangat tinggi pada seluruh skenario SSP, sehingga risiko banjir terhadap sistem transmisi dan distribusi listrik bersifat kronis dan berpotensi sistemik. Temuan ini mengindikasikan bahwa strategi adaptasi untuk gardu induk tidak lagi dapat bersifat reaktif, melainkan harus diarahkan pada adaptasi struktural dan operasional jangka panjang dalam perencanaan aset dan keandalan sistem ketenagalistrikan di DAS Kapuas.

4.5 Dampak Perubahan Iklim Bencana Banjir

Perubahan iklim berdampak langsung maupun tidak langsung terhadap seluruh rantai nilai ketenagalistrikan, mulai dari sisi pasokan (pembangkit), jaringan transmisi–distribusi, hingga pola beban dan permintaan listrik. IPCC dalam Laporan Penilaian Keenam (AR6) menegaskan bahwa sektor energi termasuk ketenagalistrikan merupakan salah satu sektor yang paling rentan terhadap peningkatan frekuensi dan intensitas kejadian iklim ekstrem seperti gelombang panas, banjir, kekeringan, badi, dan kenaikan muka air laut (IPCC, 2022).

Perubahan iklim memberikan tekanan yang signifikan terhadap keandalan sistem transmisi tenaga listrik melalui peningkatan frekuensi dan intensitas kejadian iklim ekstrem, seperti banjir, angin kencang, tanah longsor, dan gelombang panas. Kondisi tersebut meningkatkan risiko kerusakan fisik pada menara transmisi, kegagalan pondasi akibat erosi dan longsor, penurunan kemampuan isolasi peralatan akibat kelembapan tinggi, serta pengurangan kapasitas hantar arus konduktor akibat suhu ekstrem. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa perubahan karakteristik iklim dapat meningkatkan probabilitas terjadinya *flashover*, kegagalan struktural, serta gangguan sistem transmisi dan distribusi listrik secara signifikan, bahkan hingga beberapa kali lipat dibandingkan kondisi iklim historis (Panteli & Mancarella, 2015; Zhang et al., 2019; Winkler et al., 2022).

4.5.1 Perhitungan Aspek Teknis Pembangunan

Kalimantan Barat mengalami kejadian bencana banjir pada tahun 2021 di Kabupaten Sintang akibat hujan deras dengan intensitas tinggi serta meluapnya debit sungai Kapuas akibat aliran sungai dari hulu. Curah hujan tinggi di DAS Kapuas juga sesuai dengan data curah hujan CHIRPS yang dijadikan acuan. Banjir yang terjadi menyebabkan terganggunya proses pekerjaan konstruksi infrastruktur ketenagalistrikan pada proyek Pembangunan Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 kV Sanggau – Sekadau yang menyebabkan keterlambatan Commercial Operation Date (COD) atau penyelesaian infrastruktur ketenagalistrikan untuk dapat disalurkan kepada pelanggan.

Proyek SUTT 150 kV Sanggau – Sekadau merupakan proyek interkoneksi sistem Khatulistiwa yang melintasi Sungai Kapuas di 3 lokasi. Sistem kelistrikan di Kabupaten Sanggau, Sekadau dan Sintang masih bersifat isolated atau belum terhubung dengan sistem kelistrikan yang ada sehingga rawan pemadaman akibat gangguan. Beroperasinya SUTT 150 kV Sanggau – Sekadau dapat meningkatkan keandalan listrik yang tersalurkan ke Kabupaten Sekadau, Sintang dan sekitarnya. Proyek ini direncanakan juga akan menghentikan penggunaan 4 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) yaitu PLTU Menyurai, PLTD Anggreko, PLTD Makro di Kabupaten Sanggau dan PLTD Suak Payung di Sekadau yang memiliki kapasitas total 18,6 megawatt (MW). Suplai listrik Sistem Khatulistiwa yang berasal dari PLTU Parit Baru Site Bengkayang dan PLTU IPP Kalbar 1 dapat tersalurkan melalui SUTT 150 kV Sanggau – Sekadau. Keberadaan jaringan kelistrikan tersebut akan meningkatkan kualitas pasokan listrik serta menekan biaya pokok penyediaan (BPP) listrik sebesar lebih dari Rp 15 Miliar per bulan.

Tanggal COD proyek SUTT 150 kV Sanggau – Sekadau yang direncanakan pada tanggal 4 November 2019, mengalami keterlambatan hingga 969 hari akibat banjir yang terjadi di sekitar lokasi proyek terutama pada ruas menara transmisi yang berada di sekitar sungai. Keterlambatan proyek SUTT 150 kV Sanggau – Sekadau menyebabkan perpanjangan waktu pengoperasian 4 PLTD di sekitar lokasi tersebut. Berbagai studi menunjukkan bahwa ketiadaan jaringan transmisi atau keterlambatan interkoneksi sistem kelistrikan menyebabkan ketergantungan tinggi pada PLTD di wilayah terpencil, yang berimplikasi langsung

terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca dan polutan lokal akibat konsumsi bahan bakar fosil yang berkelanjutan. Beberapa penelitian terdahulu yang membahas terkait emisi transmisi diantaranya dapat dilihat pada Tabel 4.20.

Tabel 4. 20 Referensi Penelitian Terdahulu

No	Penulis	Emisi PLTD Isolated
1	Distantio & Sambegoro (2025)	Ketergantungan penuh pada PLTD akibat ketiadaan interkoneksi/transmisi menyebabkan konsumsi BBM dan emisi CO ₂ tinggi; integrasi PLTS secara signifikan menurunkan jam operasi PLTD dan emisi.
2	Sihombing (2025)	Operasi PLTD sebagai satu-satunya sumber daya listrik menunjukkan intensitas emisi tinggi per kWh akibat efisiensi termal rendah dan beban parsial; kondisi ini lazim pada wilayah yang belum memiliki transmisi.
3	Yasa (2025)	PLTD mendominasi suplai energi dan menghasilkan emisi CO ₂ tinggi; kondisi ini terjadi karena sistem belum terhubung jaringan utama/transmisi regional.
4	Panteli & Mancarella (2015)	Ketergantungan terhadap Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) pada sistem kelistrikan terisolasi, yang umumnya disebabkan oleh keterbatasan jaringan dan infrastruktur transmisi, berkontribusi signifikan terhadap tingginya emisi gas rumah kaca (GRK) serta biaya operasional pembangkitan listrik. Konsumsi bahan bakar fosil yang tinggi, volatilitas harga diesel, dan efisiensi pembangkit yang relatif rendah menjadikan PLTD sebagai sumber energi yang tidak berkelanjutan dalam jangka panjang.
5	Yogasara et al. (2025)	Sistem tanpa interkoneksi transmisi mengandalkan PLTD dengan emisi tinggi;
6	Rwanita dan Husnayain (2025)	tanpa jaringan transmisi, PLTD menjadi sumber energi dominan dengan emisi tinggi; sistem hybrid mampu menurunkan emisi CO ₂ per kWh secara substansial.
7	Marhaini et al. (2022)	Studi di Nias menunjukkan PLTD memiliki konsumsi spesifik sekitar

No	Penulis	Emisi PLTD Isolated
		0,25–0,27 liter solar/kWh pada beban 50–75%. integrasi PLTS untuk menggantikan jam operasi PLTD di sistem Nias dinilai layak secara ekonomi dan menurunkan emisi karena tidak lagi membakar solar.
8	Surana & Jordaan (2019)	Mengurangi losses dan memperbanyak listrik rendah karbon yang lewat jaringan dapat memangkas ratusan MtCO ₂ e per tahun secara global

Sumber : Analisis Penulis, 2025

Berdasarkan berbagai studi di atas, dapat disimpulkan bahwa ketiadaan jaringan transmisi atau interkoneksi sistem kelistrikan menyebabkan PLTD beroperasi sebagai sumber daya utama pada sistem terisolasi. Kondisi ini berimplikasi langsung pada tingginya konsumsi bahan bakar fosil dan intensitas emisi CO₂ per kWh, yang dipengaruhi oleh efisiensi termal PLTD yang relatif rendah serta operasi pada beban parsial. Hampir seluruh publikasi menegaskan bahwa transmisi atau interkoneksi sistem berperan penting dalam menurunkan jam operasi PLTD, konsumsi BBM, dan emisi gas rumah kaca. Dengan demikian, keterlambatan pembangunan transmisi tidak hanya berdampak pada keandalan sistem, tetapi juga memperpanjang periode emisi tinggi dari PLTD.

Operasional PLTD akibat keterlambatan proyek transmisi di Kalimantan Barat menyebabkan emisi tambahan (*avoidable emission*) selama 969 hari keterlambatan yang dihitung sebagai berikut:

a. Data Teknis PLTD

$$\text{Kapasitas total PLTD} = 18,6 \text{ MW}$$

$$\text{Jumlah hari keterlambatan proyek} = 969 \text{ hari}$$

$$\begin{aligned}\text{Total jam operasional} &= 969 \text{ hari} \times 24 \text{ jam} \\ &= 23.256 \text{ jam}\end{aligned}$$

b. *Capacity Factor*

Capacity factor atau faktor sensitivitas. *Capacity factor* (CF) menggambarkan tingkat pemanfaatan aktual pembangkit listrik terhadap kapasitas terpasangnya dalam suatu periode tertentu.

Nilai CF mencerminkan peran pembangkit dalam sistem ketenagalistrikan. Ketiadaan data rinci terkait operasional PLTD sehingga digunakan analisa sensitifitas dengan skenario.

Tabel 4. 21 *Capacity Factor* Pembangkit

Skenario	<i>Capacity Factor</i>	Keterangan
Konservatif	0,50	Operasional parsial
Moderat	0,70	PLTD sebagai pembangkit utama
Tinggi	0,85	Baseload diesel dengan jam operasional tinggi

Sumber : *International Energy Agency* (IEA). (2017)

c. Faktor Emisi

Faktor emisi PLTD (diesel) berdasarkan IPCC *stationary combustion*

$$EF_{PLTD} = 0,75 \text{ ton CO}_2/\text{MWh} \quad (4.7)$$

d. Energi Listrik selama keterlambatan proyek

Perhitungan energi yang terpakai akibat keterlambatan proyek dapat dihitung dengan persamaan 4.8.

$$G_{delay} = P \times CF \times t \quad (4.8)$$

$$G = 18,6 \times CF \times 23.256$$

Keterangan:

G_{delay} : energi listrik selama keterlambatan proyek (MWh)

P : Kapasitas PLTD Terpasang (MW)

CF : *Capacity Factor*

t : waktu (jam)

Dengan perumusan tersebut didapatkan energi selama waktu keterlambatan proyek berdasarkan skenario yang dapat dilihat pada Tabel 4.20.

Tabel 4. 22 Energi yang Dihasilkan

Skenario	Capacity Factor	Energi (MWh)
Konservatif	0,50	216.281
Moderat	0,70	302.793
Tinggi	0,85	367.677

Sumber: Analisis Penulis, 2025

e. Perhitungan emisi aktual selama keterlambatan proyek

Perhitungan emisi yang dihasilkan dari peroperasian PLTD akibat keterlambatan proyek dapat dihitung menggunakan persamaan 4.9.

$$M_{PLTD} = G \times EF_{PLTD} \quad (4.9)$$

Keterangan:

M : emisi (ton CO₂)

G : Energi (MWh)

EF_{PLTD} : Faktor Emisi PLTD

Tabel 4. 23 Emisi yang Dihasilkan

Skenario	Energi (MWh)	Emisi PLTD (ton CO ₂)	Emisi PLTD (ton CO ₂ /hari)
Konservatif	216.281	162.211	167,4
Moderat	302.793	227.095	234,4
Tinggi	367.677	275.758	284,3

Sumber: Analisis Penulis, 2025

Emisi yang dihasilkan oleh pengoperasian PLTD akibat keterlambatan proyek pembangunan SUTT 150 kV Sanggau – Sekadau selama 969 hari berada pada 162,211 hingga 275,758 ton CO² tergantung tingkat pemanfaatan (CF) PLTD yang dioperasikan. Estimasi emisi CO₂ akibat pengoperasian PLTD dalam penelitian ini dapat digunakan untuk proyeksi dampak di masa yang akan datang, sepanjang dipahami sebagai estimasi berbasis skenario dengan asumsi bahwa faktor emisi, pola pemanfaatan PLTD, dan durasi keterlambatan proyek transmisi berada dalam rentang kondisi yang sebanding. Pendekatan skenario digunakan karena ketidakpastian dalam proyeksi sistem energi masa depan, sebagaimana diterapkan dalam *World*

Energy Outlook oleh IEA (2021) dan IPCC AR6 WG III (2022). Pengoperasian pembangkit cadangan seperti PLTD sebagai respons terhadap keterbatasan jaringan transmisi juga merupakan bagian dari analisis reliabilitas sistem energi (Panteli & Mancarella, 2015). Pendekatan ini tidak dimaksudkan sebagai prediksi absolut, melainkan sebagai alat analisis risiko untuk menilai potensi dampak lingkungan akibat keterlambatan pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan.

4.5.2 Perhitungan Potensi Dampak Sosial dan Ekonomi

Peristiwa banjir memberikan dampak kerugian sosial dan ekonomi pada wilayah sekitarnya. Perhitungan potensi kerugian sosial dan ekonomi dilakukan dengan menentukan jumlah orang yang terkena dampak dari ketidakandalan kelistrikan akibat banjir maupun gangguan lainnya. Kejadian banjir pada tahun 2021 yang terjadi di Kabupaten Bengkayang, Kabupaten Landak dan Kabupaten Sanggau berdampak pada 7.461 pelanggan. Jumlah pelanggan multi golongan pada UP3 Pontianak dan UP3 Sanggau pada tahun 2024 dapat dilihat pada Tabel 4.24.

Tabel 4. 24 Jumlah Pelanggan

Golongan Pelanggan	UP3 Pontianak	UP3 Sanggau
Rumah Tangga	301.758	396.557
Usaha	26.301	21.138
Industi	134	162
Umum	2.319	2.695
Sosial	4.759	10.418
Multiguna	77	108
Total	335.348	431.078

Sumber: BPS Kalimantan Barat, 2024

Pertumbuhan pelanggan diproyeksikan sesuai dengan skenario perubahan iklim yang dikaji yaitu SSP1-2.6 pada tahun 2054, SSP2-4.5 pada tahun 2029 dan SSP5-8.5 pada tahun 2049. Proyeksi jumlah pelanggan listrik pada UP3 Pontianak dan UP3 Sanggau dilakukan dengan menggunakan data pelanggan tahun 2024 sebagai tahun dasar (*baseline*) untuk menggambarkan kondisi eksisting sistem

kelistrikan sebelum periode analisis risiko iklim dan hidrometeorologi. Proyeksi pelanggan dilakukan untuk tahun 2029, 2049, dan 2054, yang masing-masing bukan dipilih sebagai tahun target kebijakan, melainkan sebagai tahun dengan curah hujan tahunan tertinggi berdasarkan hasil analisis data proyeksi iklim pada skenario SSP245, SSP585, dan SSP126. Pendekatan ini sejalan dengan praktik umum dalam kajian risiko perubahan iklim, di mana tahun-tahun dengan intensitas atau akumulasi curah hujan ekstrem dipilih untuk mengevaluasi potensi dampak terhadap sistem dan infrastruktur yang rentan. Kerangka *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) digunakan untuk mengaitkan proyeksi iklim dengan implikasi sosioekonomi, karena SSP dirancang untuk merepresentasikan lintasan pembangunan global yang berbeda, yang memengaruhi tingkat emisi gas rumah kaca, besaran perubahan iklim, serta tingkat eksposur dan kerentanan terhadap risiko fisik (Riahi et al., 2017).

