



Kementerian PPN/  
Bappenas



Australian Government

KAJIAN

# INFRASTRUKTUR BERKETAHANAN IKLIM DI INDONESIA

2026

**KIAT**

KEMITRAAN INDONESIA AUSTRALIA  
UNTUK INFRASTRUKTUR

Kajian "Infrastruktur Berketahanan Iklim di Indonesia" ini didukung oleh Kemitraan Indonesia Australia untuk Infrastruktur (KIAT), yang didanai oleh Pemerintah Australia.

---

KAJIAN

---

# **INFRASTRUKTUR BERKETAHANAN IKLIM DI INDONESIA**

---



**BAPPENAS**

Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional/  
Badan Perencanaan Pembangunan Nasional

# TIM PENYUSUN

## Pengarah

**Leonardo A. A. T. Sambodo**

Deputi Bidang Pangan, Sumber Daya Alam,  
dan Lingkungan Hidup  
Kementerian PPN/Bappenas

## Penanggungjawab

**Nizhar Marizi**

Direktur Lingkungan Hidup  
Kementerian PPN/Bappenas

## Tim Editor

Irfan Darliazi Yananto

## Tim Penulis

Frank Thomalla

Saut Sagala

Nicholas Hudson

Putra Dwitama

Andi Syahputra

Litany Meliala

Nurul Rusdayanti

Ridcho Andrian

## Tim Peneliti Teknis

Data61, Commonwealth Scientific and  
Industrial Research Organisation (CSIRO)  
Australia's National Science Agency



**Kementerian PPN/  
Bappenas**

*Bekerja sama dengan*

**KIAT**

KEMITRAAN INDONESIA AUSTRALIA  
UNTUK INFRASTRUKTUR

# DAFTAR ISI

<b>Tim Penyusun</b> .....	<b>ii</b>
<b>Kata Pengantar</b> .....	<b>vii</b>
<b>Ringkasan eksekutif</b> .....	<b>ix</b>
<b>Daftar singkatan</b> .....	<b>xi</b>
<b>Glosarium Istilah</b> .....	<b>xvii</b>
<b>1. Pendahuluan</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tujuan .....	1
1.2 Metodologi.....	1
<b>2. Memahami Infrastruktur Berketahanan iklim</b> .....	<b>5</b>
2.1 Bagaimana perubahan iklim memengaruhi infrastruktur? .....	5
2.2 Langkah-langkah untuk mengurangi risiko iklim terhadap infrastruktur .....	7
2.3 Prinsip-prinsip infrastruktur berketahanan iklim.....	8
2.4 Meningkatnya fokus global terhadap Infrastruktur Berketahanan Iklim .....	9
2.5 Mengintegrasikan Kebijakan Berketahanan Iklim di seluruh siklus hidup infrastruktur .....	10
<b>3. Dampak iklim terhadap infrastruktur Indonesia</b> .....	<b>15</b>
3.1 Perubahan iklim di Indonesia .....	15
3.2 Konteks bahaya alam di Indonesia .....	18
3.3 Risiko iklim dan respons pada sektor-sektor infrastruktur utama di Indonesia .....	19
3.3.1 Transportasi.....	19
3.3.2 Air dan sanitasi.....	21
3.3.3 Energi .....	22
<b>4. Potensi biaya dampak perubahan iklim pada infrastruktur</b> .....	<b>25</b>
4.1 Lingkup penilaian risiko .....	25
4.1.1 Fokus sektoral .....	26
4.1.2 Jenis-jenis bahaya yang dikaji.....	27
4.1.3 Model iklim dan skenario yang digunakan.....	27
4.1.4 Perkiraan biaya ekonomi .....	28
4.1.5 Periode waktu yang dijadikan model .....	29
4.2 Hasil penilaian risiko .....	29
4.2.1 Perubahan kerugian berdasarkan sektor .....	29
4.2.2 Dampak berbagai jenis bahaya .....	32
4.2.3 Variasi regional dampak iklim .....	34
4.2.4 Dampak yang berbeda terhadap kelompok rentan .....	36
4.3 Temuan utama dari penilaian risiko .....	38
4.4 Keterbatasan dan area untuk penelitian lanjutan .....	39

<b>5. Pendanaan dan pembiayaan Infrastruktur Berketahanan Iklim .....</b>	<b>41</b>
5.1 Tantangan pendanaan dan pembiayaan infrastruktur berketahanan iklim .....	41
5.2 Instrumen pendanaan dan pembiayaan Infrastruktur Berketahanan Iklim (CRI) saat ini.....	43
5.2.1 Instrumen Pembiayaan Publik Berbasis Keberlanjutan: <i>Green Sukuk</i> .....	43
5.2.2 Mekanisme pembiayaan risiko dan ketahanan .....	44
5.2.3 Pembiayaan iklim internasional dan kerja sama bilateral.....	44
6.3 Mengukur manfaat ketahanan untuk menarik pembiayaan iklim dan mendorong kemajuan .....	45
5.4 Mobilisasi investasi pemerintah .....	46
5.4.1 Pendanaan ketahanan khusus.....	46
5.4.2 Hibah berbasis kinerja .....	47
5.5 Mobilisasi investasi sektor swasta .....	47
5.6 Mobilisasi investasi BUMN.....	50
<b>6. Peluang untuk memperkuat Infrastruktur Berketahanan iklim (CRI) di Indonesia .....</b>	<b>53</b>
6.1 Meningkatkan efektivitas model tata kelola bersama.....	54
6.2 Meningkatkan peran risiko iklim dalam perencanaan pembangunan dan tata ruang.....	54
6.3 Penguatan penilaian risiko pada tingkat proyek.....	55
6.4 Meningkatkan standar pemeliharaan aset dan investasi.....	55
6.5 Meningkatkan kualitas dan akses terhadap data iklim dan bencana .....	56
6.6 Memperkuat pendanaan dan pembiayaan.....	56
<b>Lampiran Teknis: Penilaian risiko.....</b>	<b>60</b>
<b>Referensi .....</b>	<b>67</b>

# DAFTAR GAMBAR

Gambar 1:	Arah penguatan Infrastruktur Berketahanan Iklim (CRI) di Indonesia.....	x
Gambar 2:	Masukan bagi studi mengenai infrastruktur berketahanan iklim ini.....	1
Gambar 3:	Prinsip-prinsip Infrastruktur Berketahanan iklim .....	10
Gambar 4:	Langkah-langkah untuk Mengintegrasikan Kebijakan Berketahanan Iklim sepanjang siklus hidup infrastruktur .....	12
Gambar 5:	Perubahan jumlah hari per tahun dengan Indeks Panas >35°C, 1986–2005 hingga 2080–2099.....	15
Gambar 6:	Kenaikan muka air laut di Indonesia, 1992–2020.....	16
Gambar 7:	Jumlah bencana yang tercatat akibat bahaya alam di Indonesia pada 2019 .....	18
Gambar 8:	Kejadian bencana meteorologi, hidrologi, dan klimatologi di Indonesia, 1990–2020 .....	19
Gambar 9:	Strategi mitigasi banjir pada MRT Jakarta .....	20
Gambar 10:	Meninggikan pipa air untuk mengurangi risiko iklim.....	21
Gambar 11:	Peta Proyek Penyeberangan Transmisi Listrik Jawa–Bali .....	22
Gambar 12:	Lingkup penilaian risiko yang dilakukan untuk infrastruktur di Indonesia .....	26
Gambar 13:	Kerugian tahunan rata-rata akibat bahaya iklim berdasarkan sektor (2025, dalam triliun rupiah) .....	30
Gambar 14:	Kerugian tahunan sektor transportasi pada kondisi saat ini berdasarkan subsektor (2025, dalam triliun rupiah) .....	31
Gambar 15:	Kerugian tahunan di sektor transportasi berdasarkan subsektor untuk seluruh periode waktu (2025, dalam triliun rupiah) .....	31
Gambar 16:	Kerugian tahunan rata-rata akibat bahaya iklim berdasarkan sektor dalam interval lima tahunan (2025, dalam triliun rupiah) .....	32
Gambar 17:	Perubahan kerugian berdasarkan jenis bahaya iklim (2025, dalam triliun rupiah) .....	33
Gambar 18:	Proporsi kerugian akibat bahaya iklim berdasarkan sektor pada periode 2040-an (Persentase) .....	34
Gambar 19:	Perubahan kerugian sektor transportasi dari kondisi saat ini hingga periode 2040-an berdasarkan provinsi .....	35
Gambar 20:	Perubahan kerugian sektor ketenagalistrikan dari kondisi saat ini hingga periode 2040-an berdasarkan provinsi .....	36
Gambar 21:	Hubungan antara peningkatan kerugian sektor transportasi dan tingkat pembangunan manusia .....	37
Gambar 22:	Ilustrasi dampak ketahanan iklim terhadap arus kas proyek.....	49
Gambar 23:	Arah penguatan Infrastruktur Berketahanan iklim (CRI) di Indonesia.....	53

## DAFTAR TABEL

Tabel 1:	Dampak ilustratif dari sejumlah bahaya iklim pada beberapa sektor infrastruktur .....	6
Tabel 2:	Tingkat kemunculan rujukan adaptasi perubahan iklim dalam Buku KPBU .....	48

## DAFTAR KOTAK

Kotak 1:	Penilaian risiko Iklim Nasional Australia dan Rencana Adaptasi Nasional .....	27
----------	---	----



## KATA PENGANTAR

Deputi Bidang Pangan,  
Sumber Daya Alam, dan  
Lingkungan Hidup

Indonesia sebagai negara kepulauan menghadapi tantangan iklim yang semakin besar dan kompleks. Dampak perubahan iklim telah dirasakan secara nyata melalui meningkatnya frekuensi dan intensitas kejadian ekstrem seperti banjir dan kekeringan, serta perubahan jangka panjang berupa kenaikan permukaan laut, perubahan pola curah hujan, dan peningkatan suhu. Bahaya dampak perubahan iklim akan menimbulkan ancaman serius bagi sistem infrastruktur. Kejadian iklim akut maupun kronis berpotensi merusak infrastruktur penting dan mengganggu layanan esensial yang menopang kehidupan masyarakat, serta mengakibatkan kerugian ekonomi yang signifikan serta dampak sosial yang luas. Oleh karena itu, penguatan ketahanan infrastruktur terhadap risiko iklim menjadi prasyarat penting untuk menjaga keberlanjutan pelayanan publik, melindungi capaian pembangunan, dan memastikan kemakmuran nasional tetap terjaga di tengah ketidakpastian iklim yang terus meningkat.

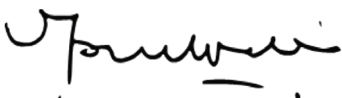
Dalam konteks tersebut, Kementerian PPN/Bappenas memandang penguatan ketahanan iklim sebagai fondasi utama pembangunan nasional ke depan. Melalui Kebijakan Pembangunan Berketahanan Iklim (PBI) atau *Climate Resilience Development* (CRD), Pemerintah Indonesia mengarahkan transformasi pembangunan agar seluruh proses perencanaan, penganggaran, dan pelaksanaan pembangunan secara sistematis mengarusutamakan pengelolaan risiko iklim. PBI telah ditetapkan sebagai bagian integral dari RPJPN 2025–2045 dan juga dalam RPJMN 2025–2029, termasuk melalui prioritas penguatan ketahanan infrastruktur di wilayah dan sektor strategis yang memiliki tingkat risiko iklim tinggi.

Sejalan dengan kerangka PBI tersebut, Studi Infrastruktur Berketahanan Iklim disusun untuk memperkuat basis bukti dalam perumusan kebijakan dan pengambilan keputusan investasi infrastruktur yang responsif terhadap risiko iklim. Studi ini menyajikan penilaian risiko iklim yang komprehensif terhadap sektor-sektor infrastruktur utama di Indonesia dengan mengintegrasikan analisis bahaya iklim, paparan aset, dan potensi kerugian ekonomi. Temuan studi ini menunjukkan bahwa tanpa intervensi adaptasi yang terencana dan terintegrasi, dampak perubahan iklim terhadap infrastruktur berpotensi meningkatkan kerugian ekonomi secara signifikan, serta mengganggu kesinambungan layanan publik dan aktivitas sosial-ekonomi.

Di samping itu, studi ini menganalisis kebijakan dan regulasi, studi kasus, dan pemodelan ekonomi untuk memberikan dasar bukti yang kuat dalam meningkatkan ketahanan infrastruktur Indonesia terhadap risiko iklim, serta menyajikan penilaian risiko iklim pertama untuk infrastruktur Indonesia, dengan wawasan penting tentang kemungkinan distribusi kerugian ekonomi berdasarkan sektor infrastruktur, provinsi, dan jenis bahaya. Temuan tersebut menghasilkan enam arah rekomendasi strategis untuk memajukan infrastruktur berketahanan iklim di Indonesia, disertai dengan berbagai peluang spesifik di seluruh siklus hidup infrastruktur. Secara keseluruhan, rekomendasi ini bertujuan untuk memperkuat kapasitas kelembagaan, meningkatkan proses perencanaan dan desain, meningkatkan ketahanan operasional, dan mengidentifikasi alternatif baru untuk pendanaan dan pembiayaan.

Melalui langkah-langkah ini, Indonesia diharapkan dapat memperkuat sistem infrastrukturnya, melindungi pembangunan sosial-ekonomi, dan mendukung transisi jangka panjang negara menuju masa depan yang tangguh dan berkelanjutan.

Jakarta, Februari 2026



**(Leonardo A. A. T. Sambodo)**

# RINGKASAN EKSEKUTIF

**Perubahan iklim menghadirkan berbagai tantangan mendasar di seluruh aspek kehidupan sosial dan ekonomi, dan infrastruktur juga tidak luput dari dampak tersebut.** Bahkan, karena sifatnya yang fisik serta skala aset yang sering kali besar dan tersebar luas, infrastruktur sangat terpapar terhadap perubahan iklim. Pengembangan infrastruktur berketahanan iklim (*Climate-Resilience Infrastructure/CRI*) dapat mengurangi dampak perubahan iklim terhadap sistem infrastruktur dan akan menjadi bentuk adaptasi perubahan iklim yang sangat krusial.

**Keterpaparan Indonesia yang khas terhadap perubahan iklim serta tingkat risiko bencana yang tinggi saat ini menjadikan infrastruktur berketahanan iklim semakin penting.** Meskipun Indonesia telah memiliki pengalaman dalam pengurangan risiko bencana, perubahan iklim menuntut kita untuk mempertimbangkan risiko-risiko ke depan yang berada di luar cakupan kejadian historis, serta mempertimbangkan perubahan yang lebih lambat dan bertahap seperti kenaikan muka air laut. Setiap sektor infrastruktur menghadapi jenis risiko yang berbeda akibat perubahan iklim, dan perlu menyusun rencana yang berbeda untuk mengelola dampaknya.

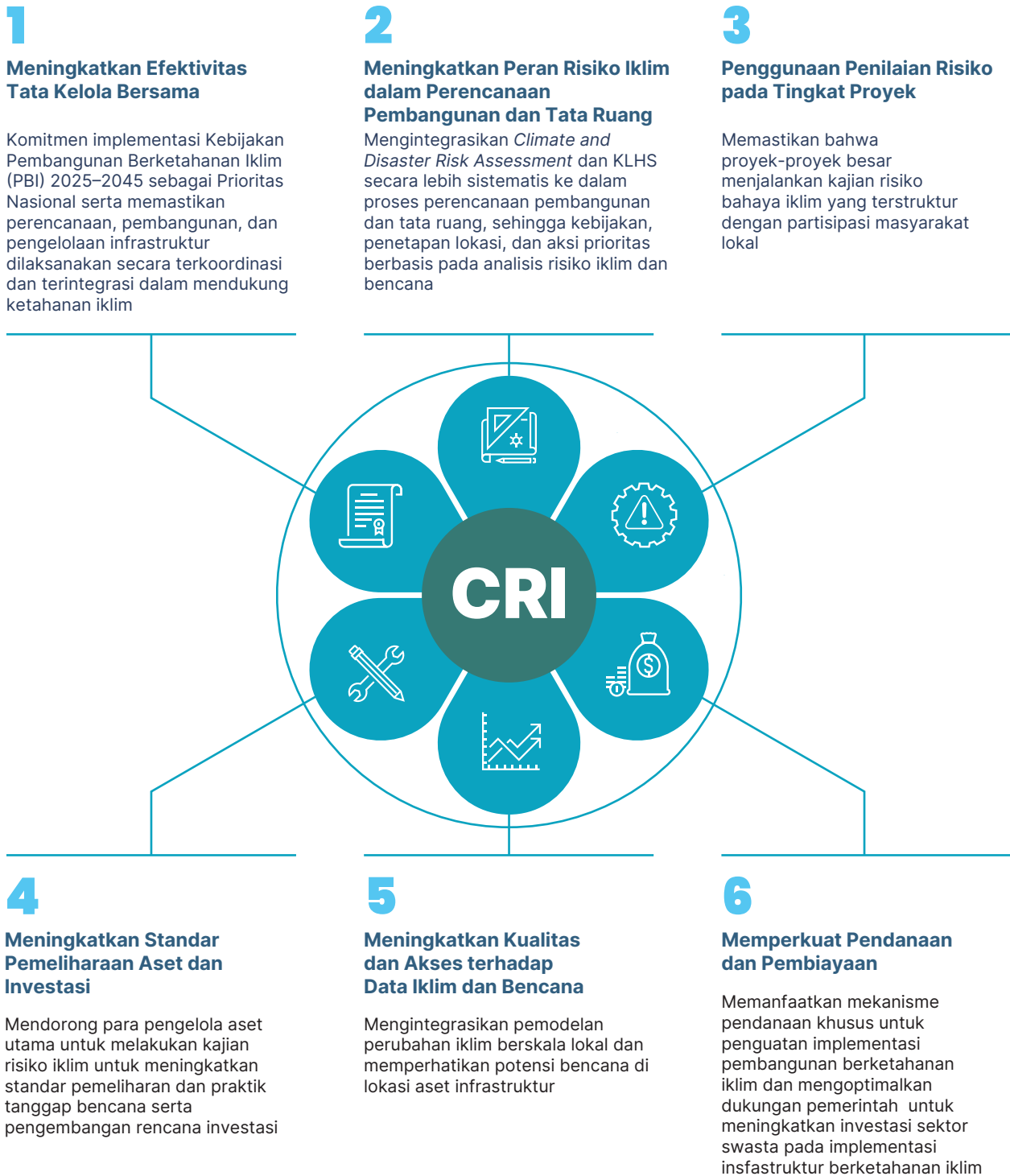
**Kerusakan infrastruktur akibat perubahan iklim merupakan ancaman yang signifikan bagi perekonomian.** Infrastruktur merupakan prasyarat penting bagi kegiatan ekonomi. Perubahan iklim dapat menimbulkan dampak ekonomi langsung berupa biaya untuk memperbaiki kerusakan, serta dampak ekonomi tidak langsung yang lebih luas akibat terganggunya layanan infrastruktur. Suatu penilaian risiko terhadap sektor transportasi, ketenagalistrikan, dan telekomunikasi di Indonesia menemukan bahwa kerugian rata-rata tahunan akibat perubahan iklim dapat meningkat hingga empat kali lipat pada pertengahan 2040-an, yang mencapai IDR135 triliun.

**Indonesia telah mempersiapkan diri menghadapi dampak perubahan iklim, termasuk melalui Kebijakan Pembangunan Berketahanan Iklim (PBI) yang telah menjadi Program Prioritas Nasional pada Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2025 – 2029 dan pada Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional (RPJPN) 2025 -2045.** Namun demikian, masih terdapat kesenjangan di sepanjang siklus hidup infrastruktur dalam transisi menuju sistem yang siap menerapkan infrastruktur berketahanan iklim. Kebijakan dan regulasi yang mendukung infrastruktur berketahanan iklim masih tersebar di berbagai domain, sementara penyiapan proyek serta operasi dan pemeliharaan (O&M) perlu bertransformasi agar lebih mampu merespons risiko iklim dengan lebih baik. Sejumlah sumber data penting relatif mudah diakses, namun data pemodelan iklim dan data kerusakan infrastruktur masih terbatas.

**Pendanaan dan pembiayaan CRI harus bersaing dengan berbagai kebutuhan investasi modal lainnya—baik untuk pembangunan infrastruktur secara lebih luas maupun upaya mitigasi perubahan iklim.** Indonesia telah menggunakan dana hasil penerbitan *Green Sukuk* untuk melakukan pembiayaan kembali proyek-proyek infrastruktur yang memberikan manfaat ketahanan iklim. Peningkatan investasi pada CRI akan memerlukan pemanfaatan instrumen pembiayaan dan insentif yang lebih beragam, khususnya dengan mengoptimalkan peran BUMN serta investasi sektor swasta guna meningkatkan ketahanan infrastruktur.

Kajian ini telah mengidentifikasi enam arah utama untuk meningkatkan CRI di Indonesia, yang masing-masing mencakup serangkaian peluang spesifik. Hal ini mencakup berbagai perbaikan di sepanjang siklus hidup infrastruktur yang akan memungkinkan fokus yang lebih kuat pada ketahanan, termasuk potensi sumber pendanaan dan pembiayaan. Keenam arah utama ini ditampilkan pada Gambar 1 di bawah ini.

GAMBAR 1: ARAH PENGUATAN INFRASTRUKTUR BERKETAHANAN IKLIM (CRI) DI INDONESIA



# DAFTAR SINGKATAN

AAL	<i>Average Annual Loss</i> (Kerugian Tahunan Rata-rata)
ACCCRN	<i>Asian Cities Climate Change Resilience Network</i> (Jaringan Ketahanan Perubahan Iklim Kota-Kota Asia)
ADB	<i>Asian Development Bank</i> (Bank Pembangunan Asia)
ADCOM	<i>Indonesia's Adaptation Communication</i> (Komunikasi Adaptasi Indonesia)
AKSARA	Aksi Pembangunan Rendah Karbon dan Ketahanan Iklim Indonesia
AMDAL	Analisis Manajemen Dampak Lingkungan
APBD	Anggaran Pendapatan dan Belanja Daerah
APBN	Anggaran Pendapatan dan Belanja Negara)
ASEAN	<i>Association of Southeast Asian Nations</i> (Perhimpunan Bangsa-Bangsa Asia Tenggara)
Bappenas	Badan Perencanaan Pembangunan Nasional
BAU	<i>Business as Usual</i> (Praktik seperti Biasa)
BBB	<i>Build Back Better</i> (Membangun Kembali dengan Lebih Baik)
BIM	<i>Building Information Modeling</i> (Pemodelan Informasi Bangunan)
BKF	Badan Kebijakan Fiskal
BLU	Badan Layanan Umum
BMKG	Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika
BNPB	Badan Nasional Penanggulangan Bencana
BPBD	Badan Penanggulangan Bencana Daerah
BPDLH	Badan Pengelola Dana Lingkungan Hidup
BPS	Badan Pusat Statistik
BRIN	Badan Riset dan Inovasi Nasional
BRT	<i>Bus Rapid Transit</i>
CAT	<i>Climate Action Tracker</i>
CBT	<i>Climate Budget Tagging</i> (Penandaan Anggaran Iklim)
CC	<i>Climate Change</i> (Perubahan Iklim)
CCH	<i>Climate Change Hotspot</i> (Kawasan Rawan Perubahan Iklim)
CCKP	<i>Climate Change Knowledge Portal</i> (Portal Pengetahuan Perubahan Iklim)
CDRI	<i>Coalition for Disaster Resilient Infrastructure</i> (Koalisi untuk Infrastruktur Tahan Bencana)
CEWS	<i>Climate Early Warning System</i> (Sistem Peringatan Dini Iklim)

## Daftar singkatan

CICERO	<i>Center for International Climate and Environmental Research</i>
COP	<i>Conference of Parties</i> (Konferensi Para Pihak)
CPI	<i>Climate Policy Initiative</i> (Inisiatif Kebijakan Iklim)
CRA	<i>Climate Risk Assessment</i> (Penilaian Risiko Iklim)
CRD	<i>Climate Resilient Development</i> (Pembangunan Berketahanan Iklim)
CSIRO	<i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization</i>
DFAT	<i>Department of Foreign Affairs and Trade</i> (Departemen Luar Negeri dan Perdagangan Australia)
DJBM	Direktorat Jenderal Bina Marga
DITRDC	<i>Department of Infrastructure, Transport, Regional Development and Communications</i> (Departemen Infrastruktur, Transportasi, Pembangunan Regional, dan Komunikasi Australia)
DRR	<i>Disaster risk reduction</i> (Pengurangan risiko bencana)
EHS	<i>Environment and Human Security</i> (Lingkungan Hidup dan Keamanan Manusia)
EIA	<i>Environmental impact assessment</i> (Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL))
ENSO	<i>El Niño–Southern Oscillation</i> (Osilasi Selatan El Niño)
EOFO	<i>End-of-Facility Outcome</i> (Hasil Akhir Fasilitas)
ESG	<i>Environmental, Social and Governance</i> (kriteria investasi Lingkungan, Sosial, dan Tata Kelola)
FCDO	<i>Foreign, Commonwealth and Development Office</i> (Kantor Luar Negeri, Persemakmuran, dan Pembangunan Inggris)
G20	<i>Group of 20</i> (sebuah forum antarpemerintah yang terdiri atas 19 negara dan Uni Eropa)
GCF	<i>Green Climate Fund</i> (Dana Iklim Hijau)
GCIP	<i>Green Cities and Infrastructure Programme</i> (Program Kota Hijau dan Infrastruktur)
GDI	<i>Gender Development Index</i> (Indeks Pembangunan Gender)
PDB	Produk Domestik Bruto
GDPC	<i>Red Cross Red Crescent Global Disaster Preparedness Centre</i> (Pusat Kesiapsiagaan Bencana Global Palang Merah dan Bulan Sabit Merah)
GFDRR	<i>Global Facility for Disaster Risk Reduction</i> (Fasilitas Global untuk Pengurangan Risiko Bencana)
GGGI	<i>Global Green Growth Institute</i>
GRK	(Emisi) Gas Rumah Kaca
GIRI	<i>Global Infrastructure Risk Model and Resilience Index</i> (Model Risiko dan Indeks Ketahanan Infrastruktur Global)
GIS	<i>Geographic Information System</i> (Sistem Informasi Geografis)
GIZ	<i>Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit</i> (Badan Kerja Sama Internasional Jerman)

Pemerintah RI	Pemerintah Republik Indonesia
PDRB	Produk Domestik Regional Bruto
IPM	Indeks Pembangunan Manusia
HEVA	<i>Hazard, Exposure and Vulnerability Assessment</i> (Kajian Bahaya, Paparan, dan Kerentanan)
HRNA	<i>Human Recovery Needs Assessment</i> (Kajian Kebutuhan Pemulihan Manusia)
IAMCR	<i>Integrated Asset Management and Climate Resilience</i> (Manajemen Aset dan Ketahanan Iklim Terpadu)
IBF	<i>Impact Based Forecasting</i> (Prakiraan Berbasis Dampak)
ICCTF	<i>Indonesia Climate Change Trust Fund</i> (Dana Perwalian Perubahan Iklim Indonesia )
IDMC	<i>Internal Displacement Monitoring Centre</i> (Pusat Pemantauan Pengungsian Internal)
IDR	Rupiah Indonesia
IFF	<i>Infrastructure Funding and Financing</i> (Pendanaan dan Pembiayaan Infrastruktur)
IKN	Ibu Kota Negara
IKP	Indikator Kinerja Program
IKSS	Indikator Kinerja Sasaran Strategis
IKU	indikator kinerja utama
IPB	Institut Pertanian Bogor
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Panel Antarpemerintah tentang Perubahan Iklim)
ITCZ	<i>Inter-Tropical Convergence Zone</i> (Zona Konvergensi Antar-Tropik)
JICA	<i>Japan International Cooperation Agency</i> (Badan Kerja Sama Internasional Jepang)
K/L	Kementerian dan Lembaga
KfW	Bank investasi dan pembangunan pemerintah Jerman
KIAT	Kemitraan Indonesia–Australia untuk Infrastruktur
KLHK	Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan
KLHS	Kajian Lingkungan Hidup Strategis
KPI	<i>Key Performance Indicators</i> (Indikator Kinerja Utama/IKU)
KRISNA	Kolaborasi Perencanaan dan Informasi Kinerja Anggaran
KSK	Kawasan Strategis Kabupaten/Kota
KSN	Kawasan Strategis Nasional
KSP	Kawasan Strategis Provinsi
LCCP	<i>Low Carbon Development Pathway</i> (Jalur Pembangunan Rendah Karbon)

## Daftar singkatan

LCCR	<i>Low Carbon and Climate Resilience</i> (Rendah Karbon dan Ketahanan Iklim)
LCDI	<i>Low Carbon Development Initiative</i> (Inisiatif Pembangunan Rendah Karbon)
LIPI	Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
LTS	<i>Long-Term Strategy</i> (Strategi Jangka Panjang)
LTS-LCCR	<i>Indonesia's Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience 2050</i> (Strategi Jangka Panjang Indonesia untuk Pembangunan Rendah Karbon dan Ketahanan Iklim 2050)
MAPI	<i>Mitigation Adaptation to Climate Change</i> (Mitigasi dan Adaptasi terhadap Perubahan Iklim)
MDB	<i>Multilateral Development Bank</i> (Bank Pembangunan Multilateral)
MER	<i>Monitoring Evaluation Reporting</i> (Pemantauan, Evaluasi, dan Pelaporan)
MEWS	<i>Meteorology Early Warning System</i> (Sistem Peringatan Dini Meteorologi)
MHEWS	<i>Multi Hazard Early Warning System</i> (Sistem Peringatan Dini Multi Bahaya)
MOEF	<i>Ministry of Environment and Forestry</i> (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan)
Kemenkeu	Kementerian Keuangan
Kemenkes	Kementerian Kesehatan
Kemendagri	Kementerian Dalam Negeri
KKP	Kementerian Kelautan dan Perikanan
Kementerian PUPR	Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
Kemensos	Kementerian Sosial
Kemenuh	Kementerian Perhubungan
MRV	<i>Measurement, Reporting, and Verification</i> (Pengukuran, Pelaporan, dan Verifikasi)
NAP	<i>National Adaptation Plan</i> (Rencana Adaptasi Nasional)
NDC	<i>Nationally Determined Contribution</i> (Kontribusi yang Ditetapkan Secara Nasional)
BNPB	Badan Nasional Penanggulangan Bencana
NDMP	<i>National Disaster Management Plan</i> (Rencana Nasional Penanggulangan Bencana)
NFP	<i>National Focal Point</i>
NGO	<i>Non-governmental organisation</i> (Organisasi nonpemerintah)
OJK	Otoritas Jasa Keuangan
PBI	(Kebijakan) Pembangunan Berketahanan Iklim
Perpres	Peraturan Presiden

PLN	Perusahaan Listrik Negara (badan usaha milik negara di bidang ketenagalistrikan Indonesia)
PMI	Palang Merah Indonesia
KPBU	Kerja Sama Pemerintah dan Badan Usaha
PROKLIM	Program Kampung Iklim
PT IIF	PT Indonesia Infrastructure Finance
PT PII	PT Penjaminan Infrastruktur Indonesia (IIGF)
SMI	PT Sarana Multi Infrastruktur
PT KAI	PT Kereta Api Indonesia
RAD API	Rencana aksi daerah untuk mengurangi emisi GRK (Adaptasi Perubahan Iklim)
RAN API	Rencana Aksi Nasional Adaptasi Perubahan Iklim
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i> (Jalur Konsentrasi Representatif)
RDTR	Rencana Detail Tata Ruang
Renja	Rencana Kerja
RENSTRA	Rencana Strategis
RKP	Rencana Kerja Pemerintah
RKPD	Rencana Kerja Pemerintah Daerah
RPJMD	Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah
RPJMN	Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional
RPJPD	Rencana Pembangunan Jangka Panjang Daerah
RPJPN	Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional
RPPLH	Rencana Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup
RTR	Rencana Tata Ruang
RTRW	Rencana Tata Ruang Wilayah
RTRWP	Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten/Provinsi
RUJJN	Rencana Umum Jaringan Jalan Nasional
Satu DJA	Sistem Aplikasi Terpadu Direktorat Jenderal Anggaran
SDGs	<i>Sustainable Development Goals (United Nations)</i> (Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (PBB))
BPBD	Badan Penanggulangan Bencana Daerah
KLHS	Kajian Lingkungan Hidup Strategis
KEK	Kawasan Ekonomi Khusus
SIDIK	Sistem Informasi dan Data Indeks Kerentanan
SKPD	Satuan Kerja Perangkat Daerah
SLR	<i>Sea Level Rise</i> (Kenaikan Muka Air Laut)
SMS	<i>Short Message Service</i> (Layanan Pesan Singkat)

## Daftar singkatan

SPPL	Surat Pernyataan Pengelolaan Lingkungan
SPPN	Sistem Perencanaan Pembangunan Nasional
SRN	Sistem Registri Nasional (Perubahan Iklim Indonesia)
SRN-PPI	Sistem Registri Nasional Pengendalian Perubahan Iklim
TNI	Tentara Nasional Indonesia
UNDP	<i>United Nations Development Program</i> (Program Pembangunan PBB)
UNESCO	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i> (Organisasi Pendidikan, Keilmuan, dan Kebudayaan Perserikatan Bangsa-Bangsa)
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> (Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa tentang Perubahan Iklim)
USAID	<i>U.S. Agency for International Development</i>
USD	Dolar Amerika Serikat
WHO	<i>World Health Organisation</i> (Organisasi Kesehatan Dunia)

# GLOSARIUM ISTILAH

---

Adaptasi perubahan iklim	Proses penyesuaian terhadap iklim aktual atau yang diperkirakan beserta dampaknya untuk mengurangi atau menghindari dampak merugikan, atau memanfaatkan peluang yang menguntungkan.
Bahaya	Probabilitas dan intensitas terjadinya suatu peristiwa yang menimbulkan kerusakan, yang dinyatakan dalam frekuensi dan tingkat keparahan.
Bahaya iklim	Peristiwa atau tren iklim yang berpotensi menimbulkan kerusakan, seperti kenaikan muka air laut, perubahan pola curah hujan, suhu ekstrem, atau kejadian cuaca ekstrem.
Bencana	Peristiwa merugikan berskala besar akibat proses alam yang menimbulkan kerugian terhadap manusia, aset, atau lingkungan.
Bencana iklim	Peristiwa bencana yang dipicu atau diperparah oleh variabilitas dan perubahan iklim, seperti banjir, kekeringan, gelombang panas, badai, atau kenaikan muka air laut, yang menimbulkan kerugian terhadap manusia, aset, dan aktivitas ekonomi.
Infrastruktur	Aset, jaringan, dan sistem yang menyediakan layanan untuk mendukung fungsi sosial dan ekonomi masyarakat.
Infrastruktur berketahanan iklim	Infrastruktur yang dirancang, dibangun, dan dikelola agar mampu menghadapi bahaya dan bencana akibat perubahan iklim, tahan dan tetap berfungsi selama gangguan, pulih dengan cepat, serta tidak menimbulkan atau memperparah dampak perubahan iklim dalam jangka panjang.
Infrastruktur kritis	Struktur, fasilitas, jaringan, dan aset yang menyediakan layanan sangat penting bagi kehidupan sosial dan ekonomi serta pengelolaan risiko bencana.
Infrastruktur untuk ketahanan	Infrastruktur yang mendukung ketahanan sosial dan ekonomi secara luas tanpa menimbulkan risiko sistemik baru.
Iklim	Kondisi cuaca pada nilai rata-rata, rentang, dan variabilitas unsur cuaca di suatu wilayah dalam periode waktu tertentu (umumnya 30 tahun atau lebih).
Kapasitas adaptif	Kemampuan suatu sistem untuk menyesuaikan diri terhadap perubahan iklim guna mengurangi potensi kerusakan atau mengatasi konsekuensi yang timbul.

