

**KESENJANGAN KAPASITAS TEKNOLOGI DAN RISIKO
BENCANA VULKANIK: ANALISIS KOMPARATIF
POSISI INDONESIA DI ANTARA NEGARA-
NEGARA VULKANIK DUNIA**



Disusun Oleh:

N a m a : Muhammad Ferrel Ganendra Arisaputra

NIM : 22523054

**PROGRAM STUDI INFORMATIKA – PROGRAM SARJANA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA**

2026

HALAMAN PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

**KESENJANGAN KAPASITAS TEKNOLOGI DAN RISIKO
BENCANA VULKANIK: ANALISIS KOMPARATIF
POSISI INDONESIA DI ANTARA NEGARA-
NEGARA VULKANIK DUNIA**



Yogyakarta, 28 April 2026

Pembimbing,


(Arrie Kurniawardhani, S.Si., M.Kom.)

HALAMAN PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

**KESENJANGAN KAPASITAS TEKNOLOGI DAN RISIKO
BENCANA VULKANIK: ANALISIS KOMPARATIF
POSISI INDONESIA DI ANTARA NEGARA-
NEGARA VULKANIK DUNIA**

TUGAS AKHIR

Telah dipertahankan di depan sidang penguji sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Komputer dari Program Studi Informatika – Program Sarjana di Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia

Yogyakarta, 13 Mei 2026

Tim Penguji

Arrie Kurniawardhani, S.Si., M.Kom.

Anggota 1

Dr. Hendrik, S.T., M.Eng.

Anggota 2

Taufiq Hidayat, S.T., M.C.S., Ph.D.

Mengetahui,

Ketua Program Studi Informatika – Program Sarjana

Fakultas Teknologi Industri

Universitas Islam Indonesia



(Ir. Dhamas Hatta Fudholi, S.T., M.Eng., Ph.D.)

HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Ferrel Ganendra Arisaputra

NIM : 22523054

Tugas akhir dengan judul:

KESENJANGAN KAPASITAS TEKNOLOGI DAN RISIKO BENCANA VULKANIK: ANALISIS KOMPARATIF POSISI INDONESIA DI ANTARA NEGARA- NEGARA VULKANIK DUNIA

Menyatakan bahwa seluruh komponen dan isi dalam tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri. Apabila di kemudian hari terbukti ada beberapa bagian dari karya ini adalah bukan hasil karya sendiri, tugas akhir yang diajukan sebagai hasil karya sendiri ini siap ditarik kembali dan siap menanggung risiko dan konsekuensi apapun.

Demikian surat pernyataan ini dibuat, semoga dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Yogyakarta, 28 April 2026



(Muhammad Ferrel Ganendra Arisaputra)

HALAMAN PERSEMBAHAN

Bagian Skripsi ini penulis persembahkan untuk:

1. Papa dan Mama, untuk setiap doa yang dipanjatkan jauh sebelum penulis tahu betapa beratnya perjalanan ini. Skripsi ini selesai karena kalian tidak pernah berhenti percaya, bahkan di saat penulis sendiri sempat goyah. Terima kasih sudah menjadi Papa dan Mama. Tidak akan pernah ada kata-kata yang cukup untuk membalas semua itu. Semoga kalian selalu sehat dan panjang umur. Tunggu penulis, karena masih banyak hal yang ingin penulis wujudkan untuk membuat kalian bangga.
2. Teman-teman yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu, yang hadir di hari-hari panjang dan malam-malam yang tidak mudah. Yang mengajak keluar tepat ketika penulis paling membutuhkannya, dan yang membuat proses ini terasa jauh lebih ringan hanya dengan ada. Terima kasih sudah menjadi bagian dari perjalanan yang tidak akan penulis tukar dengan apapun.
3. FC Barcelona, yang dalam momen-momen paling melelahkan selalu berhasil mengingatkan penulis bahwa permainan belum selesai sebelum peluit panjang berbunyi. *Més que un club*, Lebih dari sekadar tim, sebuah cara pandang untuk tidak menyerah. *Visca Barça, Visca Catalunya*.
4. Dan untuk seseorang yang menemani hampir seluruh perjalanan kuliah ini, yang namanya tidak perlu penulis tulis karena ia sudah menjadi bagian penting dari cerita yang selalu dikenang. Terima kasih sudah membuat hari-hari penulis lebih ringan dan selalu ada saat dibutuhkan. Penulis tidak pernah menyesal mengenalmu, justru akan menyesal jika tidak mengenalmu sama sekali. Untuk setiap kesalahan yang pernah penulis lakukan, penulis meminta maaf dengan tulus. Kamu layak mendapatkan yang terbaik. Kini kita sedang berproses di jalur masing-masing, dan penulis sudah belajar menerima itu dengan tenang. Yang tersisa hanyalah harapan tulus, semoga kamu selalu baik-baik saja, keluargamu sehat, dunia memperlakukanmu dengan lembut, segala urusanmu dimudahkan, dan langkahmu selalu dilapangkan.

HALAMAN MOTO

Her love was the gravity that kept my feet on the ground and my eyes on the stars.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga skripsi ini dapat diselesaikan. Skripsi yang berjudul “Kesenjangan Kapasitas Teknologi dan Risiko Bencana Vulkanik: Analisis Komparatif Posisi Indonesia di Antara Negara-Negara Vulkanik Dunia” ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana pada Program Studi Informatika, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.

Penyelesaian skripsi ini tidak terlepas dari dukungan, bimbingan, dan bantuan berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. **Prof. Fathul Wahid, S.T., M.Sc., Ph.D.**, selaku Rektor Universitas Islam Indonesia, atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menempuh pendidikan di universitas ini.
2. **Prof. Dr. Ir. Hari Purnomo, M.T., IPU, ASEAN.Eng**, selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia, atas fasilitas akademik dan lingkungan belajar yang mendukung selama masa studi penulis.
3. **Raden Teduh Dirgahayu, S.T., M.Sc.**, selaku Ketua Jurusan Informatika, atas dukungan administratif dan kelancaran proses akademik selama penulis menempuh studi.
4. **Dhomas Hatta Fudholi, S.T., M.Eng., Ph.D.**, selaku Ketua Program Studi Informatika, atas bimbingan dalam pengelolaan kurikulum dan arahan akademik yang diberikan.
5. **Arrie Kurniawardhani, S.Si., M.Kom.**, selaku Dosen Pembimbing Skripsi, atas kesabaran, bimbingan yang tak ternilai, dan arahan yang tajam dalam membantu penulis menavigasi kompleksitas penelitian komparatif kuantitatif lintas negara ini dari awal hingga selesai.
6. **Hari Setiaji, S.Kom., M.Eng.**, selaku Dosen Pembimbing Akademik, atas saran dan arahan yang diberikan selama penulis menjalani masa studi.
7. Seluruh dosen dan staf Jurusan Informatika, Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia, atas ilmu, pengalaman, dan inspirasi yang telah diberikan selama penulis menempuh pendidikan.

8. Orang tua dan keluarga penulis, atas doa yang tidak pernah putus, dukungan moral yang selalu hadir, dan kepercayaan yang menjadi kekuatan terbesar penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
9. Rekan-rekan mahasiswa, yang telah menjadi teman diskusi, berbagi referensi, dan saling menyemangati dalam menyelesaikan tugas akhir masing-masing.
10. Seluruh lembaga internasional yang menyediakan data secara terbuka, meliputi Bündnis Entwicklung Hilft (*World Risk Index*), Portulans Institute (*Network Readiness Index*), World Intellectual Property Organization (*Global Innovation Index*), World Bank, European Commission Joint Research Centre (INFORM Risk Index), Smithsonian Institution (Global Volcanism Program), serta Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (EM-DAT), yang datanya menjadi tulang punggung seluruh analisis dalam penelitian ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Keterbatasan data di tingkat subnasional, cakupan sampel yang tidak mencakup seluruh negara vulkanik, serta sifat analisis yang bersifat asosiatif dan bukan kausal merupakan batasan yang penulis akui dengan rendah hati. Kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi penyempurnaan penelitian ini maupun bagi pengembangan penelitian serupa di masa mendatang.

Penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat, baik sebagai referensi akademik bagi peneliti selanjutnya maupun sebagai masukan berbasis data bagi para pemangku kebijakan di sektor kebencanaan nasional, khususnya dalam merumuskan strategi investasi kapasitas teknologi yang lebih terarah untuk menekan risiko bencana vulkanik Indonesia.

Semoga Allah SWT senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada kita semua.

Yogyakarta, 28 April 2026



(Muhammad Ferrel Ganendra Arisaputra)

SARI

Penelitian ini bertujuan menganalisis hubungan antara kapasitas teknologi dan kemampuan penanggulangan bencana vulkanik di antara negara-negara vulkanik dunia, dengan Indonesia sebagai kasus sentral. Latar belakang penelitian adalah fenomena *digital divide* dalam konteks kebencanaan, di mana kesenjangan teknologi antarnegara berimplikasi langsung pada perbedaan kapasitas mitigasi, kesiapsiagaan, respons, dan pemulihan bencana.

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif komparatif berbasis data sekunder tahun 2024 dari tujuh sumber utama, meliputi *World Risk Index* (WRI), *Network Readiness Index* (NRI), *Global Innovation Index* (GII), GDP per kapita World Bank, INFORM Risk Index, Smithsonian GVP, dan EM-DAT CRED, dengan sampel 55 negara vulkanik. Metode analisis meliputi analisis kuadran, regresi *Ordinary Least Squares* (OLS), korelasi Pearson, dan *gap analysis* per fase *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction* 2015–2030 dengan negara *benchmark* Jepang, Selandia Baru, dan Islandia.