Dalam konteks ini, skenario SSP tidak digunakan untuk menentukan tahun proyeksi pelanggan secara langsung, melainkan untuk menyediakan konteks sosioekonomi dari tahun-tahun ekstrem curah hujan yang dianalisis (O'Neill et al., 2017). Proyeksi jumlah pelanggan listrik pada tahun-tahun ekstrem dihitung menggunakan model pertumbuhan majemuk tahunan (*compound annual growth model*), yang lazim diterapkan dalam studi perencanaan sistem ketenagalistrikan ketika analisis difokuskan pada sensitivitas sistem terhadap kondisi masa depan tertentu. Pendekatan ini memungkinkan estimasi perkembangan permintaan dan basis pelanggan secara konsisten berdasarkan asumsi laju pertumbuhan tahunan, sehingga sesuai untuk mengevaluasi implikasi skenario jangka panjang terhadap keandalan dan kapasitas sistem kelistrikan (Ventosa et al., 2005). Model pertumbuhan ini dipilih karena jumlah pelanggan listrik secara empiris berkorelasi kuat dengan dinamika jangka panjang seperti pertumbuhan penduduk, aktivitas ekonomi, dan perluasan akses listrik, yang relatif tidak berfluktuasi secara tahunan seperti variabel iklim. Dengan demikian, jumlah pelanggan pada tahun 2029 (SSP2-4.5), 2049 (SSP5-8.5), dan 2054 (SSP1-2.6) diperlakukan sebagai eksposur sistem kelistrikan pada saat terjadinya kondisi hidrologis ekstrem, khususnya curah hujan tahunan maksimum pada masing-masing skenario iklim.

Pendekatan ini konsisten dengan kerangka *risk-based analysis*, di mana risiko dipahami sebagai fungsi dari bahaya (*hazard*), eksposur (*exposure*), dan kerentanan (*vulnerability*). Dalam konteks ini, estimasi jumlah pelanggan listrik diperlukan untuk merepresentasikan besarnya eksposur layanan ketenagalistrikan terhadap bahaya iklim ekstrem. Pemilihan tahun dengan curah hujan maksimum sebagai tahun analisis juga sejalan dengan praktik *stress testing* infrastruktur, yang bertujuan untuk mengevaluasi kinerja dan ketahanan sistem pada kondisi ekstrem, bukan pada kondisi rata-rata, sehingga potensi dampak terburuk dapat diidentifikasi secara lebih komprehensif (NGFS, 2023). Dalam konteks ketenagalistrikan, curah hujan ekstrem diketahui berpotensi meningkatkan risiko gangguan operasional pada jaringan distribusi dan transmisi, sehingga analisis yang mengombinasikan proyeksi pelanggan dan kondisi hidrometeorologi ekstrem menjadi relevan secara teknis dan kebijakan (Panteli & Mancarella, 2015).

Perhitungan proyeksi jumlah pelanggan listrik UP3 Pontianak dan UP3 Sanggau dilakukan dengan menjadikan jumlah pelanggan tahun 2024 sebagai tahun dasar (baseline). Proyeksi dihitung untuk tiga tahun yang dipilih berdasarkan hasil analisis iklim, yaitu tahun dengan curah hujan tahunan maksimum pada masing-masing skenario SSP, yaitu 2029 untuk SSP245, 2049 untuk SSP585, dan 2054 untuk SSP126. Dengan demikian, hasil proyeksi pelanggan pada tahun-tahun tersebut digunakan sebagai representasi besarnya eksposur layanan kelistrikan ketika terjadi kondisi hidrometeorologi ekstrem pada skenario iklim yang berbeda.

Metode proyeksi jumlah pelanggan menggunakan pendekatan pertumbuhan majemuk tahunan (*compound growth*) dengan rumus:

$$P_t = P_{2024} \times (1 + r)^{(t-2024)} \quad (4.10)$$

di mana P_t adalah jumlah pelanggan pada tahun proyeksi, P_{2024} adalah jumlah pelanggan pada tahun dasar 2024, r adalah laju pertumbuhan pelanggan per tahun, dan $(t-2024)$ adalah selisih tahun (jumlah tahun proyeksi). Dalam penelitian ini, laju pertumbuhan pelanggan per UP3 ditetapkan asumsi laju pertumbuhan tahunan berbasis skenario (*low–mid–high*) agar konsisten dengan pendekatan analisis skenario, yaitu: SSP1-2.6 sebagai skenario pertumbuhan

rendah sebesar 1,5% per tahun, SSP2-4.5 sebagai skenario pertumbuhan sedang sebesar 2,5% per tahun, dan SSP5-8.5 sebagai skenario pertumbuhan tinggi sebesar 3,5% per tahun.

Untuk skenario SSP1-2.6, tahun analisis adalah 2054 sehingga selisih tahun terhadap baseline 2024 adalah n=30. Faktor pengali pertumbuhan yang digunakan adalah $(1 + 0,015)^{30} = 1,563080$. Jumlah pelanggan 2054 dihitung dengan mengalikan nilai pelanggan 2024 dengan faktor 1,563080. Sebagai contoh, pelanggan rumah tangga UP3 Pontianak pada 2054 dihitung dari $301.758 \times 1,563080 = 471.672$ pelanggan, sedangkan total pelanggan UP3 Pontianak pada 2054 dihitung dari $335.348 \times 1,563080 = 524.176$ pelanggan. Perhitungan yang sama dilakukan untuk semua golongan dan UP3 Sanggau sehingga diperoleh proyeksi total 2054 sebesar 673.809 pelanggan.

Untuk skenario SSP2-4.5, tahun analisis adalah 2029 sehingga selisih tahun terhadap baseline 2024 adalah n=5. Faktor pengali pertumbuhan yang digunakan adalah $(1 + 0,025)^5 = 1,131408$. Dengan demikian, jumlah pelanggan setiap golongan pada tahun 2029 dihitung dengan mengalikan nilai pelanggan 2024 dengan 1,131408. Sebagai contoh, pelanggan rumah tangga UP3 Pontianak pada 2029 dihitung dari $301.758 \times 1,131408 = 341.411$ pelanggan, sedangkan total pelanggan UP3 Pontianak pada 2029 dihitung dari $335.348 \times 1,131408 = 379.415$ pelanggan. Prosedur yang sama diterapkan pada seluruh golongan pelanggan dan juga pada UP3 Sanggau sehingga diperoleh proyeksi total 2029 sebesar 487.725 pelanggan.

Untuk skenario SSP5-8.5, tahun analisis adalah 2049 sehingga selisih tahun terhadap baseline 2024 adalah n=25. Faktor pengali pertumbuhan yang digunakan adalah $(1 + 0,035)^{25} = 2,363245$. Nilai pelanggan tahun 2049 pada masing-masing golongan dihitung dengan mengalikan nilai tahun 2024 dengan 2,363245. Sebagai contoh, pelanggan rumah tangga UP3 Sanggau pada 2049 dihitung dari $396.557 \times 2,363245 = 937.161$ pelanggan, sedangkan total pelanggan UP3 Sanggau pada 2049 dihitung dari $431.078 \times 2,363245 = 1.018.743$ pelanggan. Langkah perhitungan ini menghasilkan peningkatan pelanggan yang lebih tinggi dibanding skenario lain karena waktu lebih panjang dan laju pertumbuhan diasumsikan lebih besar.

Perhitungan kerugian akibat gangguan kelistrikan dapat dihitung menggunakan persamaan *Business Cost* 4.11.

$$BC = \left(\frac{GDP_{pc}}{365} \right) \times N_{terdampak} \quad (4.11)$$

Keterangan:

BC	= <i>Business Cost</i>
GDP pc	= <i>Gross Domestic Product per Capita</i>
Nterdampak	= Jumlah pelanggan terdampak

GDP per Kapita untuk Provinsi Kalimantan Barat tahun 2024 berdasarkan BPS Provinsi Kalimantan Barat yaitu sekitar 52,700,000 per Kapita. GDP kemudian diproyeksikan berdasarkan skenario dan tahun proyeksi dengan perhitungan pertumbuhan majemuk:

$$GDP_{pc,t} = GDP_{pc,2024} \times (1 + g)^{(t-2024)} \quad (4.12)$$

Dimana g adalah laju pertumbuhan GDP per kapita tahunan. Proyeksi GDP per kapita digunakan dalam penelitian ini sebagai proksi nilai output ekonomi rata-rata per individu yang berpotensi terdampak oleh gangguan layanan ketenagalistrikan akibat kejadian hidrometeorologi ekstrem. Nilai GDP per kapita Provinsi Kalimantan Barat tahun 2024 sebesar Rp52.700.000 per kapita dijadikan sebagai tahun dasar (baseline) untuk menghitung proyeksi GDP per kapita pada tahun-tahun analisis selanjutnya.

Proyeksi Produk Domestik Bruto (GDP) per kapita dilakukan menggunakan pendekatan pertumbuhan majemuk (*compound growth approach*), yang secara luas digunakan dalam studi perencanaan energi dan analisis dampak ekonomi jangka panjang. Pendekatan ini memungkinkan estimasi perkembangan indikator ekonomi secara konsisten berdasarkan asumsi laju pertumbuhan tahunan, sehingga relevan untuk mengevaluasi implikasi perubahan ekonomi terhadap permintaan energi, kemampuan bayar, dan dampak ekonomi pada skenario jangka panjang (Bhattacharyya & Timilsina, 2010). Laju pertumbuhan GDP per kapita (g)

tidak ditetapkan sebagai satu nilai tunggal, melainkan dibedakan berdasarkan skenario *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) untuk merepresentasikan lintasan pembangunan sosioekonomi yang berbeda di masa depan (Riahi et al., 2017). Penggunaan kerangka SSP dalam proyeksi ekonomi didasarkan pada fakta bahwa SSP secara eksplisit mengaitkan dinamika pertumbuhan ekonomi, struktur pembangunan, dan konsumsi energi dengan implikasi perubahan iklim dan risiko fisik (O'Neill et al., 2017). Asumsi proyeksi pertumbuhan GDP sesuai skenario yang digunakan seperti tertera pada Tabel 4.25.

Pemilihan tahun analisis ekonomi dalam penelitian ini tidak didasarkan pada keseragaman, waktu antar skenario, melainkan pada hasil analisis iklim yang mengidentifikasi tahun dengan curah hujan tahunan maksimum pada masing-masing skenario SSP. Oleh karena itu, tahun 2054 (SSP1-2.6) 2029 (SSP2-4.5), dan 2049 (SSP5-8.5) diperlakukan sebagai tahun kejadian ekstrem yang berbeda secara temporal, tetapi relevan secara fungsional dalam analisis risiko perubahan iklim. Pendekatan ini sejalan dengan praktik risk-based climate impact assessment, di mana fokus analisis diarahkan pada kondisi ekstrem yang paling berpotensi menimbulkan dampak signifikan terhadap sistem dan infrastruktur, bukan pada perbandingan kondisi rata-rata antar periode waktu yang seragam.

Tabel 4. 25 Asumsi proyeksi pertumbuhan GDP

Skenario	Pertumbuhan GDP	GDP Tahun Skenario	GDP Tahun 2060	Dasar Ilmiah
SSP1-2.6 Tahun 2054	2%	Rp 95.458.755	Rp107.502.063	<i>sustainability pathway</i> dengan pertumbuhan ekonomi yang relatif moderat akibat peningkatan efisiensi energi dan dekarbonisasi, sehingga diasumsikan laju pertumbuhan GDP per kapita sebesar 2% per tahun (Riahi et al., 2017).
SSP2-4.5 Tahun 2029	3%	Rp 61.093.744	Rp152.739.268	<i>middle-of-the-road</i> , di mana pertumbuhan ekonomi berlangsung secara moderat tanpa perubahan struktural yang ekstrem, sehingga diasumsikan laju pertumbuhan GDP per kapita sebesar 3% per tahun (O'Neill et al., 2017).
SSP5-8.5 Tahun 2049	4%	Rp 140.489.575	Rp 216.277.246	Pertumbuhan ekonomi tinggi dan konsumsi energi intensif (Riahi et al., 2017). Negara berkembang di Asia berpotensi mengalami pertumbuhan GDP per kapita pada kisaran 3–5% per tahun hingga pertengahan abad, sehingga asumsi 4% (Calvin et al., 2017).

Sumber: Analisis Penulis, 2025

Jumlah pelanggan terdampak ($N_{terdampak}$) menggunakan dasar SAIDI per unit. SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) adalah indikator keandalan sistem tenaga listrik yang menyatakan rata-rata total durasi padam listrik yang dialami oleh setiap pelanggan dalam satu periode tertentu. SAIDI mengukur akumulasi waktu padam yang dialami seluruh pelanggan. Pada tahun 2024 total SAIDI pada UP3 Pontianak berjumlah 198,38 dan pada UP3 Sanggau berjumlah 505,19. Jumlah pelanggan terdampak ($N_{terdampak}$) diturunkan dari indikator keandalan sistem SAIDI tahunan dengan menggunakan konsep *customer interruption minutes*. Total durasi gangguan pelanggan dalam satu tahun dihitung sebagai hasil perkalian antara SAIDI tahunan dan jumlah pelanggan. Nilai tersebut kemudian dikonversi menjadi jumlah pelanggan terdampak ekuivalen dengan membaginya terhadap durasi satu kejadian ekstrem yang diasumsikan berlangsung selama satu hari (1.440 menit). Perhitungan pelanggan terdampak dapat dilihat pada persamaan 4.12.

$$N_{terdampak} = \frac{SAIDI_t \times N_{total}}{1440} \quad (4.12)$$

Tabel 4. 26 Pelanggan Terdampak Tahun 2024

Unit	SAIDI 2024	Jumlah Pelanggan	Pelanggan Terdampak ($N_{terdampak}$)
UP3 Pontianak	198,38	335.348	46.199
UP3 Sanggau	505,19	431.078	151.249

Sumber: PT PLN (Persero), 2024

Penentuan nilai *Business Cost* (BC) pada tahun proyeksi dilakukan dengan pendekatan berbasis risiko iklim dan keandalan sistem kelistrikan. Kenaikan curah hujan ekstrem pada masing-masing skenario SSP diasumsikan meningkatkan tingkat ketidakandalan sistem yang direpresentasikan oleh SAIDI, dengan faktor eskalasi yang berbeda sesuai tingkat keparahan skenario iklim. Nilai SAIDI tahun proyeksi kemudian digunakan untuk menurunkan jumlah pelanggan terdampak ekuivalen pada satu kejadian ekstrem berdurasi satu hari. Selanjutnya, BC dihitung

dengan mengalikan jumlah pelanggan terdampak dengan nilai output ekonomi harian per kapita yang diturunkan dari GDP per kapita pada tahun yang bersangkutan. Pendekatan ini sejalan dengan praktik *climate stress testing* infrastruktur energi, di mana kerugian ekonomi dihitung sebagai fungsi dari bahaya iklim, eksposur sistem ketenagalistrikan, dan ketidakandalan operasional, serta tidak bergantung pada asumsi ketidakandalan yang konstan sepanjang waktu.

SAIDI meningkat secara non-linier terhadap kejadian cuaca ekstrem (hujan lebat, banjir, badai), dan untuk studi skenario biasanya digunakan faktor eskalasi SAIDI (*SAIDI escalation factor*):

$$SAIDI_{future} = SAIDI_{baseline} \times \alpha_{climate} \quad (4.13)$$

Dimana $\alpha_{climate}$ ditentukan dari tingkat keparahan skenario iklim. Berdasarkan rentang *climate stress testing*, nilai $\alpha_{climate}$ untuk setiap skenario ditentukan sebagai berikut:

Tabel 4. 27 Faktor Pengali Kerentanan Iklim

Skenario	Karakter Iklim	$\alpha_{climate}$
SSP1-2.6	Mitigasi kuat	1,2
SSP2-4.5	Moderat	1,5
SSP5-8.5	Ekstrem dan sering	2,0

Sumber: IPCC AR6 (2022)

Faktor eskalasi α (alpha) didefinisikan sebagai pengali yang digunakan untuk merepresentasikan peningkatan tingkat ketidakandalan sistem kelistrikan akibat pengaruh kejadian cuaca ekstrem yang semakin intens dan sering pada masa depan, khususnya yang dipicu oleh perubahan iklim. Secara matematis, faktor ini digunakan untuk memproyeksikan nilai SAIDI pada tahun proyeksi dari kondisi baseline. Pendekatan ini umum digunakan dalam kajian keandalan jaringan dan penilaian risiko iklim ketika proyeksi langsung indikator operasional tidak tersedia (Panteli & Mancarella, 2015). Penggunaan faktor eskalasi α didasarkan pada temuan bahwa kejadian cuaca ekstrem, seperti hujan lebat dan banjir, secara signifikan meningkatkan durasi gangguan listrik yang dialami pelanggan, sehingga menyebabkan kenaikan nilai SAIDI dibandingkan kondisi iklim normal.