---

---

Kejadian iklim ekstrem	Peristiwa cuaca atau iklim dengan intensitas atau durasi yang jauh di luar kondisi rata-rata historis suatu wilayah, seperti hujan ekstrem, suhu sangat tinggi, atau badai tropis kuat.
Kerugian ekonomi akibat perubahan iklim	Nilai kerugian finansial yang timbul akibat dampak perubahan iklim terhadap aset, produksi, layanan, atau aktivitas ekonomi.
Layanan dasar	Pelayanan Dasar adalah pelayanan publik untuk memenuhi kebutuhan dasar warga negara seperti pendidikan, kesehatan, pekerjaan umum dan penataan ruang, ketentraman, ketertiban umum, dan perlindungan masyarakat, dan sosial.
Pembangunan Berketahanan Iklim	Pendekatan pembangunan yang bertujuan memperkuat kapasitas sistem perencanaan dan pelaksanaan pembangunan nasional agar mampu mengantisipasi ancaman, mengurangi risiko, bertahan, pulih, dan beradaptasi terhadap dampak perubahan iklim.
Pengurangan risiko bencana	Upaya mencegah risiko bencana baru, mengurangi risiko yang ada, dan mengelola risiko sisa guna memperkuat ketangguhan dan mendukung pembangunan berkelanjutan.
Perubahan iklim	Perubahan pada sistem iklim yang diatribusikan secara langsung atau tidak langsung pada aktivitas manusia yang mengubah komposisi atmosfer global dan terjadi di luar variabilitas iklim alami dalam periode waktu yang sebanding.
Proyeksi iklim	Respons sistem iklim yang disimulasikan terhadap skenario masa depan terkait emisi atau konsentrasi gas rumah kaca menggunakan model iklim.
Risiko bencana	Potensi kehilangan jiwa atau kerusakan aset sebagai fungsi dari bahaya, keterpaparan, kerentanan, dan kapasitas.
Risiko iklim	Potensi kerugian atau dampak merugikan akibat interaksi antara bahaya iklim, keterpaparan, dan kerentanan yang memengaruhi sistem sosial, ekonomi, atau lingkungan.
Siklus hidup infrastruktur	Tahapan sepanjang umur aset infrastruktur, mulai dari perencanaan, perancangan, pembangunan, pengoperasian, pemeliharaan hingga penggantian atau dekomisioning.
Tata kelola infrastruktur	Kapasitas untuk merencanakan, membiayai, merancang, melaksanakan, mengelola, dan memelihara sistem infrastruktur.

---





# 1 | PENDAHULUAN

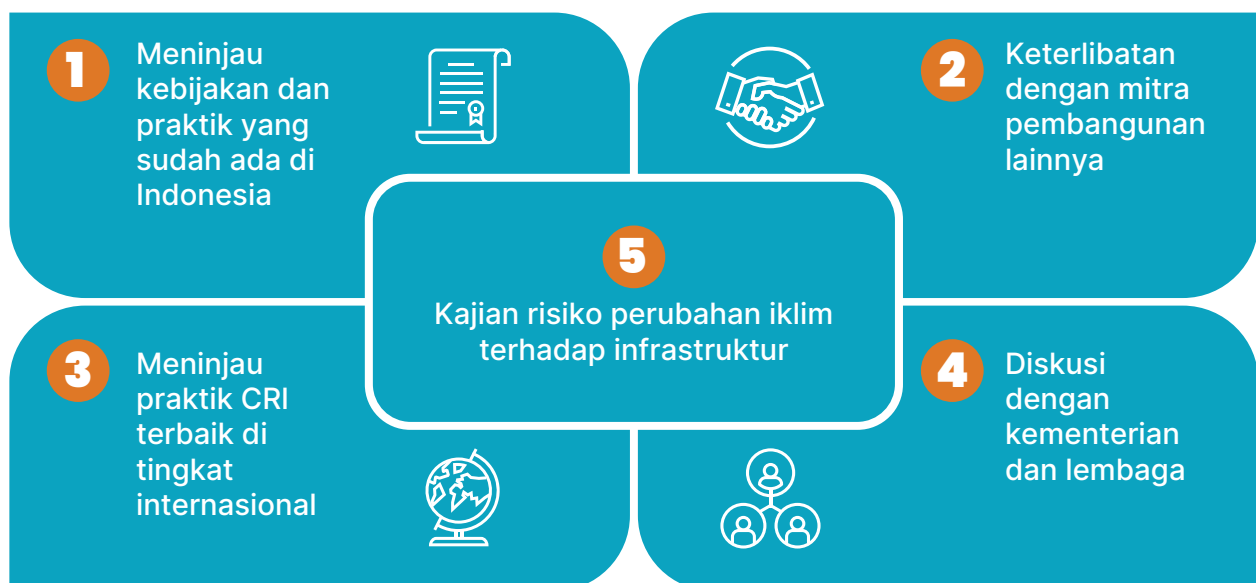
## 1.1 Tujuan

Melalui kegiatan CRI, Kemitraan Indonesia-Australia untuk Infrastruktur (KIAT) mendukung Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional (Bappenas) untuk meningkatkan pemahaman mengenai potensi dampak risiko iklim terhadap infrastruktur di Indonesia, serta untuk menyusun rekomendasi kebijakan dan pembiayaan guna meningkatkan ketahanan infrastruktur.

## 1.2 Metodologi

Penelitian ini dilaksanakan antara April 2024 dan September 2025 oleh tim ahli yang berkolaborasi erat dengan Kementerian PPN/Bappenas. Dokumen ini terdiri atas lima modul pekerjaan sebagaimana diuraikan di bawah ini dalam Gambar 2.

GAMBAR 2: MASUKAN BAGI STUDI MENGENAI INFRASTRUKTUR BERKETAHANAN IKLIM INI



Tinjauan terhadap kebijakan dan praktik yang telah ada memberikan penilaian dasar bagi pengembangan Infrastruktur Berketahanan Iklim di Indonesia, serta memungkinkan dilakukan analisis kesenjangan terhadap praktik terbaik internasional. Penilaian risiko ini didukung oleh Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), yang merupakan lembaga riset nasional Australia. Kajian ini memanfaatkan berbagai sumber data milik Pemerintah Indonesiadan data milik CSIRO. Data yang digunakan terdiri atas data lokasi dan nilai aset infrastruktur dari kementerian teknis, pengelola aset, dan Bappenas. Selain itu, data yang digunakan juga mencakup data historis dampak bencana dari BNPB dan pemerintah daerah, data kependudukan dan sosial ekonomi dari BPS, serta hasil pemodelan iklim berskala lokal (*downscaled*) dari BMKG dan CSIRO.

Untuk melengkapi dan memvalidasi data tersebut, studi ini juga didukung melalui proses konsultasi dan pendalaman dengan berbagai pemangku kepentingan. Diskusi intensif dilakukan dengan Direktorat Lingkungan Hidup Bappenas untuk menyepakati kerangka kebijakan Infrastruktur Berketahanan Iklim di Indonesia serta cakupan analisis studi. Konsultasi dengan kementerian dan lembaga terkait dilaksanakan guna memperoleh data tambahan dan informasi latar belakang mengenai praktik infrastruktur berketahanan iklim yang saat ini diterapkan oleh Pemerintah Indonesia. Selain itu, masukan turut dihimpun dari bank pembangunan multilateral dan mitra pembangunan lainnya.

Daftar lengkap pemangku kepentingan yang dikonsultasikan adalah:

### **Pemerintah Republik Indonesia**

- Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional/Bappenas
  - Direktorat Lingkungan Hidup
  - Direktorat Tata Ruang, Perkotaan, Pertanahan, dan Penanggulangan Bencana
  - Direktorat Konektivitas dan Infrastruktur Logistik
  - Direktorat Perumahan dan Infrastruktur Kawasan Permukiman
  - Direktorat Transmisi, Ketenagalistrikan, Kedirgantaraan, dan Antariksa
  - Direktorat Kemitraan dan Keterpaduan Pengembangan Infrastruktur
- Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian
  - Asisten Deputi Bidang Ketahanan Bencana dan Pemanfaatan Teknologi
- Kementerian Koordinator Bidang Infrastruktur & Pembangunan Kewilayahan
  - Asisten Deputi Pengembangan Konektivitas Antar Wilayah
- Kementerian Pekerjaan Umum
  - Direktorat Bendungan dan Danau
  - Direktorat Sistem dan Strategi Penyelenggaraan Jalan dan Jembatan
  - Direktorat Pembiayaan Infrastruktur Sumber Daya Air
  - Direktorat Pembiayaan Infrastruktur Jalan dan Jembatan
- Kementerian Keuangan
  - Direktorat Kerja Sama Multilateral dan Keuangan Berkelanjutan
- Kementerian Perhubungan
  - Pusat Pengelolaan Transportasi Berkelanjutan
- Kementerian Pertanian
  - Direktorat Irigasi Pertanian
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral
  - Direktorat Perencanaan dan Pembangunan Infrastruktur EBTKE

- Kementerian Kelautan dan Perikanan
  - Direktorat Kepelabuhanan Perikanan
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan
  - Direktorat Adaptasi Perubahan Iklim
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika
  - Direktorat Perubahan Iklim
  - Direktorat Layanan Iklim Terapan
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana
  - Direktorat Pemetaan dan Evaluasi Risiko Bencana
  - Pusat Data Informasi dan Komunikasi Kebencanaan

### **Organisasi lainnya**

- SIAP-SIAGA
- Asian Development Bank (Bank Pembangunan Asia)
- Bank Dunia
- United Nations Development Program (Program Pembangunan PBB)
- Climate Policy Initiative (Inisiatif Kebijakan Iklim)
- Kemitraan untuk Infrastruktur



## 2 | MEMAHAMI INFRASTRUKTUR BERKETAHANAN IKLIM

Perubahan iklim menghadirkan berbagai tantangan mendasar di seluruh aspek kehidupan sosial dan ekonomi, lingkungan maupun infrastruktur juga tidak luput dari dampak tersebut. Bahkan, karena sifatnya yang fisik serta skala aset yang sering kali besar dan tersebar luas, infrastruktur sangat terpapar terhadap perubahan iklim. Pengembangan infrastruktur berketahanan iklim (CRI) yang mampu mengurangi dampak perubahan iklim terhadap sistem infrastruktur akan menjadi bentuk adaptasi perubahan iklim yang sangat krusial

### 2.1 Bagaimana perubahan iklim memengaruhi infrastruktur?

Dampak perubahan iklim sudah dirasakan secara global, termasuk di Indonesia, dan diperkirakan akan semakin memburuk dalam beberapa dekade mendatang seiring pemanasan global yang terus berlanjut dan meningkat. Perubahan iklim terutama memengaruhi infrastruktur melalui perubahan jenis, frekuensi, dan tingkat keparahan bencana alam yang dipicu oleh sistem iklim. Bahaya tersebut dapat bersifat akut atau dalam waktu dekat, seperti banjir, longsor, abrasi dan kebakaran hutan, namun terdapat pula berbagai bahaya kronis dalam waktu yang lebih lama didorong oleh perubahan iklim. Hal tersebut mencakup suhu lingkungan yang lebih tinggi, kenaikan muka air laut, dan pengasaman laut.

Setiap jenis bahaya tersebut berdampak pada berbagai jenis infrastruktur dengan cara yang berbeda, dan dapat mengganggu kemampuan aset infrastruktur untuk beroperasi serta menurunkan efisiensi operasionalnya, terutama ketika infrastruktur tersebut bergantung pada sumber daya alam. Sebagai contoh, pembangkit listrik tenaga air bergantung pada pola curah hujan yang sedang mengalami perubahan. Perubahan iklim juga akan menggeser permintaan atas layanan infrastruktur—misalnya, kenaikan suhu udara sekitar kemungkinan akan mendorong peningkatan permintaan energi (untuk pendinginan) dan air minum. Tabel 1 menyajikan beberapa contoh mengenai bagaimana dampak perubahan iklim dapat memengaruhi berbagai sektor infrastruktur.

TABEL 1: DAMPAK ILUSTRATIF DARI SEJUMLAH BAHAYA IKLIM PADA BEBERAPA SEKTOR INFRASTRUKTUR

	Kenaikan suhu lingkungan	Kenaikan muka air laut	Peningkatan curah hujan	Badai dan angin kencang
Transportasi	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aspal jalan mencair dan rel kereta api melengkung</li> <li>Kerusakan lapis fondasi jalan akibat mencairnya tanah musiman beku atau permafrost</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inundasi jalan dan jalur kereta api di kawasan pesisir</li> <li>Ketidaksesuaian infrastruktur pelabuhan terhadap kenaikan muka air laut</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gangguan pada jaringan jalan dan metro akibat banjir</li> <li>Erosi pada fondasi jalan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kerusakan pada aset di atas permukaan tanah, seperti jembatan</li> <li>Ketidakmampuan mengoperasikan bandara akibat angin kencang</li> </ul>
Energi	<ul style="list-style-type: none"> <li>Penurunan efisiensi panel surya</li> <li>Penurunan keluaran pembangkit listrik termal akibat keterbatasan suhu air pendingin</li> <li>Peningkatan kebutuhan pendinginan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inundasi infrastruktur pembangkit listrik di wilayah pesisir</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Penurunan keluaran pembangkit listrik tenaga air</li> <li>Gangguan pasokan energi akibat banjir yang merendam fasilitas pembangkit listrik</li> <li>Kekurangan air pendingin</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kerusakan jaringan transmisi dan distribusi akibat angin</li> <li>Kerusakan pada panel surya dan turbin angin</li> </ul>
Telekomunikasi	<ul style="list-style-type: none"> <li>Peningkatan kebutuhan pendinginan untuk pusat data</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Terendamnya infrastruktur pesisir seperti sentral telepon</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kerusakan infrastruktur menara seluler akibat penurunan tanah</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kerusakan menara seluler akibat angin yang mengganggu operasional jaringan</li> </ul>

Sumber: OECD, 2018; analisis tim

Fokus laporan ini adalah pada gangguan terhadap infrastruktur akibat bencana alam. Peningkatan gangguan dan kerusakan infrastruktur akibat bahaya-bahaya tersebut akan berdampak pada pemilik aset dan investor, serta masyarakat yang dilayani. Infrastruktur yang tidak mampu atau tidak beradaptasi terhadap perubahan iklim akan mendorong peningkatan biaya bagi pemerintah karena pemilik aset dan investor akan mengalami penurunan pendapatan, peningkatan biaya pemeliharaan dan perbaikan, serta menghadapi premi risiko dan biaya pembiayaan yang lebih tinggi. Bagi masyarakat, berkurangnya ketahanan infrastruktur akan mengurangi manfaat ekonomi dari investasi infrastruktur melalui penurunan tingkat pemanfaatannya, serta berpotensi menurunkan investasi pada infrastruktur baru karena pemerintah harus menanggung biaya yang lebih tinggi untuk memelihara aset yang sudah ada.

## 2.2 Langkah-langkah untuk mengurangi risiko iklim terhadap infrastruktur

Adaptasi terhadap dampak perubahan iklim membantu menghindari biaya ekonomi akibat gangguan infrastruktur serta dapat menghasilkan berbagai manfaat lainnya. Manfaat tersebut meliputi kerugian aset yang dapat dihindari, penurunan biaya pemeliharaan, layanan publik yang lebih berkualitas dan lebih andal, serta percepatan pertumbuhan ekonomi dan pembangunan sosial.

Mengingat sifat adaptasi perubahan iklim yang sangat bergantung pada konteks, langkah-langkah untuk mengurangi risiko iklim akan sangat bervariasi antar wilayah, sektor infrastruktur, dan aset. Secara umum, risiko iklim terhadap infrastruktur dapat dikurangi dengan menempatkan aset di wilayah yang paparan terhadap bahaya iklimnya lebih rendah (misalnya menghindari pembangunan infrastruktur baru di wilayah banjir), serta meningkatkan kemampuan aset untuk menghadapi dampak iklim ketika dampak tersebut terjadi (OECD, 2018). Namun, memindahkan lokasi aset infrastruktur tidak selalu merupakan pilihan yang realistis, mengingat kebutuhan untuk tetap melayani masyarakat di lokasi saat ini. Secara umum, langkah-langkah adaptasi dapat dikelompokkan ke dalam dua kategori:

- **Langkah adaptasi struktural** merupakan perubahan fisik pada infrastruktur untuk mencapai atau memfasilitasi adaptasi. Contohnya mencakup perubahan komposisi permukaan jalan agar tidak mengalami deformasi pada suhu tinggi, serta penggunaan permukaan perkerasan berpori pada jalan untuk mengurangi limpasan permukaan saat terjadi hujan lebat. Pendekatan berbasis ekosistem dengan memanfaatkan infrastruktur alami ("*green infrastructure*") untuk merancang langkah-langkah adaptasi juga merupakan alternatif penting yang perlu dipertimbangkan, bersama dengan langkah adaptasi struktural infrastruktur ("*grey infrastructure*"). Sebagai contoh, restorasi daerah aliran sungai dapat melindungi sumber air minum dan mengurangi risiko banjir melalui peningkatan penyerapan air hujan. Pendekatan ini dapat lebih hemat biaya dibandingkan hanya mengandalkan infrastruktur "*grey*", sekaligus memberikan berbagai manfaat tambahan, termasuk peningkatan keanekaragaman hayati, nilai budaya dan rekreasi, serta kesehatan mental dan fisik.
- **Langkah adaptasi berbasis manajemen (non-struktural)** mencakup langkah-langkah lain, seperti perubahan prosedur operasional atau penerapan rencana manajemen kedaruratan. Contohnya mencakup penyesuaian jadwal pemeliharaan untuk mengakomodasi perubahan pola cuaca, investasi pada sistem peringatan dini, atau pembelian asuransi untuk mengelola dampak keuangan dari bencana terkait iklim dengan lebih baik. Langkah-langkah ini juga dapat mencakup peningkatan pemantauan terhadap aset yang ada untuk mengurangi risiko kegagalan seiring perubahan kondisi iklim.

## 2.3 Prinsip-prinsip infrastruktur berketahanan iklim

Secara kolektif, berbagai intervensi untuk menurunkan risiko iklim pada infrastruktur ini diharapkan dapat mendorong pengembangan infrastruktur berketahanan iklim (CRI). Karakteristik utama infrastruktur berketahanan iklim adalah infrastruktur tersebut direncanakan, dirancang, dibangun, dan dioperasikan dengan cara yang mengantisipasi, mempersiapkan diri, serta beradaptasi terhadap perubahan kondisi iklim. Infrastruktur tersebut juga mampu menahan, merespons, dan pulih dengan cepat dari gangguan yang disebabkan oleh kondisi iklim tersebut (OECD, 2018).

CADRI (2020) mencatat bahwa infrastruktur berketahanan iklim penting untuk:

- Melindungi penghuni dan mempertahankan kesejahteraan
- Mengurangi kerugian langsung dan meminimalkan kerusakan pada elemen struktural dan non-struktural.
- Mengurangi biaya tidak langsung akibat gangguan
- Meminimalkan gangguan layanan dan kegagalan berantai pada fasilitas dan layanan
- Mendorong pengurangan risiko bencana
- Melindungi investasi
- Berkontribusi terhadap pembangunan berkelanjutan
- Mengelola risiko pada lingkungan yang dibangun

Infrastruktur Berketahanan Iklim dapat mengurangi, namun tidak sepenuhnya menghilangkan, risiko gangguan terkait iklim. Akan terdapat risiko residual yang perlu dikelola melalui asuransi dan sistem manajemen risiko lainnya. Besarnya perubahan iklim yang bertransformasi menjadi risiko bagi infrastruktur bergantung pada interaksi antara perubahan bahaya iklim dengan keterpaparan (lokasi aset) dan kerentanan (kecenderungan atau predisposisi untuk terdampak yang merugikan).

Infrastruktur Berketahanan Iklim berfokus pada adaptasi perubahan iklim untuk infrastruktur umum, seperti transportasi, jaringan kelistrikan, dan pembangkit listrik. Namun, terdapat pula aset infrastruktur yang secara khusus ditujukan untuk melindungi masyarakat dan aset lainnya dari dampak perubahan iklim. Ini mencakup sistem drainase, tanggul laut, kanal banjir, dan pemecah gelombang. Untuk membedakan jenis-jenis infrastruktur ini dari CRI, CDRI mengusulkan agar infrastruktur tersebut diberi label 'infrastruktur untuk ketahanan (*infrastructure for resilience*)' (CDRI, 2023). Infrastruktur untuk ketahanan akan memberikan kontribusi penting bagi pada implementasi kebijakan Pembangunan Berketahanan Iklim (PBI) di Indonesia.

## 2.4 Meningkatnya fokus global terhadap Infrastruktur Berketahanan Iklim

Terdapat peningkatan kesadaran di kalangan komunitas internasional dan pemerintah nasional bahwa perubahan iklim dan risiko bahaya alam mengancam pertumbuhan dan pembangunan di masa depan. Pentingnya dan urgensi pembangunan infrastruktur berketahanan iklim telah disoroti di tingkat internasional melalui sejumlah inisiatif dan publikasi utama yang dapat menjadi panduan dalam pendekatan pengembangan Infrastruktur Berketahanan Iklim.

Pentingnya investasi dalam ketahanan telah ditekankan dalam berbagai laporan yang diterbitkan oleh organisasi internasional seperti *United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR)* (UNISDR, 2015), *United Nations Development Programme (UNDP)*, *Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC)* (IPCC, 2012), *World Bank (WB)* (World Bank, 2013), *Asian Development Bank (ADB)*, *Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)*, serta *Coalition for Disaster Resilient Infrastructure (CDRI)*.

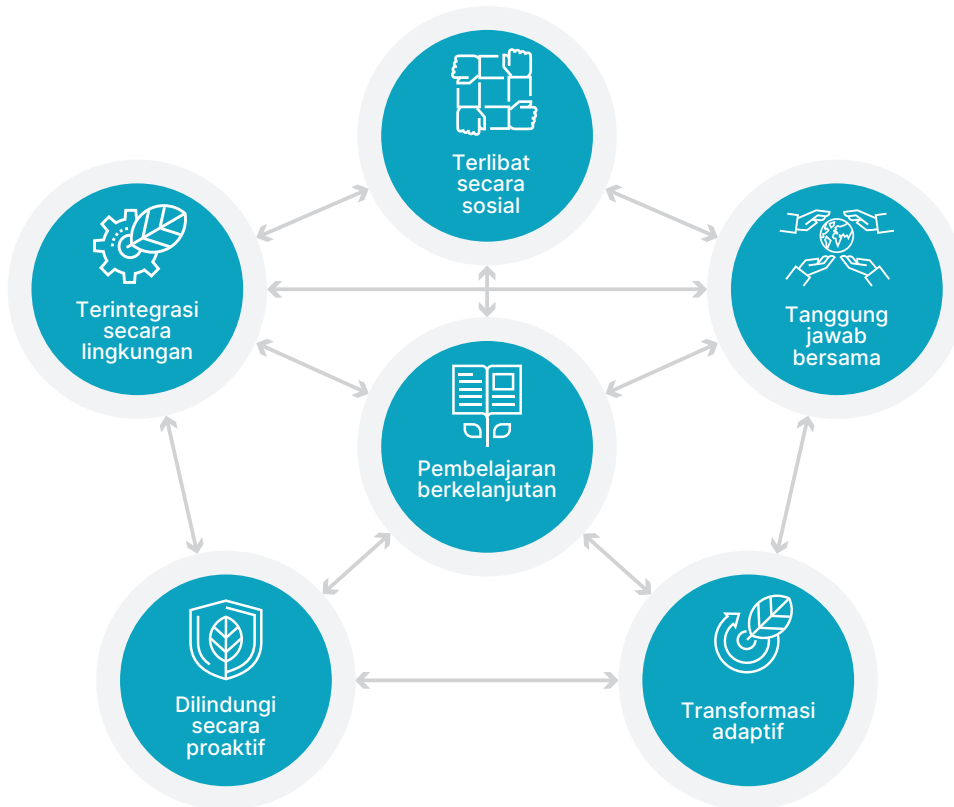
*The Sendai Framework for Disaster Risk Reduction (SFDRR)* (UNDRR, 2015), *the Financing for Development Framework* (United Nations, 2023), *the Sustainable Development Goals (SDGs)* (United Nations, 2024), serta berbagai perjanjian perubahan iklim merupakan kerangka kebijakan internasional yang mendorong pembangunan berketahanan iklim. SFDRR mendorong pengurangan yang signifikan atas risiko bencana dan kerugian, baik berupa hilangnya nyawa, mata pencaharian, dan kesehatan, maupun kerugian pada aset ekonomi, fisik, sosial, budaya, dan lingkungan milik individu, pelaku usaha, masyarakat, dan negara. Dokumen ini diadopsi oleh 187 Negara Anggota PBB. Infrastruktur berketahanan iklim dapat mendukung upaya pencapaian SFDRR.

Kajian Infrastruktur Berketahanan Iklim juga berperan penting untuk pencapaian SDG 13 (penanganan perubahan iklim), SDG 9 (industri, inovasi, dan infrastruktur), SDG 3 (kehidupan sehat dan sejahtera), SDG 4 (pendidikan berkualitas), SDG 6 (air bersih dan sanitasi), SDG 7 (energi bersih dan terjangkau), serta SDG 11 (ketahanan kota terhadap bencana). Layanan dasar yang andal juga berkaitan erat dengan berbagai manfaat kesejahteraan, seperti kesempatan kerja yang berkelanjutan (SDG 8), pengurangan kemiskinan (SDG 1), dan kesetaraan gender (SDG 5) (CDRI, 2023).

Memastikan bahwa infrastruktur tahan terhadap perubahan iklim dapat mendukung pencapaian Perjanjian Paris, antara lain melalui peningkatan kemampuan untuk beradaptasi terhadap perubahan iklim serta memastikan bahwa arus pembiayaan selaras dengan pembangunan rendah karbon dan pembangunan berketahanan iklim (OECD, 2018).

Prinsip-Prinsip Infrastruktur Berketahanan Iklim (UNDRR, 2022) menjabarkan seperangkat prinsip, tindakan utama, dan pedoman untuk mewujudkan peningkatan ketahanan (*net resilience gain*) pada skala nasional dan meningkatkan keberlanjutan layanan kritis/penting, seperti energi, transportasi, air minum, air limbah, pengelolaan sampah, dan komunikasi digital, yang memungkinkan layanan kesehatan, pendidikan, dan lainnya berfungsi secara efektif (Gambar 3).

GAMBAR 3: PRINSIP-PRINSIP INFRASTRUKTUR BERKETAHANAN IKLIM



Sumber: UNDRR (2022)

Studi Kebijakan OECD tentang Infrastruktur Berketahanan Iklim (OECD, 2018) menguraikan kerangka kebijakan untuk memastikan bahwa jaringan infrastruktur baru maupun yang sudah ada memiliki ketahanan terhadap perubahan iklim. Dokumen ini didasarkan pada pengalaman di negara-negara OECD dan G20, serta menunjukkan bagaimana pemerintah dan pelaku usaha dapat berkolaborasi untuk memobilisasi investasi bagi infrastruktur berketahanan iklim. Laporan CDRI tentang Ketahanan Infrastruktur Global (CDRI, 2023) menyajikan argumen yang kuat, dari perspektif ekonomi, keuangan, dan politik, untuk memprioritaskan investasi guna meningkatkan ketahanan.

## 2.5 Mengintegrasikan Kebijakan Berketahanan Iklim di seluruh siklus hidup infrastruktur

Pendekatan Infrastruktur Berketahanan Iklim menekankan bahwa pertimbangan risiko iklim perlu dimasukkan secara sistematis ke dalam seluruh siklus hidup infrastruktur. Siklus hidup tersebut mencakup lima tahapan yaitu perencanaan, pembangunan, operasi, pemeliharaan, hingga pengakhiran atau decommissioning. Dengan pendekatan ini, ketahanan terhadap risiko iklim tidak hanya dipertimbangkan pada tahap awal pembangunan, tetapi juga sepanjang masa layanan infrastruktur hingga masa akhir penggunaannya.