Hasil analisis menempatkan Indonesia pada kuadran Waspada (NRI 53,84; WRI 41,13). Korelasi Pearson antara NRI dan *Lack of Coping Capacities* menghasilkan $r = -0,55$ ($p < 0,001$), dengan model regresi $Y = 69,01 - 0,85X$ dan $R^2 = 0,307$. Residual positif Indonesia sebesar +27,70 poin mengonfirmasi paradoks *digital divide*: kapasitas penanggulangan bencana Indonesia jauh di bawah prediksi model berdasarkan modal teknologi yang dimilikinya. *gap analysis* mengidentifikasi ketertinggalan sistemik di seluruh fase Sendai, dengan gap terbesar pada fase pemulihan (0,42) diikuti respons (0,36), mitigasi (0,29), dan kesiapsiagaan (0,13). Penelitian merekomendasikan empat prioritas kebijakan: penguatan fondasi ekonomi untuk pemulihan, perbaikan tata kelola kelembagaan, peningkatan infrastruktur mitigasi, dan integrasi teknologi ke sistem kesiapsiagaan daerah terpencil. Keterbatasan utama penelitian ini adalah sifat analisis yang asosiatif dan bukan kausal serta bertumpu pada data agregat tingkat negara.

Kata kunci: *digital divide*, bencana vulkanik, *Network Readiness Index*, *World Risk Index*, *Sendai Framework*, Indonesia, *gap analysis*

GLOSARIUM

Analisis Kuadran

Metode pemetaan yang membagi bidang kartesius menjadi empat kuadran berdasarkan nilai median dua variabel, digunakan dalam penelitian ini untuk memposisikan negara-negara vulkanik berdasarkan kapasitas teknologi (NRI) dan risiko bencana (WRI).

Bencana Vulkanik

Peristiwa yang dipicu oleh aktivitas gunung berapi, mencakup letusan, aliran piroklastik, lahar, hujan abu, dan tsunami vulkanik, yang mengakibatkan kerugian jiwa, kerusakan infrastruktur, dan gangguan kehidupan masyarakat.

Coping capacity

Kapasitas suatu negara dalam menangani dampak bencana ketika terjadi, mencakup kemampuan mobilisasi sumber daya, koordinasi kelembagaan, dan ketersediaan infrastruktur tanggap darurat. Dalam *World Risk Index*, rendahnya kapasitas ini diukur melalui sub-komponen *Lack of Coping Capacities*.

Digital divide

Kesenjangan antarnegara atau antarkelompok dalam hal akses, pemanfaatan, dan kemampuan mengoptimalkan teknologi informasi dan komunikasi. Dalam konteks kebencanaan, *digital divide* mencakup perbedaan kemampuan membangun sistem peringatan dini, mengoordinasikan respons darurat, dan memulihkan sistem sosial-ekonomi pascabencana.

EM-DAT CRED

Emergency Events Database yang dikelola oleh Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) di Universitas Louvain, Belgia. Merupakan

database kejadian bencana global yang paling komprehensif, mencatat kejadian bencana sejak tahun 1900 beserta data korban dan kerugian ekonomi.

Erupsi

Peristiwa keluarnya material vulkanik dari dalam bumi ke permukaan melalui kawah atau celah gunung berapi, yang dapat berupa lava, gas vulkanik, abu, atau material piroklastik.

gap analysis

Metode analisis yang mengukur jarak antara kondisi aktual suatu entitas dengan kondisi ideal atau kondisi entitas pembandingan (*benchmark*) pada dimensi-dimensi tertentu, digunakan dalam penelitian ini untuk mengidentifikasi kesenjangan kapasitas Indonesia dengan negara-negara *benchmark* per fase Sendai *Framework*.

GDP per Kapita

Gross Domestic Product (Produk Domestik Bruto) dibagi jumlah penduduk suatu negara, dinyatakan dalam dolar AS. Digunakan dalam penelitian ini sebagai indikator kapasitas ekonomi dan ruang fiskal untuk investasi kebencanaan serta pemulihan pascabencana.

Global Innovation Index (GII)

Indeks tahunan yang diterbitkan oleh World Intellectual Property Organization (WIPO) untuk mengukur kapasitas inovasi suatu negara melalui dimensi masukan inovasi (kelembagaan, modal manusia, infrastruktur, kecanggihan pasar dan bisnis) dan keluaran inovasi (pengetahuan, teknologi, dan kreativitas).

Gunung Berapi Aktif

Gunung berapi yang pernah mengalami aktivitas erupsi dalam rentang waktu Holosen (sekitar 10.000

tahun terakhir) berdasarkan catatan Smithsonian Global Volcanism Program (GVP).

INFORM Risk Index

Index for Risk Management yang dikembangkan oleh Komisi Eropa melalui Joint Research Centre untuk mengukur risiko bencana dan krisis kemanusiaan suatu negara dari tiga dimensi: bahaya dan keterpaparan, kerentanan sosial-ekonomi, dan kurangnya kapasitas penanggulangan.

Kerentanan (*Vulnerability*)

Kondisi sosial, ekonomi, dan kelembagaan yang menentukan seberapa besar dampak yang akan ditanggung suatu masyarakat ketika bencana terjadi. Dalam *World Risk Index*, kerentanan dibagi menjadi tiga sub-komponen: *Susceptibility*, *Lack of Coping Capacities*, dan *Lack of Adaptive Capacities*.

Kesiapsiagaan (*Preparedness*)

Fase penanggulangan bencana yang mencakup kapasitas sistem pemantauan, jaringan komunikasi, teknologi peringatan dini, dan kesiapan sumber daya manusia sebelum bencana terjadi. Berkaitan dengan Prioritas 4 Sendai *Framework*.

Keterpaparan (*Exposure*)

Proporsi populasi dan aset yang berada dalam jangkauan potensi dampak ancaman alam. Dalam *World Risk Index*, keterpaparan merupakan salah satu dari dua komponen utama pembentuk skor risiko bencana.

Koefisien Determinasi (R^2)

Ukuran statistik yang menunjukkan proporsi variasi variabel dependen yang dapat dijelaskan oleh variabel independen dalam model regresi. Nilai R^2 berkisar antara 0 hingga 1, dengan nilai yang lebih tinggi

menunjukkan kemampuan penjelas model yang lebih besar.

Korelasi Pearson

Ukuran statistik yang mengukur kekuatan dan arah hubungan linear antara dua variabel kontinu. Nilai koefisien berkisar antara -1 (hubungan negatif sempurna) hingga +1 (hubungan positif sempurna), dengan 0 menunjukkan tidak adanya hubungan linear.

Kuadran Preventif

Konfigurasi kuadran dalam analisis penelitian ini yang menampung negara-negara dengan skor NRI di atas median dan skor WRI di bawah median, menandakan kapasitas teknologi tinggi disertai risiko bencana yang relatif rendah.

Kuadran Reaktif

Konfigurasi kuadran dalam analisis penelitian ini yang menampung negara-negara dengan skor NRI di bawah median dan skor WRI di atas median, menandakan kapasitas teknologi terbatas berhadapan dengan risiko bencana yang tinggi.

Kuadran Waspada

Konfigurasi kuadran dalam analisis penelitian ini yang menampung negara-negara dengan skor NRI di atas median namun skor WRI juga di atas median, menandakan kapasitas teknologi memadai tetapi risiko bencana tetap tinggi karena faktor paparan atau kerentanan lain.

Lahar

Aliran lumpur vulkanik yang terbentuk dari campuran material piroklastik dengan air, baik dari hujan, sungai, maupun danau kawah yang meluap akibat erupsi. Lahar merupakan salah satu bahaya sekunder

letusan gunung berapi yang dapat mengancam kawasan jauh dari pusat erupsi.

Listwise deletion

Prosedur statistik yang mengeluarkan seluruh observasi yang tidak memiliki data lengkap pada variabel-variabel kunci dari analisis. Digunakan dalam penelitian ini untuk menghasilkan sampel analitik 55 negara dari populasi 75 negara vulkanik.

Mitigasi

Fase penanggulangan bencana yang mencakup upaya mengurangi risiko sebelum bencana terjadi melalui pembangunan infrastruktur fisik, regulasi tata ruang, dan program pengurangan risiko bencana. Berkaitan dengan Prioritas 1 Sendai *Framework*.

Network Readiness Index (NRI)

Indeks tahunan yang diterbitkan oleh Portulans Institute untuk mengukur kapasitas teknologi informasi dan komunikasi suatu negara melalui empat pilar: teknologi, masyarakat, tata kelola, dan dampak. Digunakan dalam penelitian ini sebagai proksi utama kapasitas teknologi agregat negara.

Normalisasi Min-Max

Teknik transformasi data yang mengubah nilai setiap variabel ke dalam skala 0 hingga 1 berdasarkan nilai minimum dan maksimum dalam sampel, sehingga variabel-variabel dengan satuan yang berbeda dapat dibandingkan secara setara.

Ordinary Least Squares (OLS)

Metode estimasi dalam analisis regresi linear yang meminimalkan jumlah kuadrat selisih antara nilai aktual dan nilai yang diprediksi oleh model. Merupakan metode regresi paling umum digunakan dalam penelitian kuantitatif komparatif lintas negara.