Pendekatan penggunaan faktor eskalasi juga sejalan dengan praktik *climate stress testing* yang direkomendasikan oleh NGFS, di mana *shock multipliers* digunakan untuk menguji ketahanan sistem dan infrastruktur terhadap kondisi iklim ekstrem yang berada di luar variabilitas historis. Pendekatan ini tidak dimaksudkan untuk menghasilkan prediksi deterministik, melainkan untuk mengevaluasi sensitivitas sistem pada kondisi tekanan tinggi (NGFS, 2023).

Perhitungan kerugian *Business Cost* di UP3 Pontianak dan UP3 Sanggau dengan jumlah pelanggan pada tahun baseline 2024 dan tahun proyeksi berdasarkan skenario iklim dapat dilihat pada Tabel 4.28 hingga Tabel 4.30.

Tabel 4. 28 Perhitungan Kerugian Business Cost Skenario SSP1-2.6

Unit	Tahun	SAIDI _{future} (menit/tahun)	N _{total} (Pelanggan)	N _{terdampak} (Pelanggan)	BC total (miliar/hari)
UP3 Pontianak	2054	238,06	524.176	86.655	22,66
	2060	238,06	573.157	94.752	27,91
UP3 Sanggau	2054	606,23	673.809	283.668	74,19
	2060	606,23	736.772	310.175	91,35

Sumber: Analisis Penulis, 2025

Tabel 4. 29 Perhitungan Kerugian Business Cost Skenario SSP2-4.5

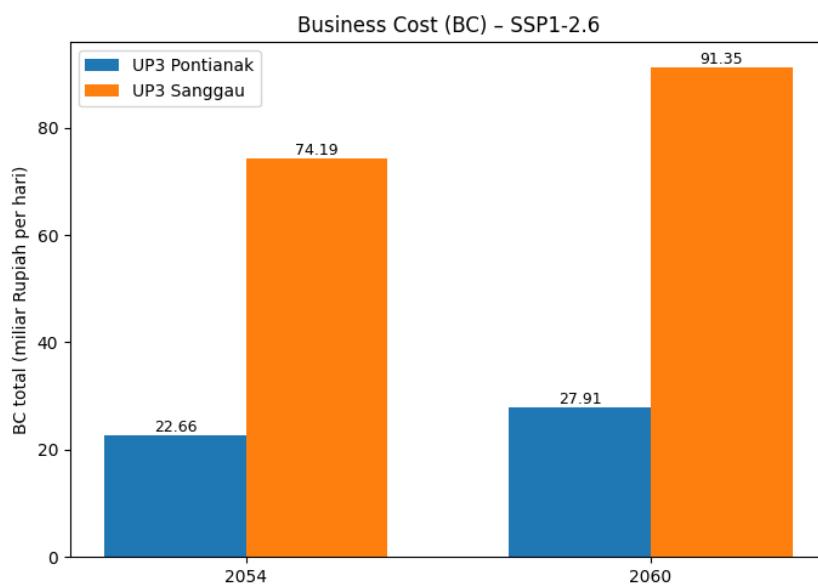
Unit	Tahun	SAIDI _{future} (menit/tahun)	N _{total} (Pelanggan)	N _{terdampak} (Pelanggan)	BC total (miliar/hari)
UP3 Pontianak	2029	297,57	379.415	78.405	13,12
	2060	297,57	815.746	168.570	70,54
UP3 Sanggau	2029	757,79	487.725	256.660	42,96
	2060	757,79	1.048.612	551.821	230.92

Sumber: Analisis Penulis, 2025

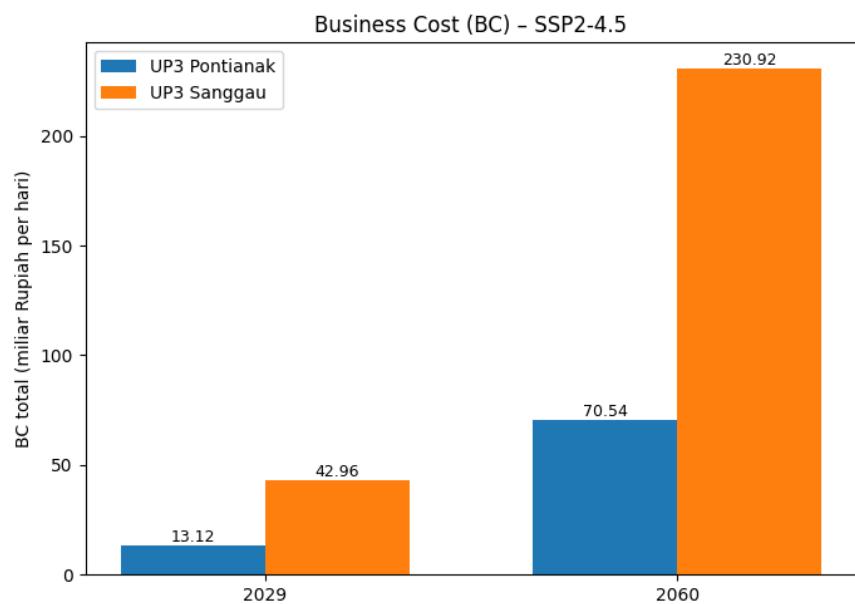
Tabel 4. 30 Perhitungan Kerugian Business Cost Skenario SSP5-8.5

Unit	Tahun	SAIDI _{future} (menit/tahun)	N _{total} (Pelanggan)	N _{terdampak} (Pelanggan)	BC total (miliar/hari)
UP3 Pontianak	2049	396,76	792.509	218.358	84,05
	2060	396,76	1.157.040	318.797	188,90
UP3 Sanggau	2049	1.010,38	1.018.743	714.804	275,13
	2060	1.010,38	1.487.334	1.043.592	618,37

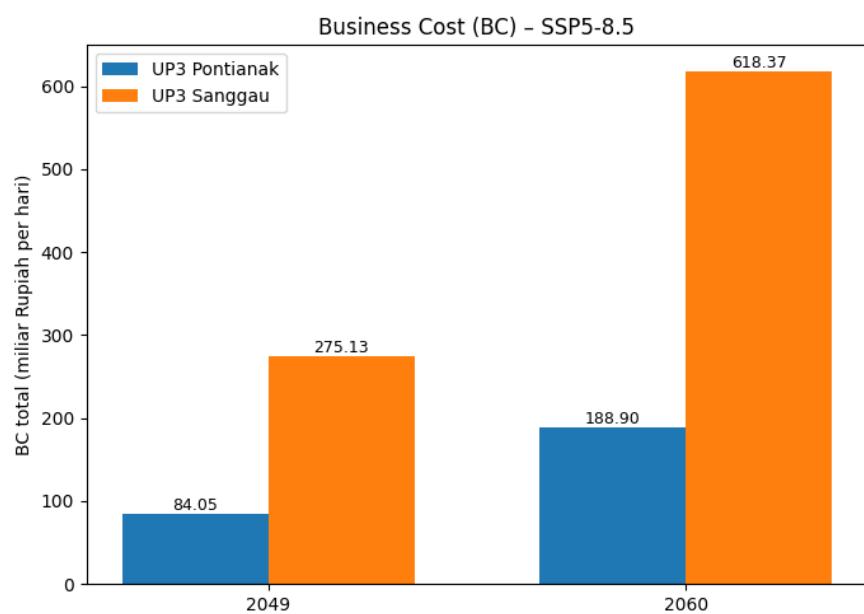
Sumber: Analisis Penulis, 2025



Gambar 4. 40 Kerugian Business Cost Skenario SSP1-2.6



Gambar 4. 41 Kerugian *Business Cost* Skenario SSP2-4.5



Gambar 4. 42 Kerugian *Business Cost* Skenario SSP5-8.5

Business Cost (BC) per skenario SSP memperlihatkan perbandingan langsung antara UP3 Pontianak dan UP3 Sanggau pada tahun skenario berbasis kejadian ekstrem dan pada horizon jangka panjang tahun 2060, yang dihitung menggunakan pendekatan risk-based assessment dengan memetakan hubungan antara bahaya iklim (*hazard*), eksposur sistem (*exposure*), dan konsekuensi

ekonomi (*impact*) sebagaimana direkomendasikan oleh IPCC (2022). Nilai BC dihitung dengan menjadikan indikator SAIDI sebagai representasi ketidakandalan sistem kelistrikan, yang secara luas digunakan dalam kajian dampak cuaca ekstrem terhadap keandalan jaringan listrik dan kerugian ekonomi akibat gangguan layanan (Panteli & Mancarella, 2015).

Pada skenario SSP1-2.6, grafik menunjukkan bahwa BC UP3 Pontianak meningkat dari 22,66 miliar Rupiah per hari pada tahun skenario 2054 menjadi 27,91 miliar Rupiah per hari pada tahun 2060, sementara BC UP3 Sanggau meningkat dari 74,19 miliar Rupiah per hari menjadi 91,35 miliar Rupiah per hari. Pola ini menunjukkan bahwa meskipun SSP1-2.6 merepresentasikan lintasan mitigasi kuat dengan peningkatan bahaya iklim yang relatif terkendali, pertumbuhan jumlah pelanggan dan peningkatan GDP per kapita tetap memperbesar eksposur ekonomi terhadap gangguan ketenagalistrikan pada jangka panjang (Riahi et al., 2017).

Pada skenario SSP2-4.5, terjadi peningkatan BC yang jauh lebih tajam dari tahun skenario menuju tahun 2060, di mana BC UP3 Pontianak meningkat dari 13,12 miliar Rupiah per hari pada tahun 2029 menjadi 70,54 miliar Rupiah per hari pada tahun 2060, sedangkan BC UP3 Sanggau meningkat dari 42,96 miliar Rupiah per hari menjadi 230,92 miliar Rupiah per hari. Lonjakan ini mencerminkan kombinasi antara peningkatan ketidakandalan sistem akibat tekanan iklim menengah dan pertumbuhan eksposur sosioekonomi, yang dalam literatur sering diidentifikasi sebagai faktor utama peningkatan risiko ekonomi infrastruktur energi pada lintasan pembangunan *middle-of-the-road* (Panteli & Mancarella, 2015; Riahi et al., 2017).

Pada skenario SSP5-8.5, grafik memperlihatkan eskalasi BC yang paling ekstrem, dengan BC UP3 Pontianak meningkat dari 84,05 miliar Rupiah per hari pada tahun 2049 menjadi 188,90 miliar Rupiah per hari pada tahun 2060, serta BC UP3 Sanggau meningkat dari 275,13 miliar Rupiah per hari menjadi 618,37 miliar Rupiah per hari. Pola ini menunjukkan bahwa pada lintasan emisi tinggi, peningkatan bahaya iklim bersifat nonlinier dan berdampak signifikan terhadap keandalan sistem, sehingga gangguan listrik berpotensi menimbulkan kerugian

ekonomi sistemik pada horison jangka panjang (Panteli & Mancarella, 2015; IPCC, 2022).

Secara konsisten pada seluruh skenario, nilai BC UP3 Sanggau lebih tinggi dibandingkan UP3 Pontianak pada tahun yang sama, yang mengindikasikan bahwa wilayah dengan tingkat ketidakandalan sistem dan jumlah pelanggan terdampak yang lebih tinggi memiliki kerentanan ekonomi yang lebih besar terhadap gangguan layanan kelistrikan, sebagaimana juga dilaporkan dalam kajian keandalan jaringan dan ketahanan infrastruktur energi (Panteli & Mancarella, 2015). Perbandingan antara tahun skenario dan tahun 2060 pada setiap SSP menunjukkan bahwa risiko ekonomi gangguan kelistrikan tidak hanya dipengaruhi oleh kejadian ekstrem tunggal, tetapi juga oleh akumulasi pertumbuhan eksposur ekonomi dalam jangka panjang, sehingga penguatan ketahanan sistem dan upaya penurunan SAIDI menjadi kunci untuk menekan *Business Cost* di masa depan.

4.5.3 Perhitungan Aspek Teknis Operasional

Dari perspektif ekonomi, gangguan pada sistem transmisi menghasilkan kerugian melalui peningkatan *Energy Not Served (ENS)*, biaya pemadaman, kerusakan aset, dan peningkatan biaya operasi serta pemeliharaan. *Energy Not Served (ENS)* adalah tenaga listrik yang tidak dapat disalurkan sepenuhnya oleh transmisi yang disebabkan oleh gangguan sehingga sistem penyaluran ketenagalistrikan tidak dapat sampai kepada konsumen.

Berbagai studi menunjukkan bahwa pemadaman listrik yang dipicu oleh kejadian hidrometeorologis ekstrem dapat menimbulkan kerugian ekonomi dalam skala besar, baik bagi perusahaan penyedia listrik maupun sektor industri dan masyarakat secara luas. Dampak ekonomi tersebut mencakup kehilangan pendapatan, gangguan aktivitas produksi, serta penurunan kesejahteraan sosial. Selain itu, meningkatnya kebutuhan rehabilitasi dan adaptasi infrastruktur ketenagalistrikan akibat perubahan iklim berpotensi mendorong kenaikan biaya investasi dan biaya pokok penyediaan listrik. Dengan demikian, perubahan iklim tidak hanya menjadi tantangan terhadap ketahanan teknis jaringan transmisi, tetapi juga merupakan isu ekonomi strategis yang berimplikasi langsung pada ketahanan energi nasional (Rose et al., 2018; Schaeffer et al., 2012).

Sistem operasional ketenagalistrikan yang berdampak apabila terjadi kejadian hidrometeorologis melingkupi beberapa Unit Pelayanan Pelanggan (UP3) dalam DAS Kapuas, yaitu UP3 Pontianak dan UP3 Sanggau. Wilayah kerja dari masing – masing UP3 tersebut melingkupi Unit Layanan Pelanggan (ULP) berikut:

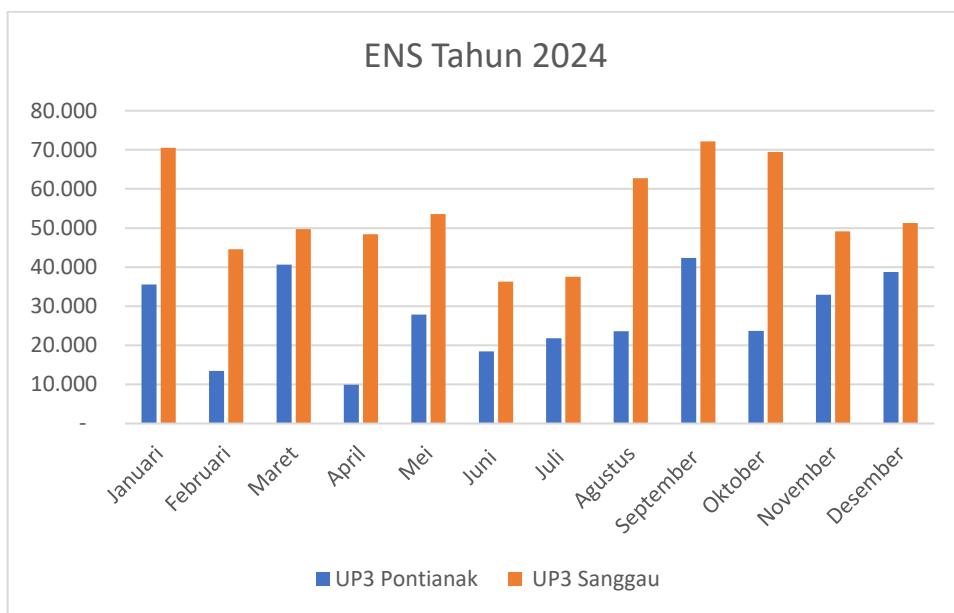
- a) UP3 Pontianak meliputi ULP Pontianak Kota, ULP Siantan, ULP Sei Jawi, ULP Ngabang, ULP Mempawah, ULP Kakap dan ULP Rasau
- b) UP3 Sanggau meliputi UP3 Sanggau Kota, UP3 Balai Karangan, UP3 Nangapinoh, UP3 Putussibau, UP3 Sintang dan UP3 Sekadau.

Data ENS UP3 Pontianak dan UP3 Sanggau sepanjang tahun 2024 dapat dilihat pada Tabel 4.31.