Pada tahap perencanaan, integrasi ketahanan iklim dapat dilakukan dengan memanfaatkan informasi mengenai lokasi prioritas dan intervensi pembangunan dalam kebijakan Pembangunan Berketahanan Iklim (PBI). Data tersebut membantu mengidentifikasi wilayah yang memiliki tingkat risiko tinggi terhadap dampak perubahan iklim sehingga dapat menjadi bahan pertimbangan dalam menentukan lokasi, desain, dan spesifikasi pembangunan infrastruktur. Dengan pendekatan ini, perencanaan infrastruktur dapat lebih terarah pada wilayah yang membutuhkan peningkatan ketahanan, sekaligus memastikan bahwa desain dan standar teknis yang diterapkan mampu mengantisipasi risiko iklim di masa mendatang.

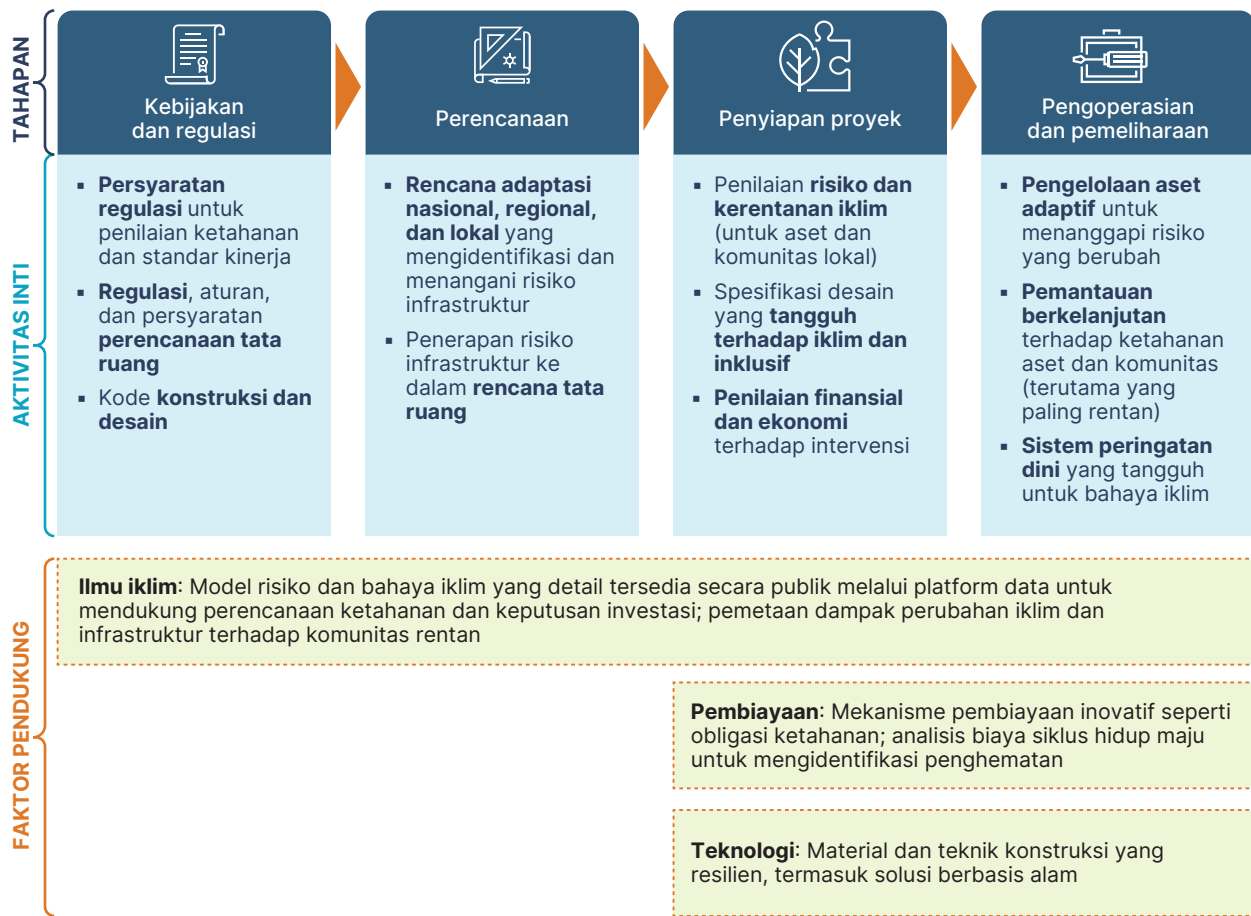
Pada tahap pembangunan, prinsip ketahanan iklim dapat diwujudkan melalui penerapan standar desain yang mempertimbangkan kondisi iklim ekstrem, penggunaan material yang lebih tahan terhadap tekanan lingkungan, serta solusi inovatif lainnya yang dapat meningkatkan kapasitas adaptasi. Selain aspek teknis, integrasi ketahanan iklim dan pembangunan infrastruktur juga memerlukan dukungan kebijakan, kelembagaan, serta mekanisme pembiayaan yang memadai. Hal ini mencakup penyelarasan kebijakan pembangunan nasional dan daerah, penguatan kapasitas institusi perencana dan pelaksana proyek, serta pengembangan instrumen pembiayaan yang mendorong investasi pada infrastruktur yang lebih tangguh terhadap perubahan iklim.

Selanjutnya, pada tahap operasi dan pemeliharaan, pengelolaan infrastruktur dilakukan secara adaptif untuk merespons perubahan iklim serta menjaga kinerja dan keselamatan aset infrastruktur. Hal ini mencakup pemantauan berkala terhadap kondisi fisik infrastruktur, evaluasi terhadap potensi risiko iklim yang berkembang, serta penerapan sistem peringatan dini dan langkah untuk melindungi pengguna dan masyarakat dari potensi bahaya.

Pada tahap pengakhiran, proses penghentian operasi, pembongkaran, atau penggantian infrastruktur perlu dilakukan dengan memperhatikan aspek keselamatan serta dampak lingkungan, terutama di wilayah yang rentan terhadap bahaya iklim. Perencanaan decommissioning yang baik dapat mengurangi risiko kerusakan lingkungan, memastikan keselamatan masyarakat sekitar, dan membuka peluang pemanfaatan kembali lokasi atau material secara berkelanjutan.

Selain aspek teknis di setiap tahapan siklus hidup infrastruktur, integrasi ketahanan iklim juga memerlukan dukungan kebijakan, kelembagaan, serta mekanisme pembiayaan yang memadai. Hal ini mencakup penyelarasan kebijakan pembangunan nasional dan daerah, penguatan kapasitas institusi perencana dan pelaksana proyek, serta pengembangan instrumen pembiayaan yang mendorong investasi pada infrastruktur yang lebih tangguh terhadap perubahan iklim.

GAMBAR 4: LANGKAH-LANGKAH UNTUK MENINGTEGRASIKAN KEBIJAKAN BERKETAHANAN IKLIM SEPANJANG SIKLUS HIDUP INFRASTRUKTUR







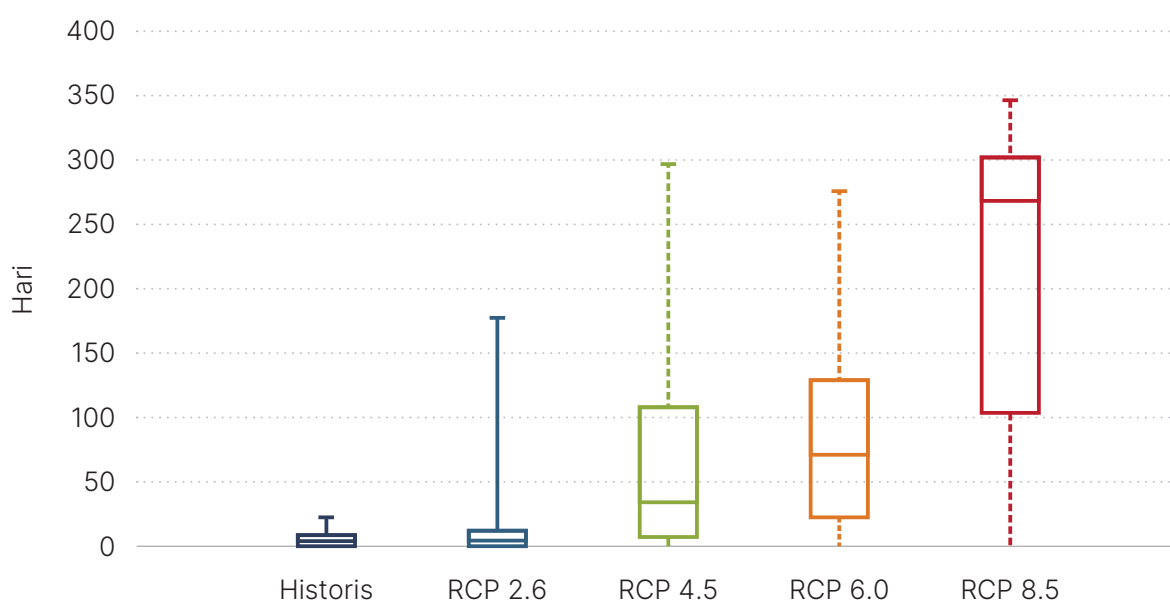
### 3 | DAMPAK IKLIM TERHADAP INFRASTRUKTUR INDONESIA

Tingginya keterpaparan dan risiko bencana Indonesia akibat perubahan iklim, menjadikan pembangunan infrastruktur berketahanan iklim menjadi kebutuhan yang semakin mendesak. Meskipun Indonesia telah memiliki pengalaman menerapkan beberapa prinsip CRI melalui upaya pengurangan risiko bencana, khususnya sejak Tsunami Aceh tahun 2004, perubahan iklim menuntut pertimbangan risiko masa depan yang lebih dinamis dan melampaui tren kejadian historis. Setiap sektor infrastruktur menghadapi jenis risiko yang berbeda akibat perubahan iklim, sehingga diperlukan pendekatan perencanaan dan pengelolaan yang disesuaikan dengan jenis ancaman dan tingkat kerentanannya.

#### 3.1 Perubahan iklim di Indonesia

Indonesia sangat rentan terhadap bahaya dan bencana ekstrem terkait iklim, serta termasuk sepertiga negara dengan tingkat risiko iklim tertinggi, dengan paparan tinggi terhadap semua jenis banjir dan panas ekstrem (World Bank and ADB, 2021a). Banyak kota pesisir di Indonesia telah mengalami dampak gabungan dari kenaikan muka air laut dan penurunan muka tanah, yang menyebabkan terendamnya wilayah pesisir. Dampak perubahan iklim di Indonesia diperkirakan akan terus berlanjut dan makin cepat meningkat.

GAMBAR 5: PERUBAHAN JUMLAH HARI PER TAHUN DENGAN INDEKS PANAS >35°C, 1986–2005 HINGGA 2080–2099



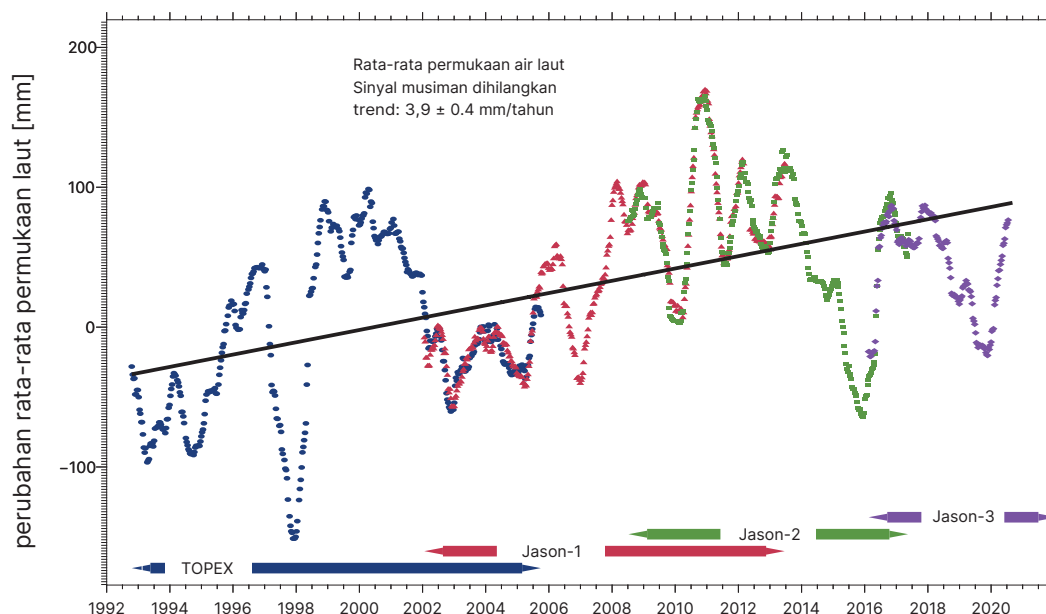
Sumber: World Bank and ADB, 2021

Suhu rata-rata tahunan di Indonesia telah meningkat sekitar 0,3°C sejak 1990. Proyeksi perubahan suhu di Indonesia yang didasarkan pada empat skenario RCP, yaitu RCP2.6 (emisi rendah), RCP4.5, RCP6.0, dan RCP8.5 (emisi tinggi), secara konsisten menunjukkan tren peningkatan suhu pada seluruh skenario. Kenaikan suhu sebesar 0,9°C (RCP2.6) hingga 1,7°C (RCP8.5) diperkirakan terjadi pada 2050; sementara kenaikan sebesar 0,8°C (RCP2.6) hingga 3,5°C (RCP8.5) diperkirakan terjadi pada 2100 (World Bank dan ADB, 2021). Gambar 5 menampilkan proyeksi jumlah hari dengan indeks panas lebih dari 35°C. Dalam skenario RCP8.5, Indonesia diperkirakan akan mengalami kondisi yang sangat berbahaya hampir setiap hari sepanjang tahun. Suhu yang lebih tinggi ini akan berdampak serius terhadap kesehatan pekerja luar ruang, serta menimbulkan risiko terhadap infrastruktur yang dirancang untuk kondisi lingkungan tertentu, seperti permukaan jalan.

Peningkatan Suhu Permukaan Laut (SPL) di wilayah perairan Indonesia berkisar 0,8–1,5°C per 100 tahun apabila dihitung sejak tahun 1945. Nilai ini sedikit lebih tinggi dibandingkan rata-rata global, tetapi sebanding dengan tren kenaikan suhu global sebesar  $0,78 \pm 0,18^\circ\text{C}$  (IPCC, 2007). Kajian mengenai suhu permukaan laut pada periode 1889–2014 menunjukkan tren peningkatan hingga 0,5°C di beberapa wilayah perairan Indonesia. Rata-rata suhu permukaan laut diproyeksikan meningkat sebesar 0,65°C pada 2030, 1,10°C pada 2050, 1,70°C pada 2080, dan 2,15°C pada 2100, dibandingkan dengan SST pada tahun 2000. SST yang lebih tinggi berpotensi memicu badai tropis yang lebih intens, dengan kecepatan angin yang lebih tinggi.

Sebagai negara kepulauan, Indonesia sangat rentan terhadap kenaikan muka air laut. Kenaikan muka air laut telah mencapai hingga 80 cm selama satu abad terakhir di sejumlah wilayah, antara lain di Pulau Jawa dan wilayah timur Indonesia (Republik Indonesia, 2021a). Selama 10 tahun terakhir, kenaikan muka air laut di perairan Indonesia rata-rata mencapai 7,2 cm dan diproyeksikan meningkat lagi sekitar 40 cm pada 2050 (Bappenas, 2019).

GAMBAR 6: KENAIKAN MUKA AIR LAUT DI INDONESIA, 1992–2020



Sumber: NOAA (2020), dikutip dalam (Triana and Wahyudi, 2020)

Genangan pesisir dapat menyebabkan kerusakan signifikan pada bangunan dan infrastruktur, yang berujung pada kerugian besar. Kondisi ini menjadi perhatian serius bagi Indonesia sebagai negara maritim dengan garis pantai yang panjang dan rentan (Bappenas, 2018) serta banyak pulau kecil, di mana terendahnya pesisir secara permanen menjadi ancaman besar di masa depan. Sekitar 25% PDB Indonesia dihasilkan dari wilayah pesisir, sehingga potensi dampak ekonomi akibat kenaikan muka air laut sangat besar. Berdasarkan proyeksi, kenaikan muka air laut setinggi satu meter dapat menggenangi 405,000 ha daratan dan mengurangi luas wilayah Indonesia akibat banjir di pulau-pulau dataran rendah, khususnya di pantai utara Jawa, pantai timur Sumatera, dan pantai selatan Sulawesi. Saat ini, 42 juta penduduk Indonesia tinggal di wilayah dengan ketinggian kurang dari 10 meter di atas permukaan laut (GFDRR, 2011a). Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) memperkirakan bahwa sedikitnya 115 pulau kecil di Indonesia menghadapi risiko serius tenggelam akibat kenaikan muka air laut dan penurunan muka tanah (Brookings Institution, 2023).

Pelabuhan dan kawasan sekitarnya sangat rentan terhadap kenaikan muka air laut karena berlokasi di pesisir terbuka, muara, atau delta yang berada di dataran rendah (UNCTAD, 2020). Jaringan transportasi pesisir sering berfungsi sebagai rute evakuasi yang esensial, sehingga keandalannya menjadi krusial saat terjadi bencana (EPA, 2017). Instalasi pembangkit listrik lepas pantai, khususnya tenaga angin serta minyak dan gas, juga terdampak oleh kenaikan muka air laut, perubahan arus laut, dan erosi pantai (IAEA, 2019).

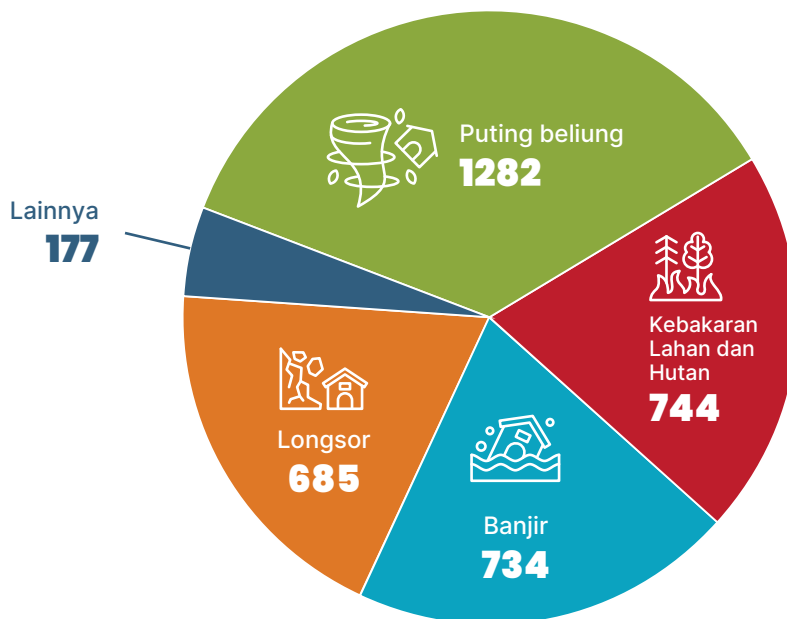
Curah hujan tahunan secara keseluruhan telah menurun sekitar 2–3% sejak 1990, yang disertai perubahan pola musiman antara musim hujan dan musim kemarau. Di wilayah selatan, terjadi penurunan rata-rata curah hujan tahunan meskipun disertai peningkatan curah hujan pada musim hujan. Sementara itu, peningkatan curah hujan rata-rata di wilayah utara terjadi bersamaan dengan penurunan curah hujan pada musim kemarau. Proyeksi curah hujan di masa depan memiliki tingkat ketidakpastian yang lebih tinggi dibandingkan proyeksi suhu. Dinamika curah hujan di masa depanserta variabilitas antar-tahun akan bergantung pada interaksi antara perubahan iklim dan fenomena Osilasi Selatan El Niño (ENSO). Peningkatan curah hujan akan meningkatkan risiko banjir dan tanah longsor, terutama di wilayah pegunungan. Sebaliknya, penurunan curah hujan yang diproyeksikan terjadi pada musim kemarau berpotensi menyebabkan kekeringan (World Bank dan ADB, 2021).

Dengan jumlah penduduk sekitar 275 juta jiwa dan tingkat keterpaparan terhadap berbagai bahaya, upaya pengurangan risiko bencana di Indonesia menjadi sangat penting untuk melindungi keselamatan serta kesejahteraan masyarakat. Meningkatnya risiko iklim fisik akibat perubahan iklim mengindikasikan bahwa kejadian iklim ekstrem diperkirakan akan terjadi lebih sering dan lebih intens. Pada saat yang sama, tekanan jangka panjang berupa kenaikan suhu, kekeringan, dan kenaikan muka air laut menambah tekanan terhadap masyarakat dan perekonomian.

### 3.2 Konteks bahaya alam di Indonesia

Data menunjukkan lebih dari 2.000 bencana terjadi setiap tahunnya di Indonesia, dengan sekitar 90% di antaranya terkait faktor cuaca dan iklim. Kondisi tersebut mencerminkan tingginya tingkat kerentanan nasional terhadap berbagai bahaya alam. Gambar 7 menunjukkan jumlah bencana yang disebabkan oleh bahaya alam pada tahun 2019 (BNPB, dikutip dalam (World Bank and ADB, 2021b)). Indeks Risiko INFORM tahun 2019 menempatkan Indonesia pada peringkat ke-59 dari 191 negara dalam hal risiko bahaya alam, dengan banjir dan siklon tropis diidentifikasi sebagai perhatian utama (Komisi Eropa, 2019).

GAMBAR 7: JUMLAH BENCANA YANG TERCATAT AKIBAT BAHAYA ALAM DI INDONESIA PADA 2019

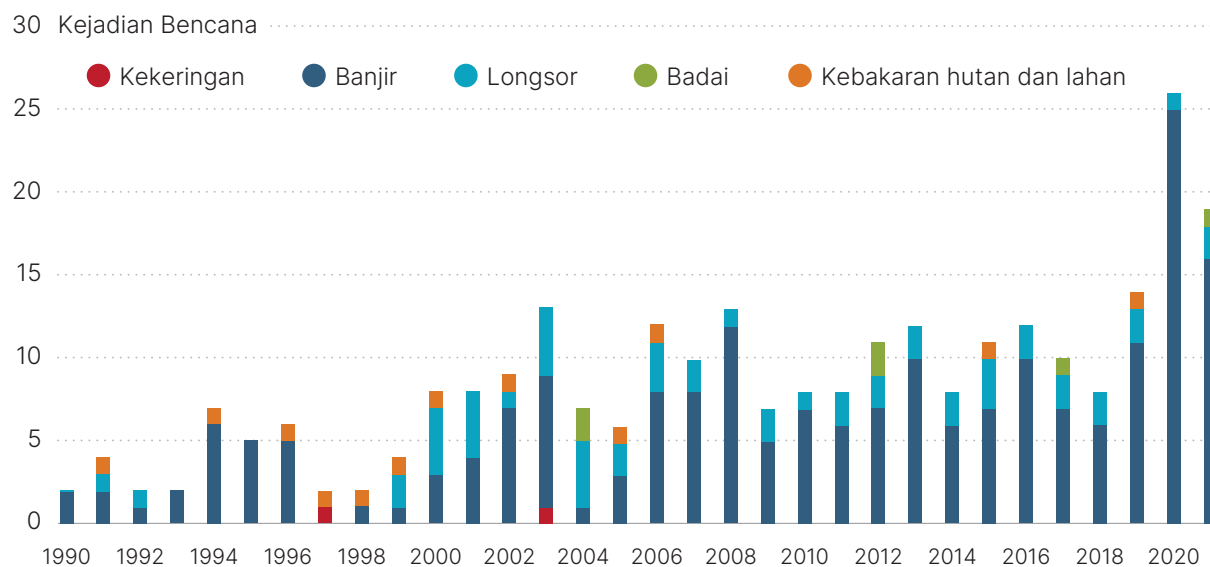


Sumber: BNPB

Sebagai negara kepulauan terbesar di dunia yang terletak di wilayah tropis di antara Samudra Hindia dan Samudra Pasifik, Indonesia sangat dipengaruhi oleh dinamika cuaca dan iklim ekstrem. Meskipun paparan risiko tersebar hampir di seluruh wilayah, Sulawesi, Jawa, dan Bali termasuk daerah yang paling rentan terhadap bahaya iklim.

Analisis historis atas kejadian bencana selama 30 tahun terakhir telah menunjukkan tren peningkatan bencana meteorologi, hidrologi, dan klimatologi di Indonesia (Gambar 8). Meskipun sebagian peningkatan ini kemungkinan mencerminkan perbaikan kualitas pengumpulan data, tren kenaikannya tetap sangat tajam. Peningkatan paling signifikan terlihat pada kejadian banjir, yang kemungkinan besar disebabkan oleh interaksi perubahan iklim dengan urbanisasi yang pesat serta perubahan tata guna lahan yang mengurangi perlindungan banjir alami dan daya serap tanah.

GAMBAR 8: KEJADIAN BENCANA METEOROLOGI, HIDROLOGI, DAN KLIMATOLOGI DI INDONESIA, 1990–2020



Sumber: EM-DAT, dikutip dalam. (World Bank Group, 2023)

### 3.3 Risiko iklim dan respons pada sektor-sektor infrastruktur utama di Indonesia

#### 3.3.1 Transportasi

Infrastruktur transportasi merupakan faktor pendorong bagi pertumbuhan ekonomi Indonesia dalam beberapa tahun terakhir dan termasuk salah satu prioritas utama pemerintah. Investasi yang besar, terutama pada jaringan jalan tol di Jawa, telah secara signifikan meningkatkan konektivitas di wilayah dengan kepadatan penduduk tertinggi di Indonesia. Perubahan iklim menghadirkan tantangan terhadap ketahanan jaringan transportasi yang terus berkembang.

Tantangan terhadap ketahanan jaringan transportasi akan paling terasa di luar kawasan perkotaan, ketika longsor dan banjir kerap mengganggu jalan nasional dan jalan daerah serta menyebabkan masyarakat menjadi terisolasi. Banjir besar di Sumatera pada 2025 diperkirakan telah merusak 2058 km jalan nasional (sekitar 4% dari total jaringan jalan nasional) dan 31 jembatan nasional. Banjir yang terjadi secara rutin di kota-kota besar, terutama Jakarta, juga dapat mengganggu sistem transportasi publik dan memperburuk kemacetan lalu lintas. Infrastruktur fisik transportasi dapat memperparah dampak bencana, dengan mengurangi daya resap tanah terhadap curah hujan dan membendung alur saluran air alami.

GAMBAR 9: STRATEGI MITIGASI BANJIR PADA MRT JAKARTA

### Penanganan Mitigasi Banjir Stasiun Istora Mandiri



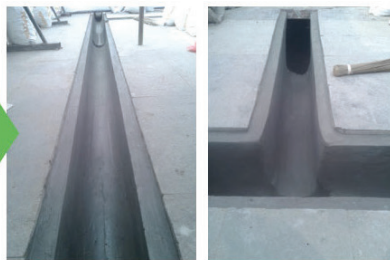
Penambahan Dinding Penahan Air Limpasan (21 Jan 2020)



Pembesaran Tali Air Istora (12 Agustus 2020)



Pembuatan Sodetan Penahan Air dari Arah Polda Metro Jaya (24 September 2020)



Sejumlah proyek transportasi di Indonesia telah mengintegrasikan konsep infrastruktur berketahanan iklim, baik dari aspek struktural maupun operasional. Di Jakarta, pembangunan MRT (*Mass Rapid Transit*) dan LRT (*Light Rail Transit*) telah mempertimbangkan risiko banjir dan curah hujan tinggi. Upaya mitigasi MRT Jakarta dimulai dengan pemantauan cuaca dan tinggi muka air sungai dari BMKG, penyediaan penghalang banjir termasuk meninggikan pintu masuk stasiun, simulasi penanggulangan bencana banjir, serta pembersihan rutin saluran drainase pemeliharaan dan sumur resapan. LRT Jakarta telah menerapkan langkah-langkah serupa untuk memastikan operasi tetap berjalan tanpa terputus, antara lain pemasangan alat pemantau ketinggian air pada struktur gardu listrik dan utilitas, serta pemasangan pintu penghalang banjir pada gardu listrik dan pintu elevator di stasiun. Selain itu, pembangunan kawasan di sekitar stasiun MRT Jakarta merupakan bagian dari transformasi kota yang lebih luas, yaitu penataan kembali kota dari lingkungan yang padat lalu lintas menuju kota yang berkelanjutan dan tahan terhadap iklim. Pembangunan taman baru dan ruang terbuka hijau di sekitar stasiun juga turut membantu memitigasi efek pulau panas perkotaan (*urban heat island*).

Di Jawa bagian utara, Kawasan Metropolitan Semarang memerlukan peningkatan konektivitas untuk mendukung pertumbuhan yang pesat. Namun, perubahan iklim meningkatkan risiko banjir pesisir di wilayah pantai utara Jawa. Penurunan muka tanah di Semarang memperparah dampak kenaikan muka air laut, dengan laju penurunan yang mencapai sekitar 100 mm per tahun di beberapa wilayah—jauh lebih tinggi dibandingkan rata-rata regional sekitar 2,1 mm per tahun (Bott et al., 2021). Kombinasi penurunan muka tanah dan kenaikan muka air laut meningkatkan risiko banjir, khususnya saat pasang tinggi, serta menyebabkan genangan rutin di wilayah pesisir dataran rendah. Proyek Jalan Tol Semarang-Demak berupaya menjadi solusi bagi kedua permasalahan tersebut, yaitu sebagai jalan tol yang sekaligus berfungsi sebagai tanggul laut. Desain proyek ini mengintegrasikan matras bambu setebal 17 lapis untuk memperkuat struktur tanggul di atas laut, yang berfungsi meningkatkan daya dukung tanah dasar (*subgrade*). Desain

inovatif ini berfungsi sebagai sistem polder untuk menahan air, serta memitigasi permasalahan banjir dan dampak pasang surut. Selain itu, pembangunan jalan tol berupaya mempertahankan kawasan mangrove di sepanjang pesisir (Badan Pengatur Jalan Tol, 2024).

### 3.3.2 Air dan sanitasi

Perubahan iklim telah menjadi ancaman signifikan terhadap infrastruktur air di Indonesia berimplikasi pada berbagai sistem. Salah satu risiko utama adalah kenaikan muka air laut yang diperparah oleh penurunan muka tanah di sejumlah wilayah pesisir. Kenaikan muka air laut dapat menyebabkan intrusi air laut ke dalam akuifer air tawar, sehingga menurunkan kualitas air baku, menurunkan penyediaan air minum serta mengancam infrastruktur air dan sanitasi yang ada.

Peningkatan frekuensi dan intensitas banjir serta badai ekstrem juga memberikan tekanan pada infrastruktur air minum dan sanitasi. Peningkatan curah hujan dapat memengaruhi laju limpasan, kapasitas, dan sistem drainase perkotaan (Kourtis & Tsihrintzis, 2021). Genangan berkepanjangan dapat menyebabkan kerusakan pada infrastruktur air bersih (jaringan pipa dan instalasi pengolahan air), yang pada akhirnya menurunkan ketersediaan air bersih untuk konsumsi rumah tangga dan penggunaan publik (Sari, 2023). Di sektor sanitasi, debit air yang tinggi, apabila tidak diiringi infrastruktur yang tangguh, dapat menyebabkan kebocoran dan luapan pada jaringan perpipaan air limbah serta kegagalan atau fluktuasi kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) (Li et al., 2023; Purwanti, 2022; Sandhi, 2023).