Pemulihan (Recovery)	Fase penanggulangan bencana yang mencakup kapasitas jangka panjang suatu negara untuk membangun kembali kehidupan sosial dan ekonomi pascabencana. Berkaitan dengan Prioritas 3 Sendai <i>Framework</i> dan sangat dipengaruhi oleh kapasitas ekonomi serta ekosistem inovasi nasional.
Pengurangan Risiko Bencana (Disaster Risk Reduction / DRR)	Pendekatan sistematis untuk mengidentifikasi, mengkaji, dan mengurangi risiko bencana, yang bertujuan untuk mengurangi kerentanan sosial-ekonomi dan meningkatkan ketangguhan masyarakat terhadap bencana alam maupun bencana yang dipicu aktivitas manusia.
Residual	Selisih antara nilai aktual dan nilai yang diprediksi oleh model regresi untuk suatu observasi. Residual positif berarti nilai aktual lebih tinggi dari prediksi, sedangkan residual negatif berarti nilai aktual lebih rendah dari prediksi.
Respons	Fase penanggulangan bencana yang mencakup kemampuan institusi dan sistem pemerintahan untuk memobilisasi sumber daya secara cepat dan terkoordinasi pada saat bencana berlangsung. Berkaitan dengan Prioritas 2 Sendai <i>Framework</i> .
Ring of Fire (Cincin Api Pasifik)	Jalur sepanjang sekitar 40.000 kilometer di tepi Samudra Pasifik yang merupakan zona aktivitas seismik dan vulkanik paling aktif di dunia, tempat sebagian besar gunung berapi aktif global terkonsentrasi, termasuk seluruh rangkaian kepulauan Indonesia.

Sabo Dam	Bendungan pengendali sedimen yang dibangun untuk menahan dan mengurangi aliran material vulkanik seperti lahar dan debris flow dari gunung berapi, berfungsi sebagai infrastruktur mitigasi fisik di kawasan rawan vulkanik.
<i>Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030</i>	Kerangka internasional utama yang diadopsi oleh 187 negara anggota PBB pada Maret 2015 di Sendai, Jepang, untuk memandu kebijakan pengurangan risiko bencana global. Kerangka ini menetapkan empat prioritas: memahami risiko, memperkuat tata kelola, berinvestasi dalam ketangguhan, dan meningkatkan kesiapsiagaan.
Smithsonian Global Volcanism Program (GVP)	Program ilmiah jangka panjang yang dikelola oleh Smithsonian Institution untuk memelihara database gunung berapi aktif dunia paling otoritatif, mencakup data lokasi, sejarah erupsi, dan tingkat aktivitas vulkanik secara global.
<i>Technology-resilience gap</i>	Jarak antara kapasitas teknologi yang dimiliki suatu negara secara agregat dengan sejauh mana kapasitas tersebut benar-benar diterjemahkan ke dalam ketangguhan bencana yang terukur. Konsep ini menjelaskan fenomena paradoks yang dialami Indonesia dalam penelitian ini.
Volcanic Explosivity Index (VEI)	Skala logaritmik yang digunakan untuk mengukur intensitas atau dahsyatnya letusan gunung berapi berdasarkan volume material yang dikeluarkan dan ketinggian kolom erupsi. Skala VEI berkisar dari 0 (letusan tidak eksplosif) hingga 8 (letusan super-kolosal).

World Risk Index (WRI)

Indeks komposit tahunan yang dikembangkan oleh Bündnis Entwicklung Hilft untuk mengukur risiko bencana suatu negara dari dua komponen utama: keterpaparan terhadap ancaman alam dan kerentanan yang mencakup *Susceptibility*, *Lack of Coping Capacities*, serta *Lack of Adaptive Capacities*. Skor WRI yang lebih tinggi mencerminkan risiko yang lebih besar.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING	ii
HALAMAN PENGESAHAN DOSEN PENGUJI	iii
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
HALAMAN MOTO	vi
KATA PENGANTAR	vii
SARI	ix
GLOSARIUM	x
DAFTAR ISI	xviii
DAFTAR TABEL	xx
DAFTAR GAMBAR	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Bencana Vulkanik dan Risiko Global	6
2.2 Kerangka Penanggulangan Bencana: Sendai <i>Framework</i> 2015-2030	7
2.3 <i>Digital divide</i> dan Ketangguhan Bencana	9
2.4 Tinjauan Indikator Penelitian	10
2.4.1 Smithsonian Global Volcanism (GVP)	10
2.4.2 <i>Network Readiness Index</i> (NRI)	11
2.4.3 <i>World Risk Index</i> (WRI)	12
2.4.4 INFORM Risk Index	13
2.4.5 GDP per Kapita	13
2.4.6 <i>Global Innovation Index</i> (GII)	14
2.4.7 EM-DAT CRED	14
2.5 Posisi Indonesia dalam Lanskap Vulkanik Global	16
2.6 Data Science dan Visualisasi dalam Manajemen Risiko Bencana Kontemporer	17
2.7 Kajian Penelitian Terdahulu	19
2.8 Kerangka Pemikiran	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Desain Penelitian	25
3.2 Populasi dan Sampel	26
3.3 Sumber Data	32
3.3.1 Smithsonian Global Volcanism Program	32
3.3.2 <i>World Risk Index</i> 2024	32
3.3.3 <i>Network Readiness Index</i> 2024	32
3.3.4 <i>Global Innovation Index</i> 2024	32
3.3.5 GDP per Kapita 2024	33
3.3.6 INFORM Risk Index 2024	33
3.3.7 EM-DAT CRED	33
3.4 Operasionalisasi Variabel	33

3.5	Prosedur Analisis	36
3.6	Teknik Pengumpulan Data	37
3.7	Teknik Analisis Data	38
3.7.1	Pembersihan dan Transformasi Data	39
3.7.2	Analisis Statistik Deskriptif	40
3.7.3	Analisis Korelasi Pearson	41
3.7.4	Analisis Regresi <i>Ordinary Least Squares</i>	42
3.7.5	Analisis Kuadran	45
3.7.6	<i>gap analysis</i>	46
3.8	Pengembangan <i>Dashboard</i> sebagai Alat Bantu Analisis	48
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		50
4.1	Gambaran Umum Data	50
4.2	Posisi Indonesia dalam Analisis Kuadran	52
4.3	Analisis Korelasi dan Regresi	54
4.3.1	Hasil Analisis Korelasi	54
4.3.2	Hasil Analisis Regresi Linear Sederhana	56
4.3.3	Posisi Indonesia dalam Model Regresi	58
4.3.4	Kelayakan Model Regresi sebagai Dasar Rekomendasi Kebijakan	59
4.4	<i>gap analysis</i> per Fase Sendai <i>Framework</i>	60
4.4.1	Sintesis Temuan <i>gap analysis</i>	62
4.5	Pembahasan dan Implikasi Kebijakan	64
4.5.1	Paradoks <i>Digital divide</i> Indonesia: Konfirmasi Empiris	64
4.5.2	Kesenjangan Sistemik di Sepanjang Siklus Penanggulangan	65
4.5.3	Keterbatasan dan Catatan Metodologis	66
4.5.4	Implikasi Kebijakan untuk Indonesia	67
4.6	Hasil Pengembangan <i>Dashboard</i> Analitik	67
4.6.1	<i>Pipeline</i> Integrasi dan Harmonisasi Data	67
4.6.2	Modul Profil dan Peringkat Negara Vulkanik (Tab 1)	69
4.6.3	Modul Analisis Kuadran (Tab 2)	70
4.6.4	Modul Korelasi dan Regresi OLS (Tab 3)	71
4.6.5	Modul Perbandingan Head-to-Head Indonesia (Tab 4)	73
4.6.6	Modul Analisis Ketangguhan per Fase Penanggulangan Bencana (Tab 5) 75	
4.6.7	Modul Peta dan Drill-Down Vulkanik (Tab 6)	77
4.6.8	Modul <i>Dataset</i> Master dan Ekspor (Tab 7)	78
4.6.9	Struktur <i>Dashboard</i>	81
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		82
5.1	Kesimpulan	82
5.2	Saran	83
5.2.1	Saran untuk Pemangku Kebijakan	83
5.2.2	Saran untuk Penelitian Selanjutnya	85
DAFTAR PUSTAKA		87
LAMPIRAN		90

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Negara-Negara Vulkanik dengan Data Tidak Lengkap pada Indikator Utama <i>Listwise deletion</i> (WRI, NRI, GDP, INFORM).....	28
Tabel 3.2 Operasionalisasi Variabel Penelitian	33
Tabel 4.1 Statistik Deskriptif Sampel Analitik (n=55)	50
Tabel 4.2 Perbandingan Kapasitas Teknologi dan Kemampuan Penanggulangan: Indonesia vs <i>Benchmark</i>	58
Tabel 4.3 Ringkasan Gap Indonesia vs Rata-rata <i>Benchmark</i> per Fase Sendai <i>Framework</i> ...	63
Tabel 4.4 Pemetaan Standardisasi Nama Negara Antar sumber Data	68
Tabel 4.5 Ringkasan Fungsi Tujuh Modul <i>Dashboard</i> Analitik	79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kerangka Pemikiran Penelitian.....	24
Gambar 3.1 Alur Teknik Analisis Data	39
Gambar 3.2 Ilustrasi Pembagian Empat Kuadran Analisis.....	45
Gambar 4.1 Analisis Kuadran: Kapasitas Teknologi (NRI) vs Risiko Bencana (WRI).....	53
Gambar 4.2 <i>Heatmap</i> Korelasi Pearson: Indikator Kapasitas vs Risiko	55
Gambar 4.3 Regresi OLS: NRI Score terhadap <i>Lack of Coping Capacities</i>	57
Gambar 4.4 <i>Radar chart</i> : Profil Ketangguhan Indonesia vs <i>Benchmark</i> per Fase Sendai	61
Gambar 4.5 Tampilan Modul Profil dan Peringkat Negara Vulkanik (Tab 1)	70
Gambar 4.6 Tampilan Modul Analisis Kuadran Kapasitas Teknologi vs Risiko Bencana	71
Gambar 4.7 Tampilan Modul Regresi OLS NRI Score terhadap <i>Lack of Coping Capacities</i> (Tab 3).....	72
Gambar 4.8 Tampilan <i>Heatmap</i> Korelasi Pearson Antarvariabel (Tab 3).....	73
Gambar 4.9 Tampilan Modul Perbandingan Head-to-Head Indonesia vs Negara <i>Benchmark</i> (Tab 4).....	74
Gambar 4.10 Tampilan Modul Analisis Ketangguhan Fase Mitigasi (Tab 5).....	76
Gambar 4.11 Radar Ringkasan Ketangguhan Indonesia per Fase Penanggulangan (Tab 5)...	77
Gambar 4.12 Tampilan Modul Peta Distribusi Gunung Berapi per Negara (Tab 6)	78
Gambar 4.13 Tampilan Modul <i>Dataset</i> Master dan Statistik Deskriptif (Tab 7)	79