Tabel 4. 31 Data ENS UP3 Tahun 2024

Nilai ENS (kWh)	UP3 Pontianak	UP3 Sanggau
Januari	35.550	70.499
Februari	13.449	44.524
Maret	40.663	49.731
April	9.954	48.442
Mei	27.844	53.554
Juni	18.433	36.288
Juli	21.774	37.563
Agustus	23.640	62.699
September	42.389	72.183
Okttober	23.700	69.455
November	32.946	49.124
Desember	38.736	51.284
Total	329.078	645.346
Rata – Rata/Bulan	27.423	53.779
Rata – Rata/Jam	37,463	73,468

Sumber : PT PLN (Persero), 2024



Gambar 4. 43 ENS UP3 Pontianak dan UP3 Sanggau Tahun 2024

Rata – rata ENS perjam gangguan untuk di UP3 Pontianak yaitu 37,463 kWh dengan total ENS tahun 2024 yaitu sebanyak 329.078 kWh. Sedangkan di UP3 Sanggau rata – rata ENS perjamnya tahun 2024 yaitu sekitar 73,468 kWh dengan total ENS pada tahun 2024 yaitu sekitar 645.346 kWh. Perhitungan rata – rata kerugian akibat daya listrik yang tidak tersalurkan menggunakan persamaan 4.14.

$$\text{Rata-rata Kerugian} = \text{Rata-Rata ENS} \times \text{Rata – Rata Tarif Listrik} \quad (4.14)$$

Harga atau tarif penggunaan listrik di Kalimantan Barat, sama seperti di daerah lainnya dimana mengikuti tarif nasional yang ditetapkan oleh PT PLN (Persero). Pada periode tahun 2024, tarif dasar listrik rata – rata per-kWh berdasarkan data AP2T yaitu sekitar Rp 1.153,38/kWh. Kerugian akibat ENS perjam per UP3 yaitu:

a) UP3 Pontianak

$$\text{Rata-rata ENS} = 37,463 \text{ kWh}$$

$$\begin{aligned} \text{Rata-rata Kerugian} &= 37,463 \text{ kWh} \times \text{Rp } 1.153,38/\text{kWh} = \\ &= \text{Rp } 43.209 \end{aligned}$$

b) UP3 Sanggau

$$\begin{aligned}\text{Rata-rata ENS} &= 73,468 \text{ kWh} \\ \text{Rata-rata Kerugian} &= 73,468 \text{ kWh} \times \text{Rp } 1.153,38/\text{kWh} \\ &= \text{Rp } 84.737\end{aligned}$$

Berdasarkan data ENS tahun 2024, nilai rata-rata ENS untuk UP3 Pontianak sebesar 37,463 kWh/jam, sedangkan untuk UP3 Sanggau sebesar 73,468 kWh/jam. Tarif dasar listrik rata-rata di Kalimantan Barat untuk seluruh golongan pelanggan digunakan sebesar Rp 1.153,38 per kWh. Dengan demikian, rata-rata kerugian ENS UP3 Pontianak adalah sebesar Rp 43.209 kWh/jam, sedangkan rata-rata kerugian ENS UP3 Sanggau mencapai Rp 84.737 kWh/jam.

Selanjutnya sesuai dengan skenario yang telah diproyeksikan, beberapa sistem ketenagalistrikan yang memiliki risiko banjir sangat tinggi sesuai dengan skenario SSP1-2.6, SSP2-4.5 dan SSP5-8.5 untuk Gardu Induk dengan estimasi kerugian ENS dan tidak adanya perubahan tarif listrik dimasa yang akan datang. Wilayah layanan UP3 Pontianak yang memiliki risiko sangat tinggi terhadap kejadian banjir meliputi GI Kota Baru, GI Siantan, GI Sei Raya, GI Ngabang, GI Tayan dan GI Ambawang, sedangkan wilayah layanan UP3 Sanggau meliputi GI Sanggau, GI Sekadau, GI Sintang dan GI Putussibau.

Nilai ENS berdasarkan skenario SSP menggunakan metode scaling dari baseline ENS 2024 dengan persamaan 4.15 sehingga didapatkan nilai kerugian akibat ENS pada Tabel 4.32.

$$ENS_t = ENS_{2024} \times \alpha \times \left(\frac{N_t}{N_{2024}} \right) \quad (4.15)$$

Tabel 4. 32 Nilai Kerugian Akibat ENS

Unit	Skenario SSP	Tahun	ENS (kWh/Jam)	Kerugian (Rp/jam)
UP3 Pontianak	SSP1-2.6	2054	70,46	81.261
	SSP2-4.5	2029	63,75	73.520
	SSP5-8.5	2049	177,56	204.816
UP3 Sanggau	SSP1-2.6	2054	138,18	159.375
	SSP2-4.5	2029	125,03	144.215
	SSP5-8.5	2049	348,20	401.590

Sumber: Analisis Penulis, 2025

Hasil analisis menunjukkan bahwa pada skenario SSP1-2.6, kerugian akibat ENS meningkat secara relatif moderat dibandingkan kondisi *baseline*, yang mencerminkan bahwa lintasan mitigasi kuat mampu menekan eskalasi baha iklim, meskipun pertumbuhan jumlah pelanggan tetap meningkatkan eksposur ekonomi sistem. Pada skenario SSP2-4.5, kerugian akibat ENS meningkat lebih signifikan, yang mengindikasikan bahwa kombinasi tekanan iklim menengah dan pertumbuhan eksposur pelanggan dapat menghasilkan dampak finansial yang lebih besar terhadap sistem ketenagalistrikan. Sementara itu, pada skenario SSP5-8.5, kerugian akibat ENS mencapai nilai tertinggi yang mencerminkan kondisi *severe stress* di mana kejadian iklim ekstrem berpotensi menimbulkan kerugian finansial yang substansial dan berulang.

Perbedaan nilai kerugian akibat ENS antara UP3 Pontianak dan UP3 Sanggau pada seluruh skenario menunjukkan bahwa ketidakandalan sistem eksisting dan besarnya eksposur pelanggan berperan penting dalam memperbesar dampak ekonomi pemadaman, yang konsisten dengan temuan literatur mutakhir mengenai kerentanan infrastruktur energi terhadap cuaca ekstrem dan perubahan iklim (Panteli et al., 2021). Hal ini mengindikasikan bahwa wilayah dengan nilai

SAIDI dan ENS baseline yang lebih tinggi memiliki risiko kerugian ekonomi yang lebih besar pada masa depan apabila tidak diimbangi dengan peningkatan ketahanan sistem. Kerugian akibat ENS cenderung meningkat pada seluruh skenario SSP, dengan eskalasi tertinggi pada skenario emisi tinggi, atau SSP5-8.5 sehingga ENS dapat digunakan sebagai indikator kuantitatif yang relevan untuk menilai kerugian finansial akibat gangguan kelistrikan di bawah tekanan perubahan iklim.

4.6 Strategi Adaptasi

Penetapan strategi adaptasi terhadap perubahan iklim dilakukan dengan mengombinasikan analisis *Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats* (SWOT) dan *Analytical Hierarchy Process* (AHP). Analisis SWOT digunakan sebagai alat untuk mengidentifikasi dan merumuskan alternatif strategi adaptasi berdasarkan faktor internal dan eksternal yang mempengaruhi sistem. Selanjutnya, metode AHP diterapkan untuk melakukan pembobotan dan penentuan prioritas strategi adaptasi yang paling efektif dan layak untuk diimplementasikan dalam menghadapi dampak perubahan iklim. Pendekatan integratif SWOT–AHP memungkinkan proses pengambilan keputusan yang lebih sistematis dan objektif, karena SWOT berperan dalam menghasilkan alternatif strategi, sedangkan AHP digunakan untuk mengevaluasi dan menentukan prioritas strategi berdasarkan tingkat kepentingan relatif antar kriteria. Kombinasi kedua metode ini banyak digunakan dalam studi adaptasi perubahan iklim dan pengelolaan risiko karena mampu mengakomodasi pertimbangan kualitatif dan kuantitatif secara simultan.

4.6.1 Identifikasi SWOT

Perumusan strategi adaptasi terhadap perubahan iklim yang dapat dilakukan pada infrastruktur ketenagalistrikan di DAS Kapuas dilakukan dengan pengumpulan faktor – faktor internal dan eksternal dengan pendekatan analisis *Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats* (SWOT). Analisis SWOT yang dilakukan yaitu:

Tabel 4. 33 Identifikasi Faktor Internal - Eksternal

Strengths (Kekuatan)	Weaknesses (Kelemahan)
S1. Terdapat standar teknis, SOP operasi, dan praktik pemeliharaan aset	W1. Kerentanan fisik aset terhadap bahaya banjir dan hidrometeorologi ekstrem
S2. Pengetahuan dan keahlian pekerja dalam penanganan gangguan akibat bencana	W2. Integrasi risiko iklim ke perencanaan aset/standar desain belum konsisten
S3. Ketersediaan sistem respons gangguan darurat untuk pemulihan pasokan listrik	W3. Tingginya kerugian finansial akibat pemadaman listrik dan proses pemulihan sistem
Opportunities (Peluang)	Threats (Ancaman)
O1. Penerapan perencanaan pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan berbasis risiko iklim	T1. Peningkatan intensitas dan frekuensi hujan lebat dan kejadian ekstrem
O2. Integrasi energi bersih dan sistem energi terdesentralisasi ke dalam sistem ketenagalistrikan	T2. Meningkatnya potensi kerugian ekonomi akibat dampak banjir terhadap infrastruktur ketenagalistrikan
O3. Penguatan sistem ketenagalistrikan untuk menurunkan tingkat kerawanan operasional akibat kejadian iklim ekstrem	T3. Risiko gejolak sosial akibat pemadaman listrik berkepanjangan

Sumber: Analisis Penulis, 2025

Strengths (Kekuatan) adalah faktor internal yang memberikan keunggulan atau nilai positif bagi suatu organisasi, sistem, atau proyek. Kekuatan ini mencakup sumber daya, kapabilitas, karakteristik teknis, atau keunggulan strategis yang dapat dimanfaatkan untuk mencapai tujuan atau menghadapi tantangan.

- a) Terdapat Standar Teknis, SOP Operasi dan Praktik Pemeliharaan Aset PT PLN (Persero) Unit Pelaksana Pengatur Distribusi (UP2D) Kalimantan Barat dan Unit Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban (UIP3B) Kalimantan telah memiliki SOP Pengoperasian Gardu Induk Distribusi dan juga Gardu Induk sistem interkoneksi di Kalimantan. Keberadaan standar teknis, prosedur operasi standar (SOP), serta praktik pemeliharaan aset yang telah diterapkan secara berkelanjutan merupakan kekuatan utama dalam mendukung keandalan sistem ketenagalistrikan. Standar ini menjadi acuan dalam pengoperasian,

inspeksi, dan perbaikan infrastruktur sehingga mampu menjaga kinerja sistem dalam kondisi normal maupun saat terjadi gangguan.

b) Pengetahuan dan Keahlian Pekerja Dalam Penanganan Gangguan Akibat Bencana

Para pekerja Operator GI, Pelayanan Teknis, dan pekerja lapangan telah dilakukan pelatihan dan sertifikasi yang diperlukan dalam penanganan keadaan gangguan yang mungkin terjadi. Pengetahuan dan keahlian pekerja lapangan dalam menangani gangguan akibat bencana hidrometeorologi merupakan modal penting dalam meningkatkan ketahanan sistem ketenagalistrikan.

c) Ketersediaan sistem respons gangguan darurat untuk pemulihan pasokan listrik

Sistem respon gangguan kelistrikan di Kalimantan bertumpu pada pemantauan Pusat Pengatur Beban (P2B) Kalimantan untuk mendekripsi gangguan transmisi secara *real-time*, diikuti proteksi otomatis (pemutusan aliran) guna mencegah kerusakan meluas. Pemulihan dilakukan bertahap melalui penyalaan ulang pembangkit (PLTA/PLTD/PLTU) dan pengaktifan kembali Gardu Induk (GI).

Weaknesses (Kelemahan) adalah faktor internal yang dapat menghambat kinerja, mengurangi efisiensi, atau meningkatkan kerentanan suatu sistem terhadap ancaman dari luar. Kelemahan ini mencakup keterbatasan teknis, operasional, manajerial, atau struktural yang dapat memperburuk dampak dari tekanan eksternal, dalam hal ini, perubahan iklim.

- a) Kerentanan fisik aset terhadap bahaya banjir dan hidrometeorologi ekstrem
- Jumlah menara transmisi dengan tingkat kerawanan banjir sangat tinggi berdasarkan tahun dengan jumlah curah hujan tertinggi pada skenario SSP1-2.6, SSP2-4.5 dan SSP5-8.5 yaitu secara berurutan berjumlah 1962, 2018 dan 2023 menara. Lokasi infrastruktur kelistrikan yang berada pada kawasan kerawanan banjir sangat tinggi ini meningkatkan potensi kerusakan fisik infrastruktur dan risiko gangguan sistem serta lama waktu pemulihan.

- b) Integrasi risiko iklim ke perencanaan aset standar desain belum konsisten
Integrasi risiko iklim dalam perencanaan aset dan standar desain infrastruktur ketenagalistrikan belum dilakukan secara konsisten, khususnya pada aset eksisting. Banyak infrastruktur dibangun berdasarkan kondisi iklim historis tanpa mempertimbangkan proyeksi peningkatan intensitas dan frekuensi kejadian ekstrem. Kondisi ini menyebabkan infrastruktur kurang adaptif terhadap perubahan iklim dan meningkatkan kerentanan sistem dalam jangka panjang.
- c) Tingginya kerugian finansial akibat pemadaman listrik dan proses pemulihan sistem
Kerugian akibat ENS per jam berdasarkan setiap SSP dihitung pada UP3 yang berada di Kawasan DAS Kapuas, yaitu UP3 Pontianak dan UP3 Sanggau dengan kerugian paling tinggi pada SSP5-85 hingga mencapai Rp 204.816 /jam pada UP3 Pontianak dan Rp 401.590/ jam pada UP3 Sanggau. Serta kerugian ekonomi dan sosial pada pelanggan UP3 Pontianak dan UP3 Sanggau yang terdampak paling tinggi pada skenario SSP5-8.5 di tahun 2060 hingga mencapai Rp188,90 miliar/hari pada UP3 Pontianak dan Rp 618,37 miliar/hari pada UP3 Sanggau.

Opportunities (Peluang) adalah faktor eksternal yang dapat dimanfaatkan untuk mendukung pengembangan atau peningkatan kinerja sistem. Peluang ini biasanya muncul dari tren kebijakan, kemajuan teknologi, ketersediaan sumber daya eksternal, atau perubahan lingkungan yang positif.

- a) Penerapan perencanaan pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan berbasis risiko iklim
PLN telah memiliki fondasi kelembagaan melalui penerapan manajemen risiko berkelanjutan dan perencanaan jangka panjang melalui RUPTL. Namun, integrasi risiko perubahan iklim secara eksplisit ke dalam perencanaan pembangunan dan penguatan infrastruktur ketenagalistrikan masih memiliki ruang untuk ditingkatkan. Kondisi ini membuka peluang penerapan perencanaan berbasis risiko iklim sebagai bagian dari strategi

adaptasi untuk meningkatkan ketahanan sistem ketenagalistrikan, khususnya di wilayah rawan banjir seperti Kalimantan Barat.

- b) Penerapan perencanaan pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan berbasis risiko iklim

PT PLN (Persero) telah mengarahkan pengembangan sistem ketenagalistrikan nasional menuju peningkatan porsi energi bersih dan energi terbarukan melalui perencanaan jangka menengah dan panjang. Arah kebijakan tersebut tercermin dalam RUPTL 2025 – 2034 dengan penambahan sistem transmisi sebanyak 9.812 km dan gardu induk sebanyak 8.080 di Kalimantan untuk mengevakuasi EBT yang akan dibangun seperti pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir dan *Battery Energy Storage System* (BESS).

- c) Penguatan sistem ketenagalistrikan untuk menurunkan tingkat kerawanan operasional akibat kejadian iklim ekstrem

Penguatan sistem ketenagalistrikan melalui peningkatan spesifikasi teknis, digitalisasi jaringan, dan pemantauan kondisi aset secara berkelanjutan memberikan peluang untuk menurunkan tingkat kerawanan operasional. Upaya ini mendukung peningkatan ketahanan jaringan terhadap variabilitas dan ekstremitas iklim.