Permasalahan utama bagi infrastruktur penyediaan air adalah kerentanan jaringan pipa terhadap longsor, yang dapat dipicu oleh faktor geologi maupun klimatologi. Sebagian besar pasokan air untuk kebutuhan domestik di Indonesia berasal dari mata air dan sumber air di kawasan pegunungan di bagian tengah pulau-pulau, yang kemudian harus dialirkan ke pusat-pusat permukiman di dataran pesisir. Perusahaan air minum daerah (PDAM) menghadapi tantangan berkelanjutan untuk memperbaiki pipa transmisi yang rusak. Sejumlah PDAM kini mulai mencoba meninggikan pipa guna mengurangi kerentanannya (Gambar 10).

GAMBAR 10: MENINGGIKAN PIPA AIR UNTUK MENGURANGI RISIKO IKLIM

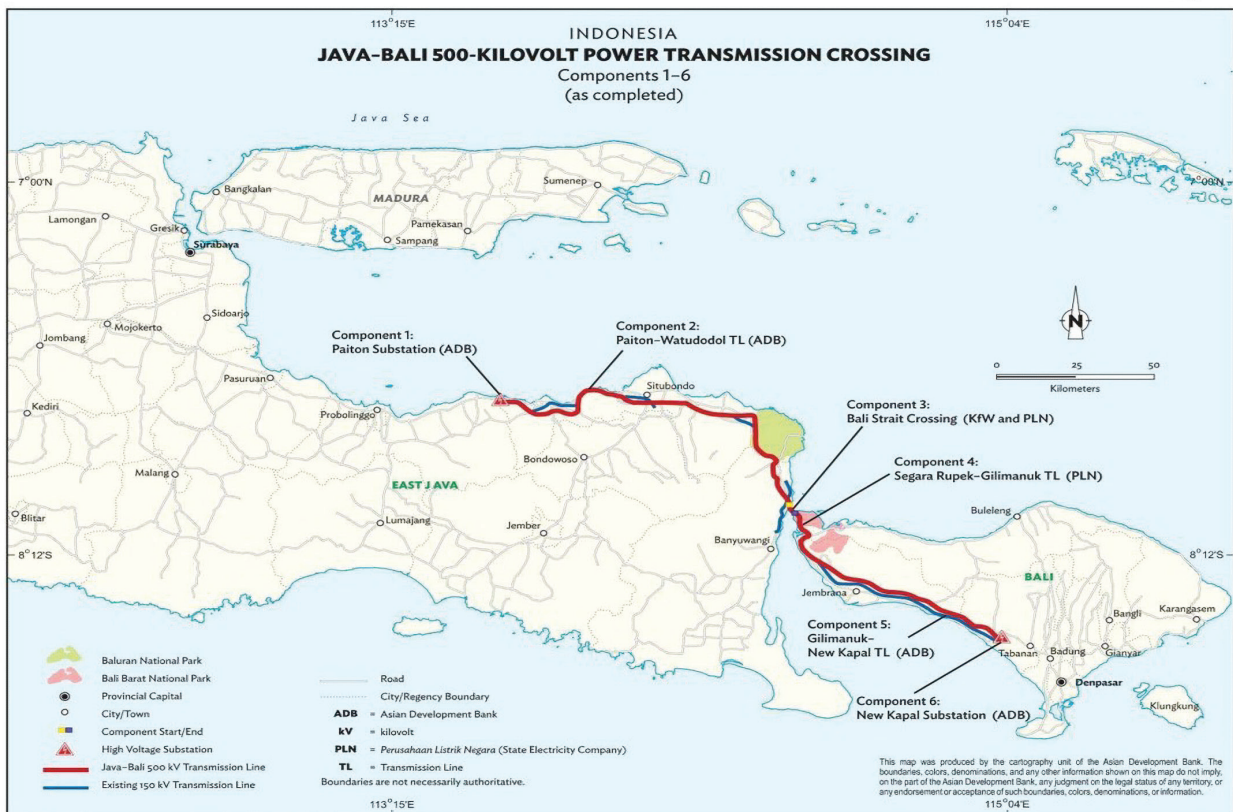


PDAM mulai memahami beragam tantangan terkait iklim yang dihadapi, baik terhadap infrastruktur fisik maupun keamanan sumber-sumber pasokan air baku yang ada, dan sebagian telah melakukan penilaian risiko iklim.

### 3.3.3 Energi

Sektor ketenagalistrikan juga terdampak perubahan iklim, salah satunya berupa peningkatan frekuensi sambaran petir. Petir merupakan penyebab dominan gangguan pada jaringan transmisi listrik di Indonesia (Wibowo et al., 2012). Perubahan iklim diperkirakan akan menyebabkan peningkatan sebesar 41% dalam frekuensi petir di seluruh dunia (Pérez-Invernón, 2023). Selain sambaran petir, berbagai bahaya hidrometeorologi lainnya juga dapat mengganggu sektor energi, seperti angin kencang dan tanah longsor. Suhu lingkungan yang lebih tinggi juga dapat menyebabkan kawat jaringan listrik melendut serta mempercepat korosi pada baterai. Menurut laporan keberlanjutan PT Perusahaan Listrik Negara (PT PLN), jenis aset yang paling rentan terhadap perubahan iklim adalah jaringan distribusi, dengan probabilitas kerusakan yang tinggi, diikuti oleh dampak signifikan terhadap kegiatan pembangkitan meskipun dengan probabilitas yang lebih kecil. Infrastruktur energi yang berketahanan iklim menjadi sangat krusial untuk mengamankan pasokan listrik

GAMBAR 11: PETA PROYEK PENYEBERANGAN TRANSMISI LISTRIK JAWA-BALI



Sumber: ADB 2021

Proyek Penyeberangan Transmisi Listrik Jawa–Bali 500 kilovolt, yang didukung oleh ADB, merupakan salah satu proyek sektor energi yang telah mengintegrasikan konsep ketahanan iklim. Saluran transmisi dirancang dan dibangun agar mampu bertahan terhadap bahaya yang dipicu oleh perubahan iklim, seperti banjir, kenaikan muka air laut, dan tanah longsor. Laporan analisis mengenai dampak lingkungan (AMDAL), yang disusun oleh PT PLN, telah mempertimbangkan perubahan iklim dan bencana terkait iklim. Ini mencakup pemilihan lokasi, peninggian komponen krusial, penguatan struktur, penggunaan alternatif material, serta penerapan langkah-langkah perlindungan terhadap banjir (ADB, 2021).

PT PLN juga memiliki sejumlah kebijakan dan prosedur untuk mengelola dampak lingkungannya, termasuk pemetaan profil risiko. Selain itu, PT PLN telah mengidentifikasi dampak paparan cuaca ekstrem terhadap infrastruktur ketenagalistrikan. Sejumlah upaya untuk mengurangi risiko perubahan iklim telah dilakukan, antara lain peningkatan kesadaran mengenai risiko perubahan iklim di lingkungan PLN Group, penyusunan studi kerentanan serta pelaksanaan aksi adaptasi perubahan iklim melalui proyek percontohan, dan pembentukan tim tanggap darurat untuk melindungi aset PLN apabila terjadi bahaya alam yang dipicu oleh perubahan iklim.



## 4 | POTENSI BIAYA DAMPAK PERUBAHAN IKLIM PADA INFRASTRUKTUR

Kerusakan infrastruktur akibat perubahan iklim dan bencana terkait tidak hanya membahayakan keselamatan masyarakat dan mengganggu aktivitas sosial, tetapi juga menimbulkan ancaman signifikan bagi perekonomian. Infrastruktur merupakan prasyarat penting bagi keberlangsungan kegiatan ekonomi. Biaya akibat perubahan iklim terhadap infrastruktur mencakup dampak ekonomi langsung dari kegiatan perbaikan, serta dampak ekonomi tidak langsung yang lebih luas akibat gangguan terhadap layanan infrastruktur.

Bermitra dengan CSIRO, lembaga sains asal Australia, Kementerian PPN/Bappenas dan KIAT telah melakukan kajian pertama atas risiko perubahan iklim terhadap infrastruktur di Indonesia. Hasil analisis tersebut menunjukkan bahwa skala kerugian berpotensi cukup besar, meningkat dari sekitar Rp38 triliun per tahun saat ini menjadi lebih dari Rp136 triliun per tahun pada pertengahan 2040-an apabila terjadi perubahan iklim tingkat sedang hingga berat. Kerugian yang disajikan ini hanya mencakup kerugian pada sebagian sektor transportasi, ketenagalistrikan, dan telekomunikasi yang dianalisis. Oleh karena itu, total kerugian di seluruh sistem infrastruktur diperkirakan akan jauh lebih besar.

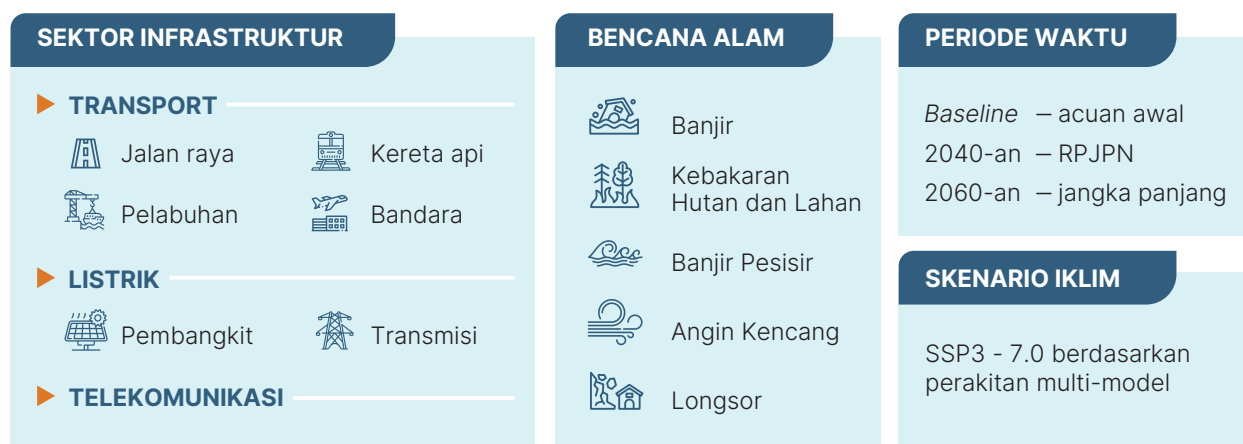
### 4.1 Lingkup penilaian risiko

Secara global, bukti mengenai dampak bencana akibat perubahan iklim terhadap infrastruktur semakin berkembang. Namun, basis data dan kajian yang komprehensif untuk konteks Indonesia masih terbatas. Dalam upaya memperkuat perumusan kebijakan dan penetapan prioritas investasi, Kementerian PPN/Bappenas dan KIAT menugaskan CSIRO untuk melakukan kajian terhadap hal-hal berikut:

*Berapa besar kerugian ekonomi yang dapat ditimbulkan oleh perubahan iklim terhadap infrastruktur Indonesia selama periode RPJPN 2025-2045 dan selanjutnya apabila tidak dilakukan upaya untuk mengurangi risiko?*

Pertanyaan ini hanya dapat dijawab melalui analisis geospasial yang terperinci terhadap masing-masing aset infrastruktur serta tingkat paparannya terhadap perubahan pola bahaya iklim. Selanjutnya, dampak pada tingkat aset diagregasi dan dilaporkan pada tingkat provinsi. Mengingat kompleksitas dan intensitas waktu yang diperlukan untuk jenis analisis ini, diperlukan pembatasan cakupan dalam beberapa aspek, termasuk sektor yang dianalisis, skenario iklim, biaya ekonomi, dan kerangka waktu.

GAMBAR 12: LINGKUP PENILAIAN RISIKO YANG DILAKUKAN UNTUK INFRASTRUKTUR DI INDONESIA



### 4.1.1 Fokus sektoral

Meskipun semua jenis infrastruktur akan terdampak oleh perubahan iklim, penilaian risiko ini difokuskan pada tiga sektor, yaitu transportasi, ketenagalistrikan, dan telekomunikasi. Ketiga sektor ini sering disebut sebagai “infrastruktur penting” karena perannya yang strategisnya dalam mendukung aktivitas ekonomi dan penanganan bencana. Pemilihan sektor-sektor tersebut juga mempertimbangkan ketersediaan data mengenai lokasi aset infrastruktur, yang sangat penting untuk penilaian risiko, serta pengelolaan yang dilakukan pada skala nasional. Sektor lain, seperti penyediaan air minum, memiliki tingkat kepentingan yang sama, namun keterbatasan akses data menjadi kendala dalam kajian ini.

Penilaian pada sektor transportasi mencakup seluruh jaringan jalan nasional, termasuk jalan tol, dengan total panjang lebih dari 50.000 km, sementara jalan daerah tidak termasuk dalam kajian ini. Jaringan kereta api nasional PT KAI di Pulau Jawa dan Sumatra termasuk dalam kajian, namun jalur kereta cepat Whoosh antara Jakarta dan Bandung tidak disertakan karena keterbatasan dalam memperkirakan biaya penggantian aset baru yang masih berada pada tahap awal dalam fase operasionalnya. Sebanyak 211 bandara dan 25 pelabuhan strategis juga termasuk dalam kajian ini.

Kajian terhadap sektor ketenagalistrikan mencakup sebagian besar aset pembangkit yang terhubung dengan jaringan listrik nasional, serta sebagian kecil dari jaringan transmisi. Hanya bagian jaringan transmisi antara pembangkit dan gardu induk pertama yang dikaji. Untuk memahami lebih lanjut mengenai dampak ekonomi akibat kerusakan pada saluran transmisi yang terjadi lebih jauh ke dalam jaringan, diperlukan pemodelan jaringan ketenagalistrikan yang kompleks. Jaringan distribusi tidak dikaji dengan alasan yang sama. Dengan demikian, estimasi kerugian pada sektor ketenagalistrikan hanya merepresentasikan sebagian kecil dari total kerugian yang kemungkinan terjadi.

Dalam sektor telekomunikasi, kajian difokuskan terhadap menara seluler. Meskipun menara seluler hanya merupakan titik akhir dari jaringan backhaul serat optik dan konektivitas antarpulau, data mengenai jaringan pendukung tersebut relatif terbatas. Selain itu, menara seluler diperkirakan menjadi elemen yang paling sensitif terhadap iklim dalam sistem telekomunikasi mengingat lokasinya yang berada di ruang terbuka.

### KOTAK 1: **PENILAIAN RISIKO IKLIM NASIONAL AUSTRALIA DAN RENCANA ADAPTASI NASIONAL**

Australia baru-baru ini melaksanakan Penilaian risiko Iklim Nasional (*National Climate Risk Assessment*) pertamanya. Kajian ini mempertimbangkan risiko iklim pada X sektor yang berbeda dalam perekonomian, termasuk sektor infrastruktur dan lingkungan yang dibangun. Meskipun kajian tersebut tidak mengkuantifikasi biaya ekonomi, hasilnya menunjukkan bahwa tingkat risiko terhadap infrastruktur pada tahun 2050 diperkirakan berada pada kategori tinggi hingga sangat tinggi, dengan tingkat keyakinan menengah.

Dengan menganalisis kelompok bahaya iklim dan sektor yang serupa, kajian tersebut secara khusus menyoroti sejumlah isu utama, yaitu dampak panas dan kebakaran hutan terhadap infrastruktur energi; kurangnya redundansi pada jaringan transportasi di wilayah perdesaan dan regional yang menyebabkan periode gangguan layanan yang panjang akibat banjir dan siklon; serta risiko yang sangat tinggi terhadap infrastruktur telekomunikasi, khususnya di wilayah pesisir.

Pada saat yang sama, Australia merilis Rencana Adaptasi Nasional yang baru, yang menguraikan langkah-langkah yang telah berjalan dan langkah-langkah baru yang akan ditempuh pemerintah untuk mendukung adaptasi. Untuk sektor infrastruktur dan lingkungan binaan, langkah-langkah tersebut mencakup penguatan kerangka regulasi infrastruktur kritis, dukungan langsung terhadap peningkatan ketahanan perkeretaapian, serta investasi baru dalam ilmu pengetahuan iklim dan data.

#### 4.1.2 Jenis-jenis bahaya yang dikaji

Kajian ini mencakup lima jenis bahaya, yaitu banjir akibat curah hujan (*pluvial flooding*), kebakaran hutan, inundasi pesisir (*lonjakan badai yang diperburuk oleh kenaikan muka air laut*), angin konvektif ekstrem (yang umumnya terkait dengan badai petir), serta longsor yang dipicu oleh curah hujan. Untuk masing-masing bahaya tersebut, CSIRO mengembangkan model bahaya khusus yang mengintegrasikan data tata guna lahan Indonesia, data bahaya, dan data meteorologi yang tersedia dengan pemodelan iklim untuk memproyeksi kejadian bahaya. Tingkat kedetilan pemetaan untuk setiap bahaya bervariasi, bergantung pada sumber data yang dikombinasikan. Perincian lengkap metodologi disajikan dalam Lampiran Teknis.

Perlu dicatat bahwa seluruh bahaya yang tercakup dalam kajian ini bersifat akut atau dalam waktu dekat. Selain itu, terdapat pula dampak perubahan iklim yang bersifat kronis yang juga akan memengaruhi infrastruktur. Sebagai contoh, peningkatan suhu lingkungan dapat memengaruhi stabilitas bahan pengikat perkerasan jalan serta berdampak pada produktivitas teknologi pembangkitan listrik. Jenis dampak seperti ini memerlukan pendekatan analitis yang berbeda, dan tidak termasuk dalam penilaian risiko ini.

#### 4.1.3 Model iklim dan skenario yang digunakan

Saat ini terdapat sekitar 100 model iklim global yang telah dikembangkan dalam kerangka *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP) fase 6, yang merupakan standar terbaru untuk pemodelan iklim yang direkomendasikan oleh IPCC. Sebagian besar model tersebut memiliki resolusi spasial sekitar 250 km, yang berarti model memprediksi variabel iklim pada petak grid

di permukaan bumi dengan ukuran sekitar 250 km × 250 km. CSIRO memilih tujuh model yang dinilai paling representatif dan prediktif untuk Indonesia, kemudian melakukan koreksi bias dan penurunan skala (*downscaling*) terhadap model-model tersebut menggunakan data historis hingga mencapai resolusi 32 km.

Analisis penilaian risiko menggunakan skenario SSP3-7.0 yang direkomendasikan oleh IPCC, yang juga dikenal sebagai skenario Regional Rivalry (Persaingan Regional). Skenario ini merepresentasikan lintasan emisi yang relatif tinggi, dengan proyeksi pemanasan global sekitar 3,6°C di atas tingkat pra-industri pada tahun 2100. Skenario ini menggambarkan dunia yang berfokus pada kepentingan nasional dan regional, yang mengarah pada berkurangnya perdagangan internasional, pertumbuhan ekonomi yang lambat, serta inovasi teknologi yang juga berlangsung lambat. Perlu dicatat bahwa skenario SSP3-7.0 bukan merupakan skenario terburuk yang direkomendasikan IPCC. Skenario terburuknya adalah SSP5-8.5, yang mengasumsikan emisi gas rumah kaca diperkirakan akan terus berlangsung hampir tanpa pengendalian. Skenario tersebut tidak digunakan dalam kajian ini karena dipandang sebagai hasil dengan probabilitas yang rendah.

#### 4.1.4 Perkiraan biaya ekonomi

Penilaian risiko ini memperkirakan biaya ekonomi langsung dan tidak langsung dari bahaya iklim terhadap infrastruktur. Biaya langsung mencakup biaya perbaikan yang harus ditanggung oleh pemilik aset untuk memperbaiki kerusakan aset akibat suatu kejadian bahaya. Jenis biaya langsung lainnya juga meliputi hilangnya pendapatan bagi pemilik aset akibat penurunan pungutan pengguna ketika aset tidak dapat beroperasi karena kerusakan. Hal ini bisa mencakup kehilangan pendapatan tol bagi pemilik jalan tol, atau kehilangan pendapatan dari biaya layanan penumpang di bandara yang tidak bisa beroperasi.

Biaya tidak langsung merujuk pada kerugian aktivitas ekonomi yang lebih luas yang bergantung pada keberfungsian infrastruktur. Hal ini dapat berupa hilangnya nilai perdagangan akibat pelabuhan yang tidak dapat mengeksport barang secara tepat waktu, atau menurunnya produktivitas pekerja yang tidak dapat mencapai tempat kerja mereka karena jalan ditutup akibat suatu kejadian bahaya. Untuk penilaian risiko ini, biaya tidak langsung tersebut sebagian besar diestimasi menggunakan data lalu lintas atau tingkat pemanfaatan infrastruktur serta biaya upah rata-rata per jam pada tingkat regional.

Tidak semua jenis kerugian ekonomi dapat diestimasi untuk seluruh jenis aset dan bahaya dalam penilaian risiko ini. Sebagai contoh, beberapa jenis kerusakan berpotensi bersifat katastrofik atau menimbulkan biaya perbaikan yang terlalu kompleks untuk diperkirakan. Biaya penggantian jalan merupakan tolok ukur yang relatif umum untuk panjang ruas jalan tertentu, misalnya satu kilometer. Namun, biaya tahunan rata-rata dari kejadian berdampak tinggi dengan kemungkinan kejadian rendah, seperti banjir besar atau kebakaran pada aset khusus seperti bandara, pembangkit listrik tenaga batu bara, atau pelabuhan laut, dapat sangat besar dan sangat sulit untuk diestimasi. Oleh karena itu, jenis biaya tersebut tidak dimasukkan dalam kajian ini, yang berarti estimasi kerugian ekonomi cenderung lebih rendah dari kondisi sebenarnya.

Biaya ekonomi selanjutnya diagregasi dan dilaporkan sebagai “kerugian tahunan rata-rata”. Kerugian tersebut bukan merupakan kerugian spesifik pada tahun tertentu, melainkan kerugian yang diperkirakan atau rata-rata berdasarkan kondisi iklim, tingkat bahaya, dan populasi pada periode tersebut. Kerugian ini dinyatakan dalam mata uang rupiah tahun 2025 untuk periode waktu saat ini maupun masa depan, guna memudahkan perbandingan tanpa dipengaruhi oleh inflasi. Meskipun penilaian risiko ini tidak mencakup pemodelan dinamis maupun pemodelan keseimbangan, besaran kerugian ini secara kasar dapat disepadankan dengan kerugian terhadap Produk Domestik Bruto (PDB).

#### **4.1.5 Periode waktu yang dijadikan model**

Bahaya terkait iklim telah memberikan dampak terhadap infrastruktur di Indonesia pada saat ini. Oleh karena itu, kajian ini diawali dengan estimasi kerugian dasar pada kondisi saat ini, yaitu pada pertengahan tahun 2020-an. Estimasi dasar ini kemudian dibandingkan dengan dua periode waktu di masa depan. IPCC merekomendasikan analisis proyeksi iklim pada dua kurun waktu masa depan untuk mempertimbangkan ketidakpastian emisi gas rumah kaca di masa depan serta variasi respons iklim. Pendekatan ini memungkinkan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap potensi dampak perubahan iklim dan mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti ilmiah terbaik yang tersedia.

Indonesia telah membangun infrastruktur baru secara pesat selama satu dekade terakhir dan tren ini diperkirakan akan berlanjut hingga tahun 2040-an dan seterusnya, sejalan dengan rencana yang tercantum dalam RPJPN. Namun demikian, lokasi pembangunan infrastruktur tersebut di masa depan tidak dapat dipastikan, sementara penilaian risiko iklim ini bersifat spesifik lokasi. Oleh karena itu, penilaian risiko ini mengasumsikan tidak adanya perubahan dalam jumlah, lokasi, maupun kondisi infrastruktur yang saat ini dikaji. Pendekatan ini juga memberikan manfaat berupa pemisahan dampak perubahan iklim dari faktor lain, seperti peningkatan jumlah aset infrastruktur.

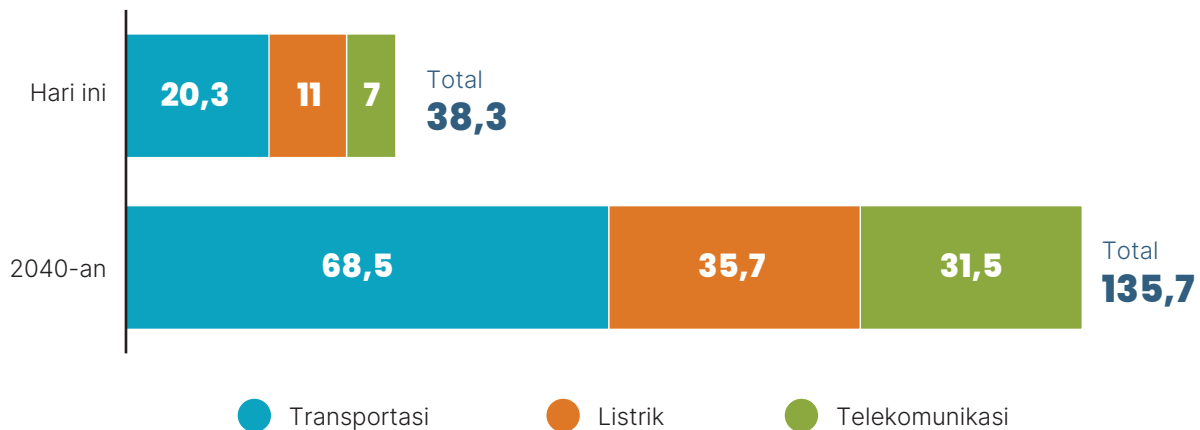
### **4.2 Hasil penilaian risiko**

#### **4.2.1 Perubahan kerugian berdasarkan sektor**

Penilaian risiko menunjukkan peningkatan yang sangat signifikan dalam kerugian tahunan rata-rata akibat bahaya terkait iklim antara kondisi saat ini dan periode 2040-an. Kerugian diperkirakan meningkat sekitar 3,5 kali lipat, dari sekitar Rp38 triliun per tahun saat ini menjadi hampir Rp136 triliun per tahun pada pertengahan 2040-an (Gambar 13). Peningkatan ini bersifat sangat tajam dan signifikan dalam rentang waktu yang relatif singkat. Menariknya, pemodelan jangka panjang hingga periode 2060-an menunjukkan bahwa kerugian tidak mengalami perubahan yang signifikan pada periode kedua tersebut. Sebagian besar peningkatan biaya akibat perubahan iklim terjadi dalam dua puluh tahun ke depan, yang semakin menegaskan urgensi untuk melakukan tindakan sejak dini.

Peningkatan kerugian relatif konsisten di ketiga sektor yang dikaji. Sektor transportasi merupakan sektor dengan kerugian terbesar pada kondisi saat ini, yang tidak mengherankan mengingat cakupan geografisnya yang paling luas. Kerugian pada sektor transportasi diperkirakan meningkat dari sekitar Rp20 triliun per tahun saat ini menjadi hampir Rp70 triliun pada periode 2040-an. Pada sektor ketenagalistrikan, kerugian saat ini diperkirakan sebesar Rp11 triliun (dengan catatan bahwa hanya sebagian kecil jaringan transmisi dan tidak termasuk jaringan distribusi yang dikaji), dan meningkat menjadi hampir Rp36 triliun pada periode 2040-an. Kerugian pada sektor telekomunikasi meningkat sekitar 4,5 kali lipat selama periode tersebut, dari sekitar Rp7 triliun per tahun saat ini menjadi Rp31 triliun.

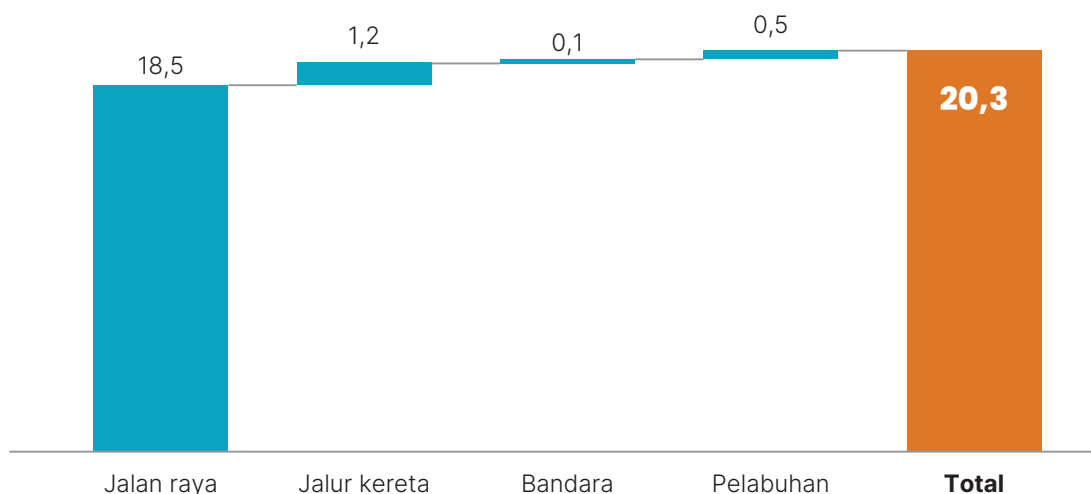
GAMBAR 13: KERUGIAN TAHUNAN RATA-RATA AKIBAT BAHAYA IKLIM BERDASARKAN SEKTOR (2025, DALAM TRILIUN RUPIAH)



Kerugian yang terjadi saat ini merepresentasikan sekitar 0,2% dari Produk Domestik Bruto (PDB) Indonesia. Dengan mempertimbangkan keterbatasan cakupan kajian ini, total kerugian akibat bahaya iklim terhadap infrastruktur pada kondisi saat ini diperkirakan lebih mendekati 1% dari PDB atau lebih. Dengan potensi peningkatan kerugian hingga 3,5 kali lipat dalam dua puluh tahun ke depan, Indonesia perlu mencatat pertumbuhan PDB yang sangat cepat untuk mempertahankan tingkat kerugian tersebut agar tetap proporsional terhadap PDB. Mengingat infrastruktur yang belum dibangun belum tercakup dalam kajian ini, kerugian dari aset-aset baru tersebut perlu dikendalikan melalui penerapan desain dan konstruksi yang lebih tahan iklim.

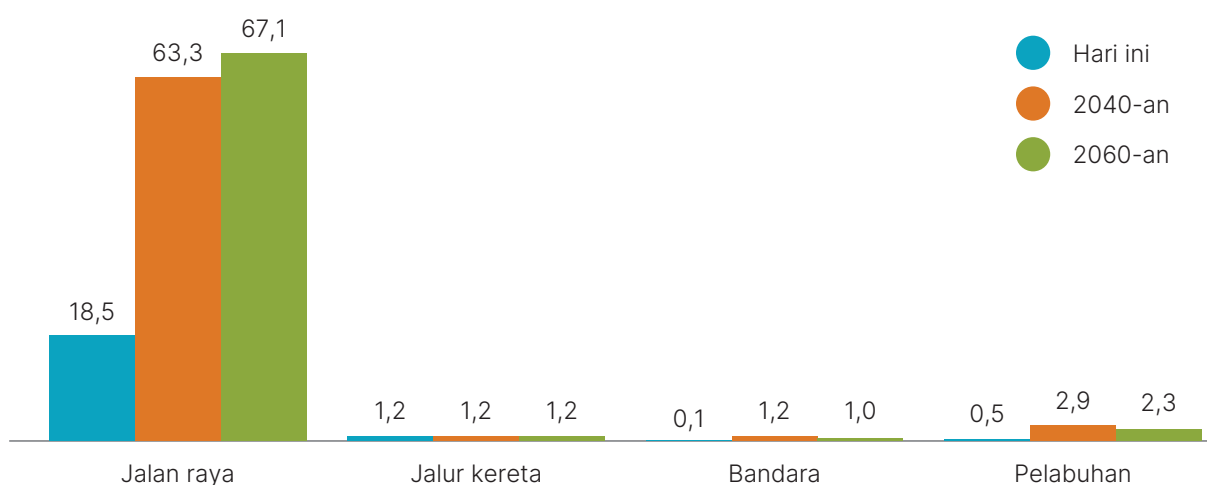
Dalam sektor transportasi, kajian ini menemukan bahwa subsektor jalan merupakan kontributor kerugian terbesar, dengan menyumbang lebih dari 90% dari total kerugian sektor transportasi. (Gambar 14). Hal ini tidak mengherankan mengingat panjang jaringan jalan yang dikaji sekitar delapan kali lebih panjang dibandingkan jaringan kereta api. Bandara dan pelabuhan laut saat ini mengalami kerugian yang relatif kecil, dengan catatan bahwa estimasi tersebut terutama merupakan kerugian tidak langsung akibat sulitnya memperkirakan biaya penggantian kerusakan aset (lihat 4.1.4 di atas).