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Bencana alam merupakan salah satu ancaman terbesar terhadap keberlangsungan pembangunan manusia di seluruh dunia. Di antara berbagai jenis bencana geologis, aktivitas vulkanik menempati posisi yang khas karena sifatnya yang tidak dapat dicegah, sulit diprediksi secara presisi, dan berpotensi menimbulkan dampak lintas batas yang masif. Letusan gunung berapi dapat mengakibatkan hilangnya nyawa, kerusakan infrastruktur, gangguan terhadap sistem pangan, hingga perubahan iklim jangka pendek yang mempengaruhi seluruh kawasan. Smithsonian Global Volcanism Program (GVP) mencatat bahwa sejak tahun 1900, terdapat ribuan kejadian erupsi yang tersebar di 77 entitas geografis vulkanik aktif di seluruh dunia, yang setelah eksklusi entitas non-negara dan wilayah tanpa data pembangunan yang memadai menjadi 75 negara yang membentuk populasi penelitian ini (Smithsonian Institution, 2024).

Dalam menghadapi ancaman tersebut, kapasitas suatu negara untuk melakukan mitigasi, kesiapsiagaan, respons, dan pemulihan bencana menjadi penentu utama seberapa besar dampak yang harus ditanggung masyarakatnya. *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030* yang diadopsi oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa secara tegas menetapkan bahwa pengurangan risiko bencana harus didukung oleh investasi pada teknologi, infrastruktur, dan tata kelola kelembagaan yang memadai (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2015). Namun kenyataannya, kapasitas antarnegara dalam keempat dimensi tersebut sangat tidak merata.

Kesenjangan ini semakin tajam ketika diukur menggunakan indikator-indikator global yang sah. *World Risk Index (WRI) 2024* yang diterbitkan Bündnis Entwicklung Hilft menunjukkan bahwa negara-negara dengan kapasitas teknologi tinggi, sebagaimana diukur oleh *Network Readiness Index (NRI)* (Portulans Institute, 2024) dari Portulans Institute dan *Global Innovation Index (GII)* (World Intellectual Property Organization, 2024) dari WIPO, secara konsisten mencatatkan risiko bencana yang lebih rendah (Bündnis Entwicklung Hilft, 2024). Sebaliknya, negara-negara dengan kapasitas teknologi rendah cenderung berada dalam kategori risiko tinggi hingga sangat tinggi. Pola ini mengindikasikan adanya hubungan sistemik antara penguasaan teknologi dengan ketangguhan suatu negara dalam menghadapi bencana, sebuah fenomena yang dalam literatur pembangunan disebut sebagai *digital divide* dalam konteks kebencanaan.

Fenomena *digital divide* dalam kebencanaan tidak semata-mata merujuk pada ketimpangan akses internet atau infrastruktur digital secara umum. Lebih dari itu, ia mencakup kesenjangan dalam kemampuan suatu negara memanfaatkan teknologi untuk sistem peringatan dini, komunikasi darurat, koordinasi institusional, dan pemulihan pascabencana. Negara-negara seperti Jepang, Selandia Baru, dan Islandia menjadi contoh nyata bagaimana kapasitas teknologi yang tinggi mampu diartikulasikan ke dalam kesiapan bencana yang efektif, meskipun ketiga negara tersebut juga berada di kawasan vulkanik aktif.

Di sisi lain, terdapat negara-negara yang menunjukkan pola paradoks: kapasitas teknologi agregat yang terus berkembang, namun kemampuan penanggulangan bencana (*coping capacity*) yang tetap rendah. Indonesia adalah contoh paling menonjol dari paradoks ini. Paradoks *digital divide* dalam konteks kebencanaan merujuk pada kondisi di mana suatu negara memiliki kapasitas teknologi agregat yang relatif memadai, namun kapasitas tersebut tidak diterjemahkan ke dalam kemampuan penanggulangan bencana yang sepadan. Dengan kata lain, terdapat kesenjangan antara potensi teknologi yang dimiliki dengan realisasinya dalam ketangguhan bencana yang nyata dan terukur. Dengan 101 gunung berapi aktif dan frekuensi erupsi tertinggi di dunia sejak tahun 1900 (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), 2024; Smithsonian Institution, 2024), Indonesia menanggung beban vulkanik yang tidak tertandingi oleh negara mana pun. Meskipun pertumbuhan ekonomi dan teknologi Indonesia dalam satu dekade terakhir cukup signifikan, *World Risk Index* menempatkan Indonesia dalam kategori risiko sangat tinggi, sementara nilai *Lack of Coping Capacities*-nya tetap tinggi dibandingkan negara-negara vulkanik lain yang setara secara ekonomi.

Kondisi inilah yang menjadikan Indonesia kasus yang paling relevan sekaligus paling mendesak untuk dikaji secara komparatif. Negara-negara seperti Jepang, Selandia Baru, dan Islandia telah membuktikan bahwa beban vulkanik yang besar tidak harus berakhir dengan risiko yang tinggi, selama investasi kapasitas teknologi dan kelembagaan dilakukan secara sistematis dan terukur. Penelitian ini tidak berhenti pada kuantifikasi kesenjangan, melainkan berupaya mengidentifikasi dimensi kesenjangan yang paling kritis beserta implikasinya bagi prioritas kebijakan pengurangan risiko bencana vulkanik di Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, penelitian ini merumuskan tiga pertanyaan utama sebagai berikut:

- a. Di mana posisi Indonesia dibandingkan negara-negara vulkanik lain dalam hal kapasitas teknologi dan tingkat risiko bencana berdasarkan indikator global tahun 2024?
- b. Seberapa besar dan signifikan hubungan antara kapasitas teknologi suatu negara dengan kemampuan penanggulangan bencana vulkaniknya di antara negara-negara vulkanik dunia?
- c. Langkah apa yang perlu diprioritaskan Indonesia untuk menutup kesenjangan kapasitas teknologi dan kesiapan bencana vulkanik menuju level negara-negara yang telah berhasil menekan risikonya?

1.3 Tujuan Penelitian

Sejalan dengan rumusan masalah di atas, penelitian ini memiliki tiga tujuan utama:

- a. Memetakan posisi Indonesia di antara negara-negara vulkanik dunia berdasarkan kapasitas teknologi dan tingkat risiko bencana menggunakan indikator global tahun 2024.
- b. Menganalisis hubungan antara kapasitas teknologi dengan kemampuan penanggulangan bencana vulkanik secara kuantitatif di antara negara-negara vulkanik dunia.
- c. Merumuskan prioritas langkah yang perlu diambil Indonesia untuk menutup kesenjangan kapasitas teknologi dan kesiapan bencana vulkanik menuju level negara-negara yang telah berhasil menekan risikonya.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat pada dua level, yaitu manfaat teoritis dan manfaat praktis.

Manfaat Teoritis

Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan literatur tentang hubungan antara *digital divide* dan ketangguhan bencana (disaster resilience) dalam konteks komparatif antarnegara. Selama ini, kajian *digital divide* lebih banyak berfokus pada dimensi akses dan partisipasi digital secara umum. Penelitian ini memperluas cakupan tersebut dengan menguji secara empiris apakah dan seberapa besar kesenjangan teknologi antarnegara berpengaruh terhadap kapasitas penanggulangan bencana vulkanik secara spesifik, menggunakan kerangka Sendai *Framework* dan data indikator global yang terverifikasi.

Manfaat Praktis

Bagi pemerintah Indonesia, khususnya Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) dan Kementerian Komunikasi dan Digital, penelitian ini dapat menjadi referensi

berbasis data dalam merumuskan kebijakan pengurangan risiko bencana yang lebih terarah. Dengan mengetahui di dimensi dan fase mana kesenjangan Indonesia paling besar dibandingkan negara-negara *benchmark*, alokasi investasi teknologi untuk kebencanaan dapat diprioritaskan secara lebih efisien. Bagi peneliti selanjutnya, penelitian ini menyediakan kerangka analisis kuantitatif lintas negara yang dapat dikembangkan untuk jenis bencana lain maupun konteks regional yang lebih spesifik.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini dibatasi pada beberapa hal berikut.