Threats (Ancaman) adalah faktor eksternal yang berpotensi mengganggu atau memperburuk kondisi sistem jika tidak diantisipasi. Ancaman bersumber dari perubahan lingkungan, kebijakan, iklim, ekonomi, maupun sosial yang berada di luar kendali langsung, tetapi berdampak nyata terhadap operasional dan keberlanjutan.

- a) Peningkatan intensitas dan frekuensi hujan lebat dan kejadian ekstrem

Perubahan iklim berkontribusi terhadap peningkatan intensitas dan frekuensi hujan lebat serta kejadian iklim ekstrem lainnya. Kondisi ini meningkatkan risiko banjir, longsor, dan kerusakan infrastruktur ketenagalistrikan.

- b) Meningkatnya potensi kerugian ekonomi akibat dampak banjir terhadap infrastruktur ketenagalistrikan

Banjir yang semakin sering dan meluas berpotensi menimbulkan kerugian ekonomi yang besar akibat kerusakan infrastruktur ketenagalistrikan. Dampak ekonomi tersebut mencakup biaya rehabilitasi aset serta kerugian akibat terhentinya aktivitas ekonomi dan pelayanan publik.

- c) Risiko gejolak sosial akibat pemadaman listrik berkepanjangan

Pemadaman listrik berkepanjangan akibat kejadian iklim ekstrem dapat memicu gejolak sosial, terutama pada wilayah dengan ketergantungan tinggi terhadap pasokan listrik. Gangguan terhadap pelayanan publik, aktivitas ekonomi, dan kebutuhan dasar masyarakat berpotensi memperburuk kerentanan sosial.

4.6.2 Strategi SO, ST, WO dan WT

Setelah faktor internal eksternal teridentifikasi, selanjutnya adalah menyusun strategi dengan kombinasi antar faktor internal-eksternal (*Strength-Opportunity, Strength-Threat, Weakness-Opportunity dan Weakness-Threat*).

Tabel 4. 34 Strategi SWOT

Strategi SO (<i>Strength–Opportunity</i>)		
1.	SO-1	Mengoptimalkan standar teknis, SOP operasi, serta praktik pemeliharaan aset yang telah ada untuk mendukung penerapan perencanaan pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan berbasis risiko iklim..
2.	SO-2	Manfaatkan pengetahuan dan keahlian pekerja dalam penanganan gangguan akibat bencana untuk mendukung integrasi energi bersih dan sistem energi terdesentralisasi, khususnya pada wilayah rawan banjir dan akses terbatas..
3.	SO-3	Mengembangkan sistem ketenagalistrikan yang lebih tangguh terhadap kejadian iklim ekstrem melalui penguatan respons gangguan darurat dan peningkatan ketahanan operasional jaringan.
Strategi ST (<i>Strength–Threat</i>)		
1.	ST-1	Meningkatkan efektivitas sistem respons gangguan darurat untuk mengurangi dampak peningkatan intensitas dan frekuensi hujan lebat serta kejadian iklim ekstrem terhadap keandalan pasokan listrik..

2.	ST-2	Memanfaatkan standar teknis dan SOP operasi yang ada untuk mempercepat pemulihan sistem pascabencana dan menekan potensi kerugian ekonomi akibat banjir.
3.	ST-3	Menggunakan kapasitas dan keahlian pekerja dalam penanganan gangguan untuk meminimalkan durasi pemadaman listrik berkepanjangan yang berpotensi menimbulkan gejolak sosial.
Strategi WO (<i>Weakness–Opportunity</i>)		
1.	WO-1	Mendorong integrasi risiko iklim ke dalam perencanaan aset dan standar desain melalui penerapan perencanaan pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan berbasis risiko iklim.
2.	WO-2	Mengurangi kerentanan fisik aset dan potensi kerugian finansial akibat pemadaman listrik dengan mengembangkan energi bersih dan sistem energi terdesentralisasi sebagai sumber pasokan alternatif.
3.	WO-3	Memperkuat sistem ketenagalistrikan melalui penguatan jaringan dan peningkatan ketahanan operasional guna menekan risiko gangguan dan biaya pemulihan akibat kejadian iklim ekstrem.
Strategi WT (<i>Weakness–Threat</i>)		
1.	WT-1	Melakukan prioritisasi penguatan dan perlindungan aset ketenagalistrikan yang paling rentan terhadap banjir untuk mengurangi dampak peningkatan hujan ekstrem dan kejadian iklim ekstrem.
2.	WT-2	Mengembangkan strategi adaptasi bertahap untuk menekan kerugian ekonomi akibat banjir melalui pengurangan durasi pemadaman dan peningkatan efisiensi pemulihan sistem.
3.	WT-3	Menyusun rencana kontinjensi dan komunikasi krisis guna meminimalkan risiko gejolak sosial akibat pemadaman listrik berkepanjangan pada wilayah rawan bencana..

4.6.3 Analisis Prioritas Strategi Menggunakan AHP

Setelah disusun strategi menggunakan analisis SWOT, didapatkan 12 strategi untuk adaptasi terhadap perubahan iklim. Dari 12 Strategi ini akan dilakukan analisis menggunakan AHP guna mendapatkan strategi terbaik. Analisis AHP dilakukan dengan memberikan kuesioner kepada para 10 orang responden terdiri dari *Manager*, *Assistant Manager* dan *Team Leader* di PT PLN (Persero). Berdasarkan faktor internal dan eksternal yang telah diidentifikasi dalam analisis SWOT pada tabel 4.31, disusun hirarki AHP yang terdiri dari beberapa tingkatan, yaitu tingkat 1 tujuan, tingkat 2 kriteria S, W, O dan T serta tingkat 3 sub kriteria. Berdasarkan faktor yang telah teridentifikasi dilakukan perbandingan berpasangan baik pada tingkat 2 (S, W, O dan T) serta tingkat 3 (faktor setiap kategori pada Tabel 4.32.

Selanjutnya dilakukan pembobotan faktor internal dan eksternal SWOT menggunakan metode AHP. Nilai eigenvector merepresentasikan bobot relatif masing-masing faktor dalam kelompoknya, sedangkan weighted score menunjukkan bobot global faktor terhadap tujuan adaptasi perubahan iklim pada infrastruktur ketenagalistrikan. Hasil pembobotan Faktor SWOT dapat dilihat pada Tabel 4.35.

Tabel 4. 35 Pembobotan Faktor SWOT

Faktor Internal-Eksternal SWOT	<i>Eigenvector</i>	<i>Weighted Score</i>
<i>Strengths</i>	0,40	
S1. Standar teknis, SOP operasi, dan praktik pemeliharaan aset	0,45	0,180
S2. Pengetahuan dan keahlian pekerja dalam penanganan gangguan akibat bencana	0,35	0,140
S3. Ketersediaan sistem respons gangguan darurat untuk pemulihan pasokan listrik	0,20	0,080
<i>Weaknesses</i>	0,15	
W1. Kerentanan fisik aset terhadap bahaya banjir dan hidrometeorologi ekstrem	0,45	0,068
W2. Integrasi risiko iklim ke perencanaan aset/standar desain belum konsisten	0,20	0,030
W3. Tingginya kerugian finansial akibat pemadaman listrik dan proses pemulihan sistem	0,35	0,053
<i>Opportunities</i>	0,25	
O1. Penerapan perencanaan pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan berbasis risiko iklim	0,40	0,100
O2. Integrasi energi bersih dan sistem energi terdesentralisasi	0,25	0,063
O3. Penguatan sistem ketenagalistrikan untuk menurunkan kerawanan operasional akibat kejadian iklim ekstrem	0,35	0,088
<i>Threats</i>	0,20	
T1. Peningkatan intensitas dan frekuensi hujan ekstrem	0,45	0,090
T2. Meningkatnya potensi kerugian ekonomi akibat dampak banjir	0,35	0,070
T3. Risiko gejolak sosial akibat pemadaman listrik berkepanjangan	0,20	0,040

Sumber: Analisis Penulis, 2025

Hasil pembobotan faktor SWOT menggunakan metode AHP berdasarkan penilaian 10 responden menunjukkan bahwa kelompok *Strengths* memiliki bobot tertinggi dibandingkan kelompok faktor lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa kapasitas internal sistem ketenagalistrikan, terutama yang berkaitan dengan standar teknis, SOP operasi, dan praktik pemeliharaan aset, dipandang sebagai faktor paling menentukan dalam mendukung adaptasi infrastruktur ketenagalistrikan terhadap perubahan iklim di Kalimantan Barat. Dominasi faktor internal mencerminkan keyakinan responden bahwa ketahanan sistem lebih efektif dicapai melalui penguatan tata kelola teknis dan operasional yang telah berjalan.

Berdasarkan *weighted score* pada tabel 4.33 ditentukan prioritas berbagai strategi adaptasi pada Tabel 4.31. sehingga dihasilkan prioritas pada tabel 4.36.

Tabel 4. 36 Tabel Prioritas Keterkaitan *Weighted Score* dengan Strategi SWOT

No	Strategi	Faktor SWOT	Total Weighted Score	Prioritas
SO- 1	Mengoptimalkan standar teknis, SOP operasi, dan praktik pemeliharaan aset untuk mendukung perencanaan berbasis risiko iklim	S1 + O1	0,280	Sangat Tinggi
SO-2	Pemanfaatan pengetahuan dan keahlian pekerja dalam penanganan gangguan bencana untuk mendukung integrasi energi bersih dan sistem terdesentralisasi	S2 + O2	0,203	Tinggi
SO-3	Pengembangan sistem ketenagalistrikan yang lebih tangguh melalui penguatan respons darurat dan ketahanan operasional jaringan	S1 + O3	0,268	Sangat Tinggi

No	Strategi	Faktor SWOT	Total Weighted Score	Prioritas
ST-1	Meningkatkan efektivitas sistem respons gangguan darurat untuk menghadapi hujan ekstrem dan kejadian iklim ekstrem	S3 + T1	0,170	Tinggi
ST-2	Pemanfaatan standar teknis dan SOP operasi untuk mempercepat pemulihan pascabencana dan menekan kerugian ekonomi akibat banjir	S1 + T2	0,250	Sangat Tinggi
ST-3	Pemanfaatan kapasitas dan keahlian pekerja untuk meminimalkan durasi pemadaman listrik dan risiko gejolak sosial	S2 + T3	0,180	Menengah
WO-1	Integrasi risiko iklim ke dalam perencanaan aset dan standar desain melalui penerapan perencanaan berbasis risiko iklim	W2 + O1	0,130	Menengah
WO-2	Pengurangan kerentanan fisik aset dan potensi kerugian finansial melalui pengembangan energi bersih dan sistem terdesentralisasi	W1 + W3 + O2	0,186	Menengah
WO-3	Penguatan sistem ketenagalistrikan melalui penguatan jaringan dan peningkatan ketahanan operasional	W1 + W3 + O3	0,211	Tinggi
WT-1	Prioritisasi penguatan dan perlindungan aset paling rentan terhadap banjir dan hujan ekstrem	W1 + T1	0,158	Tinggi

No	Strategi	Faktor SWOT	Total Weighted Score	Prioritas
WT-2	Strategi adaptasi bertahap untuk menekan kerugian ekonomi akibat banjir melalui pengurangan durasi pemadaman	W3 + T2	0,123	Menengah
WT-3	Penyusunan rencana kontinjensi dan komunikasi krisis untuk meminimalkan risiko gejolak sosial	W2 + T3	0,070	Rendah

Sumber: Analisis Penulis, 2025

Strategi adaptasi perubahan iklim terhadap bencana banjir untuk infrastruktur ketenagalistrikan DAS Kapuas di Kalimantan Barat berdasarkan hasil prioritas Sangat Tinggi dan Tinggi mengacu pada hasil *weighted score*.

1. Prioritas Sangat Tinggi

- a) **SO-1.** Optimisasi Standar Teknis, SOP Operasi, dan Praktik Pemeliharaan untuk Mendukung Perencanaan Berbasis Risiko Iklim

Strategi SO-1 menempatkan standar teknis dan SOP sebagai titik berat utama dalam membangun ketahanan infrastruktur transmisi terhadap perubahan iklim. Standar teknis dan SOP yang kuat memungkinkan integrasi informasi risiko iklim (mis. banjir/curah hujan ekstrem) ke dalam perencanaan dan pembangunan infrastruktur, sehingga rancangan jalur transmisi dan spesifikasi teknis gardu dapat memperhitungkan probabilitas kejadian ekstrem. Pendekatan ini sangat penting di wilayah yang rawan hidrometeorologi seperti Kalimantan Barat, di mana sistem transmisi sering kali melintasi dataran banjir, hutan gambut, dan sungai besar. Dalam konteks adaptasi, penggunaan SOP berbasis

risiko membantu mengurangi gangguan sistem sejak tahap perencanaan aset hingga operasional lapangan.

Penelitian oleh Sadeghi et al. (2023) menunjukkan bahwa penerapan perencanaan sistem kelistrikan berbasis risiko (*risk-based planning*) secara signifikan meningkatkan ketahanan jaringan terhadap kejadian banjir ekstrem, terutama melalui integrasi proyeksi iklim ke dalam tahap perencanaan desain dan strategi operasional sistem tenaga. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi dini titik-titik kritis jaringan serta penyesuaian kapasitas dan konfigurasi infrastruktur terhadap peningkatan risiko iklim. Sejalan dengan temuan tersebut, Li et al. (2022) menegaskan bahwa penerapan kerangka kerja *climate-resilient grid planning* berkontribusi pada peningkatan keandalan sistem tenaga listrik dalam menghadapi beban cuaca ekstrem, melalui kombinasi penilaian risiko iklim, penguatan infrastruktur, dan adaptasi strategi operasi jaringan.

- b) **SO-3. Pengembangan Sistem Ketenagalistrikan yang Lebih Tangguh Melalui Penguatan Respons Gangguan dan Ketahanan Operasional**

Strategi SO-3 fokus pada penguatan ketahanan operasional sistem transmisi melalui peningkatan respons gangguan dan redundansi sistem. Di era perubahan iklim, kejadian eksternal seperti badai dan hujan ekstrem cenderung terjadi secara tidak terduga, sehingga kemampuan instrumen teknis seperti SCADA, kontrol otomatis, dan respons lapangan harus dimaksimalkan. Pendekatan ini bukan hanya meningkatkan keandalan operasi, tetapi juga mempercepat pemulihan layanan pascabencana, yang berdampak signifikan terhadap *Energy Not Supplied* (ENS) dan kerugian sosial-ekonomi. Selain itu, penguatan sistem juga mencakup optimasi redundansi jalur, proteksi isolasi, dan pemantauan kondisi aset secara real-time, yang semuanya berkontribusi pada ketangguhan sistem.

Menurut Zhang et al. (2024), penerapan teknologi pemantauan *real-time* serta strategi redundansi pada jaringan transmisi secara signifikan mampu menurunkan frekuensi dan durasi gangguan yang disebabkan oleh kejadian cuaca ekstrem. Integrasi sistem pemantauan berbasis sensor dan *advanced analytics* memungkinkan deteksi dini kondisi abnormal serta respons operasional yang lebih cepat. Selain itu, evaluasi ketahanan jaringan listrik dalam konteks *smart grid* menunjukkan bahwa sistem dengan tingkat *grid resilience* yang tinggi mampu mempertahankan dan memulihkan operasional secara lebih cepat ketika terjadi gangguan berskala besar, sehingga mengurangi dampak ekonomi dan sosial akibat pemadaman listrik (Mitra et al., 2022).