GAMBAR 14: KERUGIAN TAHUNAN SEKTOR TRANSPORTASI PADA KONDISI SAAT INI BERDASARKAN SUBSEKTOR (2025, DALAM TRILIUN RUPIAH)



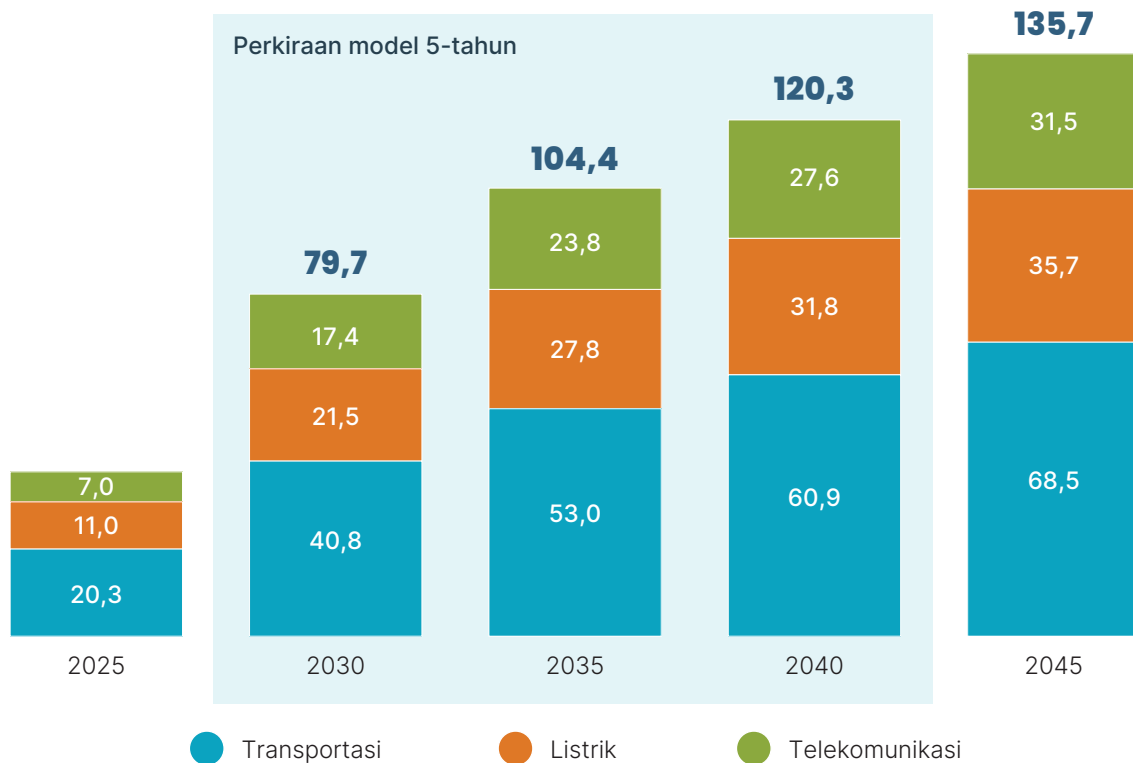
Namun demikian, perubahan kerugian pada periode-periode masa depan memberikan perspektif yang berbeda mengenai tantangan di masing-masing subsektor transportasi (Gambar 15). Kerugian pada subsektor jalan meningkat secara signifikan, sejalan dengan peningkatan total kerugian secara keseluruhan sekitar 3,5 kali lipat hingga periode 2040-an. Kerugian pada subsektor perkeretaapian relatif tidak berubah, sebagai temuan yang cukup mengejutkan. Hal ini mungkin disebabkan oleh jalur rel yang dibangun pada koridor dengan kemiringan rendah, sehingga perubahan tingkat bahaya diperkirakan relatif minimal. Subsektor bandara dan pelabuhan laut mengalami peningkatan kerugian yang sangat besar dari basis awal yang rendah, masing-masing meningkat hingga 12 kali lipat dan 6 kali lipat pada periode 2040-an. Selanjutnya, kerugian pada kedua subsektor tersebut sedikit menurun pada periode 2060-an, yang kemungkinan disebabkan oleh penurunan ringan frekuensi badai petir dan angin kencang dalam pemodelan iklim jangka panjang.

GAMBAR 15: KERUGIAN TAHUNAN DI SEKTOR TRANSPORTASI BERDASARKAN SUBSEKTOR UNTUK SELURUH PERIODE WAKTU (2025, DALAM TRILIUN RUPIAH)



Sebagaimana dijelaskan sebelumnya, model iklim menggunakan interval dekade dan tidak dirancang untuk mengestimasi perubahan dalam jangka waktu yang lebih pendek, karena perubahan iklim terjadi secara bertahap. Untuk mendukung siklus perencanaan nasional Indonesia yang berlangsung setiap lima tahun, kerugian dalam interval dua puluh tahun antara kondisi saat ini dan pertengahan 2040-an telah diinterpolasi ke dalam interval lima tahunan guna memberikan gambaran mengenai skala tantangan pada titik waktu antara tersebut. Interpolasi tingkat tinggi ini tidak dimaksudkan untuk analisis rinci, namun menunjukkan bahwa kerugian kemungkinan akan meningkat dengan cepat hingga tahun 2030, yang semakin menegaskan urgensi untuk menangani tantangan ini.

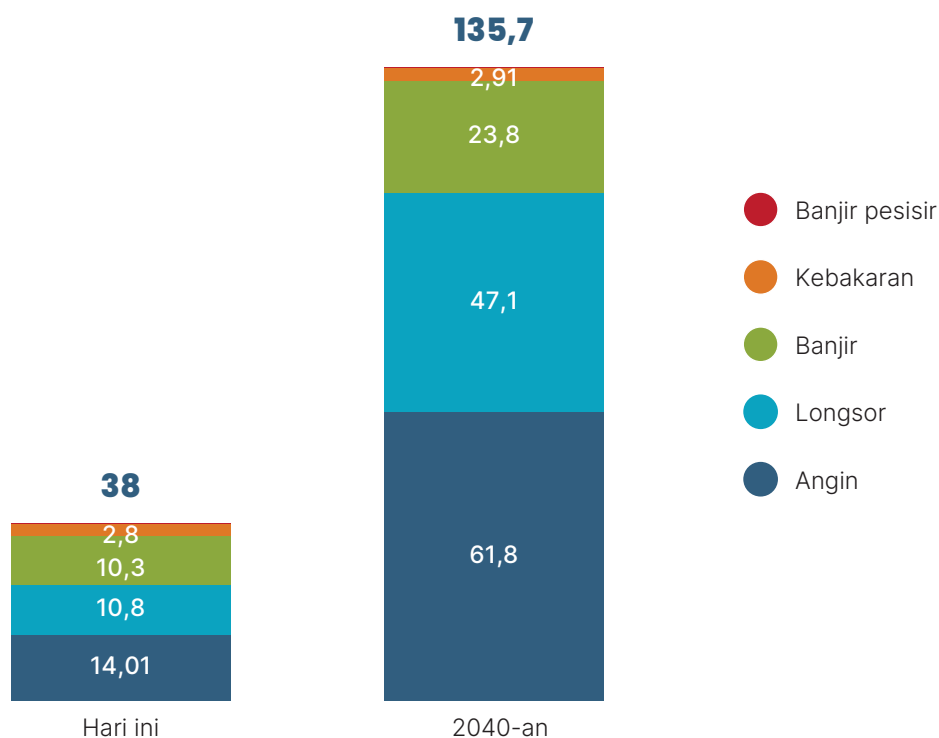
GAMBAR 16: KERUGIAN TAHUNAN RATA-RATA AKIBAT BAHAYA IKLIM BERDASARKAN SEKTOR DALAM INTERVAL LIMA TAHUNAN (2025, DALAM TRILIUN RUPIAH)



#### 4.2.2 Dampak berbagai jenis bahaya

Peningkatan total kerugian tahunan rata-rata dari kondisi saat ini hingga periode 2040-an juga dapat diuraikan berdasarkan lima jenis bahaya iklim yang dianalisis dalam penilaian risiko ini. (Gambar 17). Saat ini, bahaya paling utama adalah angin, tanah longsor, dan banjir. Pola ini tetap konsisten hingga periode 2040-an, meskipun kerugian akibat angin dan longsor meningkat dengan laju yang lebih cepat dibandingkan banjir, yang meningkat sekitar empat kali lipat selama periode tersebut, sementara kerugian akibat banjir hanya meningkat sekitar dua kali lipat. Kerugian akibat kebakaran relatif kecil, sekitar Rp3 triliun, dan pada dasarnya tidak mengalami perubahan. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh kebakaran hutan di Indonesia yang umumnya terjadi di wilayah-wilayah terpencil di Kalimantan dan Sumatra, di mana keberadaan infrastruktur nasional relatif lebih terbatas.

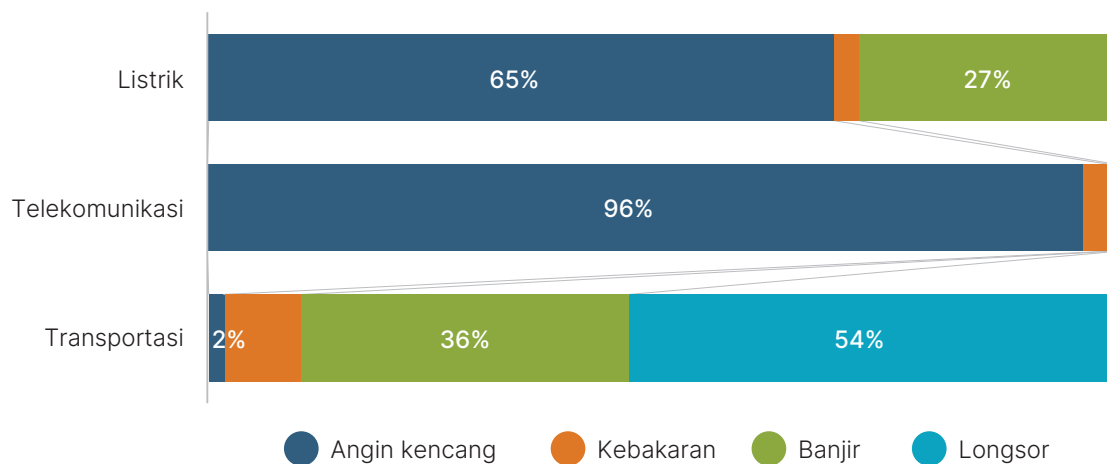
GAMBAR 17: PERUBAHAN KERUGIAN BERDASARKAN JENIS BAHAYA IKLIM (2025, DALAM TRILIUN RUPIAH)



Penilaian risiko menunjukkan bahwa genangan pesisir akibat kenaikan muka air laut merupakan bahaya dengan kontribusi kerugian paling kecil dan tidak mengalami perubahan yang signifikan pada periode masa depan. Meskipun temuan ini mungkin terlihat mengejutkan, perlu dicatat bahwa kajian ini hanya mempertimbangkan infrastruktur pada tingkat nasional yang relatif kecil kemungkinannya dibangun tepat di sepanjang garis pantai. Sebaliknya, infrastruktur lokal dan permukiman yang umumnya berlokasi lebih dekat ke wilayah pesisir akan memiliki tingkat paparan yang lebih tinggi, khususnya di kawasan seperti pesisir utara Pulau Jawa. Kenaikan muka air laut juga merupakan salah satu dampak perubahan iklim yang berkembang secara lebih lambat, dengan puncak dampak yang diproyeksikan baru terjadi setelah tahun 2100 dalam skenario SSP3.

Sumber variasi terbesar dalam dampak bahaya iklim berasal dari sektor infrastruktur itu sendiri. Perbedaan karakteristik fisik dari berbagai jenis aset menyebabkan masing-masing aset menghadapi profil bahaya yang sangat berbeda. (Gambar 18). Di sektor transportasi, longsor dan banjir merupakan risiko utama karena kemampuannya untuk mengganggu jalan, jalur rel, dan landasan pacu. Risiko longsor menjadi sangat krusial khususnya bagi subsektor jalan, mengingat jalan memegang peran utama dalam sistem transportasi di wilayah pegunungan Indonesia, di mana kejadian longsor relatif lebih sering terjadi. Sebaliknya, sektor telekomunikasi dan ketenagalistrikan jauh lebih rentan terhadap angin kencang. Hal ini disebabkan oleh ketergantungan kedua sektor tersebut pada infrastruktur yang bersifat terbuka atau berada di atas permukaan tanah, seperti menara seluler, jaringan transmisi, serta menara turbin angin untuk pembangkitan listrik.

GAMBAR 18: PROPORSI KERUGIAN AKIBAT BAHAYA IKLIM BERDASARKAN SEKTOR PADA PERIODE 2040-AN (PERSENTASE)



Meskipun meningkatnya frekuensi kejadian angin kencang jelas menimbulkan ancaman besar terhadap infrastruktur yang berada di atas permukaan tanah, pemodelan perubahan pola angin secara akurat masih merupakan tantangan yang signifikan. Perubahan pola angin merupakan dampak sekunder, bukan dampak utama, dari perubahan iklim. Proyeksi angin dari berbagai model iklim menunjukkan variasi yang sangat besar, dan analisis angin dalam penilaian risiko ini menemukan tingkat variabilitas yang sangat tinggi pada tingkat provinsi—jauh lebih tinggi dibandingkan jenis bahaya lainnya. Oleh karena itu, diperlukan penelitian dan analisis lanjutan untuk memahami dengan lebih baik perubahan kecepatan angin maksimum di berbagai wilayah Indonesia serta dampaknya terhadap infrastruktur kritis di atas permukaan tanah.

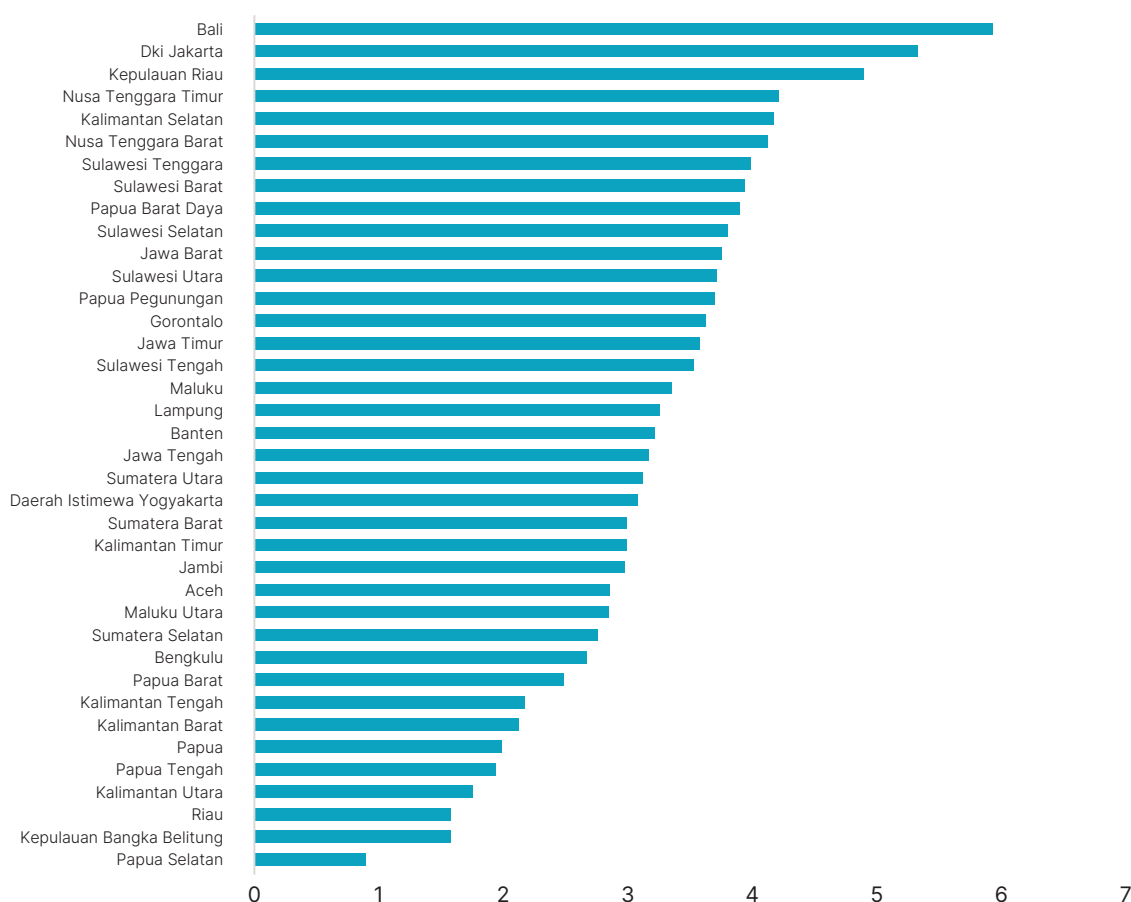
### 4.2.3 Variasi regional dampak iklim

Mengingat luas wilayah dan keragaman karakteristik kepulauan Indonesia, terdapat variasi regional yang signifikan dalam dampak perubahan iklim yang diperkirakan akan terjadi. Jenis dan tingkat bahaya juga dipengaruhi oleh faktor manusia, seperti tata guna lahan—terutama dalam pola kejadian kebakaran—serta probabilitas dan dampak banjir. Penilaian risiko ini berfokus pada lokasi spesifik aset infrastruktur serta tingkat pemanfaatannya oleh penduduk di sekitarnya. Dengan demikian, kajian ini juga mencerminkan perbedaan yang signifikan antarprovinsi dalam hal jumlah dan kondisi infrastruktur yang ada, total populasi, serta kepadatan penduduk. Provinsi-provinsi di Pulau Jawa diperkirakan akan mengalami kerugian ekonomi terbesar karena memiliki jumlah infrastruktur yang paling banyak serta tingkat pemanfaatan yang paling tinggi.

Untuk mengisolasi dampak perubahan iklim dan memungkinkan perbandingan yang lebih antar provinsi, penilaian risiko ini menitikberatkan pada tingkat perubahan kerugian ekonomi antara kondisi saat ini dan periode 2040-an. Meskipun peningkatan absolut kerugian ekonomi mungkin relatif kecil, lonjakan yang besar dalam tingkat perubahan tersebut tetap dapat menimbulkan tantangan fiskal dan logistik yang signifikan bagi provinsi dengan jumlah penduduk yang lebih kecil dan infrastruktur yang lebih terbatas.

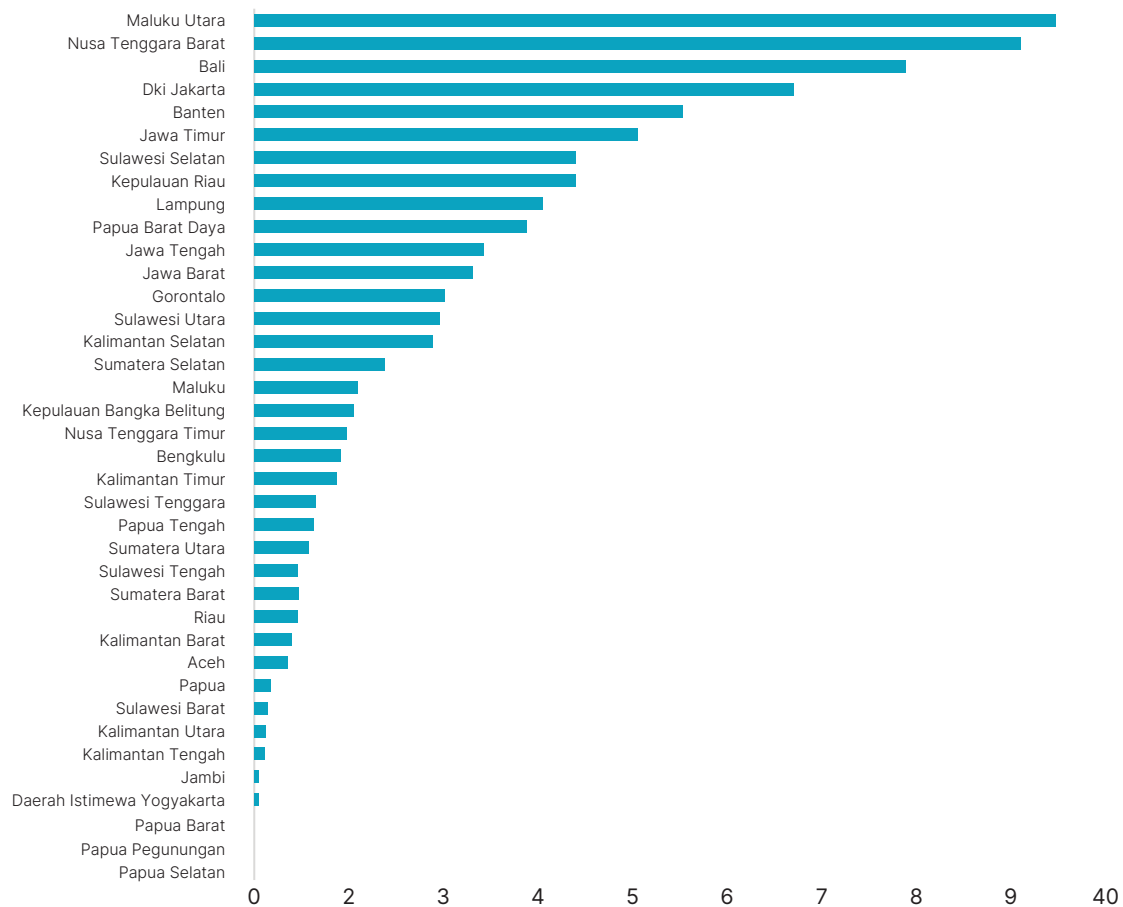
Gambar 19 menunjukkan perubahan kerugian pada sektor transportasi dalam bentuk rasio antara kerugian pada periode 2040-an dan kerugian pada kondisi saat ini untuk masing-masing provinsi. Provinsi-provinsi yang berada di sisi kiri grafik diperkirakan akan mengalami peningkatan kerugian terbesar dibandingkan dengan tingkat kerugian saat ini, sedangkan provinsi-provinsi di sisi kanan berada di bawah rata-rata nasional yang sekitar 3,5 kali lipat. Tingkat variasi kerugian tersebut, bahkan dengan menggunakan metrik normalisasi ini, sangat mencolok. Papua Selatan diperkirakan justru mengalami sedikit penurunan kerugian pada sektor transportasi, sementara Bali dan DKI Jakarta diperkirakan akan mengalami peningkatan kerugian lebih dari lima kali lipat dibandingkan dengan tingkat saat ini.

**GAMBAR 19: PERUBAHAN KERUGIAN SEKTOR TRANSPORTASI DARI KONDISI SAAT INI HINGGA PERIODE 2040-AN BERDASARKAN PROVINSI**



Analisis serupa terhadap kerugian pada sektor ketenagalistrikan menunjukkan variasi regional yang bahkan lebih besar dibandingkan dengan sektor transportasi. Dalam dua puluh tahun ke depan, terdapat sejumlah besar provinsi yang diperkirakan mengalami kerugian yang relatif stagnan atau bahkan menurun, sementara sejumlah kecil provinsi lainnya menghadapi peningkatan kerugian yang sangat besar. Tingkat variasi yang lebih tinggi ini kemungkinan mencerminkan distribusi infrastruktur ketenagalistrikan yang lebih tidak merata di seluruh wilayah Indonesia, serta tingginya sensitivitas infrastruktur transmisi terhadap kejadian angin kencang. Beberapa provinsi tidak memiliki infrastruktur ketenagalistrikan yang memenuhi kriteria analisis berdasarkan data yang tersedia dalam penilaian risiko ini, sehingga ditampilkan dengan nilai nol.

GAMBAR 20: PERUBAHAN KERUGIAN SEKTOR KETENAGALISTRIKAN DARI KONDISI SAAT INI HINGGA PERIODE 2040-AN BERDASARKAN PROVINSI



Data pada tingkat provinsi ini memungkinkan identifikasi sejumlah provinsi yang paling berisiko terhadap dampak perubahan iklim pada infrastrukturnya. Meskipun penilaian risiko ini hanya mencakup cakupan infrastruktur yang terbatas, aset yang dianalisis merupakan sebagian dari infrastruktur yang paling krusial dan hasil kajian ini dapat membantu mengarahkan serta memfokuskan investasi dalam upaya peningkatan ketahanan. Meskipun data juga tersedia untuk sektor telekomunikasi, kerugian pada sektor tersebut sangat bergantung pada kejadian angin konvektif kuat. Variabilitas angin yang sangat tinggi dalam pemodelan iklim menjadikan hasil untuk sektor telekomunikasi lebih sulit untuk diinterpretasikan.

#### 4.2.4 Dampak yang berbeda terhadap kelompok rentan

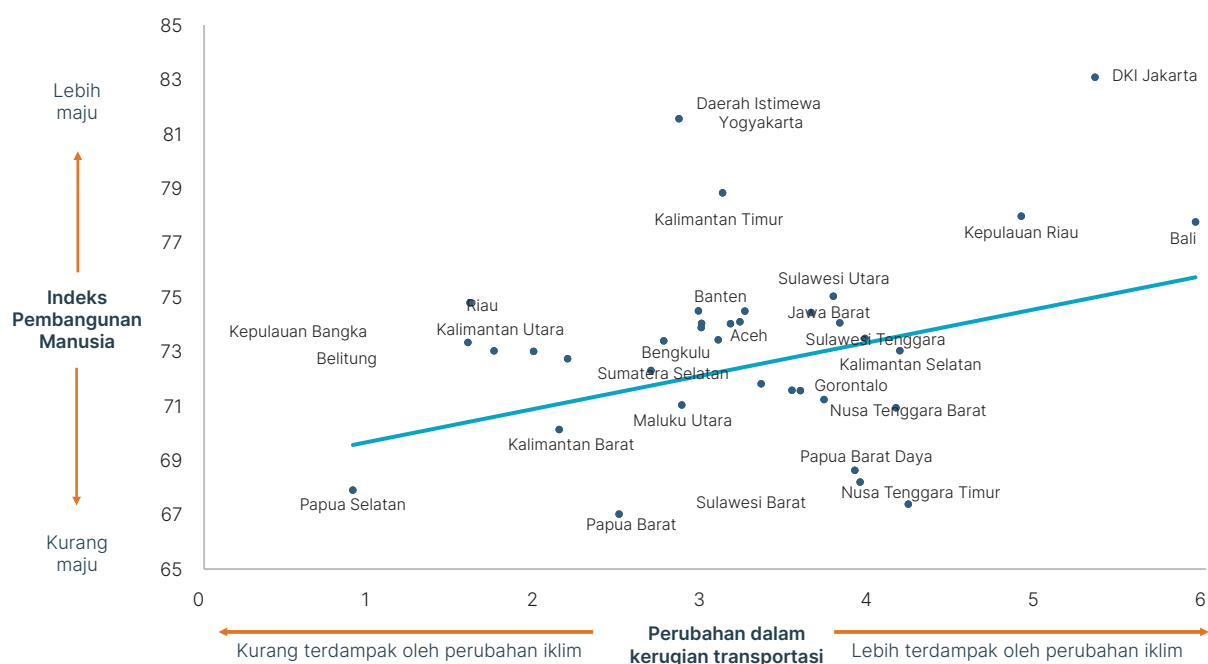
Gangguan dan kegagalan pada jaringan infrastruktur serta layanan yang disediakan berpotensi memperburuk kondisi ketimpangan sosial yang telah ada. Berbagai studi menunjukkan bahwa masyarakat berpenghasilan rendah terdampak secara tidak proporsional oleh bencana alam (Hallegatte et al., 2020). Sebagai contoh, sebuah survei terhadap 200 rumah tangga di Mumbai, India, menunjukkan bahwa ketidaktersediaan akses jalan akibat banjir menyebabkan rumah tangga miskin kehilangan hari kerja, yang berujung pada hilangnya pendapatan, penurunan produktivitas, dan dalam beberapa kasus kehilangan pekerjaan. (Patankar, 2015). Terdapat pula berbagai studi di Indonesia yang mengkaji hubungan antara paparan terhadap bencana alam dan kemiskinan rumah tangga (Dartanto, 2022). Hubungan sebab-akibat ini juga bekerja

sebaliknya, di mana rumah tangga berpenghasilan rendah sering kali terpaksa menempati lokasi-lokasi dengan tingkat paparan bahaya yang paling tinggi, seperti di bantaran sungai atau jalur alami aliran banjir.

Meskipun temuan-temuan semacam ini telah banyak dilaporkan dan diterima secara luas, penilaian risiko iklim ini menggunakan data populasi secara agregat sehingga sulit untuk memisahkan dampak gangguan infrastruktur terkait iklim terhadap berbagai kelompok rentan. Untuk memahami bagaimana berbagai tipe rumah tangga terdampak oleh gangguan layanan—termasuk keterkaitannya dengan ketimpangan gender—diperlukan data rumah tangga mengenai pola pemanfaatan infrastruktur.

Terdapat variasi tingkat pembangunan yang signifikan di Indonesia, bahkan pada tingkat provinsi. Analisis telah dilakukan untuk menguji apakah provinsi dengan tingkat pembangunan yang lebih rendah (diukur melalui Indeks Pembangunan Manusia) cenderung mengalami peningkatan kerugian infrastruktur yang lebih besar akibat perubahan iklim. Kondisi tersebut berpotensi menempatkan provinsi-provinsi yang kurang berkembang pada tingkat tekanan ekonomi yang sangat tinggi. Namun demikian, kajian ini tidak menemukan adanya korelasi antara tingkat pembangunan yang lebih rendah dengan peningkatan kerugian infrastruktur yang lebih besar (Gambar 21). Bahkan, korelasi yang ditemukan, meskipun lemah, cenderung bergerak ke arah sebaliknya, di mana provinsi-provinsi yang lebih makmur dan lebih maju justru menghadapi kerugian yang lebih besar. Analisis ini dilakukan untuk kerugian pada sektor transportasi, namun hasil yang serupa juga ditemukan pada sektor ketenagalistrikan.

**GAMBAR 21: HUBUNGAN ANTARA PENINGKATAN KERUGIAN SEKTOR TRANSPORTASI DAN TINGKAT PEMBANGUNAN MANUSIA**



Provinsi dengan tingkat pembangunan yang lebih tinggi cenderung memiliki lebih banyak infrastruktur per kapita dan lebih bergantung padanya untuk aktivitas ekonomi, sehingga menjadi lebih rentan terhadap kerusakan dan gangguan infrastruktur. Namun, penggunaan rasio antara kerugian masa depan dan kerugian saat ini telah menyesuaikan pengaruh tersebut. Penjelasan alternatifnya adalah bahwa tingkat pembangunan yang lebih tinggi mendorong pembangunan infrastruktur di wilayah-wilayah yang lebih terekspos terhadap dampak perubahan iklim. Jika demikian, hal ini mengindikasikan meningkatnya risiko seiring tekanan pembangunan yang menyebabkan pemanfaatan lahan-lahan yang lebih marginal atau lebih terekspos. Diperlukan analisis lanjutan sebelum hipotesis ini dapat dipastikan.