Pertama, dari sisi cakupan geografis, penelitian ini hanya melibatkan negara-negara yang memiliki gunung berapi aktif berdasarkan data Smithsonian Global Volcanism Program (GVP). Dari 77 entitas geografis vulkanik yang tercatat, dua dieksklusi: Antartika yang meskipun memiliki 19 gunung berapi aktif berdasarkan catatan GVP, tidak dapat diperlakukan sebagai negara dalam analisis komparatif karena tidak memiliki populasi permanen maupun struktur pemerintahan nasional, dan Taiwan karena status politiknya yang dipersengketakan menyebabkan ketidakhadirannya dalam seluruh *dataset* indikator global yang digunakan, termasuk WRI, NRI, GII, GDP per Kapita World Bank, dan INFORM Risk Index. Populasi akhir yang digunakan adalah 75 negara. Dari populasi tersebut, 55 negara memenuhi syarat kelengkapan data pada empat indikator utama model regresi *Ordinary Least Squares* (OLS), yaitu WRI, NRI, GDP per Kapita, dan INFORM Risk Index, sehingga menjadi sampel analitik penelitian ini setelah prosedur *listwise deletion*. GII tetap digunakan sebagai variabel dalam analisis visualisasi dan *gap analysis*, namun tidak dijadikan syarat inklusi sampel.

Kedua, dari sisi cakupan waktu, seluruh data indikator yang digunakan merujuk pada tahun 2024, kecuali data historis erupsi gunung berapi yang mencakup periode 1900 hingga 2025 berdasarkan catatan Smithsonian Global Volcanism Program (GVP) dan *Emergency Events Database* (EM-DAT) yang dikelola oleh Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED).

Ketiga, dari sisi indikator, penelitian ini menggunakan tujuh sumber data utama: *World Risk Index* (WRI) 2024, *Network Readiness Index* (NRI) 2024, *Global Innovation Index* (GII) 2024, GDP (World Bank, 2024) per Kapita 2024 dari World Bank, INFORM Risk Index 2024, serta data vulkanik dari Smithsonian GVP dan EM-DAT (European Commission Joint Research Centre, 2024). Indikator-indikator ini dipilih karena memiliki cakupan negara yang

luas, metodologi yang terverifikasi, dan diakui oleh lembaga internasional seperti United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), PBB, dan Uni Eropa.

Keempat, dari sisi metode analisis, penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif komparatif yang mencakup analisis kuadran, regresi OLS, korelasi Pearson, dan *gap analysis*. Penelitian ini tidak menggunakan data primer seperti survei atau wawancara lapangan.

1.6 Sistematika Penulisan

Penelitian ini disusun dalam lima bab yang saling berkesinambungan. Berikut adalah gambaran singkat isi masing-masing bab.

Bab I Pendahuluan memaparkan latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan. Bab ini berfungsi sebagai kerangka awal yang menjelaskan mengapa penelitian ini perlu dilakukan, apa yang ingin dijawab, dan bagaimana batasannya.

Bab II Tinjauan Pustaka membahas landasan teoretis dan empiris yang menjadi pijakan penelitian. Cakupannya meliputi konsep *digital divide* dalam konteks kebencanaan, kerangka *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*, tinjauan terhadap masing-masing indikator yang digunakan (WRI, NRI, GII, GDP per Kapita, dan INFORM Risk Index), serta kajian penelitian terdahulu yang relevan.

Bab III Metodologi Penelitian menjelaskan desain penelitian, sumber dan prosedur pengumpulan data, proses seleksi sampel termasuk *listwise deletion*, serta metode analisis yang digunakan. Metode analisis yang diuraikan mencakup analisis kuadran berbasis median split, regresi OLS, korelasi Pearson, dan *gap analysis* dengan negara *benchmark* Jepang, Selandia Baru, dan Islandia.

Bab IV Hasil dan Pembahasan menyajikan temuan penelitian secara sistematis. Bagian ini mencakup pemetaan posisi Indonesia dalam analisis kuadran kapasitas teknologi versus risiko bencana, hasil uji korelasi dan regresi antarvariabel, serta *gap analysis* yang mengukur kesenjangan Indonesia dengan negara-negara *benchmark* di setiap fase penanggulangan bencana berdasarkan *Sendai Framework*.

Bab V Kesimpulan dan Saran merangkum jawaban atas ketiga rumusan masalah penelitian dan menarik implikasi dari temuan yang diperoleh. Bagian saran ditujukan kepada pemangku kebijakan, khususnya BNPB dan Kementerian Komunikasi dan Digital, serta kepada peneliti selanjutnya yang ingin mengembangkan kerangka analisis serupa.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bencana Vulkanik dan Risiko Global

Bencana vulkanik adalah salah satu fenomena geologi paling kompleks yang dihadapi manusia. Berbeda dari bencana hidrometeorologi seperti banjir atau badai yang masih bisa diprediksi dalam jendela waktu yang cukup, aktivitas vulkanik bersifat episodik dan sulit diperkirakan secara presisi bahkan dengan teknologi pemantauan mutakhir sekalipun. Satu letusan bisa memicu rangkaian bahaya sekunder yang saling tumpang tindih: aliran piroklastik, lahar, hujan abu, hingga tsunami vulkanik, yang masing-masing membutuhkan strategi mitigasi dan respons tersendiri (Tilling, 2008).

Secara global, distribusi gunung berapi aktif tidak merata. Smithsonian Global Volcanism Program (GVP) mencatat bahwa sebagian besar aktivitas vulkanik terkonsentrasi di sepanjang Cincin Api Pasifik (Ring of Fire), busur kepulauan Karibia, serta jalur tektonik Afrika Timur dan Mediterania. Dari 75 negara yang memiliki gunung berapi aktif, hanya sebagian kecil yang memiliki kapasitas teknologi dan kelembagaan memadai untuk mengelola risiko tersebut secara efektif. Ketimpangan ini menciptakan pola yang konsisten dalam data global: negara dengan beban vulkanik tinggi sekaligus kapasitas rendah menanggung proporsi korban dan kerugian yang jauh lebih besar dibanding negara maju dengan paparan serupa (Garschagen et al., 2021).

Risiko bencana vulkanik tidak bisa dilepaskan dari tiga komponen utama yang digunakan dalam literatur manajemen bencana kontemporer: bahaya (*hazard*), keterpaparan (*exposure*), dan kerentanan (*vulnerability*) (Birkmann et al., 2022). Bahaya merujuk pada karakteristik fisik ancaman itu sendiri, dalam hal ini intensitas dan frekuensi erupsi. Keterpaparan mengacu pada seberapa banyak populasi dan aset yang berada dalam jangkauan dampak potensial. Kerentanan mencakup kondisi sosial, ekonomi, dan kelembagaan yang menentukan seberapa besar dampak yang akan ditanggung ketika bahaya itu terjadi. *World Risk Index 2024* mengoperasionalkan ketiga komponen ini ke dalam skor komposit yang memungkinkan perbandingan antarnegara secara sistematis.

Yang membedakan bencana vulkanik dari jenis bencana lain adalah dimensi waktu dampaknya. Sebagian besar bencana bersifat akut dengan dampak yang relatif terlokalisasi secara temporal. Letusan besar seperti Pinatubo 1991 menunjukkan bahwa dampak vulkanik dapat berlangsung bertahun-tahun melalui gangguan iklim, kerusakan lahan pertanian, dan

perpindahan penduduk dalam skala besar (Newhall & Punongbayan, 1996). Ini berarti kapasitas pemulihan (*recovery capacity*) suatu negara sama pentingnya dengan kapasitas mitigasi dan respons awalnya. Dimensi inilah yang membuat analisis kesiapan bencana vulkanik perlu mencakup seluruh siklus penanggulangan, bukan hanya fase darurat semata, sebagaimana dirangkum dalam kerangka pemikiran penelitian ini pada Gambar 2.1.

2.2 Kerangka Penanggulangan Bencana: Sendai *Framework* 2015-2030

Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030 merupakan kerangka internasional utama yang memandu kebijakan pengurangan risiko bencana di tingkat global. Diadopsi pada Konferensi Dunia Ketiga PBB tentang Pengurangan Risiko Bencana di Sendai, Jepang, pada Maret 2015, kerangka ini menjadi penerus *Hyogo Framework for Action* 2005-2015, kerangka internasional pengurangan risiko bencana sebelumnya yang juga diadopsi PBB, dengan orientasi yang lebih eksplisit terhadap pengurangan risiko secara sistemik, bukan sekadar penanganan dampak bencana setelah terjadi (Shaw, 2020). UNDRR menetapkan *Sendai Framework* sebagai panduan global yang mengikat secara moral bagi 187 negara penandatanganan, termasuk Indonesia (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2015).

Sendai Framework memperkenalkan pergeseran paradigma yang signifikan dalam cara dunia memandang bencana. Jika sebelumnya pendekatan dominan berfokus pada respons dan pemulihan pascabencana, *Sendai Framework* menegaskan bahwa investasi pada pengurangan risiko sebelum bencana terjadi jauh lebih efisien secara ekonomi dan lebih efektif dalam menyelamatkan nyawa. Kerangka ini menetapkan tujuh target global yang harus dicapai pada 2030, antara lain pengurangan angka kematian akibat bencana, penurunan jumlah penduduk terdampak, pengurangan kerugian ekonomi, serta peningkatan akses terhadap sistem peringatan dini dan informasi risiko bencana (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2015).