- c) **ST-2. - Pemanfaatan Standar Teknis dan SOP untuk Percepatan Pemulihan serta Pengurangan Kerugian Ekonomi Akibat Banjir**
- Strategi ST-2 menekankan peran standar teknis dan SOP dalam konteks pemulihan sistem pascabencana. Ketika banjir ekstrem terjadi, keterlambatan pemulihan jaringan transmisi tidak hanya berdampak pada keandalan listrik tetapi juga menimbulkan kerugian ekonomi yang luas karena sektor industri, layanan publik, dan permukiman terganggu. Standar teknis yang didukung SOP pemulihan cepat memastikan bahwa langkah operasional darurat, prioritas perbaikan, serta protokol keselamatan dilaksanakan secara efisien dan konsisten antar tim lapangan. Penelitian Panteli dan Mancarella (2015) menunjukkan adanya hubungan langsung antara waktu pemulihan jaringan listrik (*recovery time*) dan besarnya dampak ekonomi akibat gangguan iklim ekstrem. Sistem ketenagalistrikan yang mendukung perencanaan pemulihan terpadu (*integrated restoration planning*) terbukti mampu menurunkan dampak finansial secara signifikan melalui percepatan pemulihan layanan dan pengurangan energi tak tersalurkan (*energy not supplied*, ENS). Studi tersebut juga menekankan pentingnya integrasi strategi pemulihan ke dalam standar operasional prosedur

(SOP) jaringan listrik sebagai bagian dari upaya peningkatan ketahanan sistem. Selain itu, berbagai kerangka kerja *post-disaster restoration planning* yang menggabungkan evaluasi nilai ENS dan biaya pemulihan telah diterapkan dalam sejumlah studi kasus, yang menegaskan bahwa keberadaan SOP yang jelas dan terstruktur dapat mempercepat pencapaian *recovery time objective* (RTO) serta meminimalkan biaya tidak langsung akibat gangguan berskala besar (Williams et al., 2021)..

2. Prioritas Tinggi

- a) **SO-2.** Pemanfaatan Pengetahuan dan Keahlian Pekerja dalam Penanganan Gangguan untuk Mendukung Integrasi Energi Bersih dan Sistem Terdesentralisasi

Strategi SO-2 menekankan pentingnya penguatan kapasitas sumber daya manusia (SDM) sebagai komponen adaptasi non-struktural dalam menghadapi risiko iklim terhadap sistem ketenagalistrikan. Dalam konteks perubahan iklim, gangguan akibat banjir dan hujan ekstrem tidak hanya membutuhkan solusi teknis, tetapi juga respons operasional yang cepat dan adaptif dari personel lapangan. Peningkatan kompetensi pekerja dalam penanganan gangguan memungkinkan PLN untuk mempertahankan keandalan sistem, khususnya di wilayah rawan bencana seperti DAS Kapuas yang memiliki akses terbatas dan kompleksitas geografis tinggi.

PT PLN (Persero) telah mengintegrasikan aspek pengembangan sumber daya manusia (SDM), pelatihan, serta pelaksanaan pembelajaran berkelanjutan ke dalam penilaian *maturity level* kinerja pada bidang-bidang terkait. Pendekatan ini sejalan dengan temuan Sovacool et al. (2020) yang menegaskan bahwa kapasitas dan kompetensi SDM merupakan faktor kunci dalam meningkatkan ketahanan sistem energi terhadap gangguan iklim, khususnya pada fase respons darurat dan pemulihan pascagangguan. Selain itu, Bie et al. (2019) menunjukkan bahwa peningkatan kompetensi operator

jaringan dan kesiapan organisasi berkontribusi langsung terhadap penurunan durasi pemadaman serta peningkatan fleksibilitas sistem dalam menghadapi kejadian cuaca ekstrem. Dengan demikian, penguatan kapasitas SDM dan institusional tidak hanya berperan sebagai pendukung teknis, tetapi juga sebagai elemen strategis dalam meningkatkan resiliensi sistem ketenagalistrikan.

- b) **ST-1.** Peningkatan Efektivitas Sistem Respons Gangguan Darurat untuk Menghadapi Hujan Ekstrem dan Kejadian Iklim Ekstrem
- Strategi ST-1 berfokus pada penguatan sistem respons darurat sebagai langkah adaptasi operasional untuk mengantisipasi ancaman hujan ekstrem dan banjir yang semakin intens akibat perubahan iklim. Di wilayah dengan variabilitas curah hujan tinggi, keterlambatan respons terhadap gangguan dapat memperbesar dampak teknis dan sosial-ekonomi, termasuk peningkatan ENS dan durasi pemadaman listrik. Peningkatan efektivitas respons darurat mencakup penyusunan protokol tanggap darurat berbasis prakiraan cuaca ekstrem, peningkatan koordinasi lintas unit, serta pemanfaatan sistem peringatan dini hidrometeorologi. Strategi ini memungkinkan PLN untuk melakukan tindakan preventif, seperti pengamanan aset kritis dan penyiapan tim siaga, sebelum kejadian ekstrem mencapai puncaknya.

Menurut Panteli et al. (2017), sistem ketenagalistrikan yang dilengkapi dengan mekanisme respons darurat yang adaptif mampu secara signifikan mengurangi dampak gangguan akibat kejadian iklim ekstrem, khususnya melalui percepatan waktu pemulihan (*recovery time*). Mekanisme tersebut mencakup koordinasi operasional yang fleksibel, pengambilan keputusan berbasis kondisi aktual, serta integrasi strategi pemulihan dalam prosedur operasi sistem. Sejalan dengan temuan tersebut, Kwasinski et al. (2016) menunjukkan bahwa tingkat kesiapsiagaan operasional yang tinggi berkontribusi langsung terhadap peningkatan ketahanan (*resilience*) sistem tenaga listrik dalam menghadapi cuaca ekstrem, terutama

melalui percepatan proses isolasi gangguan, pengurangan area terdampak, dan pemulihan layanan secara bertahap namun terkontrol.

- c) **WO-3.** Penguatan Sistem Ketenagalistrikan melalui Penguatan Jaringan dan Peningkatan Ketahanan Operasional

Strategi WO-3 menempatkan penguatan ketahanan operasional jaringan sebagai langkah adaptasi struktural untuk mengurangi kerentanan fisik aset terhadap banjir dan hujan ekstrem. Ketahanan operasional tidak hanya bergantung pada kekuatan desain awal, tetapi juga pada kemampuan sistem untuk tetap berfungsi atau pulih dengan cepat ketika sebagian jaringan mengalami gangguan. Dalam konteks DAS Kapuas, penguatan ketahanan operasional dapat dilakukan melalui peningkatan redundansi jaringan, penguatan struktur pendukung, serta optimalisasi konfigurasi jaringan agar tidak terjadi kegagalan berantai. Strategi ini menjadi penting karena banyak jalur transmisi melintasi wilayah dengan akses terbatas dan waktu pemulihan yang relatif lama jika terjadi kerusakan.

Studi oleh Brown et al. (2019) menunjukkan bahwa peningkatan redundansi dan fleksibilitas jaringan transmisi secara signifikan menurunkan risiko terjadinya pemadaman listrik berskala luas akibat bencana alam, terutama melalui pengurangan titik kegagalan kritis dan peningkatan kemampuan sistem dalam melakukan *re-routing* daya. Selain itu, Espinoza et al. (2020) menegaskan bahwa pendekatan *network hardening*—yang mencakup penguatan fisik infrastruktur, peningkatan standar desain, serta kesiapsiagaan operasional—merupakan komponen kunci dalam strategi adaptasi infrastruktur energi terhadap dampak perubahan iklim. Kedua studi tersebut menekankan bahwa penguatan struktural dan peningkatan fleksibilitas operasional harus diterapkan secara terpadu untuk meningkatkan ketahanan sistem ketenagalistrikan jangka panjang.

- d) **WT-1.** Prioritisasi penguatan dan perlindungan aset paling rentan terhadap banjir dan hujan ekstrem

Strategi WT-1 berfokus pada pendekatan adaptasi berbasis risiko dengan memprioritaskan perlindungan aset yang memiliki tingkat kerentanan dan dampak layanan paling tinggi. Dalam kondisi keterbatasan sumber daya, tidak semua aset dapat diperkuat secara bersamaan, sehingga diperlukan strategi selektif yang didasarkan pada hasil pemetaan risiko banjir dan nilai strategis aset terhadap sistem ketenagalistrikan.

Pendekatan ini memungkinkan PT PLN (Persero) untuk mengalokasikan investasi adaptasi secara lebih efisien melalui prioritisasi aset berbasis risiko, misalnya dengan peninggian peralatan gardu induk pada zona genangan, perbaikan sistem drainase, atau pemasangan proteksi tambahan pada pondasi menara transmisi yang sering terdampak banjir. Dengan strategi tersebut, risiko kegagalan sistem dapat ditekan secara signifikan tanpa harus melakukan penguatan menyeluruh pada seluruh infrastruktur, yang umumnya memerlukan biaya investasi sangat tinggi. Sejalan dengan hal tersebut, Hallegatte et al. (2019) menegaskan bahwa prioritisasi aset berbasis risiko merupakan pendekatan adaptasi infrastruktur yang paling *cost-effective* dalam menghadapi perubahan iklim. Selain itu, Ward et al. (2021) menunjukkan bahwa perlindungan selektif terhadap aset-aset kritis di wilayah rawan banjir mampu mengurangi kerugian ekonomi secara substansial sekaligus meningkatkan keandalan layanan ketenagalistrikan.

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan beberapa hal utama yang secara langsung menjawab tujuan penelitian sebagai berikut:

1. Hasil analisis menunjukkan bahwa curah hujan yang terjadi di DAS Kapuas berpengaruh signifikan terhadap potensi dan tingkat kerawanan banjir di DAS Kapuas. Perubahan iklim memengaruhi potensi banjir terutama melalui peningkatan intensitas hujan ekstrem, bukan melalui kenaikan hujan rata-rata atau jumlah hari hujan. Pada ketiga skenario, curah hujan rata-rata tahunan relatif stabil pada kisaran $\pm 8,5\text{--}11,8$ mm/hari, serta jumlah hari hujan cenderung tidak mengalami perubahan mencolok (sekitar 277–349 hari/tahun), yang menunjukkan bahwa peningkatan risiko banjir tidak terutama dipicu oleh bertambahnya frekuensi hujan. Sebaliknya, perbedaan antar skenario tercermin kuat pada intensitas hujan ekstrem harian dan akumulasi curah hujan tahunan.
2. Pemetaan risiko banjir di DAS Kapuas menunjukkan bahwa kerentanan infrastruktur ketenagalistrikan didominasi kelas tinggi hingga sangat tinggi pada seluruh skenario iklim. Dari 2.560 menara transmisi, pada kelas sangat tinggi mencapai 1.962 lokasi (SSP1-2.6/2054), meningkat menjadi 2.018 lokasi (SSP2-4.5/2029) dan 2.023 lokasi (SSP5-8.5/2049). Jalur transmisi paling rentan secara konsisten pada ketiga skenario meliputi SUTT Simpang Silat–Putussibau, Tayan–Sanggau, Sekadau–Sintang, dan Siantan–Tayan, yang sebagian besar melintasi dataran rendah sepanjang Sungai Kapuas. Pada gardu induk, Siantan, Sei Raya, Ngabang, Tayan, Sanggau, Sekadau, Sintang, Ambawang, dan Putussibau berada pada risiko banjir sangat tinggi di seluruh skenario, sementara Parit Baru dan Badau relatif lebih rendah

pada SSP1-2.6 namun meningkat pada skenario lain. Secara komparatif, SSP1-2.6 menunjukkan dampak paling minim, SSP2-4.5 paling reliabel untuk perencanaan, dan SSP5-8.5 merepresentasikan risiko maksimum terhadap keandalan sistem ketenagalistrikan.

Banjir di DAS Kapuas berdampak pada keandalan operasional, lingkungan, dan sosial–ekonomi sistem ketenagalistrikan. Secara ekonomi, kerugian akibat gangguan listrik pada tahun kejadian ekstrem mencapai ±Rp56,08 miliar per hari pada SSP2-4.5 (2029), meningkat menjadi ±Rp96,85 miliar per hari pada SSP1-2.6 (2054), dan melonjak tajam hingga ±Rp359,18 miliar per hari pada SSP5-8.5 (2049), dengan UP3 Sanggau secara konsisten menyumbang porsi *Business Cost* terbesar akibat nilai SAIDI dan jumlah pelanggan terdampak yang lebih tinggi. Dari sisi lingkungan, keterlambatan pembangunan transmisi menghasilkan laju emisi sekitar 284,3 ton CO₂ per hari dari *avoidable emission* yang berasal dari pengoperasian PLTD karena interkoneksi sistem tidak dapat beroperasi tepat waktu. SSP1-2.6 merepresentasikan dampak minimum, SSP2-4.5 paling reliabel untuk perencanaan ketahanan sistem, dan SSP5-8.5 menggambarkan kondisi risiko maksimum dengan potensi kerugian ekonomi dan lingkungan yang bersifat sistemik dan berulang.

3. Strategi adaptasi perubahan iklim yang paling efektif dan reliabel bagi infrastruktur ketenagalistrikan di DAS Kapuas adalah penguatan kapasitas internal PLN melalui optimalisasi standar teknis, SOP operasi, dan ketahanan operasional sistem, sebagaimana tercermin dari bobot faktor *Strengths* yang paling dominan (0,40) serta tingginya *weighted score* pada strategi prioritas SO-1 (0,280), SO-3 (0,268), dan ST-2 (0,250). Temuan ini secara kuantitatif sejalan dengan tingginya tingkat kerentanan fisik aset dimana menunjukkan lebih dari 2.000 lokasi pada kelas kerawanan banjir sangat tinggi pada skenario ekstrem serta besarnya potensi kerugian ekonomi dan sosial akibat ENS yang dapat mencapai ratusan miliar rupiah per hari pada skenario SSP5-8.5.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, beberapa saran terkait penelitian yang dapat dikembangkan diantaranya:

1. Penelitian ini masih belum memperhitungkan kondisi pasang surut air laut yang sering terjadi di wilayah pesisir seperti Kota Pontianak, Kabupaten Kubu Raya, Kabupaten Siantan dan Kabupaten Mempawah dan masih menjadi kelemahan dalam penyusunan penelitian ini sehingga dapat menjadi masukan untuk penelitian selanjutnya.
2. Hasil proyeksi menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan jumlah curah hujan tahunan dari setiap skenario SSP. Mengingat data yang digunakan belum melalui proses kalibrasi dan validasi menyeluruh, nilai – nilai yang diperoleh sebaiknya dipandang sebagai kecenderungan daripada estimasi absolut. Penelitian lanjutan disarankan untuk melakukan *bias correction* dengan menggunakan data pengamatan lokal untuk meningkatkan akurasi.
3. Diperlukan analisis berbasis risiko lebih lanjut terkait kerentanan sistem ketenagalistrikan terhadap proyeksi bahaya banjir di masa yang akan datang.
4. Analisis SWOT-AHP berguna untuk untuk strategi adaptasi banjir akibat perubahan iklim, namun masih banyak ruang untuk inovasi dan pengembangan lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Basset, M., Mohamed, M., & Smarandache, F. (2018). An extension of neutrosophic AHP–SWOT analysis for strategic planning and decision-making. *Symmetry*, 10(4), 116. <https://doi.org/10.3390/sym10040116>
- Addisu, A., Tsidu, G., & Basupi, L. (2025). Improving Daily CMIP6 Precipitation in Southern Africa Through Bias Correction—Part 1: Spatiotemporal Characteristics. *Climate*. <https://doi.org/10.3390/cli13050095>.
- Aldiansyah, A., Putra, R., & Pramudya, B. (2023). Analisis tingkat kerawanan banjir berbasis sistem informasi geografis menggunakan metode weighted linear combination. *Jurnal Geografi Lingkungan*, 15(2), 85–96.
- Aldrian, E., & Susanto, R. D. (2003). Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature. *International Journal of Climatology*, 23(12), 1435–1452. <https://doi.org/10.1002/joc.950>
- Allan, R. P., & Soden, B. J. (2008). Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, 321(5895), 1481–1484.
- Almazroui, M., Saeed, F., Saeed, S., Ismail, M., Ehsan, M., Islam, M., Abid, M., O'Brien, E., Kamil, S., Rashid, I., & Nadeem, I. (2021). Projected Changes in Climate Extremes Using CMIP6 Simulations Over SREX Regions. *Earth Systems and Environment*, 5, 481 - 497. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00250-5>.
- Andika, M., Putra, T., Putra, Y. S., & Adriat, R. (2021). Analisis tingkat kerawanan banjir Kabupaten Mempawah Provinsi Kalimantan Barat menggunakan metode overlay dengan scoring berbasis sistem informasi geografis. *Prisma Fisika*, 9(3), 234–243.
- Ariyani, R., Prasetyo, Y., & Nugroho, S. P. (2024). Flood hazard mapping using weighted overlay method based on hydrometeorological and physical parameters in Southeast Asia region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1289(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1289/1/012021>