Perlu dicatat bahwa penilaian risiko dan analisis ini hanya berfokus pada infrastruktur ekonomi, yaitu transportasi, ketenagalistrikan, dan telekomunikasi. Analisis serupa terhadap dampak perubahan iklim pada infrastruktur sosial, seperti rumah sakit dan sekolah, kemungkinan akan menunjukkan pola paparan dan risiko yang berbeda serta keterkaitannya dengan tingkat pembangunan suatu provinsi.

Salah satu kompleksitas penting dalam memahami kerusakan ekonomi pada rumah tangga akibat gangguan infrastruktur adalah faktor redundansi. Meskipun wilayah yang lebih maju cenderung memiliki lebih banyak infrastruktur sehingga lebih terekspos, dan mungkin juga memiliki lebih banyak infrastruktur di area berisiko tinggi, stok infrastruktur yang lebih besar tersebut juga menciptakan redundansi dalam jaringan infrastruktur. Di Jakarta, misalnya, meskipun suatu ruas jalan ditutup dalam jangka waktu yang lama akibat banjir, masih tersedia banyak rute alternatif. Kondisi ini kecil kemungkinannya terjadi di wilayah terpencil atau pegunungan, di mana suatu desa atau kota dapat bergantung hanya pada satu akses jalan. Efek redundansi ini bersifat kompleks untuk dimodelkan dalam penilaian risiko, namun seharusnya menjadi pertimbangan penting bagi pemilik infrastruktur dalam memprioritaskan peningkatan ketahanan aset.

### 4.3 Temuan utama dari penilaian risiko

Secara ringkas, terdapat beberapa temuan penting dari penilaian risiko ini yang dapat membantu mengarahkan pendekatan pengembangan infrastruktur yang lebih berketahanan iklim di Indonesia:

- Sebagian besar peningkatan biaya terjadi antara kondisi saat ini dan periode 2040-an, bukan setelah periode 2040-an. Hal ini menegaskan pentingnya mengambil tindakan sekarang untuk menangani risiko iklim pada infrastruktur, dan tidak menunggu hingga periode 2040-an ketika sebagian besar biaya tersebut telah terjadi.
- Infrastruktur yang berada di atas permukaan tanah, seperti jaringan transmisi dan menara seluler, sangat rentan terhadap peningkatan intensitas angin. Meskipun diperlukan kajian lanjutan untuk memahami dampak angin secara lebih mendalam, kemungkinan besar aset-aset yang ada perlu diperkuat di wilayah-wilayah dengan dampak angin paling tinggi.

- Kejadian longsor diperkirakan akan meningkat dan mendorong biaya perbaikan yang besar pada sektor jalan. Namun demikian, dampak ekonomi dari longsor relatif lebih rendah dibandingkan bahaya lainnya karena jalan yang terdampak cenderung berada di wilayah yang lebih terpencil.
- Terdapat variasi regional yang signifikan dalam peningkatan kerugian akibat bahaya iklim terhadap infrastruktur, dengan provinsi-provinsi yang paling terdampak mengalami peningkatan biaya sebesar dua hingga tiga kali lipat dari rata-rata nasional. Informasi ini dapat dimanfaatkan untuk menargetkan intervensi pada provinsi-provinsi yang paling membutuhkan.

#### 4.4 Keterbatasan dan area untuk penelitian lanjutan

Penting untuk mencermati keterbatasan dari jenis penilaian risiko ini. Kajian ini mengagregasi berbagai sumber data yang beragam, di mana sebagian sumber data bersifat tidak lengkap atau memiliki kualitas yang bervariasi. Pemodelan iklim itu sendiri masih memiliki tingkat ketidakpastian yang signifikan, sebagaimana tercermin dalam perbedaan hasil antarberbagai model iklim global (GCM) untuk skenario iklim yang sama. Salah satu area dengan keterbatasan data yang cukup besar adalah durasi gangguan ketika infrastruktur mengalami kerusakan. Peningkatan pengumpulan data pada aspek ini akan secara signifikan memperbaiki pemahaman mengenai dampak ekonomi perubahan iklim terhadap infrastruktur.

Keterbatasan utama dalam penilaian risiko ini adalah tidak dimasukkannya data kerentanan, khususnya sensitivitas masing-masing aset infrastruktur terhadap berbagai bahaya yang dikaji. Sebaliknya, kajian ini terutama didasarkan pada paparan aset dengan menggunakan informasi lokasi. Kajian ini membuat asumsi umum mengenai kondisi aset untuk keperluan pemodelan kerugian. Data mengenai kondisi spesifik dan, dengan demikian, sensitivitas masing-masing aset atau bagian aset pada umumnya tidak tersedia. Hal ini mencakup informasi seperti ketinggian jalan terhadap lingkungan sekitarnya atau kondisi permukaannya, maupun kekuatan desain dan kondisi menara transmisi. Saat ini, KIAT tengah melakukan pemodelan lanjutan bersama Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian PUPR, untuk mengintegrasikan data kondisi aset jalan nasional menggunakan sistem manajemen aset yang telah ada. Hasil pemodelan ini diharapkan dapat mendukung penargetan program pemeliharaan preventif pada ruas-ruas jalan nasional yang paling rentan, sehingga ketahanannya dapat ditingkatkan secara bertahap.



## 5 | PENDANAAN DAN PEMBIAYAAN INFRASTRUKTUR BERKETAHANAN IKLIM

Meskipun infrastruktur yang lebih tahan iklim jelas dibutuhkan, pendanaan dan pembiayaannya harus bersaing dengan berbagai kebutuhan modal lainnya, baik untuk pembangunan infrastruktur secara umum maupun untuk upaya mitigasi perubahan iklim. Tren global menunjukkan ketidakseimbangan yang signifikan dalam alokasi pembiayaan iklim, dengan 91% dialokasikan untuk upaya mitigasi pada periode 2021/2022, terutama di sektor energi dan transportasi. Meskipun pembiayaan adaptasi mengalami peningkatan sebesar 29% menjadi USD63 miliar pada periode 2021/2022, proporsinya terhadap total pembiayaan iklim hampir berkurang setengah dibandingkan tahun-tahun sebelumnya (*Climate Policy Initiative, 2023*). Tren ini menjadi perhatian mengingat meningkatnya risiko iklim dan kerentanan yang dihadapi oleh negara-negara seperti Indonesia, sekaligus mencerminkan tantangan global dalam mendorong investasi pada infrastruktur berketahanan iklim.

Indonesia telah memanfaatkan dana hasil penerbitan *Green Sukuk* untuk melakukan pembiayaan kembali proyek-proyek infrastruktur yang memiliki manfaat ketahanan. Peningkatan investasi pada CRI akan memerlukan pemanfaatan instrumen pembiayaan dan insentif yang lebih beragam, khususnya dengan mengoptimalkan peran BUMN serta investasi sektor swasta guna meningkatkan ketahanan infrastruktur.

### 5.1 Tantangan pendanaan dan pembiayaan infrastruktur berketahanan iklim

Indonesia telah secara signifikan meningkatkan investasi infrastruktur ekonomi melalui APBN, dengan alokasi anggaran untuk infrastruktur meningkat dari IDR247 triliun pada 2015 menjadi IDR350 triliun pada 2023. Pertumbuhan 42% dalam pendanaan APBN selama 8 tahun ini terutama diarahkan untuk proyek-proyek investasi modal baru. Hasilnya adalah peningkatan yang sangat besar pada stok modal infrastruktur Indonesia, terutama pada sektor transportasi yang sangat krusial secara ekonomi.

Meskipun lonjakan investasi ini telah meningkatkan kapasitas ekonomi, kondisi tersebut juga menimbulkan kewajiban operasi dan pemeliharaan (O&M) yang signifikan dan berpotensi belum sepenuhnya diperhitungkan dalam alokasi anggaran. Bahkan jika biaya O&M ditetapkan sebagai persentase tetap dari stok modal setiap tahunnya, biaya O&M Indonesia ke depan akan meningkat secara signifikan. Skala kewajiban tersebut belum diketahui secara pasti.

Hal ini menjadi konteks penting dalam menilai dampak peningkatan bahaya akibat perubahan iklim terhadap investasi infrastruktur. Seiring dengan meningkatnya frekuensi dan tingkat keparahan bahaya terkait iklim, infrastruktur yang ada—termasuk yang dibangun dalam satu dekade terakhir—akan menghadapi tekanan yang lebih besar, dengan aset beroperasi melampaui parameter desain awalnya. Kondisi ini dapat menimbulkan berbagai konsekuensi dan implikasi fiskal terhadap stok infrastruktur Indonesia saat ini, antara lain meningkatnya frekuensi perbaikan dan pemeliharaan yang berdampak pada kenaikan biaya untuk menjaga kualitas layanan; percepatan depresiasi aset, keusangan dini dan pemendekan umur layanan, serta kerusakan infrastruktur yang menurunkan kapasitas produktif secara keseluruhan.

Oleh karena itu, besar kemungkinan biaya O&M yang dibutuhkan untuk mempertahankan stok modal aset infrastruktur yang kini jauh lebih besar akan melampaui perkiraan awal, atau umur aset akan menurun sehingga kebutuhan modal penggantian harus dipenuhi lebih dini.

Analisis CDRI menunjukkan bahwa biaya peningkatan ketahanan infrastruktur untuk menghadapi dampak perubahan iklim berada pada kisaran 3–5% dari belanja modal proyek infrastruktur baru. Estimasi ini sejalan dengan berbagai studi global lainnya, seperti Miyamoto (2019) yang memperkirakan bahwa langkah-langkah ketahanan yang terarah memiliki biaya tambahan rata-rata sebesar 3% (kisaran 1–5%), serta International Coalition for Sustainable Infrastructure (ICSI) (2022) yang mengasumsikan bahwa investasi dalam ketahanan meningkatkan biaya proyek sebesar 3%. Dalam periode lima tahun hingga 2023 dalam APBN, hal ini setara dengan tambahan kebutuhan pendanaan sebesar IDR56 triliun hingga IDR94 triliun.

Estimasi tersebut menegaskan tantangan yang dihadapi Indonesia, baik dalam meningkatkan anggaran O&M untuk menjaga aset yang ada di tengah lingkungan operasional yang semakin berat, maupun dalam mendanai biaya peningkatan ketahanan aset baru. Perkiraan biaya tambahan untuk meningkatkan ketahanan infrastruktur dapat mengalihkan sumber daya keuangan dari peluang investasi modal lainnya yang berpotensi dalam kondisi ruang fiskal yang terbatas. Namun demikian, potensi biaya awal untuk ketahanan tersebut perlu dipertimbangkan bersamaan dengan manfaat ekonomi yang dihasilkannya, termasuk penurunan biaya siklus hidup dan gangguan layanan.

Sejumlah studi terkini menunjukkan bahwa investasi pada infrastruktur berketahanan iklim memberikan manfaat ekonomi yang jauh lebih besar dibandingkan biayanya. Sejumlah estimasi menyatakan bahwa memasukkan langkah-langkah peningkatan ketahanan dalam proyek infrastruktur menghasilkan dividen rata-rata sebesar \$4 untuk setiap \$1 yang dibelanjakan (Hallegatte, 2019), apabila seluruh manfaat diperhitungkan, dengan biaya dan manfaat yang bervariasi antar sektor dan aset. Kerugian ekonomi tak langsung yang terkait dengan gangguan layanan rata-rata sekitar dua kali lipat nilai kerugian aset keuangan. Studi lain yang menganalisis peran kebijakan fiskal dalam adaptasi perubahan iklim (Catalano, 2019) menemukan bahwa intervensi preventif menghasilkan laju pertumbuhan PDB yang lebih tinggi dibandingkan dengan tidak mengambil tindakan sama sekali atau menunggu hingga diperlukan tindakan pemulihan.

## 5.2 Instrumen pendanaan dan pembiayaan Infrastruktur Berketahanan Iklim (CRI) saat ini

Untuk mengatasi kesenjangan pendanaan dan pembiayaan CRI, investasi dapat bersumber dari berbagai pihak, yaitu dana publik, dana swasta, dan dana campuran. Pendanaan publik bersumber dari Anggaran Pendapatan dan Belanja Negara (APBN), Anggaran Pendapatan dan Belanja Daerah (APBD), hibah, serta pinjaman dalam dan luar negeri. Selain itu, BUMN juga memainkan peran penting dalam investasi infrastruktur di Indonesia, khususnya pada jalan tol, pelabuhan, bandar udara, dan ketenagalistrikan. Meskipun berbagai sumber dan pendekatan pendanaan telah tersedia, keterkaitannya dengan pencapaian ketahanan iklim belum selalu terdefiniskan secara eksplisit dalam perencanaan maupun evaluasi proyek. Oleh karena itu, pemerintah mulai mengembangkan instrumen pembiayaan inovatif, mekanisme pembagian risiko, serta memanfaatkan fasilitas pembiayaan internasional untuk memperluas ruang fiskal dan memperkuat integrasi aspek ketahanan dalam pembangunan infrastruktur.

### 5.2.1 Instrumen Pembiayaan Publik Berbasis Keberlanjutan: *Green Sukuk*

Pemerintah Indonesia telah menunjukkan inovasi dalam penerapan mekanisme pembiayaan hijau untuk mendiversifikasi sumber pembiayaan utang pemerintah yang selama ini digunakan. Pemerintah Indonesia meluncurkan program *Green Sukuk* pada tahun 2018 sebagai penerbit negara (*sovereign issuer*) pertama di dunia dan sejak saat itu telah menghimpun dana sebesar total USD6,9 miliar melalui berbagai penerbitan global, ritel, dan berbasis proyek. *Green Sukuk* Indonesia telah diterbitkan berdasarkan Kerangka Surat Berharga Negara SDG milik Pemerintah Indonesia serta kerangka-kerangka sebelumnya yang telah dinilai memenuhi prinsip obligasi hijau, sosial, dan berkelanjutan.

Dana hasil penerbitan *Green Sukuk* sejauh ini telah dialokasikan untuk delapan sektor yang memenuhi kriteria: (1) transportasi berkelanjutan, (2) efisiensi energi, (3) energi terbarukan, (4) pengolahan sampah menjadi energi dan pengelolaan sampah, (5) ketahanan terhadap perubahan iklim, (6) bangunan hijau, (7) pengelolaan sumber daya alam berkelanjutan, dan (8) pengelolaan air dan air limbah berkelanjutan.

Sektor transportasi, ketahanan, serta pengelolaan air dan air limbah merupakan tiga penggunaan utama yang mencakup lebih dari 80% dari total dana yang dihimpun. Proyek-proyek yang didukung dalam beberapa waktu terakhir antara lain pembangunan jalur kereta api baru di Sulawesi Selatan serta sistem pengelolaan air limbah domestik terpusat di Jambi. Manfaat iklim dan manfaat lain yang terkait dengan SDG dari proyek-proyek tersebut dilaporkan setiap tahun oleh Kementerian Keuangan (Kemenkeu).

Meskipun *Green Sukuk* memberikan akses bagi Pemerintah Indonesia ke sumber pendanaan baru, bentuk pembiayaan ini hanya bersifat sedikit lebih lunak dibandingkan dengan instrumen utang pemerintah lainnya. Diskon tersebut, yang sering disebut sebagai '*greenium*', umumnya hanya beberapa basis poin. Hal ini sejalan dengan temuan awal mengenai *Green Sukuk* Indonesia dari *Climate Bond Initiative (Climate Bond Initiative, 2021)*.

## 5.2.2 Mekanisme pembiayaan risiko dan ketahanan

Selain instrumen berbasis utang dan pasar modal, pembiayaan ketahanan iklim juga diperkuat melalui mekanisme pembagian risiko. Instrumen ini berfungsi untuk meningkatkan kapasitas fiskal pemerintah dalam merespons dampak bencana yang semakin meningkat akibat perubahan iklim.

Kementerian Keuangan telah menetapkan perlindungan aset negara dan daerah terhadap risiko bencana sebagai prioritas kebijakan. Sejak tahun 2019, pemerintah mulai mengasuransikan gedung perkantoran dan aset lainnya melalui skema Asuransi Barang Milik Negara (ABMN). Hingga saat ini, sebanyak 4.334 aset dari 51 kementerian/lembaga telah diasuransikan dengan total nilai pertanggungan sebesar Rp32,41 triliun dan premi sebesar Rp49,13 miliar.

Selain itu, dalam kerangka Strategi Pembiayaan dan Asuransi Risiko Bencana Nasional, pemerintah membentuk *Disaster Pooling Fund (Pooling Fund Bencana/PFB)* yang dikelola oleh Kementerian Keuangan. Dana ini dirancang untuk membiayai kegiatan rehabilitasi, rekonstruksi, dan penggantian aset pascabencana secara lebih terencana dan berkelanjutan, sehingga mengurangi tekanan fiskal mendadak pada saat terjadi bencana besar.

## 5.2.3 Pembiayaan iklim internasional dan kerja sama bilateral

Di samping sumber domestik, Indonesia juga mengakses berbagai fasilitas pembiayaan iklim internasional untuk mendukung agenda mitigasi dan adaptasi perubahan iklim. Namun demikian, sebagaimana tren global, sebagian besar pembiayaan iklim internasional masih didominasi oleh kegiatan mitigasi dibandingkan adaptasi.

Indonesia telah memperoleh dukungan dari *Green Climate Fund (GCF)* untuk proyek panas bumi (hibah USD92,5 juta dan pinjaman USD7,5 juta), efisiensi energi (jaminan USD100 juta), serta pembayaran berbasis hasil REDD+ sebesar USD103,8 juta. Selain itu, Indonesia juga mengakses *Adaptation Fund*, meskipun dengan skala pendanaan yang relatif terbatas dibanding kebutuhan nasional.

Dalam kerja sama bilateral, salah satu fasilitas terbesar adalah *Green Infrastructure Initiative (GII)*, yaitu pinjaman sebesar EUR2,5 miliar dari Pemerintah Jerman untuk mendukung proyek pengelolaan sampah padat, pengelolaan air dan air limbah, serta transportasi publik perkotaan. Walaupun berfokus pada sektor non-energi dengan potensi mitigasi emisi, fasilitas ini juga berkontribusi pada peningkatan ketahanan, khususnya di sektor air dan sanitasi.

## 5.2.4 Sistem pendanaan anggaran iklim

Untuk meningkatkan transparansi dan akuntabilitas pembiayaan iklim, Pemerintah Indonesia menerapkan sistem Penandaan Anggaran Iklim (*Climate Budget Tagging/CBT*). Sistem ini tidak mengalokasikan anggaran khusus untuk perubahan iklim melainkan mengidentifikasi dan menandai kegiatan terkait mitigasi dan adaptasi dalam program kementerian/lembaga.

Data CBT digunakan sebagai instrumen evaluasi, penguatan penganggaran berbasis kinerja, serta pelaporan nasional dan internasional, termasuk dalam National Communication Report.

Selain itu, sistem ini juga menjadi rujukan dalam pengembangan instrumen pembiayaan inovatif seperti *Green Sukuk*.

Berdasarkan laporan CBT periode 2016–2022, total belanja pemerintah untuk kegiatan terkait perubahan iklim mencapai Rp569,3 triliun, dengan rata-rata Rp81,3 triliun per tahun atau sekitar 3,5% dari total APBN. Sekitar 61% dialokasikan untuk mitigasi, sepertiga untuk adaptasi, dan sisanya untuk kegiatan lintas sektor. Meskipun porsi adaptasi masih lebih rendah dibanding mitigasi, komposisi ini relatif lebih berimbang dibandingkan tren global yang umumnya sangat didominasi oleh pembiayaan mitigasi.

Penandaan Anggaran Iklim untuk adaptasi menjadi tantangan tersendiri karena adaptasi sering kali merupakan manfaat tambahan dari berbagai upaya pembangunan lainnya untuk meningkatkan ketahanan dan keamanan masyarakat. Demikian pula, investasi pada CRI – sebagai tambahan dalam belanja modal infrastruktur – kemungkinan besar belum tertangkap dalam kerangka penandaan anggaran yang berlaku saat ini. Peningkatan dalam pengukuran CRI akan menjadi langkah penting untuk memahami kecukupan investasi (lihat 6.3 di bawah).

### 6.3 Mengukur manfaat ketahanan untuk menarik pembiayaan iklim dan mendorong kemajuan

Pelacakan investasi CRI memungkinkan para pemangku kepentingan mengukur kemajuan pencapaian tujuan ketahanan dalam Perjanjian Paris serta memahami kesenjangan investasi, hambatan, dan peluang untuk memperluas serta menyalurkan pembiayaan ke wilayah dan sektor yang paling membutuhkan. Penilaian lanskap investasi CRI juga membantu membangun konsensus mengenai siapa yang dapat dan perlu melakukan apa, serta di mana dan bagaimana hal tersebut dapat dilakukan secara paling efisien, sehingga mempercepat intervensi positif dalam CRI.

Namun demikian, saat ini belum terdapat definisi yang disepakati secara umum mengenai investasi CRI. Konsep ini bersifat luas karena adanya berbagai nuansa dalam mendefinisikan adaptasi perubahan iklim dan ketahanan iklim, serta spektrum solusi potensial lintas sektor yang dapat diterapkan untuk memastikan infrastruktur menjadi berketahanan iklim.

Inisiatif Kebijakan Iklim (*Climate Policy Initiative/CPI*) mendefinisikan proyek infrastruktur CRI yang selaras dengan lima prinsip ketahanan iklim tingkat tinggi berdasarkan lima karakteristik utama ketahanan iklim, sebagaimana dirangkum di bawah ini.

- **Berbasis proses:** Desain proyek didasarkan pada penilaian risiko iklim fisik dan pemodelan skenario iklim.
- **Spesifik konteks:** Proyek menangani, merespons, atau mengurangi risiko iklim melalui pelaksanaan kegiatan CRI.
- **Berorientasi pada dampak:** Proyek memperkuat ketahanan masyarakat lokal melalui peningkatan hasil, termasuk kinerja proyek, keluaran, hasil, dan dampak.
- **Sistemik:** Proyek memenuhi perlindungan minimum dan selaras dengan rencana adaptasi nasional
- **Dinamis:** Proyek memantau dan mengevaluasi keputusan investasi secara dinamis

CPI mengadopsi dan menyesuaikan prinsip-prinsip ketahanan ini dari *Framing Paper on Climate Resilient Finance and Investment* (OECD, 2022), *MDB Framework for Climate Resilience Metrics* (IDB, 2019), dan *Joint MDB Assessment Framework for Paris Alignment* (MDB, 2021). Secara bersama-sama, prinsip-prinsip ini membentuk kerangka kerja paling komprehensif untuk melakukan pelacakan investasi CRI secara akurat. CPI telah menguji coba prinsip dan metodologi ini untuk membangun basis data global yang mencakup lebih dari 4.000 proyek CRI yang telah dibiayai. Untuk periode 2019/2020, CPI menemukan bahwa investasi pada CRI hanya merupakan sebagian kecil dari total investasi di sektor-sektor infrastruktur kritis. Untuk setiap USD1 yang dibelanjakan untuk CRI, USD87 dibelanjakan untuk proyek infrastruktur yang tidak mengintegrasikan prinsip ketahanan iklim. Hal ini menunjukkan bahwa investasi pada CRI secara global masih berada pada tahap awal.

## 5.4 Mobilisasi investasi pemerintah

Untuk meningkatkan tingkat pendanaan CRI, pengaturan pendanaan publik untuk infrastruktur di Indonesia perlu dikembangkan agar mendukung pengarusutamaan prinsip ketahanan iklim dan memungkinkan investasi modal tambahan. Opsi yang dapat dipertimbangkan antara lain pendanaan khusus untuk biaya tambahan ketahanan serta pemanfaatan hibah berbasis kinerja yang lebih luas.

### 5.4.1 Pendanaan ketahanan khusus

Saat ini, masih terdapat keterbatasan pendanaan khusus untuk memasukkan langkah-langkah ketahanan ke dalam proyek infrastruktur baru. Kesenjangan ini sering kali menyebabkan penyediaan infrastruktur dilakukan dengan biaya awal terendah, alih-alih mempertimbangkan manfaat ketahanan jangka panjang, seiring upaya kementerian untuk menyediakan infrastruktur baru dalam jumlah sebanyak mungkin guna memenuhi kebutuhan yang terus meningkat.

Dana atau aliran pendanaan khusus yang dapat mendukung biaya tambahan untuk mengintegrasikan langkah-langkah ketahanan ke dalam proyek baru atau menyediakan pendanaan untuk penyiapan dan pengembangan proyek berpotensi memberikan manfaat jangka panjang. Keputusan pendanaan akan didasarkan pada estimasi yang disampaikan oleh kementerian/lembaga teknis mengenai potensi manfaat dari langkah-langkah ketahanan.

Mekanisme tersebut dapat dikapitalisasi melalui berbagai sumber, seperti alokasi anggaran, obligasi hijau, dan pembiayaan iklim internasional. Salah satu sumber pendanaan yang menjanjikan untuk pengembangan CRI adalah mekanisme Kerugian dan Dampak (*Loss and Damage/L&D*). Mekanisme pendanaan L&D Indonesia dirancang secara khusus untuk menangani bencana hidrometeorologi dan bencana berproses lambat akibat perubahan iklim. Dengan mengalokasikan dana L&D untuk proyek Infrastruktur Berketahanan Iklim, Indonesia dapat mengurangi beban keuangan pada anggaran negara sekaligus secara efektif meningkatkan ketahanan infrastruktur terhadap perubahan iklim.

Mekanisme ini akan melengkapi *Green Sukuk*. Sementara *Green Sukuk* membiayai proyek secara keseluruhan yang memenuhi kriteria lingkungan yang luas, termasuk adaptasi, dana ini akan secara khusus berfokus pada dukungan terhadap langkah-langkah ketahanan tambahan

dalam proyek infrastruktur individual dan bersifat terutama hibah. Mekanisme ini akan berjalan sebagai tambahan di luar pagu pendanaan proyek, dengan memberikan dukungan terarah untuk menutup biaya tambahan yang terkait dengan peningkatan ketahanan iklim. Pendekatan ini memastikan bahwa ketahanan iklim terintegrasi ke dalam proyek infrastruktur, meskipun proyek tersebut tidak memenuhi syarat atau tidak memerlukan pembiayaan penuh melalui *Green Sukuk*.

#### 5.4.2 Hibah berbasis kinerja

Hibah berbasis kinerja merupakan mekanisme untuk memberikan insentif terhadap kinerja pemerintah daerah, dan dapat digunakan untuk memprioritaskan serta meningkatkan standar pemeliharaan dan ketahanan aset dalam proyek infrastruktur. Mekanisme pembiayaan ini diberikan berdasarkan capaian hasil (*output/outcome*) yang terukur dan terverifikasi, bukan semata-mata berdasarkan rencana kegiatan atau kebutuhan anggaran. Pendekatan ini menyelaraskan insentif keuangan dengan capaian layanan yang ditargetkan sehingga mendorong instansi daerah untuk mempertahankan standar dalam pemeliharaan infrastruktur dan ketahanan iklim. Hibah berbasis kinerja atau berbasis output telah diuji coba di beberapa sektor infrastruktur di Indonesia dan kini dimungkinkan sebagai salah satu bentuk transfer fiskal dari pemerintah pusat kepada pemerintah daerah melalui Dana Alokasi Khusus (DAK).

Saat ini, banyak pemerintah daerah di Indonesia menghadapi keterbatasan anggaran yang sering kali menyebabkan penundaan pemeliharaan serta kurangnya pertimbangan terhadap ketahanan jangka panjang dari proyek infrastruktur. Hibah ini akan memberikan tambahan pendanaan kepada pemerintah daerah berdasarkan pencapaian indikator kinerja tertentu yang berkaitan dengan pemeliharaan infrastruktur dan ketahanan.

### 5.5 Mobilisasi investasi sektor swasta

Sektor swasta memainkan peran yang semakin penting dalam penyediaan dan pengelolaan infrastruktur di Indonesia, seiring dengan semakin matangnya skema kerja sama pemerintah dan badan usaha (KPBU) di beberapa sektor, terutama jalan tol. Struktur pembiayaan proyek seperti kerja sama pemerintah dan badan usaha (KPBU) berpotensi meningkatkan ketahanan infrastruktur. Dengan memanfaatkan keahlian sektor swasta, KPBU dapat mendorong penerapan praktik inovatif dalam desain, konstruksi, serta operasi dan pemeliharaan yang meningkatkan kemampuan aset untuk bertahan dan pulih dari tekanan terkait iklim. Selain itu, sifat jangka panjang kontrak KPBU selaras dengan kebutuhan perencanaan ketahanan jangka panjang, sehingga mendorong konsorsium untuk mempertimbangkan dan memitigasi risiko iklim di masa depan.

Namun demikian, KPBU yang memungkinkan investasi langsung modal swasta pada ketahanan infrastruktur masih menghadapi sejumlah tantangan yang perlu diselesaikan. Tantangan tersebut mencakup belum adanya spesifikasi persyaratan ketahanan oleh Penanggung Jawab Proyek Kerja Sama (PJPK), kesulitan dalam mengkuantifikasi manfaat, serta penetapan dan pembagian risiko iklim. Saat ini belum tersedia model standar bagi pengembang aset dan investor untuk memprioritaskan investasi peningkatan ketahanan, selain berbagai “hasil cepat yang mudah dicapai” yang menghasilkan perbaikan yang jelas terhadap daya tarik finansial proyek.

Mekanisme dukungan pemerintah yang ada untuk investasi KPBU, seperti pendanaan pengembangan proyek (*Project Development Funding/PDF*), pendanaan kesenjangan kelayakan (*Viability Gap Funding/VGF*), pembayaran ketersediaan layanan (*Availability Payments/AP*), dan penjaminan pemerintah melalui PII, belum mendorong penguatan ketahanan iklim. Mekanisme ini dapat dimanfaatkan untuk memastikan bahwa penyiapan proyek mempertimbangkan risiko iklim, serta bahwa investor swasta diwajibkan memenuhi standar ketahanan dan kinerja aset.

Kurangnya fokus pada ketahanan iklim dalam proyek KPBU terlihat jelas dalam daftar proyek KPBU Indonesia. Tinjauan terhadap profil proyek dalam tiga Buku KPBU terakhir, yang memuat ruang lingkup proyek, tujuan, struktur pelaksanaan, jadwal, dan biaya, menunjukkan belum adanya pertimbangan ketahanan iklim (Tabel 2). Dari seluruh proyek yang ditinjau, hanya satu proyek yang teridentifikasi menangani risiko perubahan iklim, dan proyek tersebut ditujukan untuk meningkatkan keandalan air, bukan ketahanan infrastruktur itu sendiri. Secara khusus, tidak ada profil proyek yang menyebutkan kebutuhan akan langkah-langkah ketahanan atau adaptasi perubahan iklim. Meskipun beberapa langkah ketahanan mungkin telah dimasukkan dalam proyek-proyek tersebut, langkah-langkah tersebut belum diprioritaskan atau dikomunikasikan sebagai tujuan kepada calon investor.