Dalam penelitian ini, *Sendai Framework* digunakan sebagai kerangka analisis utama melalui empat fase penanggulangan bencana yang menjadi tulang punggung struktur *gap analysis*. Fase pertama adalah mitigasi, yang mencakup segala upaya untuk mengurangi risiko sebelum bencana terjadi melalui pembangunan infrastruktur fisik, regulasi tata ruang, dan program pengurangan risiko bencana (Disaster Risk Reduction atau DRR). Fase ini berkorespondensi dengan Prioritas 1 *Sendai Framework*, yaitu pemahaman mendalam tentang

risiko bencana sebagai dasar seluruh kebijakan DRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2015).

Fase kedua adalah kesiapsiagaan, yang meliputi kapasitas sistem pemantauan, jaringan komunikasi, teknologi peringatan dini, dan kesiapan sumber daya manusia dalam menghadapi ancaman yang akan datang. Kesiapsiagaan berkaitan erat dengan Prioritas 4 Sendai *Framework* yang menekankan penguatan kapasitas kesiapsiagaan untuk respons yang efektif. Dalam konteks vulkanik, fase ini mencakup sistem pemantauan seismik, jaringan sensor gas vulkanik, dan infrastruktur komunikasi yang mampu menjangkau populasi berisiko secara cepat (Dewanti et al., 2019).

Fase ketiga adalah respons, yaitu kemampuan institusi dan sistem pemerintahan untuk memobilisasi sumber daya secara cepat dan terkoordinasi pada saat bencana berlangsung. Fase ini berkaitan dengan Prioritas 2 Sendai *Framework* mengenai penguatan tata kelola risiko bencana di semua tingkatan. Kapasitas respons tidak hanya ditentukan oleh ketersediaan sumber daya fisik, tetapi juga oleh kualitas koordinasi antarinstansi, kejelasan otoritas komando, dan tingkat kepercayaan publik terhadap sistem penanggulangan bencana yang ada (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2015).

Fase keempat adalah pemulihan, yang mencakup kapasitas jangka panjang suatu negara untuk membangun kembali kehidupan sosial dan ekonomi pascabencana. Pemulihan yang efektif memerlukan kombinasi antara kekuatan ekonomi, kapasitas inovasi, dan modal manusia yang memadai. Sendai *Framework* menempatkan dimensi ini dalam Prioritas 3, yaitu investasi pada pengurangan risiko bencana demi ketangguhan jangka panjang. Dalam penelitian ini, GDP per Kapita dan GII digunakan sebagai proksi kapasitas pemulihan karena keduanya mencerminkan kemampuan suatu negara untuk mengerahkan sumber daya ekonomi dan inovatif dalam proses rekonstruksi.

Penggunaan Sendai *Framework* sebagai kerangka analisis dalam penelitian ini bukan sekadar pilihan normatif. Kerangka ini memiliki legitimasi empiris yang kuat karena diadopsi secara luas oleh lembaga-lembaga internasional seperti UNDRR, United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA), dan Uni Eropa dalam sistem pengukuran risiko bencana mereka. Indikator-indikator yang digunakan dalam penelitian ini, termasuk WRI, INFORM Risk Index, dan sub-komponen NRI yang berkaitan dengan infrastruktur dan tata kelola, semuanya dapat dipetakan ke dalam salah satu dari keempat fase tersebut, sehingga memungkinkan *gap analysis* yang terstruktur dan dapat diinterpretasikan secara kebijakan.

2.3 *Digital divide* dan Ketangguhan Bencana

Konsep *digital divide* pada mulanya berkembang dalam literatur pembangunan untuk menggambarkan kesenjangan akses terhadap teknologi informasi dan komunikasi antara negara maju dan negara berkembang. Definisi awal ini relatif sederhana: ada negara yang terhubung dan ada yang tidak (Norris, 2001). Pemahaman tentang *digital divide* kemudian bergeser dari sekadar persoalan akses fisik menuju dimensi yang jauh lebih kompleks, mencakup kemampuan memanfaatkan teknologi secara produktif, kapasitas kelembagaan dalam mengelola ekosistem digital, dan sejauh mana teknologi benar-benar menghasilkan dampak sosial yang bermakna (Lythreath et al., 2022).

Dalam konteks kebencanaan, *digital divide* mengambil bentuk yang lebih spesifik dengan konsekuensi yang jauh lebih serius. Kesenjangan teknologi antarnegara bukan sekadar perbedaan kecepatan internet atau penetrasi telepon pintar, melainkan perbedaan dalam kemampuan membangun sistem peringatan dini yang andal, mengoordinasikan respons darurat melalui jaringan komunikasi yang tahan gangguan, menganalisis data vulkanik secara *real-time*, dan memulihkan sistem sosial-ekonomi dengan memanfaatkan inovasi teknologi pascabencana. Dalam kerangka ini, *digital divide* di sektor kebencanaan adalah kesenjangan dalam kapasitas bertahan hidup yang terukur (Sakurai & Murayama, 2019).

Sejumlah penelitian telah mendokumentasikan hubungan antara kapasitas teknologi dan ketangguhan bencana secara empiris. Studi menggunakan data lintas negara menemukan bahwa indikator teknologi seperti penetrasi internet, investasi infrastruktur komunikasi, dan kapasitas inovasi nasional berkorelasi negatif dengan tingkat kematian dan kerugian ekonomi akibat bencana (Sakurai & Murayama, 2019; Toya & Skidmore, 2007). Pola ini bertahan bahkan setelah dikontrol dengan variabel-variabel seperti tingkat pendapatan, kepadatan penduduk, dan frekuensi kejadian bencana. Artinya, teknologi memiliki efek independen terhadap ketangguhan bencana yang tidak sepenuhnya dapat dijelaskan oleh kekayaan ekonomi semata.

Hubungan antara teknologi dan ketangguhan bencana tidak bersifat linier dan otomatis. Ada negara dengan kapasitas teknologi agregat yang cukup tinggi tetapi kapasitas penanggulangan bencananya tetap rendah. Kondisi ini bisa terjadi karena teknologi yang tersedia tidak diartikulasikan ke dalam sistem kebencanaan secara kelembagaan, investasi teknologi terkonsentrasi di sektor ekonomi produktif tanpa efek tetesan ke bawah (*trickle-down*) yang memadai ke infrastruktur keselamatan publik (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2022), atau kapasitas sumber daya manusia di lembaga-lembaga

kebencanaan tidak berkembang seiring kemajuan teknologi nasional secara umum. Indonesia, sebagaimana akan dianalisis lebih lanjut, menunjukkan pola paradoks semacam ini.

Kerangka teoritis yang paling relevan untuk memahami paradoks ini adalah konsep *technology-resilience gap*, yaitu jarak antara kapasitas teknologi yang dimiliki suatu negara secara agregat dengan sejauh mana kapasitas tersebut benar-benar diterjemahkan ke dalam ketangguhan bencana yang terukur. Gap ini berdimensi teknis sekaligus berdimensi tata kelola, kebijakan, dan prioritas anggaran (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2022). Penelitian ini mengoperasionalkan konsep tersebut melalui analisis kuadran yang mempertemukan skor NRI sebagai proksi kapasitas teknologi dengan skor WRI sebagai proksi risiko bencana, sehingga posisi relatif setiap negara dapat dipetakan secara empiris dan dibandingkan satu sama lain.

2.4 Tinjauan Indikator Penelitian

Penelitian ini menggunakan tujuh indikator utama yang bersumber dari lembaga internasional dengan metodologi terverifikasi. Masing-masing indikator tidak berdiri sendiri, melainkan dipilih karena dapat dipetakan ke dalam salah satu fase penanggulangan bencana dalam Sendai *Framework* sekaligus memiliki cakupan negara yang memadai untuk analisis komparatif lintas negara. Bagian ini menjelaskan dasar konseptual, metodologi, dan peran masing-masing indikator dalam kerangka analisis penelitian.

2.4.1 Smithsonian Global Volcanism (GVP)

Smithsonian Global Volcanism Program merupakan inisiatif ilmiah jangka panjang yang dikelola oleh Smithsonian Institution's National Museum of Natural History di Washington, D.C (Smithsonian Institution, 2024). GVP memelihara database gunung berapi aktif dunia yang paling otoritatif dan paling luas digunakan dalam penelitian vulkanologi dan kebencanaan internasional. Database ini mencatat seluruh gunung berapi yang pernah mengalami aktivitas erupsi dalam rentang waktu Holosen (sekitar 10.000 tahun terakhir), lengkap dengan data lokasi, tipe gunung berapi, sejarah erupsi, dan tingkat aktivitas terkini.

Dalam penelitian ini, GVP berfungsi sebagai penentu populasi karena menyediakan basis data global gunung berapi aktif yang terdokumentasi dan dapat ditelusuri secara konsisten (Smithsonian Institution, 2024). Dari seluruh negara di dunia, hanya negara-negara yang memiliki minimal satu gunung berapi aktif berdasarkan catatan GVP yang diikutsertakan sebagai populasi penelitian. Hasil identifikasi ini menghasilkan 77 negara vulkanik, yang

kemudian dikurangi dua karena alasan ketidaklengkapan data dan status politik yang tidak memungkinkan perbandingan setara, yaitu Antartika dan Taiwan, sehingga populasi akhir menjadi 75 negara. Keputusan untuk menggunakan GVP sebagai penentu populasi bukan sekadar pilihan teknis. GVP adalah satu-satunya database vulkanik global yang memiliki standar kurasi ilmiah yang konsisten, diperbarui secara berkala, dan diakui oleh komunitas ilmiah internasional sebagai referensi primer dalam penelitian kebencanaan vulkanik.