- Ariyani, R. N., Muliadi, M., & Adriat, R. (2022). Analisis kecenderungan hujan ekstrem berbasis indeks iklim ekstrem periode tahun 1990–2019 di Kalimantan Barat. *Positron*, 12(1), 49–56. <https://doi.org/10.26418/positron.v12i1.47312>
- Asian Development Bank. (2021). *Climate risk and adaptation in the energy sector*. Asian Development Bank. <https://www.adb.org/>
- Astarini, A., Muliadi, & Adriat, R. (2022). Studi perbandingan metode penentuan intensitas curah hujan berdasarkan karakteristik curah hujan Kalimantan Barat. *Prisma Fisika*, 10(1), 1–7
- Aulyani, D., & Nugrahanto, E. (2020). Peak discharge in Jemelak Subwatershed, Sintang District. *Journal of Symbolic Logic*, 8, 273–282. <https://doi.org/10.23960/jsl38273-282>
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (2022). *Atlas proyeksi bencana hidrometeorologi*. BMKG.
- Baek, H., Lee, J., Lee, H., Hyun, Y., Cho, C., Kwon, W., Marzin, C., Gan, S., Kim, M., Choi, D., Lee, J., Lee, J., Boo, K., Kang, H., & Byun, Y. (2013). Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under representative concentration pathways. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49, 603–618. <https://doi.org/10.1007/s13143-013-0053-7>
- Bai, Y., Zhang, Y., Wang, X., & Wang, S. (2019). Hydrological responses to climate change and land-use change in a river basin: A modeling approach. *Journal of Hydrology*, 573, 124–136. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.073>
- Batukh, B. (2022). Strategic analysis and decision-making using SWOT matrix approach. *International Journal of Management and Business Research*, 12(2), 85–94.
- Bhattacharyya, S. C., & Timilsina, G. R. (2010). Modelling energy demand of developing countries: Are the specific features adequately captured? *Energy Policy*, 38(4), 1979–1990. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.11.079>
- Bie, Z., Lin, Y., Li, G., & Wang, X. (2019). Impact of human factors on power system resilience under extreme weather events. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(2), 2151–2161 <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2786331>
- BPDASHL Kapuas. (2019). *Rencana pengelolaan daerah aliran sungai (RP-DAS) Kapuas*. Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai dan Hutan Lindung Kapuas.

- Brown, T., Schlachtberger, D., Kies, A., Schramm, S., & Greiner, M. (2019). Synergies of sector coupling and transmission reinforcement in a cost-optimised, highly renewable European energy system. *Energy*, 160, 720–739. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.222>
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2021). *Kajian risiko bencana nasional Provinsi Kalimantan Barat 2022–2026*.
- Calvin, K., Bond-Lamberty, B., Clarke, L., Edmonds, J., Eom, J., Hartin, C., Kim, S., Kyle, P., Link, R., Moss, R., Mcjeon, H., Patel, P., Smith, S., Waldhoff, S., & Wise, M. (2017). The SSP4: A world of deepening inequality. *Global Environmental Change-human and Policy Dimensions*, 42, 284-296. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.010>
- Chapman, A., Davies, W., Downey, C., & Dookie, D. (2021). *ADB climate risk country profile: Micronesia*. Asian Development Bank. <https://think-asia.org/handle/11540/13546>
- Chen, C. A., Hsu, H. H., & Liang, H. C. (2021). Evaluation of CMIP6 models in simulating precipitation extremes. *Climate Dynamics*, 57, 1–18.
- Chen, X., Zhang, H., Chen, W., & Huang, G. (2020). Urbanization and climate change impacts on future flood risk in the Pearl River Delta under shared socioeconomic pathways. *Science of the Total Environment*, 143144. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143144>
- Chen, Y. (2022). Flood hazard zone mapping incorporating geographic information system (GIS) and multi-criteria analysis (MCA) techniques. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128268>.
- Chen, J., Li, C., Brissette, F. P., & Lucas-Picher, P. (2021). Changes in extreme precipitation and their impacts on flood risk under climate change. *Journal of Hydrology*, 603, 127032. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127032>
- Darmawan, K., Hani'ah, H., & Suprayogi, A. (2017). Analisis tingkat kerawanan banjir di Kabupaten Sampang menggunakan metode overlay dengan scoring berbasis sistem informasi geografis. *Jurnal Geodesi UNDIP*, 6(1), 31–40. <https://doi.org/10.14710/jgundip.2017.15024>

- Dash, P., & Sar, J. (2020). Identification and validation of potential flood hazard area using GIS-based multi-criteria analysis and satellite data-derived water index. *Journal of Flood Risk Management*, 13. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12620>
- Dinku, T., et al. (2018). Validation of the CHIRPS satellite rainfall estimates over eastern Africa. *Journal of Hydrometeorology*, 19(2), 397–414. https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/19/2/jhm-d-17-0204_1.xml
- Distantio, D., & Sambegoro, A. (2025). Techno-economic and grid study of hybrid diesel power plant and solar power plant systems on Simeulue Island. Laporan studi teknis, PT PLN (Persero).
- Dosio, A., Mentaschi, L., Fischer, E. M., & Wyser, K. (2020). Extreme heat waves under 1.5 °C and 2 °C global warming. *Climate Dynamics*, 54(3–4), 1971–1989. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05122-6>
- Doswell, C. A. (2003). *Flooding*. In Encyclopedia of atmospheric sciences (pp. 769–776). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227090-8/00151-2>
- Espinosa, S., Panteli, M., Mancarella, P., & Rudnick, H. (2020). Multi-phase assessment and adaptation of power systems resilience to climate change. *Electric Power Systems Research*, 189, 106674. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106674>
- European Environment Agency. (2016). Flood risks and environmental vulnerability in Europe. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/>
- Fahmi, I., Baihaqi, A., & Hidayat, R. (2017). Integration of SWOT and AHP methods in determining priority strategies for energy efficiency and carbon emission reduction in industrial sectors. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 7(5), 123–131.
- Fathi, M. K., Setiawan, B., & Khalid, P. (2019). Perubahan iklim terhadap peluang kejadian bencana hidrometeorologi di Daerah Aliran Sungai Batanghari Leko, Sumatra Selatan. *Dalam Prosiding Seminar Nasional Hari Air Dunia*.
- Fibriantika, E., Mujahidin, A., Maryamah, S., & Rasyid, I. (2021). Analysis of water balance conditions as the impact of climate and land-use changes in Kapuas

- Watershed, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 824. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/824/1/012018>.
- Fiedler, S., Crueger, T., D'Agostino, R., Peters, K., Becker, T., Leutwyler, D., Paccini, L., Burdanowitz, J., Buehler, S., Cortes, A., Dauhut, T., Dommeneget, D., Fraedrich, K., Jungandreas, L., Maher, N., Naumann, A., Rugenstein, M., Sakradzija, M., Schmidt, H., Sielmann, F., Stephan, C., Timmreck, C., Zhu, X., & Stevens, B. (2020). Simulated Tropical Precipitation Assessed across Three Major Phases of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). *Monthly Weather Review*. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-19-0404.1>.
- Fowler, H., Lenderink, G., Prein, A., Westra, S., Allan, R., Ban, N., Barbero, R., Berg, P., Blenkinsop, S., Xuan, H., Guerreiro, S., Haerter, J., Kendon, E., Lewis, E., Schaer, C., Sharma, A., Villarini, G., Wasko, C., & Zhang, X. (2021). Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2, 107 - 122. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6>.
- Fujimori, S., Hasegawa, T., Masui, T., Takahashi, K., Herran, D., Dai, H., Hijioka, Y., & Kainuma, M. (2017). SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change-human and Policy Dimensions*, 42, 268-283.
- <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.009>.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations—A New Environmental Record for Monitoring Extremes. *Scientific Data*, 2. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.
- Gimeno, L., Sorí, R., Vazquez, M., Stojanovic, M., Algarra, I., Eiras-Barca, J., ... & Nieto, R. (2022). Extreme precipitation events. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 9(6), e1611.
- Global Forest Watch. (2021). Primary forest loss in West Kalimantan, Indonesia (2002–2020). *World Resources Institute*. <https://www.globalforestwatch.org/>

- Goewin, F., Soeryamassoeka, S., & Yulianto, E. (2024). Influence of land use change on the magnitude of the runoff coefficient in the Upper Kapuas River Basin. *Jurnal Teknik Sipil*, 24(1). <https://doi.org/10.26418/jts.v24i1.75238>
- Gultom, B. J. B., Jati, D. R., & Andi, A. (2020). Komparasi adaptasi bencana banjir di kawasan waterfront Sungai Kapuas (Pontianak) dan Sungai Kakap. *Jurnal Pengembangan Kota*, 8(1), 12–22. <https://doi.org/10.14710/jpk.8.1.12-22>
- Hallegatte, S., Rentschler, J., & Rozenberg, J. (2019). *Lifelines: The resilience of infrastructure systems*. World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1430-3>
- Handayani, K., Filatova, T., & Krozer, Y. (2019). The vulnerability of the power sector to climate variability and change: Evidence from Indonesia. *Energies*, 12(19), 3640. <https://doi.org/10.3390/en12193640>
- Handoko, R. (2019). *Perubahan iklim dan dampaknya terhadap sistem hidrologi*. IPB Press.
- Hariyanto, T., Nurwatik, N., & Ramandany, V. (2023). Analysis of flood-vulnerable areas using scoring and weighting methods based on geographic information systems (Case study: Sidoarjo Regency). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1276(1), 012074. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1276/1/012074>
- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H., & Kanae, S. (2013). *Global flood risk under climate change*. *Nature Climate Change*, 3(9), 816–821. <https://doi.org/10.1038/nclimate1911>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation (SREX)*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/srex/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- International Energy Agency (IEA). (2017). *Energy Access Outlook 2017: From Poverty to Prosperity*
- Johnston, P. C., Gomez, J. F., & Laplante, B. (2012). *Climate risk and adaptation in the electric power sector*. Asian Development Bank.

<https://www.adb.org/publications/climate-risk-and-adaptation-electric-power-sector>

IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis (AR6 WG I)*. Cambridge University Press.

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Chapter 11, pp. 11-26–11-28, 11-47, 11-53.

IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press.

Irawan, D., & Mulki, G. Z. (2016). *Analisa kawasan rawan banjir Kota Sintang menggunakan sistem informasi geografi*. Universitas Tanjungpura.

Karagiannis, G. M., Turksezer, Z. I., Alfieri, L., Feyen, L., & Krausmann, E. (2017). Climate change and critical infrastructure: Floods. *JRC Science for Policy Report. European Commission*. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/>

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2013, January 28). *Kerugian karena listrik padam saat banjir*. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/news-archives/kerugian-karena-listrik-padam-saat-banjir>

Kendon, E. J., et al. (2017). Do convection-permitting models improve projections of future rainfall change? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1), 79–93. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/98/1/bams-d-1500089.1.xml>

Kriegler, E., Bauer, N., Popp, A., Humpenöder, F., Leimbach, M., Strefler, J., Baumstark, L., Bodirsky, B., Hilaire, J., Klein, D., Mouratiadou, I., Weindl, I., Bertram, C., Dietrich, J., Luderer, G., Pehl, M., Pietzcker, R., Piontek, F., Lotze-Campen, H., Biewald, A., Bonsch, M., Giannousakis, A., Kreidenweis, U., Müller, C., Rolinski, S., Schultes, A., Schwanitz, J., Stevanović, M., Calvin, K., Emmerling, J., Fujimori, S., & Edenhofer, O. (2017). Fossil-fueled development (SSP5): An energy and resource intensive scenario for the 21st century. *Global Environmental Change-human and Policy Dimensions*, 42, 297-315. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.015>.

- Kurttila, M., Pesonen, M., Kangas, J., & Kajanus, M. (2000). Utilizing the analytic hierarchy process (AHP) in SWOT analysis—A hybrid method and its application to a forest-certification case. *Forest Policy and Economics*, 1(1), 41–52. [https://doi.org/10.1016/S1389-9341\(99\)00004-0](https://doi.org/10.1016/S1389-9341(99)00004-0)
- Kwasinski, A., Weaver, W. W., Chapman, P. L., & Krein, P. T. (2016). Telecommunications power plant damage assessment for hurricane events. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31(3), 1197–1205. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2501483>
- Li, Y., Gao, H., Panteli, M., & Mancarella, P. (2022). Planning resilient power systems under climate change: A review of methods and frameworks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112132. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112132>
- Maraun, D. (2016). Bias Correcting Climate Change Simulations - a Critical Review. *Current Climate Change Reports*, 2, 211-220. <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0050-x>.
- Maraun, D., Shepherd, T., Widmann, M., Zappa, G., Walton, D., Gutiérrez, J., Hagemann, S., Richter, I., Soares, P., Hall, A., & Mearns, L. (2017). Towards process-informed bias correction of climate change simulations. *Nature Climate Change*, 7, 664-773. <https://doi.org/10.1038/nclimate3418>.
- Maraun, D., Widmann, M., Gutiérrez, J. M., Kotlarski, S., Chandler, R. E., Hertig, E., ... Thiele-Eich, I. (2017). Towards process-informed bias correction of climate change simulations. *Reviews of Geophysics*, 55(4), 965–1006. <https://doi.org/10.1002/2016RG000528>
- Marhaini, M., Mardwita, M., & Suranda, A. (2022). Analisa Efesiensi Bahan Bakar Dan Dampak Lingkungan Emisi Gas Buang Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (Pltd) Terhadap Pembangkit Listrik Mesin Gas (PLTMG). *Jurnal Surya Energy*. <https://doi.org/10.32502/jse.v6i2.4215>.
- Marqusee, J., & Jenkins, J. D. (2020). *Power System Decarbonization Requires Transmission Expansion*. *Energy Policy*, 147, 111959. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111959>
- Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J.-F., Matsumoto, K., Montzka, S. A., Raper, S. C. B., Riahi, K.,

- Thomson, A., Velders, G. J. M., & van Vuuren, D. P. (2011). The RCP Greenhouse Gas Concentrations And Their Extensions From 1765 To 2300. *Climatic Change*, 109(1–2), 213–241. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>
- Mitra, J., Vallem, M. R., & Singh, C. (2022). Grid resilience: A comprehensive review of smart grid approaches for extreme events. *IEEE Access*, 10, 31562–31580. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3154756>
- Muzdalifah. (2023). Strategi adaptasi pasca bencana banjir di Kabupaten Barito Kuala, Kalimantan Selatan. *Dalam Prosiding Seminar Nasional Lingkungan Lahan Basah* (Vol. 8, hlm. 99–105).
- National Aeronautics and Space Administration. (2023). *Effects of climate change. NASA Global Climate Change*. <https://climate.nasa.gov/effects/>
- Network for Greening the Financial System. (2023). *NGFS climate scenarios for central banks and supervisors: Phase IV. NGFS*. <https://www.ngfs.net/en/ngfs-climate-scenarios-phase-iv>
- Novianti, W., & Jiu, C. K. (2024). Banjir Kabupaten Sintang Tahun 2021: Fakta dan dampaknya serta kebijakan mitigasi bencana. *Journal of Educational Innovation and Public Health*, 2(2), 101–115. <https://doi.org/10.55606/innovation.v2i2.2853>
- Nurlatifah, A., Hatmaja, R. B., & Rakhman, A. A. (2023). *Analisis potensi kejadian curah hujan ekstrem di masa mendatang sebagai dampak dari perubahan iklim di Pulau Jawa berbasis model iklim regional CCAM*. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(4), 980–986. <https://doi.org/10.14710/jil.21.4.980-986>
- Olii, A., Monoarfa, A., & Kurniawan, R. (2021). *Flood hazard mapping using GIS-based multi-criteria analysis in tropical watershed*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 921(1), 012037. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/921/1/012037>
- Fricko, O., Havlík, P., Rogelj, J., Klimont, Z., Gusti, M., Johnson, N., Kolp, P., Strubegger, M., Valin, H., Amann, M., Ermolieva, T., Forsell, N., Herrero, M., Heyes, C., Kindermann, G., Krey, V., McCollum, D. L., Obersteiner, M., Pachauri, S., Rao, S., Schmid, E., Schoepp, W., & Riahi, K. (2017). *The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road*

scenario for the 21st century. Global Environmental Change, 42, 251–267.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.004>

O'Neill, B., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K., Hallegatte, S., Carter, T., Mathur, R., & Vuuren, D. (2014). *A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways*. *Climatic Change*, 122, 387–400.
<https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>.