TABEL 2: TINGKAT KEMUNCULAN RUJUKAN ADAPTASI PERUBAHAN IKLIM DALAM BUKU KPBU

Tahun Buku KPBU	Jumlah KPBU	Kuantitas yang mencantumkan tujuan iklim/ketahanan	Nama Proyek	Tujuan atau langkah-langkah
2023	70	0	-	-
2022	67	1	Proyek Bendungan Serbaguna Merangin (USD263 juta)	Meningkatkan keandalan pasokan air dalam menghadapi perubahan iklim
2021	83	1		

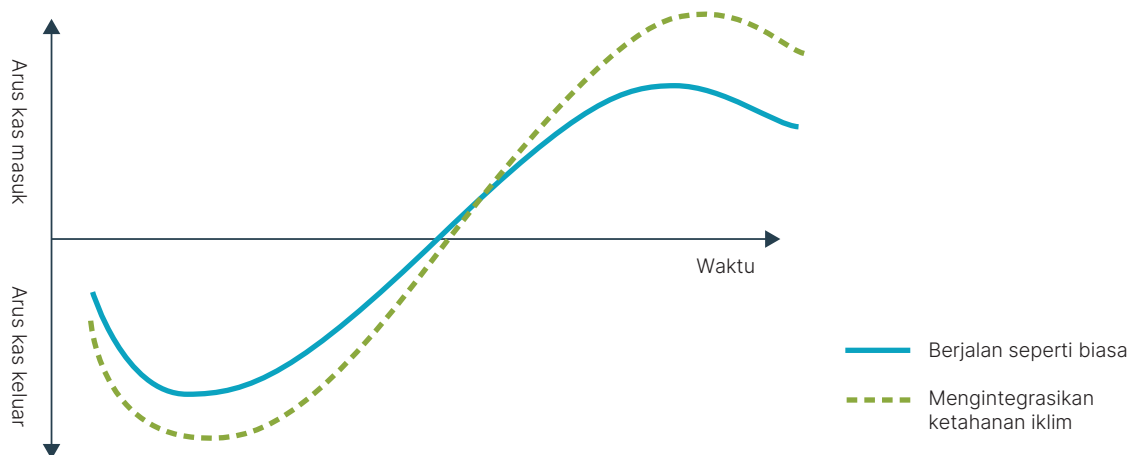
Sumber: Data dihimpun dari Buku KPBU 2023, 2022, 2021

Investasi infrastruktur oleh sektor swasta menjadi menarik ketika menawarkan tingkat pengembalian yang disesuaikan dengan risiko (*risk-adjusted returns*) yang menguntungkan, yang umumnya dicapai melalui biaya yang lebih rendah (CAPEX dan OPEX), jangka waktu pelaksanaan yang lebih singkat, serta pendapatan yang lebih tinggi. Meskipun pengintegrasian langkah-langkah ketahanan iklim dapat meningkatkan biaya awal dan jangka waktu proyek, yang berpotensi menurunkan tingkat pengembalian jangka pendek, langkah-langkah tersebut dapat secara signifikan meningkatkan kelayakan proyek dalam jangka panjang.

Gambar 22 di bawah ini menggambarkan bagaimana ketahanan iklim memengaruhi arus kas infrastruktur dari waktu ke waktu. Langkah-langkah ketahanan yang direncanakan dengan baik dapat menghasilkan pendapatan yang lebih andal, mengurangi gangguan layanan, menurunkan kerugian ekonomi, serta berpotensi meningkatkan permintaan seiring dengan meningkatnya keandalan layanan. Selain itu, infrastruktur berketahanan iklim menghadapi risiko yang lebih rendah terhadap kerusakan atau menjadi usang sebelum waktunya akibat dampak perubahan iklim, sehingga berpotensi menurunkan biaya pembiayaan dan premi asuransi sepanjang siklus hidup aset tersebut.

Meskipun memiliki potensi manfaat yang besar, investor sektor swasta sering kali mengabaikan risiko iklim fisik karena kurangnya insentif untuk melakukan investasi awal dalam ketahanan. Kondisi ini disebabkan oleh keterbatasan kapasitas untuk memahami dan mengelola risiko iklim, serta adanya potensi risiko moral (*moral hazard*) apabila investor berasumsi bahwa pemerintah akan menanggung kerugian yang bersifat keadaan kahar (*force majeure*) akibat peristiwa iklim ekstrem berskala besar.

GAMBAR 22: ILUSTRASI DAMPAK KETAHANAN IKLIM TERHADAP ARUS KAS PROYEK



Sumber: Build Resilience to Unlock Investment (Mott MacDonald, n.d)

Peningkatan transparansi terkait risiko iklim penting untuk mengintegrasikan pertimbangan tersebut ke dalam keputusan investasi. Kompleksitas risiko iklim serta keterbatasan ketersediaan data dan metrik yang sebanding turut berkontribusi pada kurangnya kesadaran secara umum di kalangan investor. OECD (OECD, 2024) menemukan bahwa persyaratan pengungkapan informasi iklim oleh sektor swasta mendorong peningkatan pemahaman terhadap risiko iklim pada aset infrastruktur serta mendukung upaya untuk memahami saling ketergantungan antarjaringan infrastruktur. Contoh internasional meliputi:

- **Inggris:** Di Inggris, Undang-Undang Perubahan Iklim (*Climate Change Act*) memuat kewenangan pelaporan adaptasi (*Adaptation Reporting Power*), yang mewajibkan perusahaan utilitas untuk melakukan penilaian risiko iklim dan mempublikasikan bagaimana mereka bermaksud mengelola risiko tersebut. Evaluasi terhadap putaran laporan terbaru menunjukkan bahwa kualitas laporan secara umum tergolong tinggi. Terdapat bukti bahwa hal ini mendorong peningkatan kesiapsiagaan di sektor infrastruktur (CCC, 2022).
- **Uni Eropa:** Pada tahun 2024, Uni Eropa memperkenalkan *Corporate Sustainability Reporting Directive* (CSRD) untuk meningkatkan dan menstandarisasi pelaporan keberlanjutan non-keuangan perusahaan di seluruh Uni Eropa. Yang perlu dicatat, Peraturan Taksonomi (*Taxonomy Regulation*) menetapkan enam tujuan lingkungan, yang salah satunya adalah adaptasi perubahan iklim. Ke depannya, perusahaan wajib menjelaskan kebijakan yang dirancang untuk mengelola dampak, risiko, dan peluang perubahan iklim yang bersifat material. Kebijakan-kebijakan ini perlu mencakup identifikasi, kajian, pengelolaan, dan/atau remediasi atas risiko-risiko material tersebut.

- **Australia:** Pada 2024, Pemerintah Australia memperkenalkan *Treasury Laws Amendment (Financial Market Infrastructure and Other Measures) Bill 2024* yang mewajibkan organisasi untuk menyampaikan pengungkapan keuangan terkait iklim secara wajib dalam laporan tahunan dan memenuhi Standar Pelaporan Keberlanjutan Australia (*Australian Sustainability Reporting Standards/ASRS*). Risiko iklim menjadi fitur utama dalam ketentuan baru ini, dengan laporan tahunan diwajibkan untuk menguraikan pendekatan strategis dalam mengelola risiko dan peluang terkait iklim, termasuk analisis skenario yang diperluas (dibandingkan ketentuan sebelumnya) serta kajian ketahanan terhadap perubahan iklim. Laporan tahunan juga harus menguraikan dampak finansial—antara lain dampak risiko dan peluang terkait iklim terhadap arus kas, pendapatan, dan nilai aset entitas pada periode pelaporan terkait, serta dampak di masa mendatang yang diperkirakan dari waktu ke waktu.

Salah satu mekanisme pembiayaan kreatif yang relatif baru diperkenalkan di Indonesia, yaitu Skema Konsesi Terbatas (*Limited Concession Scheme/LCS*), menawarkan potensi untuk meningkatkan investasi pada infrastruktur berketahanan iklim. Diperkenalkan pada tahun 2020, LCS digagas sebagai bagian dari strategi yang lebih luas untuk menarik investasi swasta ke sektor infrastruktur serta mengoptimalkan pengelolaan aset yang telah ada. Dalam skema ini, Pemerintah memberikan konsesi kepada sektor swasta untuk mengoperasikan dan/atau meningkatkan aset-aset LCS tertentu, dan sebagai imbalannya Pemerintah menerima biaya di muka yang dapat dimanfaatkan untuk pengembangan aset infrastruktur baru. Tidak terjadi pengalihan kepemilikan atas aset LCS karena pihak badan usaha hanya memiliki hak untuk mengoperasikan aset tersebut dalam jangka waktu tertentu, sementara kepemilikannya tetap berada di tangan Pemerintah.

LCS membuka peluang untuk membiayai peningkatan ketahanan iklim pada infrastruktur yang sudah ada. Peningkatan tersebut dapat dijadikan sebagai persyaratan dalam konsesi, dengan pembiayaan oleh investor swasta pada periode awal pengambilalihan pengelolaan aset. Persyaratan tersebut dapat sedikit menurunkan biaya konsesi yang dibayarkan kepada pemerintah, namun juga diharapkan memberikan manfaat bagi operator swasta dengan menurunkan biaya operasi dan pemeliharaan (O&M) yang berjalan serta mengurangi gangguan terhadap ketersediaan aset. Contoh penerapan model ini dapat dilihat pada perjanjian konsesi di Jepang di sektor transportasi dan utilitas.

## 5.6 Mobilisasi investasi BUMN

BUMN memainkan peran penting dalam sektor infrastruktur Indonesia, baik dalam kepemilikan aset, konstruksi, maupun operasi. Banyak prinsip investasi yang diuraikan di atas juga berlaku bagi BUMN Indonesia, namun BUMN perlu menyeimbangkan kelayakan komersial dengan kewajiban pelayanan publik, yang dapat mencakup investasi ketahanan iklim.

Terdapat kesenjangan yang signifikan dalam kapasitas dan sumber daya antara BUMN di berbagai sektor infrastruktur. Sektor air minum, misalnya, didominasi oleh PDAM berukuran kecil yang dimiliki pemerintah daerah dan menghadapi kendala, baik dalam merencanakan manajemen aset maupun mendanai peningkatan layanan, mengingat akses terhadap permodalan yang terbatas. Upaya PT SMI untuk menargetkan kredit bagi PDAM secara lebih tepat sasaran

diharapkan dapat berkontribusi pada peningkatan investasi untuk memperkuat ketahanan. Di sektor lain, seperti perkeretaapian dan ketenagalistrikan, penyedia utilitas nasional berskala besar memiliki kapasitas dan akses permodalan untuk mengembangkan program investasi ketahanan.

Sejalan dengan persyaratan pengungkapan bagi sektor swasta di negara lain, ada peluang bagi BUMN infrastruktur di Indonesia untuk menyusun pelaporan risiko iklim yang komprehensif atas jaringan infrastrukturnya sebagai bagian dari pelaporan perubahan iklim secara keseluruhan. Hal ini akan mencakup penilaian dan pengungkapan risiko iklim serta kerentanan terkait iklim di seluruh jaringan infrastruktur mereka, serta penjabaran strategi untuk meningkatkan ketahanan iklim. Pelaporan tersebut tidak hanya akan meningkatkan transparansi, tetapi juga mendorong BUMN untuk secara sistematis mengevaluasi dan menangani risiko iklim pada jaringan infrastrukturnya. Selain itu, pelaporan ini akan menyediakan data dan wawasan yang berharga untuk mendukung perencanaan dan pengambilan keputusan investasi infrastruktur di tingkat nasional.

PLN mulai memberikan perhatian pada risiko iklim dalam jaringannya. Pada September 2023, PLN menerbitkan laporan Satuan Tugas Pengungkapan Keuangan Terkait Iklim (*Task Force on Climate-related Financial Disclosures/TCFD*) pertamanya. Laporan TCFD merupakan langkah awal bagi perusahaan untuk meningkatkan pemahaman terhadap risiko dan peluang terkait iklim dalam jangka panjang. Sebelas rekomendasi pengungkapan TCFD mencakup empat area utama, yaitu tata kelola, strategi, manajemen risiko, serta metrik dan target. OJK memimpin implementasi prinsip TCFD di Indonesia; penyusunan ketentuan pengungkapan dan pelaporan yang lebih spesifik bagi operator infrastruktur dapat menjadi langkah yang tepat.



WRU  
2052

HSBC

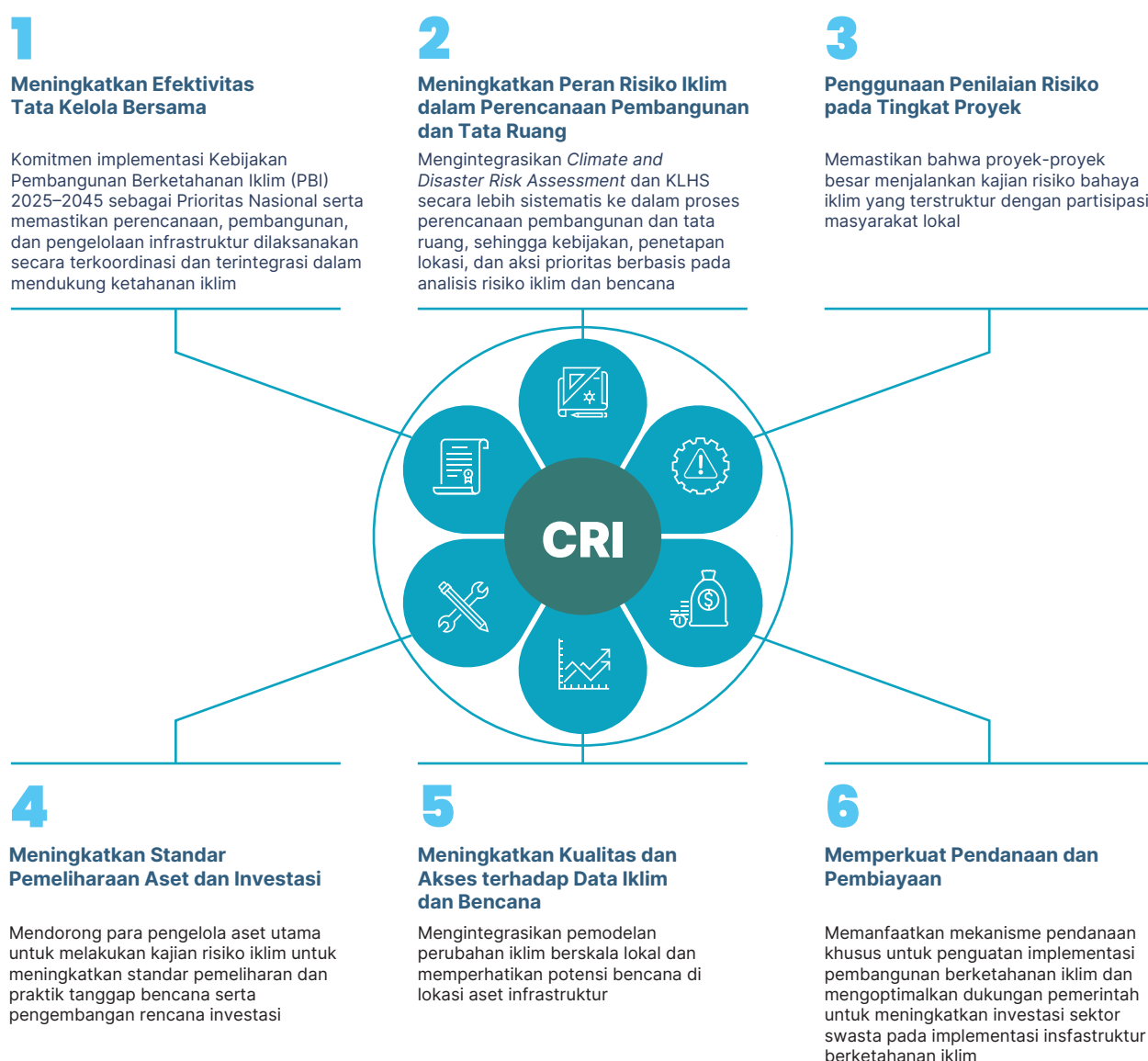
KAI ∞

KAI ∞

# 6 | PELUANG UNTUK MEMPERKUAT INFRASTRUKTUR BERKETAHANAN IKLIM (CRI) DI INDONESIA

Studi ini mengidentifikasi enam strategi utama untuk meningkatkan infrastruktur berketahanan iklim (CRI) di Indonesia, dengan serangkaian peluang spesifik untuk setiap strategi tersebut. Enam strategi ini merespon komitmen kebijakan Pembangunan Berketahanan Iklim dalam kerangka pembangunan nasional dan memberikan rekomendasi mendetail bagaimana aksi tersebut dapat tercapai. Strategi ini mencakup peningkatan di seluruh siklus hidup infrastruktur yang akan memungkinkan fokus lebih kuat pada ketahanan, termasuk potensi sumber pendanaan dan pembiayaan. Keenam arah umum ini ditunjukkan pada Gambar 23 di bawah ini.

GAMBAR 23: ARAH PENGUATAN INFRASTRUKTUR BERKETAHANAN IKLIM (CRI) DI INDONESIA



## 6.1 Meningkatkan efektivitas model tata kelola bersama

CRI menjadi tanggung jawab bersama antara manajemen bencana, pembangunan berketahanan iklim, dan pengelola aset infrastruktur karena CRI bergantung pada upaya di seluruh aspek tersebut. Koordinasi dan upaya bersama akan menjadi faktor yang krusial. Terdapat sejumlah peluang kebijakan dan regulasi untuk meningkatkan efektivitas model tata kelola bersama, termasuk:

1. Kebijakan Pembangunan Berketahanan Iklim menjadi bahan pertimbangan dalam menentukan lokasi, desain, dan spesifikasi pembangunan infrastruktur berketahanan iklim berdasarkan karakteristik dan kondisi wilayah
2. Mengintegrasikan perencanaan pembangunan infrastruktur berketahanan iklim pada kebijakan pembangunan berketahanan iklim yang akan diimplementasikan oleh Kementerian/Lembaga terkait guna mendukung ketahanan iklim
3. Menetapkan perencanaan infrastruktur nasional, khususnya Proyek Strategis Nasional (PSN), yang selaras dengan kebijakan PBI sehingga investasi untuk CRI mendapat prioritas yang memadai. Melakukan penapisan risiko iklim, termasuk lokasi prioritas PBI, pada tahap awal pengembangan PSN baru untuk mengidentifikasi risiko iklim yang perlu ditangani.

## 6.2 Meningkatkan peran risiko iklim dalam perencanaan pembangunan dan tata ruang

Perencanaan tata ruang akan memainkan peran penting dalam pembangunan infrastruktur berketahanan iklim. Perencanaan tata ruang perlu berbasis pada risiko iklim dan mampu mengidentifikasi secara dini kawasan dengan tingkat risiko iklim tinggi, sehingga pembanguan infrastruktur dapat dibatasi, dialihkan atau disertai dengan persyaratan teknis ketahanan iklim dan konstruksi yang lebih ketat. Peluang lebih lanjut untuk meningkatkan perencanaan tata ruang meliputi:

1. Mengintegrasikan Pembangunan Berketahanan Iklim ke dalam proses perencanaan tata ruang yang sudah ada, seperti Rencana Detail Tata Ruang (RDTR) yang disusun oleh masing-masing pemerintah daerah. RDTR merupakan rencana terperinci yang terkait dengan rencana tata ruang kabupaten/kota yang dilengkapi dengan pengaturan zonasi.
2. Mendorong integrasi yang lebih kuat Kajian Lingkungan Hidup Strategis (KLHS) ke dalam penyusunan Rencana Pembangunan Jangka Menengah dan Jangka Panjang, baik di tingkat nasional maupun daerah, sehingga KLHS dapat memandu pengambilan keputusan pembangunan infrastruktur dan mendukung Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDG), khususnya SDG 9.1 dan SDG 13.1.

### 6.3 Penguatan penilaian risiko pada tingkat proyek

Setiap proyek pembangunan infrastruktur baru perlu dirancang sejak awal dengan mempertimbangkan risiko iklim agar tidak meningkatkan risiko dan kerentanan pada sistem infrastruktur yang ada.. Peluang untuk memperkuat CRI pada tingkat proyek meliputi:

1. Mengembangkan dan mendiseminasi metodologi standar untuk melakukan kajian risiko dan kerentanan iklim pada proyek-proyek infrastruktur utama, dengan mempertimbangkan karakteristik iklim regional, jaringan infrastruktur kritis, profil bencana, dan lokasi prioritas Pembanguna Berketahanan Iklim
2. Mewajibkan proyek-proyek infrastruktur baru dengan skala investasi tertentu (misalnya, lebih dari Rp100 miliar) melakukan kajian risiko dan kerentanan iklim yang terstruktur sebagai bagian dari proses pengembangan proyek, serta menyusun strategi untuk mengurangi kerentanan melalui analisis tata ruang, langkah-langkah struktural dan non-struktural. Hal ini dapat dilakukan sebagai bagian dari proses AMDAL yang sudah ada, atau sebagai persyaratan terpisah. Jika diintegrasikan dalam proses AMDAL, pada tahap pelingkupan (KA-AMDAL) perlu dimasukkan kajian risiko iklim, dan pada tahap analisis (AMDAL) perlu dievaluasi bagaimana faktor-faktor iklim memengaruhi desain dan keberlanjutan proyek.
3. Memberdayakan masyarakat lokal, organisasi masyarakat sipil (OMS), dan LSM sebagai mitra strategis dalam pengelolaan risiko iklim untuk memastikan potensi dampak terhadap kerentanan masyarakat teridentifikasi dan dipertimbangkan baik dalam tahap perencanaan, pengembangan, maupun operasional proyek. Hal ini dapat mencakup adanya konsultasi publik selama proseskajian risiko dan kerentanan iklim

### 6.4 Meningkatkan standar pemeliharaan aset dan investasi

Berdasarkan siklus hidup infrastruktur, tahap operasi dan pemeliharaan merupakan fase yang menentukan keberlanjutan fungsi, kinerja, serta ketahanan suatu aset terhadap berbagai risiko, termasuk risiko iklim. Oleh karena itu, peningkatan standar pemeliharaan aset menjadi penting untuk memastikan bahwa infrastruktur tetap mampu memberikan layanan secara optimal sepanjang masa operasionalnya. Peningkatan standar pemeliharaan aset dan investasi meliputi:

1. Mendukung atau mewajibkan para pengelola aset utama melaksanakan penilaian risiko di seluruh jaringan infrastruktur mereka, kemudian menyusun program investasi yang memprioritaskan peningkatan kembali aset-aset yang paling kritis dan rentan.
2. Memastikan bahwa prosedur operasi standar (SOP) untuk aset infrastruktur utama mencakup prosedur penanganan risiko iklim yang memaksimalkan ketersediaan aset serta meminimalkan risiko bagi masyarakat setempat.

3. Meningkatkan standar pemeliharaan untuk infrastruktur kritis dengan mengintegrasikan perspektif ketahanan iklim ke dalam perencanaan program pemeliharaan. Pemeliharaan preventif akan menjadi strategi penting untuk secara bertahap meningkatkan ketahanan infrastruktur. Sebagai contoh, Direktorat Jenderal Bina Marga di Kementerian PU saat ini sedang memasukkan data iklim ke dalam sistem pengelolaan aset jaringan jalan nasional untuk mendukung perencanaan program pemeliharaan preventif.

## 6.5 Meningkatkan kualitas dan akses terhadap data iklim dan bencana

Akses terhadap data yang andal dan lokasi spesifik merupakan hambatan signifikan dalam menangani perubahan iklim, baik bagi perencana infrastruktur maupun pengelola aset. Indonesia memiliki sejumlah sistem data bencana dan cuaca yang baik, namun tingkat aksesibilitas antar jenis data masih beragam. Upaya yang dapat dilakukan mencakup:

1. Meningkatkan pengumpulan data di tingkat lokal mengenai dampak perubahan iklim dan bahaya bencana terhadap infrastruktur—baik biaya kerusakan langsung maupun waktu henti aset (yang memengaruhi pemanfaatan nilai ekonomi aset)—untuk memungkinkan penilaian yang lebih baik atas manfaat ekonomi dan finansial dari CRI.
2. Mengembangkan platform data terpusat pemerintah yang mengintegrasikan pemodelan perubahan iklim, risiko bencana, dan data lokasi infrastruktur untuk mendukung peningkatan perencanaan tata ruang serta menyediakan perangkat untuk kajian risiko dan kerentanan iklim pada tingkat proyek. Platform yang ada saat ini belum sepenuhnya mempertimbangkan kerentanan yang terkait dengan infrastruktur.
3. Memanfaatkan hasil pemodelan sebagai dasar penentuan intervensi pembangunan infrastruktur berketahanan iklim yang dapat dilaksanakan di tingkat pemerintah pusat, pemerintah daerah, serta komunitas penelitian.

## 6.6 Memperkuat pendanaan dan pembiayaan

Peningkatan CRI di Indonesia akan memberikan manfaat ekonomi jangka panjang, namun memerlukan peningkatan investasi dalam jangka pendek. Berbagai opsi untuk memperkuat pendanaan dan pembiayaan pada beragam moda infrastruktur diuraikan di bawah ini.

Untuk infrastruktur yang didanai pemerintah, peluang yang dapat ditempuh mencakup:

1. Membangun mekanisme pendanaan khusus untuk mendukung biaya tambahan dalam memasukkan langkah-langkah ketahanan ke dalam proyek baru. Keputusan pendanaan akan didasarkan pada estimasi yang disampaikan oleh pengusul proyek mengenai potensi manfaat dari langkah-langkah ketahanan. Mekanisme ini dapat diperkuat melalui alokasi anggaran, dan berpotensi melalui mekanisme *Loss & Damage*. Pendanaan juga dapat digunakan untuk memberikan hibah pendamping (*matching grant*) kepada kementerian dan instansi yang ingin melaksanakan pekerjaan yang mendukung identifikasi, pengembangan, dan efektivitas langkah-langkah ketahanan.

2. Meningkatkan penggunaan hibah berbasis kinerja untuk mendorong peningkatan standar pemeliharaan dan ketahanan aset oleh pemerintah daerah. Alokasi hibah juga dapat mempertimbangkan provinsi-provinsi yang diproyeksikan mengalami peningkatan kerugian paling cepat akibat dampak iklim.
3. Memastikan bahwa pembayaran pemulihan pascabencana memadai untuk memungkinkan infrastruktur dibangun kembali dengan standar ketahanan yang lebih tinggi dan mempertimbangkan risiko iklim di masa depan.

Struktur pembiayaan proyek seperti KPBU dapat meningkatkan ketahanan infrastruktur melalui kolaborasi pemerintah dan sektor swasta untuk mengidentifikasi dan mengalokasikan risiko bencana, membangun kerangka kontraktual yang kuat, dan kemudian melakukan investasi untuk meningkatkan ketahanan infrastruktur. Opsi untuk infrastruktur yang dibiayai oleh pihak swasta mencakup:

1. Memperluas peran Fasilitas Pengembangan Proyek (PDF) yang akan mencakup pendanaan kajian risiko dan kerentanan iklim pada tahap pengembangan proyek. PDF juga perlu menerapkan ukuran dan kriteria biaya-manfaat ketahanan yang terstandardisasi untuk memperkirakan secara akurat implikasi finansial dari langkah-langkah ketahanan
2. Melalui fasilitas SDG Indonesia One, memprioritaskan opsi pembiayaan ketahanan dalam skema pembiayaan campuran (*blended finance*) secara khusus untuk komponen ketahanan pada proyek infrastruktur. Langkah-langkah ketahanan ini akan menjadi bagian dari mekanisme yang sudah ada, seperti pinjaman konsesional, penjaminan, dan bantuan teknis.
3. Menjelaskan cakupan produk penjaminan IIGF dan KPBU dalam mengalokasikan risiko iklim untuk mendorong investasi sektor swasta yang memadai dalam langkah-langkah ketahanan. Indikator Kinerja Utama (KPI) juga perlu disepakati dan dipantau.
4. Memperkenalkan premi ketahanan dalam mekanisme dana dukungan kelayakan (*Viability Gap Fund/VGF*) dan pembayaran ketersediaan layanan (*Availability Payment/AP*), untuk menyediakan tambahan imbal hasil atau dukungan secara khusus bagi langkah-langkah ketahanan yang mungkin tidak memberikan pengembalian finansial langsung tetapi memberikan manfaat sosial-ekonomi jangka panjang yang signifikan.

Munculnya pendaurulangan aset melalui Skema Konsesi Terbatas di Indonesia dapat menyediakan suatu mekanisme untuk meningkatkan investasi dalam ketahanan sebagai bagian dari perjanjian konsesi. Fitur utama yang dapat dipertimbangkan mencakup:

1. Mengharuskan peserta lelang untuk melaksanakan kajian risiko dan kerentanan iklim sebagai bagian dari proses penilaian aset, serta menyerahkan rencana peningkatan ketahanan sebagai bagian dari proposal konsesi mereka.

2. Meminta para peserta lelang untuk mengusulkan pendekatan pendanaan atau pembiayaan yang inovatif guna mendukung langkah-langkah ketahanan. Misalnya, pembayaran bonus terkait ketersediaan aset atau opsi pembiayaan konsesi dari pemerintah.
3. Menyusun perjanjian konsesi agar mencakup target kinerja ketahanan yang spesifik beserta insentif atau sanksi yang terkait. Hal ini dapat dicapai melalui Indikator Kinerja Utama (KPI).

# LAMPIRAN

---

# LAMPIRAN TEKNIS: PENILAIAN RISIKO

## Pendekatan kuantifikasi risiko

Untuk melaksanakan penilaian risiko, digunakan kerangka multi-bahaya yang memungkinkan risiko diagregasi lintas sektor untuk seluruh bahaya terkait iklim yang dipertimbangkan secara konsisten. Risiko didefinisikan sebagai

$$Risk = Likelihood \times Consequence$$

Definisi risiko yang lebih umum ini dapat diselaraskan dengan deskripsi risiko iklim oleh Panel Antarpemerintah tentang Perubahan Iklim (*Intergovernmental Panel on Climate Change/IPCC*):

$$Risk = Hazard \times Exposure \times Vulnerability$$

Kemungkinan (*likelihood*) merupakan fungsi dari bahaya (*hazard*) dan paparan (*exposure*), sedangkan konsekuensi (*consequence*) merupakan fungsi dari paparan (*exposure*) dan kerentanan (*vulnerability*). Dalam mengkuantifikasi Kemungkinan (*Likelihood*) suatu kejadian bahaya dan Konsekuensi (*Consequences*) yang ditimbulkannya dalam kajian ini, probabilitas terjadinya bahaya dipahami sebagai Paparan (*Exposure*) yang dialami aset infrastruktur, sedangkan Kerentanan (*Vulnerability*) dipahami sebagai kecenderungan terhadap kerusakan dan gangguan, sehingga kedua definisi risiko tersebut konsisten.

Dataset dampak bahaya yang dihasilkan dari data iklim yang tersedia diiriskan dengan lokasi aset infrastruktur untuk menetapkan tingkat Paparan, sementara Konsekuensi dapat dikuantifikasi menggunakan informasi intensitas dan frekuensi bahaya yang tersedia, beserta asumsi terkait kurva kerusakan aset. Kajian ini mempertimbangkan biaya keuangan langsung yang terkait dengan perbaikan atau penggantian aset yang mengalami kerusakan fisik akibat dampak bahaya, serta kerugian ekonomi tidak langsung yang timbul akibat tidak tersedianya aset yang mengalami kerusakan tersebut.

Sistem penilaian logaritmik digunakan untuk mengukur Kemungkinan dan Konsekuensi. Metode ini memungkinkan perbandingan yang mudah lintas berbagai jenis aset dan kejadian bahaya. Sebagai contoh, bahaya yang terjadi sekali dalam sepuluh tahun akan memiliki skor kemungkinan sebesar -1. Konsekuensi diberi skor dengan cara yang serupa dan dijumlahkan lintas kategori, seperti kerusakan fisik dan gangguan ekonomi.

Skor risiko total dihitung dengan menjumlahkan skor Kemungkinan dan Konsekuensi. Apabila beberapa bahaya dipertimbangkan, skor risiko masing-masing dijumlahkan untuk menghasilkan nilai risiko keseluruhan. Skor ini kemudian dikonversi menjadi estimasi kerugian ekonomi

tahunan yang diharapkan dengan menggunakan fungsi eksponensial. Untuk proyeksi kerugian di masa mendatang, pada sebagian besar bahaya hanya perubahan pada Kemungkinan yang divariasikan, bukan Konsekuensi. Hal ini disebabkan oleh sulitnya memproyeksikan konsekuensi pada periode mendatang.