Selain sebagai penentu populasi, data frekuensi erupsi per negara dari GVP juga digunakan dalam pembahasan untuk mengkontekstualisasikan beban vulkanik historis masing-masing negara, khususnya Indonesia. Kombinasi data GVP dengan data korban dari EM-DAT memberikan gambaran yang lebih utuh tentang seberapa besar dan seberapa sering suatu negara terpapar ancaman vulkanik secara nyata, bukan hanya secara teoritis berdasarkan keberadaan gunung berapinya saja.

2.4.2 *Network Readiness Index (NRI)*

Network Readiness Index diterbitkan oleh Portulans Institute dan telah menjadi salah satu tolok ukur global yang paling komprehensif untuk mengukur kapasitas teknologi informasi dan komunikasi suatu negara (Portulans Institute, 2024). NRI mencakup lebih dari 130 negara dan diperbarui setiap tahun. Berbeda dengan indeks teknologi informasi dan komunikasi (TIK) lain yang cenderung berfokus pada infrastruktur fisik semata, NRI mengambil pendekatan yang lebih luas dengan mempertimbangkan empat pilar utama: pilar teknologi (Technology Pillar) yang mengukur infrastruktur dan akses digital, pilar masyarakat (People Pillar) yang mengukur keterampilan dan adopsi teknologi oleh individu dan organisasi, pilar tata kelola (*Governance Pillar*) yang mengukur kerangka regulasi dan kebijakan digital, serta pilar dampak (*Impact Pillar*) yang mengukur kontribusi teknologi terhadap perekonomian dan kualitas hidup.

Keunggulan NRI untuk keperluan penelitian ini terletak pada dimensi tata kelola dan dampak sosialnya. Kedua dimensi tersebut memungkinkan NRI tidak hanya mengukur seberapa canggih infrastruktur digital suatu negara, tetapi juga sejauh mana infrastruktur tersebut menghasilkan manfaat nyata bagi masyarakat, termasuk dalam konteks keselamatan publik dan manajemen bencana. Negara seperti Jepang mendapatkan skor NRI tinggi bukan hanya karena penetrasi internetnya, tetapi karena kapasitas tata kelola digitalnya yang terhubung erat dengan sistem keselamatan publik.

Dalam penelitian ini, NRI digunakan sebagai variabel independen utama dan sebagai sumbu horizontal dalam analisis kuadran. NRI berperan sebagai proksi kapasitas teknologi

agregat suatu negara, yang dalam kerangka Sendai *Framework* paling erat berkaitan dengan fase kesiapsiagaan, khususnya kemampuan sistem pemantauan, komunikasi darurat, dan koordinasi informasi. Korelasi antara NRI dan WRI menjadi uji empiris pertama dari hipotesis bahwa kapasitas teknologi memiliki hubungan signifikan dengan risiko bencana.

2.4.3 *World Risk Index (WRI)*

World Risk Index merupakan indeks komposit yang dikembangkan oleh Bündnis Entwicklung Hilft bekerja sama dengan Institute for International Law of Peace and Armed Conflict (IFHV) Universitas Bochum (Bündnis Entwicklung Hilft, 2024). WRI diterbitkan setiap tahun dan mencakup lebih dari 180 negara. Indeks ini dirancang untuk mengukur risiko bencana secara multidimensi, bukan sekadar dari sisi intensitas ancaman fisik, tetapi juga dari sisi kapasitas suatu negara dalam menghadapinya.

Secara metodologis, WRI dibangun dari dua komponen utama: keterpaparan (*exposure*) dan kerentanan (*vulnerability*). Komponen keterpaparan mengukur proporsi populasi yang terpapar berbagai ancaman alam, termasuk gempa bumi, badai tropis, banjir, kenaikan permukaan laut, dan kekeringan. Komponen kerentanan dibagi lagi menjadi tiga sub-komponen: kerentanan struktural sosial-ekonomi (*Susceptibility*), kurangnya kapasitas penanggulangan (*Lack of Coping Capacities*) yang mengukur keterbatasan kemampuan menangani dampak saat terjadi, dan kurangnya kapasitas adaptif (*Lack of Adaptive Capacities*) yang mengukur keterbatasan kemampuan beradaptasi jangka panjang. Skor WRI yang tinggi mencerminkan risiko yang lebih besar, sehingga negara dengan skor WRI tinggi adalah negara yang paling rentan terhadap bencana secara keseluruhan.

Dalam penelitian ini, WRI digunakan sebagai variabel dependen utama dalam model regresi OLS sekaligus sebagai sumbu vertikal dalam analisis kuadran. Pemilihan WRI sebagai proksi risiko bencana didasarkan pada beberapa pertimbangan. Pertama, WRI telah diadopsi oleh UNDRR sebagai salah satu referensi dalam pemantauan implementasi Sendai *Framework*. Kedua, metodologinya yang transparan dan datanya yang tersedia secara publik memungkinkan replikasi dan verifikasi independen. Ketiga, komponen *Lack of Coping Capacities* dalam WRI secara langsung berkaitan dengan kapasitas teknologi dan tata kelola, menjadikannya cocok sebagai variabel yang dipengaruhi oleh NRI dan indikator kapasitas lainnya.

2.4.4 INFORM Risk Index

Index for Risk Management (INFORM) Risk Index dikembangkan oleh Komisi Eropa melalui Joint Research Centre dan digunakan secara luas oleh lembaga-lembaga kemanusiaan PBB untuk penilaian risiko bencana dan krisis kemanusiaan secara proaktif (European Commission Joint Research Centre, 2024). INFORM mengukur risiko dari tiga dimensi utama: bahaya dan keterpaparan (*Hazard & Exposure*) yang mencakup ancaman alam dan konflik, kerentanan sosial-ekonomi (*Vulnerability*), serta kurangnya kapasitas penanggulangan (*Lack of Coping capacity*) yang mencakup dimensi kelembagaan dan infrastruktur. Berbeda dengan WRI yang lebih berorientasi pada bencana alam, INFORM mengintegrasikan risiko konflik dan krisis kemanusiaan ke dalam komposisinya, menjadikannya indikator yang lebih luas dalam mengukur ketangguhan sistemik suatu negara.

Dalam penelitian ini, INFORM Risk Index digunakan sebagai variabel independen tambahan dalam model OLS, berfungsi sebagai ukuran alternatif dari kerentanan sistemik yang melengkapi NRI dan GDP per Kapita. Keputusan untuk memasukkan INFORM ke dalam model didasarkan pada pertimbangannya yang lebih luas terhadap dimensi tata kelola dan kapasitas kelembagaan, yang tidak sepenuhnya tertangkap oleh indikator ekonomi dan teknologi saja. Selain itu, INFORM memiliki metodologi yang diakui oleh United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA) dan Uni Eropa, sehingga penggunaannya konsisten dengan orientasi penelitian yang mengacu pada standar lembaga internasional.

2.4.5 GDP per Kapita

GDP per Kapita yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari World Bank dan merujuk pada nilai tahun 2024 dalam satuan dolar AS (World Bank, 2024). GDP per Kapita merupakan indikator paling umum digunakan untuk mengukur tingkat kemakmuran ekonomi suatu negara dan kapasitas fiskalnya secara agregat.

Dalam konteks kebencanaan, GDP per Kapita memiliki dua peran analitis yang berbeda. Pertama, ia berfungsi sebagai variabel kontrol dalam model regresi OLS untuk memisahkan efek kapasitas teknologi dari efek kemakmuran ekonomi secara umum. Ini penting untuk memastikan bahwa korelasi antara NRI dan WRI tidak semata-mata mencerminkan fakta bahwa negara kaya cenderung memiliki teknologi lebih baik sekaligus risiko bencana lebih rendah. Dengan mengontrol GDP per Kapita, hubungan antara NRI dan WRI dapat diinterpretasikan sebagai efek teknologi yang bersifat independen dari kekayaan ekonomi.

Kedua, GDP per Kapita digunakan dalam *gap analysis* sebagai indikator kapasitas pemulihan ekonomi. Kemampuan suatu negara untuk membiayai rekonstruksi infrastruktur, mendukung populasi yang terdampak, dan memulihkan aktivitas ekonomi pascabencana sangat ditentukan oleh kekuatan fiskal yang sebagian besar berkorelasi dengan tingkat pendapatan per kapita.

2.4.6 Global Innovation Index (GII)

Global Innovation Index diterbitkan oleh World Intellectual Property Organization (WIPO) bekerja sama dengan sejumlah institusi riset internasional (World Intellectual Property Organization, 2024). GII mengukur kapasitas inovasi suatu negara melalui dua dimensi besar. Dimensi pertama adalah masukan inovasi, yang terdiri dari lima pilar: kelembagaan (Institutions), modal manusia dan penelitian (Human Capital and Research), infrastruktur (Infrastructure), kecanggihan pasar (Market Sophistication), dan kecanggihan bisnis (Business Sophistication). Dimensi kedua adalah keluaran inovasi, yang terdiri dari dua pilar: keluaran pengetahuan dan teknologi (*Knowledge and Technology Outputs*) serta keluaran kreatif (*Creative Outputs*). Indeks ini mencakup lebih dari 130 negara dan telah menjadi referensi standar dalam kajian ekonomi berbasis pengetahuan.

Relevansi GII dalam konteks kebencanaan terletak pada korelasinya dengan kapasitas pemulihan jangka panjang. Negara dengan kapasitas inovasi tinggi cenderung memiliki kemampuan lebih besar untuk mengembangkan solusi teknologi baru, memobilisasi penelitian terapan, dan menyesuaikan sistem kelembagaannya secara adaptif pascabencana (Izumi et al., 2019). Dalam kerangka Sendai *Framework*, dimensi ini paling dekat dengan fase pemulihan dan kapasitas adaptif jangka panjang.