Panguriseng, D., Mahmuddin, M., & Kuba, M. S. S. (2024). *Perubahan iklim dan risiko bencana banjir dalam kondisi eksisting drainase kota yang tidak berkelanjutan*. *Jurnal Ilmiah Ecosystem*, 24(3), 417–427.
<https://doi.org/10.35965/eco.v24i3.5400>

Panteli, M., & Mancarella, P. (2015). *Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies*. *Electric Power Systems Research*, 127, 259–270.
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.06.012>

Panteli, M., & Mancarella, P. (2015). *The grid: Stronger, bigger, smarter? Presenting a conceptual framework of power system resilience*. *Electric Power Systems Research*, 127, 259–270. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.06.007>

Panteli, M., Pickering, C., Wilkinson, S., Dawson, R., & Mancarella, P. (2017). *Power system resilience to extreme weather: Fragility modelling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures*. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(5), 3747–3757. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2641463>

Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). *Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633–1644. <https://hess.copernicus.org/articles/11/1633/2007/>

Peng, L., & Li, Z. (2021). *Ensemble flood risk assessment in the Yangtze River Economic Belt under CMIP6 SSP–RCP scenarios*. *Sustainability*, 13(21), 12097. <https://doi.org/10.3390/su132112097>

Pesonnen, H.-L., & Horn, S. (2014). *Evaluating the sustainability SWOT as a strategic tool for environmental policy*. *Journal of Environmental Management*, 138, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.02.017>

- Pratama, A. Y., Kusnandar, D., & Debataraja, N. N. (2017). Analisis dampak kenaikan muka air laut di Kabupaten Kubu Raya dan Kabupaten Mempawah dengan metode analytical hierarchy process (AHP). *Buletin Ilmiah Matematika, Statistika, dan Terapannya (Bimaster)*, 6(3).
- Pratama, R., Nugroho, S. P., & Hidayat, A. (2017). *Penerapan metode analytic hierarchy process (AHP) dalam pengambilan keputusan berbasis multikriteria*. *Jurnal Teknik Industri*, 18(2), 95–104.
- PT PLN (Persero). (2021). *Rencana usaha penyediaan tenaga listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021–2030*. PT PLN (Persero).
- Purwanto, A., Rustam, R., Andrasmoro, D., & Eviliyanto, E. (2022). *Flood risk mapping using GIS and multi-criteria analysis at Nanga Pinoh West Kalimantan area*. *Indonesian Journal of Geography*, 54(3), 463–470. <https://doi.org/10.22146/ijg.69879>
- Putra, A., Ekaputra, E., & Rasyidin, A. (2021). *Analysis Of Water Resources Sustainability in the Batang Kurangi Basin, Padang with The Nedbør Afstrømnings Model (NAM)*. *Procedia of Engineering and Life Science*. <https://doi.org/10.21070/pels.v1i2.959>.
- Putra, P. B., Auliyani, D., & Adi, R. N. (2022). Sintang Regency flood analysis of 2021. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1109(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1109/1/012020>
- Rahayu, S., et al. (2019). *Karakteristik hidrologi dan banjir dataran rendah di DAS Kapuas*. *Jurnal Sumber Daya Air*, 15(2), 85–98.
- Rakuasa, H., Helwend, J. K., & Sihasale, D. A. (2022). Pemetaan daerah rawan banjir di Kota Ambon menggunakan sistem informasi geografis. *Jurnal Geografi: Media Informasi Pengembangan dan Profesi Kegeografin*, 19(2), 73–82. <https://doi.org/10.15294/jg.v19i2.34240>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., Samir, K. C., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling (2017). *The Shared Socioeconomic Pathways And Their Energy, Land Use, And Greenhouse Gas Emissions Implications: An Overview*. *Global Environmental Change*, 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>

- Rose, A., Krausmann, E., & Wei, D. (2018). *Economic impacts of electricity outages caused by natural disasters*. *Energy Policy*, 118, 136–145. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.03.041>
- Rwanita, A. D., & Husnayain, F. (2025). *Techno-economic analysis of hybrid PLTD-PV-BESS rental pricing in West Kalimantan*. *International Journal of Electrical, Energy and Power System Engineering*, 8(2), 233–247. <https://doi.org/10.31258/ijepse.8.2.233-247>
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Saaty, T. L. (2008). *Decision making with the analytic hierarchy process*. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Sadeghi, M., Panteli, M., & Mancarella, P. (2023). *Climate-informed risk-based planning of power systems under extreme weather events*. *Electric Power Systems Research*, 216, 109041. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.109041>
- Sampurno, J., Ardianto, R., & Hanert, E. (2022). *Integrated machine learning and GIS-based bathtub models to assess the future flood risk in the Kapuas River Delta, Indonesia*. *Journal of Hydroinformatics*. <https://doi.org/10.2166/hydro.2022.106>
- Schaeffer, R., Szklo, A. S., Pereira de Lucena, A. F., Borba, B. S. M. C., Nogueira, L. P. P., Fleming, F. P., Troccoli, A., Harrison, M., & Boulahya, M. S. (2012). *Energy sector vulnerability to climate change: A review*. *Energy*, 38(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.056>
- Scoccimarro, E., & Gualdi, S. (2020). *Heavy Daily Precipitation Events in the CMIP6 Worst-Case Scenario: Projected Twenty-First-Century Changes*. *Journal of Climate*. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0940.1>.
- Seprianto, M., Anggo, M., Surdin, S., Harudu, L., & Aldiansyah, S. (2024). *Pemetaan daerah potensi rawan banjir menggunakan metode overlay*. *Jurnal Penelitian Pendidikan Geografi*, 9(4), 214–223.
- Sihombing, R. (2025). *Feasibility analysis of diesel power plant operations (PLTD)*. Laporan studi kelayakan, PT PLN (Persero).

- Sovacool, B. K., Martiskainen, M., Hook, A., & Baker, L. (2020). *Decarbonization and its discontents: A critical energy justice perspective on four low-carbon transitions.* *Climatic Change*, 160(4), 581–600.
<https://doi.org/10.1007/s10584-020-02721-7>
- Stofkova, J. (2022). *Use of the analytic hierarchy process and selected decision-making methods for sustainability assessment.* *Sustainability*, 14(18), 11546.
<https://doi.org/10.3390/su141811546>
- Sun, Q., Miao, C., & Duan, Q. (2022). *Extreme precipitation changes under global warming.* *Journal of Climate*, 35, 1–20.
- Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S., & Hsu, K.-L. (2022). A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons. *Atmospheric Research*, 270, 106057.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106057>
- Supari, F., Tangang, F. T., Liew, J., & Aldrian, E. (2016). *Observed changes in extreme temperature and precipitation over Indonesia.* *International Journal of Climatology*, 36(13), 4206–4220. <https://doi.org/10.1002/joc.4659>
- Surana, K., & Jordaan, S. (2019). *The climate mitigation opportunity behind global power transmission and distribution.* *Nature Climate Change*, 9, 660 - 665.
- Suryanto, J., Amprin, & Anisum. (2021). *Validasi curah hujan harian CHIRPS precipitation satellite product di Provinsi Kalimantan Barat.* *Jurnal Ilmiah Rekayasa Pertanian dan Biosistem*, 11(1), 73–88.
<https://doi.org/10.29303/jrp.v11i1.442>
- Tabari, H. (2020). *Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability.* *Scientific Reports*, 10, 13768.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>
- Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2017). *Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS.* *Journal of Hydrology*, 554, 110–122.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.08.056>

- Teutschbein, C., & Seibert, J. (2012). *Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 1527–1544.
<https://hess.copernicus.org/articles/16/1527/2012/>
- Thrasher, B., Maurer, E. P., McKellar, C., & Duffy, P. B. (2022). Bias-corrected climate projections suitable for resource management. *Earth System Science Data*, 14(5), 2225–2247. <https://doi.org/10.5194/essd-14-2225-2022>
- Toté, C., Patricio, D., Boogaard, H., Van der Wijngaart, R., Tarnavsky, E., & Funk, C. (2015). *Evaluation of satellite rainfall estimates for drought and flood monitoring in Mozambique*. *Remote Sensing*, 7(2), 1758–1776.
<https://doi.org/10.3390/rs70201758>
- Trenberth, K. E., et al. (2011). *Changes in precipitation with climate change*. *Climate Research*, 47, 123–138.
- United Nations Environment Programme Finance Initiative. (2024). *Climate risks in the power generation sector*. <https://www.unepfi.org/wordpress/wp-content/uploads/2024/05/Climate-Risks-in-the-Power-Generation-Sector-1.pdf>
- van Vuuren, D. P., & Carter, T. R. (2014). *Climate and socio-economic scenarios for climate change research and assessment: Reconciling the new scenario framework with RCPs and SSPs*. *Climatic Change*, 122(3), 415–429.
<https://doi.org/10.1007/s10584-013-0974-2>
- Ventosa, M., Baíllo, Á., Ramos, A., & Rivier, M. (2005). *Electricity market modeling trends*. *Energy Policy*, 33(7), 897–913.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.013>
- Vij, S., Biesbroek, R., Groot, A., & Termeer, C. (2017). *Changing climate policy paradigms in Bangladesh and Nepal*. *Environmental Science & Policy*, 70, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.12.010>
- Wang, B., Biasutti, M., Byrne, M. P., Castro, C., Chang, C. P., Cook, K., ... & Zhou, T. (2021). *Monsoons climate change assessment*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(1), E1-E19.
- Wang, H., et al. (2023). *Transmission expansion and carbon emission reduction in power systems with high renewable penetration*. *Applied Energy*, 341, 120834.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120834>

- Wang, Y., Hong, H., Li, S., Pamucar, D., Gigović, L., Drobnjak, S., Bui, D., & Duan, H. (2018). *A Hybrid GIS Multi-Criteria Decision-Making Method for Flood Susceptibility Mapping at Shangyou, China*. *Remote. Sens.*, 11, 62. <https://doi.org/10.3390/rs11010062>.
- Ward, P. J., Daniell, J. E., Duncan, M. J., & Jongman, B. (2021). *Flood risk management and adaptation under climate change: Protecting critical infrastructure*. *Nature Climate Change*, 11(6), 501–508. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01030-5>
- Westra, S., et al. (2014). *Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall*. *Reviews of Geophysics*, 52(3), 522–555.
- Wells, J. A., Wilson, K. A., Abram, N. K., Nunn, M., Gaveau, D. L. A., Runting, R. K., Tarniati, N., Mengersen, K. L., & Meijaard, E. (2016). Rising floodwaters: Mapping impacts and perceptions of flooding in Indonesian Borneo. *Environmental Research Letters*, 11(6), 064016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/6/064016>
- Williams, J. C., Brown, G. G., & Hancock, K. L. (2021). *Post-disaster restoration planning for electric power systems considering outage costs and recovery priorities*. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(5), 4301–4312. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3069824>
- Wida Novianti, & Cau Kim Jiu. (2024). *Banjir Kabupaten Sintang Tahun 2021: Fakta dan dampaknya serta kebijakan mitigasi bencana*. *Journal of Educational Innovation and Public Health*, 2(2), 101–115. <https://doi.org/10.55606/innovation.v2i2.2853>
- Winkler, J., Duenas-Osorio, L., Stein, R., & Subramanian, D. (2022). *Climate change and electric power system resilience: Trends, vulnerabilities, and adaptation options*. *Energy Research & Social Science*, 84, 102389. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102389>
- Winarso, P. A., & Shanas, S. P. (2017). *Atmospheric study of the impact of cold surges and Borneo vortex over Western Indonesia Maritime Continent Area*. *Journal of Climatology & Weather Forecasting*, 5(1), 1–6.
- World Resources Institute. (2021). *Indonesia disaster management reference handbook*. World Resources Institute.

- World Bank. (2021). *Climate risk country profile: Indonesia*. World Bank Group.
<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/indonesia>
- Wu, Y., Yin, X., Zhou, G., Bruijnzeel, L., Dai, A., Wang, F., Gentine, P., Zhang, G., Song, Y., & Zhou, D. (2024). *Rising rainfall intensity induces spatially divergent hydrological changes within a large river basin*. *Nature Communications*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44562-8>.
- Yasa, I. G. A. (2025). *Analisa supply–demand microgrid sistem pada pembangkit listrik hibrida*. *Laporan studi teknis*, PT PLN (Persero).
<https://doi.org/10.1038/s41558-019-0544-3>.
- Yassar, M. F., Nurul, M., Nadhifah, N., Sekarsari, N. F., Dewi, R., Buana, R., Fernandez, S. N., & Rahmadhita, K. A. (2020). *Penerapan weighted overlay pada pemetaan tingkat probabilitas zona rawan longsor di Kabupaten Sumedang, Jawa Barat*. *Jurnal Geosains dan Remote Sensing*, 1(1), 1–10. <https://doi.org/10.23960/jgrs.2020.v1i1.13>
- Yogasara, A., Maulana, R., & Adi, T. W. (2025). *Analisis teknis dan keekonomian sistem hibrida pada pelayanan kelistrikan Pulau Rhun*. *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, 11(3), 201–206. <https://doi.org/10.33795/elposys.v11i3.6289>
- Zahra, F. A., & Hermana, J. (2024). *Inundation prediction as the effect of rising mean sea level and high astronomical tide in North Jakarta based on 2013–2021 tidal data*. *Devotion: Journal of Research and Community Service*, 5(7), 850–857. <https://doi.org/10.59188/devotion.v5i7.761>
- Zhang, X., Panteli, M., Mancarella, P., & Wang, Z. (2024). *Enhancing transmission system resilience against extreme weather through real-time monitoring and redundancy strategies*. *Electric Power Systems Research*, 226, 109963. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109963>
- Zhang, Y., Huang, G., Wang, X., & Liu, Y. (2019). *Climate change impacts on power system reliability: A review of extreme weather effects on transmission networks*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 95–109. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.017>

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIOGRAFI PENULIS

Khotimah Ratna Indradjanue, S.T., lahir di Jakarta pada tanggal 30 April 1993. Penulis menyelesaikan menyelesaikan jenjang sekolah dasar sampai dengan sekolah menengah atas di Kota Jakarta; 1999 – 2005 di SD Islam Darunnajah, 2005 – 2008 di MTs 13 Jakarta, 2008 – 2011 di SMA Negeri 47 Jakarta, kemudian melanjutkan pendidikan ke jenjang sarjana di Jurusan Teknik Lingkungan, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Universitas Indonesia dan lulus pada tahun 2015 dengan penelitian mengenai polusi udara dari aktivitas *Batching Plant*.

Penulis memulai karirnya pada tahun 2015 sebagai asisten tenaga ahli bidang lingkungan yang merencanakan sistem pengelolaan sampah, air dan drainase untuk daerah 3T. Pada tahun 2019, Penulis bekerja di PT PLN (Persero) sebagai *Assisstant Engineer K3 Kam* pada Sub Biro K3L Kam di PLN UIP Kalbagteng. Pada tahun 2021, Penulis mutasi ke PLN UIP Kalbagbar sebagai *Assisstant Engineer K3 Kam*. Pada tahun 2023. Penulis mendapatkan amanah sebagai *Officer Lingkungan* di unit yang sama dan juga berkesempatan untuk melanjutkan pendidikan S2 di Departemen Teknik Lingkungan ITS dalam Program Belajar Jarak Jauh (PBJJ) Kerjasama PT PLN (Persero) dan ITS.

Penulis aktif sebagai anggota penulisan standarisasi PT PLN (Persero) terkait K3 Transmisi, dengan standar yang sudah diterbitkan yaitu SPLN U2.009-1: 2024 K3 Transmisi Bagian 1: Gardu Induk dan SPLN U2.009-2: 2025 K3 Transmisi Bagian 2: Pelaksanaan Pekerjaan. Penulis juga aktif sebagai anggota Komite Sustainability di PLN UIP Kalbagbar. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik pada ratna.indradjanue@gmail.com