## Jenis-jenis bahaya yang dikaji

Dataset bahaya dikembangkan oleh CSIRO untuk memastikan konsistensi, termasuk untuk mengakomodasi perubahan (hasil dari proyeksi iklim) pada periode-periode mendatang. Basis data bahaya Pemerintah Indonesia yang tersedia saat ini tidak sesuai untuk keperluan proyeksi. Dataset bahaya iklim dasar diturunkan dari reanalisis atmosfer generasi kelima *European Centre for Medium Range Weather Forecasts* (ECMWF) terhadap iklim global untuk periode Januari 1940 hingga saat ini, yang dikenal sebagai ERA5. ERA5 diproduksi oleh *Copernicus Climate Service* (C3S) di ECMWF. Hasilnya kemudian diuji banding terhadap set data bahaya dari InaRISK BNPB untuk memastikan keterbandingan.

## Risiko kebakaran

Metrik risiko kebakaran dibangun dengan menggunakan tiga variabel iklim yang tersedia di Indonesia, yaitu: suhu maksimum ; faktor kekeringan ; dan kecepatan angin . Faktor kekeringan diturunkan menggunakan Indeks Kekeringan Keetch-Byram (Keetch-Byram Drought Index/ KBDI) yang dimodifikasi . Dataset penggunaan lahan diperoleh dari (Hulthen and Waha, 2022), yang mencakup 14 kategori. Setiap kategori diberi bobot tingkat kemudahan terbakar antara 0 dan 1.

Dengan demikian, metrik risiko kebakaran dihitung sebagai dan bernilai antara 0 dan 1, dengan 1 merepresentasikan risiko tertinggi.

$$\frac{((T_{max} + DF + WS) \times landuse)}{3}$$

Untuk memvalidasi metrik risiko kebakaran, hasilnya dibandingkan dengan data pemantauan hotspot satelit *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) NASA periode 2010–2020 dengan resolusi 0,25°. Hanya wilayah rawan kebakaran dengan tingkat kepercayaan di atas 30% yang dimasukkan dalam proses validasi.

Tingkat kejadian risiko kebakaran kemudian dihitung sebagai jumlah hari musim kemarau per tahun ketika metrik risiko kebakaran melebihi 0,85, dengan fokus pada wilayah lahan gambut di Indonesia karena kerentanannya yang tinggi terhadap kebakaran. Untuk kajian dampak terhadap infrastruktur, diasumsikan bahwa beban bahan bakar (*fuel loads*) memerlukan waktu satu tahun untuk pulih setelah kebakaran, sehingga membatasi frekuensi maksimum terjadinya risiko kebakaran menjadi satu hari per tahun. Untuk kondisi dasar, bahaya kebakaran ditentukan dengan menghitung tingkat kejadian pada lokasi spasial tetap menggunakan ambang batas konstan. Untuk skenario iklim masa depan, ambang batas tetap tidak berubah, sementara tingkat kejadian diperbarui menggunakan proyeksi iklim untuk setiap periode waktu berdasarkan estimasi persentil ke-10, ke-50, dan ke-90. Pendekatan ini mempertahankan intensitas bahaya, sembari memungkinkan frekuensinya bervariasi seiring perubahan kondisi iklim.

## Banjir

Model pemecah aliran SWIFT hidrodinamika (*hydrodynamic SWIFT*) digunakan untuk mensimulasikan curah hujan dan aliran air permukaan di seluruh daerah tangkapan air. Model ini menggunakan data curah hujan harian pada persentil ke-99,9 yang diperoleh dari analisis ulang iklim historis. Simulasi dilakukan untuk masing-masing dari 38 provinsi di Indonesia dan dijalankan selama 24 jam, dengan curah hujan ekstrem diterapkan sebagai hujan konstan pada jam pertama. Diasumsikan bahwa seluruh curah hujan menjadi limpasan permukaan, tanpa ada peresapan ke dalam tanah. Hal ini menyebabkan akumulasi air secara bersamaan di hilir, yang memicu banjir bandang di daerah tangkapan air.

Untuk setiap simulasi, kedalaman genangan maksimum dicatat pada setiap sel grid. Kedalaman genangan di atas 0,5 meter dianggap sebagai ambang batas yang menyebabkan kerusakan pada infrastruktur. Dalam perhitungan periode masa depan, konsekuensi dari kejadian banjir diasumsikan tidak berubah, sementara tingkat kemungkinan atau frekuensinya disesuaikan berdasarkan proyeksi curah hujan di masa depan.

## Inundasi Pesisir

Pemodelan inundasi pesisir dikembangkan untuk menghasilkan estimasi kedalaman inundasi, mengingat data Pemerintah Indonesia yang tersedia saat ini terkait kerentanan hanya menyediakan indeks. Kedalaman inundasi ini diperlukan untuk menghitung risiko terhadap infrastruktur lokal. Pemodelan ini menggunakan model pengisian banjir berbasis bathtub (*bathtub-based flood filling model*) yang mempertimbangkan data lonjakan badai (*storm surge*) dan kenaikan muka air laut (SLR). Model Elevasi Digital (DEM) yang bersumber dari Pemerintah Indonesia digunakan untuk memetakan model pada lokasi-lokasi yang akan tergenang.

Data lonjakan badai diperoleh dari (Muis *et al.*, 2020) untuk titik-titik di lepas pantai Indonesia dengan ketinggian untuk periode ulang 1 banding 100. Variasi nilai yang besar ini disebabkan oleh pasang surut dan arus yang tidak seragam di sekitar berbagai pulau. Data SLR bersumber dari proyeksi IPCC AR6 dengan skenario spesifik SSP3-7.0 untuk tingkat keyakinan menengah serta nilai persentil ke-10, ke-50 (median), dan ke-90 untuk tahun 2040 dan 2060. Variasi spasial nilai SLR dalam dataset ini sekitar 10 cm di seluruh wilayah Indonesia, jauh lebih kecil dibandingkan variasi nilai lonjakan badai di seluruh wilayah negara. Pemodelan ini belum mempertimbangkan laju penurunan muka tanah di kawasan pesisir Indonesia.

## Angin ekstrem

Dampak angin ekstrem yang dihasilkan dari badai petir terhadap infrastruktur dimodelkan menggunakan teknik pengelompokan statistik. Teknik ini mengklasifikasikan angin konvektif ekstrem (*severe convective wind*) ke dalam tiga tipe: angin latar yang kuat, laju penurunan suhu (*lapse rate*) yang tajam, dan lingkungan dengan kelembapan tinggi.

Hasil analisis menunjukkan adanya variasi temporal; kejadian angin latar yang kuat lebih sering terjadi pada musim dingin di Belahan Bumi Selatan. Kejadian dengan laju penurunan suhu yang tajam dan lingkungan dengan kelembapan tinggi lebih umum terjadi pada musim panas di Belahan Bumi Selatan. Ketiga jenis kejadian tersebut paling mungkin terjadi antara pukul 12.00 siang hingga 18.00. Metrik Angin Konvektif Ekstrem (SCWM) digunakan untuk mengidentifikasi hari-hari dengan potensi aktivitas badai petir; nilai pada kisaran 50–55 dianggap sebagai hari ketika badai petir paling mungkin terjadi dan berpotensi bersifat parah.

Pada periode mendatang, nilai ambang untuk SCWM tetap tidak berubah, sementara tingkat kejadian diperbarui menggunakan estimasi persentil ke-10, ke-50, dan ke-90 dari proyeksi iklim masa depan. Pendekatan ini menjaga intensitas bahaya tetap konstan, sekaligus menyesuaikan frekuensinya berdasarkan proyeksi kondisi iklim.

## Tanah longsor

Analisis ini difokuskan pada kejadian longsor yang dipicu oleh curah hujan, dengan mengecualikan longsor yang dipicu oleh faktor geofisika. Pemetaan risiko tanah longsor dikembangkan dengan menggunakan dua komponen utama:

**Pemetaan kerawanan tanah longsor:** Model pembelajaran mesin—seperti Mesin Vektor Pendukung (*Support Vector Machine/SVM*), pohon keputusan (*decision tree*), dan hutan acak (*random forest*)—diterapkan untuk menangkap hubungan nonlinier antara kejadian tanah longsor dan faktor-faktor internal, seperti kemiringan lereng, ketinggian, aspek lereng, kelengkungan rencana (*plan curvature*), serta kelengkungan profil (*profile curvature*).

**Perhitungan ambang batas curah hujan kritis:** Langkah ini menentukan ambang batas curah hujan yang dapat memicu terjadinya tanah longsor. Model Ambang Intensitas–Durasi Curah Hujan Efektif (*Effective Rainfall Intensity–Duration/EI–D*) diterapkan untuk menentukan ambang batas curah hujan. Model ini didasarkan pada model Intensitas–Durasi (I–D) konvensional dan teori intensitas curah hujan efektif, yang memandang longsor yang dipicu hujan sebagai proses evolusi dinamis dengan potensi adanya efek jeda (*lag*) relatif terhadap kejadian hujan. Model EI–D ditetapkan sebagai berikut:

$$EI = c + \alpha D^{\beta}$$

Di mana EI adalah intensitas rata-rata curah hujan efektif, D adalah jumlah hari dengan curah hujan yang berlangsung terus-menerus, c adalah konstanta, dan  $\alpha$  serta  $\beta$  merupakan parameter hasil kalibrasi. Parameter diestimasi menggunakan regresi kuantil.

Untuk memetakan tingkat risiko bahaya longsor, tingkat kerentanan longsor—mulai dari sangat rendah (S1) hingga sangat tinggi (S5)—dikombinasikan dengan tingkat probabilitas curah hujan secara temporal (ambang batas curah hujan). Kerangka gabungan ini menyajikan tingkat risiko bahaya tanah longsor.

## Model iklim dan skenario yang digunakan

Tujuh model CMIP6 yang dinilai paling prediktif untuk Indonesia dipilih melalui analisis ulang historis, kemudian dilakukan koreksi bias dan penurunan skala (downscaling) menggunakan data historis hingga mencapai resolusi 32 km.

Untuk penilaian risiko ini, seluruh analisis dilakukan menggunakan skenario SSP3-7.0 yang direkomendasikan oleh IPCC, yang juga dikenal sebagai skenario “*Regional Rivalry* (Persaingan Regional)”. Skenario ini merepresentasikan lintasan emisi yang relatif tinggi, di mana pemanasan global diproyeksikan mencapai sekitar 3,6°C di atas tingkat pra-industri pada tahun 2100. Perlu dicatat bahwa skenario SSP3-7.0 masih bukan merupakan skenario “terburuk” yang direkomendasikan oleh IPCC untuk keperluan penilaian risiko. Skenario terburuknya adalah SSP5-8.5, di mana emisi gas rumah kaca diperkirakan akan terus berlangsung hampir tanpa pengendalian. Skenario tersebut belum digunakan dalam kajian ini karena dinilai memiliki probabilitas rendah, meskipun saat ini terdapat ketidakpastian global dalam konteks penurunan emisi.

Untuk penilaian risiko iklim infrastruktur, hasil persentil ke-90 digunakan untuk menghitung dan menyajikan kerugian tahunan pada dua periode waktu masa depan yang ditargetkan, yaitu dekade 2040-an dan 2060-an. Periode proyeksi yang dipilih dalam kajian ini adalah tahun 2040-an, yang selaras dengan berakhirnya RPJPN 2025-2045, serta tahun 2060-an untuk memberikan gambaran perubahan jangka panjang dan keselarasan dengan target Net Zero Emission. Secara teknis, periode tersebut merupakan interval dekade karena pemodelan iklim tidak dilakukan pada skala waktu yang lebih terperinci. Penggunaan persentil ini, yang lazim dalam penilaian risiko masa depan, berfokus pada kejadian yang jarang terjadi namun bukan merupakan hasil yang paling ekstrem.

## Perkiraan biaya ekonomi

Penilaian risiko ini memperkirakan biaya ekonomi langsung dan tidak langsung dari bahaya alam yang terkait iklim terhadap infrastruktur. Biaya ekonomi selanjutnya diagregasi dan dilaporkan sebagai “kerugian tahunan rata-rata”. Kerugian tersebut bukan merupakan kerugian spesifik pada tahun tertentu, melainkan kerugian yang diperkirakan atau rata-rata berdasarkan kondisi iklim, tingkat bahaya, dan populasi pada periode tersebut. Kerugian ini dinyatakan dalam mata uang rupiah tahun 2025 untuk periode waktu saat ini maupun masa depan, guna memudahkan perbandingan tanpa dipengaruhi oleh inflasi. Meskipun penilaian risiko ini tidak mencakup pemodelan dinamis maupun pemodelan keseimbangan, besaran kerugian ini secara kasar dapat disepadankan dengan kerugian terhadap Produk Domestik Bruto (PDB).

## Transportasi

Di sektor jalan raya, biaya langsung mencakup perbaikan atau penggantian jalan yang rusak serta kehilangan pendapatan tol, dengan estimasi yang didasarkan pada belanja pemerintah dan laporan tahunan operator jalan tol. Jalan raya diasumsikan berada dalam kondisi sepenuhnya rusak atau tidak terdampak, kecuali pada kejadian kebakaran, di mana 10% dari jalan yang

terdampak secara konservatif dianggap mengalami kerusakan. Biaya tidak langsung dihitung menggunakan data Lalu Lintas Harian Rata-rata Tahunan (*Average Annual Daily Traffic/AADT*), dengan asumsi satu orang per kendaraan, serta menggunakan data upah untuk mengestimasi kehilangan produktivitas selama terjadi gangguan. Estimasi ini memiliki keterbatasan, antara lain asumsi lalu lintas yang disederhanakan serta tidak memasukkan dampak angkutan barang dan rantai pasok.

Dampak ekonomi langsung dari bahaya iklim terhadap **infrastruktur perkeretaapian** dihitung berdasarkan data belanja pemeliharaan serta informasi dalam laporan keuangan PT Kereta Api mengenai nilai aset tetap. Dampak ekonomi tidak langsung dari bahaya iklim terhadap jaringan perkeretaapian dihitung menggunakan volume penumpang pada tingkat provinsi yang tersedia melalui Badan Pusat Statistik (BPS). Seperti halnya pada jaringan jalan, apabila jaringan perkeretaapian terganggu, diasumsikan bahwa hal tersebut menimbulkan kehilangan produktivitas yang dikuantifikasi menggunakan data upah, yang juga diperoleh pada tingkat provinsi.

Dampak ekonomi langsung dari bahaya iklim terhadap **pelabuhan laut** di Indonesia dihitung berdasarkan kehilangan pendapatan ketika pelabuhan tidak dapat beroperasi, dengan pendapatan dialokasikan secara proporsional berdasarkan porsi tonase kotor (*Gross Tonnage*) masing-masing pelabuhan. Kerugian tambahan juga timbul akibat kerusakan kargo, yang diperkirakan sebesar 10% dari nilai ekspor pada pelabuhan yang terdampak. Peristiwa kerusakan berdampak tinggi namun kecil kemungkinannya terjadi dikecualikan karena sifatnya yang tidak dapat diprediksi serta tingginya tingkat ketidakpastian dalam proyeksi iklim. Dampak tidak langsung dinilai melalui kehilangan produktivitas penumpang yang tidak dapat memanfaatkan pelabuhan. Untuk penumpang domestik, digunakan data upah, sedangkan untuk pengunjung internasional, biayanya didasarkan pada rata-rata pengeluaran harian pengunjung internasional ke Indonesia, yang mencakup pengeluaran seperti akomodasi, makanan, dan aktivitas.

Dalam perhitungan kerugian untuk **bandara**, dampak ekonomi langsung dari bahaya iklim terhadap bandara tidak diperhitungkan, termasuk kehilangan pendapatan operator, karena keterbatasan data. Data jumlah penumpang yang dipilah berdasarkan asal domestik dan internasional tersedia dari BPS dan telah digunakan untuk memperkirakan biaya tidak langsung. Gangguan juga dapat berdampak pada sektor terkait, seperti pariwisata, namun dampak lintas-sektor yang lebih luas tersebut tidak dicakup karena keterbatasan data dan ruang lingkup.

## Ketenagalistrikan

Perlakuan terhadap dampak ekonomi langsung untuk **pembangkit** dan **transmisi** berbeda. Dalam analisis ini, biaya perbaikan pada pembangkitan listrik tidak diperhitungkan karena sulit diestimasi. Biaya perbaikan untuk transmisi diperoleh dari Energex. Kerugian akibat ketidaktersediaan listrik dikuantifikasi menggunakan intensitas energi di Indonesia, yang menunjukkan besarnya energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan output ekonomi (PDB). Rata-rata, setiap 1 megawatt-jam (MWh) listrik berkontribusi sekitar 9,6 juta rupiah terhadap perekonomian. Oleh karena itu, kehilangan sejumlah MWh tertentu mengakibatkan perkiraan kerugian sebesar 9,6 juta × x rupiah.

Kerugian ekonomi ini tidak memperhitungkan kehilangan total infrastruktur fisik pada stasiun **pembangkit** listrik, seperti pembangkit listrik tenaga batu bara atau pembangkit listrik tenaga surya. Untuk kerugian ekonomi tidak langsung, penggunaan energi per provinsi didasarkan pada data pemerintah, dengan nilai yang tidak tersedia diestimasi menggunakan jumlah penduduk dan penggunaan energi per kapita. Jika suatu provinsi menghasilkan energi lebih besar daripada yang didistribusikannya, surplus tersebut diasumsikan digunakan secara lokal. Pembangkit listrik dinilai menggunakan tingkat keluaran rata-rata dan faktor kapasitas, karena pembangkit tidak beroperasi pada kapasitas penuh sepanjang waktu. Apabila penurunan output menyebabkan suatu provinsi tidak dapat memenuhi kebutuhan energi hariannya, kekurangan tersebut dianggap sebagai kerugian ekonomi.

Biaya langsung untuk **transmisi** energi dikuantifikasi sebagai biaya penggantian saluran listrik yang dinilai rusak akibat dampak bahaya iklim. Biaya pemeliharaan tahunan rata-rata per kilometer jaringan listrik di Indonesia berkisar antara USD1.500 hingga USD5.000, tergantung lokasi dan kondisi setempat. Biaya penggantian untuk kerusakan jaringan dan menara transmisi listrik diperkirakan sebesar USD1.320.000 per kilometer jaringan transmisi. Kerugian ekonomi tidak langsung akibat gangguan transmisi juga dihitung menggunakan intensitas energi. Sebagaimana telah disebutkan sebelumnya, analisis ini hanya mempertimbangkan saluran transmisi kritis yang menghubungkan pembangkit listrik dengan gardu induk. Energi yang ditransmisikan melalui setiap saluran transmisi kritis dihitung dengan mengasumsikan bahwa energi yang dihasilkan di setiap pembangkit listrik, setelah memperhitungkan faktor kapasitas, dibagi rata ke seluruh saluran transmisi keluar. Energi ini dikonversi menjadi biaya ekonomi dengan menggunakan intensitas energi output ekonomi yang sama sebagaimana dijelaskan di atas. Sehubungan dengan digunakannya model jaringan transmisi yang disederhanakan, asumsi terkait redistribusi daya dalam jaringan ketika pasokan yang tersedia berada di bawah estimasi permintaan provinsi tidak diperhitungkan.

## Telekomunikasi

Kerugian ekonomi langsung akibat dampak bahaya iklim dikuantifikasi melalui biaya penggantian menara BTS telepon seluler yang mengalami kerusakan. Untuk mengkuantifikasi kehilangan produktivitas akibat penurunan cakupan seluler telepon seluler sebagai dampak ekonomi tidak langsung, peta cakupan sintetis pada tahap awal disusun menggunakan data lokasi setiap menara BTS dan menghitung tumpang tindih spasial cakupan dengan asumsi bahwa setiap BTS memiliki jangkauan radius sekitar 15 km. Lokasi menara yang diidentifikasi terdampak gangguan akibat bahaya (yaitu yang terpapar bahaya) kemudian dihapus, dan peta cakupan sintetis dihitung ulang. Selisih antara dua peta cakupan sintetis tersebut kemudian merepresentasikan kehilangan cakupan akibat dampak bahaya. Luas area dari selisih tersebut kemudian dihitung lebih lanjut, dan konversi menjadi jumlah penduduk yang terdampak dilakukan dengan menggunakan data kepadatan penduduk yang tersedia dari BPS. Terakhir, dampak ekonomi diperkirakan dengan mengasumsikan setiap orang kehilangan setengah hari kerja dan mengalikannya dengan upah harian rata-rata di provinsi tersebut.

# REFERENSI

- ADB (2024) *Climate Finance Landscape of Asia and the Pacific*. Asia Development Bank. Tersedia di: <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/901611/climate-finance-landscape-asia-pacific.pdf>.
- ADB (2014) *Climate Risk Management in ADB Projects*. Manila, Philippines: Asian Development Bank. Available at: <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/148796/climate-risk-management-adb-projects.pdf> (Accessed: September 17, 2024).
- Australian Government (2023) *Critical Infrastructure Resilience Strategy*. Cyber and Infrastructure Security Centre. Available at: <https://www.cisc.gov.au/resources-subsite/Documents/critical-infrastructure-resilience-strategy-2023.pdf> (Accessed: May 21, 2024).
- BAPPENAS (2014b) *National Action Plan for Climate Change Adaptation (Rencana Aksi Nasional – Adaptasi Perubahan Iklim/ “RAN-API”)*. Jakarta, Indonesia: Ministry of National Development Planning/Bappenas.
- BAPPENAS (2021a) *Executive Summary: Climate Resilience Development Policy 2020-2045*. Ministry of National Development Planning, Government of Indonesia. Available at: [https://lcdi-indonesia.id/wp-content/uploads/2021/11/0\\_Executive-Summary.pdf](https://lcdi-indonesia.id/wp-content/uploads/2021/11/0_Executive-Summary.pdf) (Accessed: January 3, 2024).
- BAPPENAS (2021b) *Executive Summary: Climate Resilience Development Policy 2020-2045*. Ministry of National Development Planning, Government of Indonesia. Available at: [https://lcdi-indonesia.id/wp-content/uploads/2021/11/0\\_Executive-Summary.pdf](https://lcdi-indonesia.id/wp-content/uploads/2021/11/0_Executive-Summary.pdf) (Accessed: January 3, 2024).
- CDRI (2023) *Global Infrastructure Resilience: Capturing the Resilience Dividend*. Coalition for Disaster Resilient Infrastructure. Available at: [https://cdri.world/upload/biennial/CDRI\\_Global\\_Infrastructure\\_Resilience\\_Report.pdf](https://cdri.world/upload/biennial/CDRI_Global_Infrastructure_Resilience_Report.pdf) (Accessed: April 8, 2024).
- Climate Bond Initiative (2021) “Greenium Remains Visible in Latest Pricing Study.” Available at: <https://www.climatebonds.net/2021/09/greenium-remains-visible-latest-pricing-study#:~:text=In%20early%20June%202021%2C%20Indonesia%20priced%20its%20fourth,green%20yield%20curve%20remained%20inside%20the%20vanilla%20curve.>
- Dartanto, T. (2022) “Natural disasters, mitigation and household welfare in Indonesia: Evidence from a large-scale longitudinal study,” *Cogent Economics & Finance*, 10(1). Available at: <https://doi.org/10.1080/23322039.2022.2037250>.

Fiscal Policy Agency (2023) "Presentation material for DKIS Jakarta seminar."

GFDRR (2021) *Gender Dimensions of Disaster Risk and Resilience*. Washington, D.C.: Global Facility for Disaster Reduction and Recovery, the World Bank Group. Available at: <https://wrd.unwomen.org/sites/default/files/2021-11/Gender-Dimensions-of-Disaster-Risk-and-Resilience-Existing-Evidence.pdf> (Accessed: January 15, 2025).

Hall, J.W. et al. (2019) *Adaptation of Infrastructure Systems: Background Paper for the Global Commission on Adaptation*. Oxford, UK: Environmental Change Institute, University of Oxford. Available at: [https://gca.org/wp-content/uploads/2020/12/GCA-Infrastructure-background-paperV11-refs\\_0.pdf](https://gca.org/wp-content/uploads/2020/12/GCA-Infrastructure-background-paperV11-refs_0.pdf) (Accessed: July 1, 2024).

Hallegatte, S. et al. (2020) "From Poverty to Disaster and Back: a Review of the Literature," *Economics of Disasters and Climate Change*, 4(1), pp. 223–247. Available at: <https://doi.org/10.1007/s41885-020-00060-5>.

Hallegatte, S., Rentschler, J. and Rozenberg, J. (2019) *Lifelines: The Resilient Infrastructure Opportunity*. The World Bank. Available at: <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1430-3>.

Hulthen, A. and Waha, K. (2022) "Indonesian Hybrid Landcover 2020 - GeoTIFF." CSIRO. Available at: <https://doi.org/10.25919/8624-RG56>.

IAEA (2019) *Adapting the energy sector to climate change*. International Atomic Energy Agency. Available at: <https://www.iaea.org/publications/12338/adapting-the-energy-sector-to-climate-change> (Accessed: September 6, 2024).

IPCC (2012) *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York, NY: Cambridge University Press. Available at: [https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX_Full_Report.pdf).

MOF (2018) *Strategi Pembiayaan dan Asuransi Risiko Bencana*. Available at: [https://fiskal.kemenkeu.go.id/files/parb/file/PARB2018\\_Revisi.pdf](https://fiskal.kemenkeu.go.id/files/parb/file/PARB2018_Revisi.pdf).

Muis, S. et al. (2020) "A High-Resolution Global Dataset of Extreme Sea Levels, Tides, and Storm Surges, Including Future Projections," *Frontiers in Marine Science*, 7, p. 263. Available at: <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00263>.

OECD (2018) *Climate-resilient Infrastructure*. OECD Environment Policy Paper No. 14. Organisation for Economic Co-operation and Development. Available at: <https://www.oecd.org/environment/cc/policy-perspectives-climate-resilient-infrastructure.pdf> (Accessed: April 10, 2024).

Patankar, A. (2015) *The Exposure, Vulnerability, and Ability to Respond of Poor Households to Recurrent Floods in Mumbai*. World Bank, Washington, DC. Available at: <https://doi.org/10.1596/1813-9450-7481>.

- Republic of Indonesia (2024) *Integration Technical Instructions Climate Change Adaptation (API) into Spatial Planning*. Jakarta, Indonesia: Ministry of Agrarian and Spatial Planning, National Land Agency.
- Semarang City Government (2016a) *Resilient Semarang: Moving Together Towards a Resilient Semarang*. Semarang, Indonesia. Available at: [https://resilientcitiesnetwork.org/downloadable\\_resources/Network/Semarang-Resilience-Strategy-English.pdf](https://resilientcitiesnetwork.org/downloadable_resources/Network/Semarang-Resilience-Strategy-English.pdf) (Accessed: January 23, 2024).
- Semarang City Government (2016b) *Resilient Semarang: Moving Together Towards a Resilient Semarang*. Semarang, Indonesia. Available at: [https://resilientcitiesnetwork.org/downloadable\\_resources/Network/Semarang-Resilience-Strategy-English.pdf](https://resilientcitiesnetwork.org/downloadable_resources/Network/Semarang-Resilience-Strategy-English.pdf) (Accessed: January 23, 2024).
- Standards Australia (2013) *Climate change adaptation for settlements and infrastructure - A risk based approach*. Available at: [https://www.intertekinform.com/en-au/standards/as-5334-2013-119943\\_saig\\_as\\_as\\_251367/?srsltid=AfmBOop-8BPisFm7bQLhofNBO5iOu3kcQHwKUiZnHNRM9y451x0N2SX](https://www.intertekinform.com/en-au/standards/as-5334-2013-119943_saig_as_as_251367/?srsltid=AfmBOop-8BPisFm7bQLhofNBO5iOu3kcQHwKUiZnHNRM9y451x0N2SX) (Accessed: November 7, 2024).
- Triana, K. and Wahyudi, A.J. (2020) "Sea Level Rise in Indonesia: The Drivers and the Combined Impacts from Land Subsidence," *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, 37(3). Available at: <https://doi.org/10.29037/ajstd.627>.
- UNCTAD (2020) *Climate change impacts and adaptation for coastal transport infrastructure: A compilation of policies and practices*. Transport and Trade Facilitation Series No. 12. United Nations Conference on Trade and Development. Available at: [https://unctad.org/system/files/official-document/dtl1b2019d1\\_en.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/dtl1b2019d1_en.pdf) (Accessed: September 6, 2024).
- UNDRR (2015) *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Available at: <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>.
- UNDRR (2021) *Addressing the infrastructure failure data gap: A governance challenge*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Available at: <https://www.undrr.org/publication/addressing-infrastructure-failure-data-gap-governance-challenge> (Accessed: September 6, 2022).
- UNDRR (2022) *Principles for Resilient Infrastructure*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Available at: <https://www.undrr.org/publication/principles-resilient-infrastructure> (Accessed: September 6, 2022).
- UNDRR and UNU-EHS (2023) *Nature-based Solutions for Comprehensive Disaster and Climate Risk Management*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Available at: <https://www.undrr.org/media/97918/download?startDownload=20240724> (Accessed: July 24, 2024).

- UNEA (2022) *UN Environment Assembly concludes with 14 resolutions to curb pollution, protect and restore nature worldwide*. Available at: <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/un-environment-assembly-concludes-14-resolutions-curb-pollution> (Accessed: July 29, 2024).
- UNISDR (2015) *Making Development Sustainable: The Future of Disaster Risk Management. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. Geneva, Switzerland: United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Available at: <https://www.undrr.org/publication/global-assessment-report-disaster-risk-reduction-2015> (Accessed: July 1, 2024).
- United Nations (2023) *Financing for Sustainable Development Report 2023: Financing Sustainable Transformations*. New York, NY: United Nations Inter-agency Task Force on Financing for Development. Available at: [https://desapublications.un.org/publications/financing-sustainable-development-report-2023?\\_gl=1\\*1sih06i\\*\\_ga\\*ODkyODUzMjgwLjE3MjlyMTc4ODM.\\*\\_ga\\_TK9BQL5X7Z\\*MTcyMjlxNzg4My4xLjAuMTcyMjlxNzg4My4wLjAuMA..](https://desapublications.un.org/publications/financing-sustainable-development-report-2023?_gl=1*1sih06i*_ga*ODkyODUzMjgwLjE3MjlyMTc4ODM.*_ga_TK9BQL5X7Z*MTcyMjlxNzg4My4xLjAuMTcyMjlxNzg4My4wLjAuMA..) (Accessed: July 29, 2024).
- United Nations (2024) *The Sustainable Development Goals*. Available at: <https://sdgs.un.org/goals> (Accessed: July 29, 2024).
- World Bank (2013) *World Development Report 2014. Risk and Opportunity - Managing Risk for Development*. Washington, D.C.: The World Bank.
- World Bank (2019) *Strengthening New Infrastructure Assets: A Cost-Benefit Analysis*. The World Bank Group, Climate Change Group, Global Facility for Disaster Reduction and Recovery. Available at: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/962751560793977276/pdf/Strengthening-New-Infrastructure-Assets-A-Cost-Benefit-Analysis.pdf> (Accessed: April 17, 2024).
- World Bank and ADB (2021a) *Climate Risk Country Profile Indonesia*. The World Bank Group and Asian Development Bank. Available at: [https://climateknowledgeportal.worldbank.org/sites/default/files/2021-05/15504-Indonesia%20Country%20Profile-WEB\\_0.pdf](https://climateknowledgeportal.worldbank.org/sites/default/files/2021-05/15504-Indonesia%20Country%20Profile-WEB_0.pdf) (Accessed: December 12, 2023).
- World Bank and ADB (2021b) *Climate Risk Country Profile Indonesia*. The World Bank Group and Asian Development Bank. Available at: [https://climateknowledgeportal.worldbank.org/sites/default/files/2021-05/15504-Indonesia%20Country%20Profile-WEB\\_0.pdf](https://climateknowledgeportal.worldbank.org/sites/default/files/2021-05/15504-Indonesia%20Country%20Profile-WEB_0.pdf) (Accessed: December 12, 2023).
- World Bank Group (2023) *Indonesia Country Climate and Development Report*. Available at: <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/c6b1d872-f487-4579-be3a-3cb6ba55dffa> (Accessed: December 12, 2023).





Kementerian PPN/  
Bappenas