Dalam penelitian ini, GII digunakan dalam analisis visualisasi dan *gap analysis*, tetapi tidak dijadikan syarat inklusi sampel dalam model OLS. Keputusan ini diambil karena keterbatasan cakupan GII yang sedikit lebih sempit dibandingkan NRI, sehingga menjadikannya syarat inklusi akan mengurangi sampel secara tidak proporsional. Meskipun demikian, GII tetap memberikan informasi penting tentang dimensi kapasitas inovatif yang tidak sepenuhnya tertangkap oleh NRI.

2.4.7 EM-DAT CRED

Emergency Events Database (EM-DAT) dikelola oleh Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) di Université catholique de Louvain, Belgia (Centre for

Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), 2024). Database ini merupakan inventaris kejadian bencana global yang paling komprehensif dan paling luas digunakan dalam penelitian kebencanaan internasional. EM-DAT mencatat kejadian bencana sejak tahun 1900 hingga saat ini, mencakup data tanggal kejadian, lokasi, jenis bencana, jumlah korban jiwa, jumlah penduduk terdampak, dan estimasi kerugian ekonomi.

Berbeda dengan enam sumber data lain yang digunakan dalam penelitian ini, EM-DAT bukan indikator komposit dan bukan proksi kuantitatif dalam model regresi. Perannya dalam penelitian ini adalah sebagai sumber data kejadian historis yang memberikan konteks empiris terhadap beban vulkanik masing-masing negara, khususnya Indonesia. Data frekuensi erupsi, jumlah korban, dan kerugian ekonomi yang bersumber dari EM-DAT digunakan untuk memperkuat argumentasi tentang urgensi penelitian ini sekaligus memberikan dasar faktual dalam pembahasan posisi Indonesia sebagai negara dengan beban vulkanik tertinggi di dunia sejak tahun 1900.

Dalam analisis gap yang dilakukan di BAB IV, data EM-DAT juga digunakan bersama data Smithsonian GVP untuk mengkontekstualisasikan temuan kuantitatif dari model OLS. Pola historis korban dan kerugian yang tercatat dalam EM-DAT menjadi salah satu argumen mengapa gap antara kapasitas teknologi dan kesiapan bencana Indonesia perlu diperlakukan sebagai masalah sistemik, bukan anomali statistik semata.

Ketujuh sumber data ini membentuk kerangka pengukuran yang saling melengkapi dan tidak dapat dipisahkan satu sama lain. GVP menentukan siapa saja yang masuk ke dalam populasi penelitian berdasarkan paparan vulkanik nyata. EM-DAT menyediakan rekam jejak historis kejadian bencana yang menjadi konteks empiris dari seluruh analisis. WRI menangkap sisi risiko dan hasil akhir yang ditanggung suatu negara. NRI dan GII menangkap kapasitas teknologi dan inovasi dari sudut yang berbeda: NRI dari sisi kesiapan infrastruktur dan tata kelola digital, GII dari sisi kemampuan menghasilkan pengetahuan dan solusi baru. GDP per Kapita menangkap kekuatan ekonomi yang menentukan ruang fiskal untuk investasi kebencanaan. INFORM melengkapi gambaran kerentanan dari sisi kelembagaan dan kapasitas penanggulangan yang lebih holistik. Kombinasi ketujuh sumber ini memungkinkan analisis yang tidak terbatas pada satu dimensi saja, melainkan mampu memetakan posisi suatu negara dari beberapa sudut pandang sekaligus.

2.5 Posisi Indonesia dalam Lanskap Vulkanik Global

Indonesia menempati posisi yang tidak tertandingi dalam peta kerentanan vulkanik dunia. Tidak ada negara lain yang menanggung kombinasi antara frekuensi aktivitas vulkanik, jumlah penduduk yang tinggal di zona risiko, dan keterbatasan kapasitas penanggulangan dalam skala yang sebanding. Posisi ini bukan klaim deskriptif semata, melainkan fondasi empiris yang diperlukan untuk menetapkan relevansi *gap analysis* pada BAB IV.

Dari sisi paparan vulkanik, Indonesia memiliki 101 gunung berapi aktif berdasarkan catatan Smithsonian Global Volcanism Program, menjadikannya negara dengan jumlah gunung berapi aktif terbanyak di dunia dalam satu wilayah nasional (Smithsonian Institution, 2024). Gunung-gunung tersebut tersebar dari ujung barat Sumatera hingga Papua, membentang sepanjang lebih dari 5.000 kilometer di atas pertemuan tiga lempeng tektonik besar, yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik. Kepadatan distribusi ini berarti hampir tidak ada wilayah Indonesia yang sepenuhnya terbebas dari risiko dampak vulkanik, baik secara langsung maupun melalui gangguan rantai pasokan, transportasi, dan infrastruktur.

Rekam jejak historis bencana vulkanik Indonesia yang tercatat dalam database EM-DAT CRED mempertegas keparahan paparan tersebut. Sejak tahun 1900, Indonesia mencatat 763 kejadian erupsi dan 70 peristiwa bencana vulkanik yang terdokumentasi dengan total korban jiwa mencapai 13.367 orang (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), 2024). Pola frekuensi dan skala dampak yang konsisten dari dekade ke dekade menunjukkan bahwa Indonesia berhadapan dengan ancaman yang bersifat struktural, bukan episodik.

Besarnya paparan vulkanik saja tidak cukup menjelaskan tingginya risiko bencana Indonesia. Banyak negara dengan gunung berapi aktif, seperti Islandia atau Jepang, memiliki paparan vulkanik yang signifikan tetapi berhasil menekan dampak korban dan kerugian melalui investasi kapasitas yang sistematis. Perbedaan yang menentukan terletak pada kesenjangan antara tingkat paparan dengan kapasitas yang dimiliki untuk merespons dan memitigasinya (Bündnis Entwicklung Hilft, 2024). Dalam *World Risk Index 2024*, Indonesia mencatat skor WRI sebesar 41,13, menempatkannya dalam kategori Risiko Sangat Tinggi. Skor ini merupakan kombinasi dari paparan fisik yang ekstrem dan sub-komponen kerentanan yang tinggi, terutama pada dimensi *Lack of Coping Capacities* dan *lack of adaptive capacities* yang paling langsung berkaitan dengan kapasitas teknologi dan kelembagaan.

Dari sisi kapasitas teknologi, posisi Indonesia dalam *Network Readiness Index* mencerminkan paradoks yang menjadi salah satu temuan utama penelitian ini. Dengan skor

NRI sebesar 53,84, skor GII sebesar 30,6, dan GDP per kapita sebesar USD 4.925, Indonesia adalah ekonomi terbesar di Asia Tenggara yang telah mengalami pertumbuhan ekosistem digital substansial dalam satu dekade terakhir. Namun angka-angka ini belum sepenuhnya diterjemahkan ke dalam kapasitas tata kelola bencana yang merata, terutama di wilayah-wilayah terpencil yang justru paling rentan terhadap dampak vulkanik. Skor INFORM Risk Index Indonesia sebesar 4,6 mengonfirmasi kerentanan sistemik ini dari dimensi kelembagaan dan kapasitas penanggulangan krisis.

Posisi Indonesia juga perlu dipahami dalam konteks kawasan. Di antara negara-negara Asia Tenggara yang memiliki gunung berapi aktif, seperti Filipina, Papua Nugini, dan Timor Leste, Indonesia memiliki kapasitas ekonomi dan teknologi yang relatif lebih besar (Bündnis Entwicklung Hilft, 2024; Portulans Institute, 2024). Namun pada tingkatan global, perbandingan dengan Jepang, Selandia Baru, dan Islandia menunjukkan jarak yang signifikan, bukan hanya dalam hal kekayaan ekonomi, tetapi juga dalam kematangan sistem penanggulangan bencana, integrasi teknologi ke dalam protokol keselamatan publik, dan kualitas infrastruktur pemantauan vulkanik. Ketiga negara tersebut menjadi tolak ukur karena telah membuktikan bahwa investasi kapasitas yang tepat dapat menekan risiko bencana secara terukur meskipun paparan vulkanik mereka tetap tinggi.

Pemahaman mendalam tentang posisi Indonesia saat ini menjadi prasyarat bagi seluruh komparasi yang dilakukan dalam penelitian ini. Tanpa pijakan ini, rekomendasi kebijakan yang dihasilkan dari *gap analysis* akan kehilangan relevansi preskriptifnya. Perbedaan antara Indonesia dengan negara-negara *benchmark* bukan anomali yang dapat dijelaskan oleh faktor tunggal, melainkan akumulasi kesenjangan sistemik di setiap fase penanggulangan bencana yang akan diurai secara menyeluruh pada BAB IV.

2.6 Data Science dan Visualisasi dalam Manajemen Risiko Bencana Kontemporer

Dua dekade terakhir mengubah cara komunitas internasional memahami dan merespons risiko bencana secara fundamental. Analisis kerentanan yang sebelumnya bertumpu pada laporan periodik yang statis dan sering tertinggal secara temporal kini dapat dilakukan secara dinamis dan komparatif, didorong oleh ketersediaan data global yang semakin melimpah dan kemajuan metode analitik. Data Science menemukan relevansinya di sini sebagai pendekatan sistematis untuk mengekstraksi pola dari tumpukan indikator global yang kompleks menjadi informasi yang dapat ditindaklanjuti, bukan sekadar alat bantu teknis (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2022).

Penerapan metode Data Science dalam studi kebencanaan lintas negara memungkinkan peneliti mengagregasi dan menganalisis puluhan indikator dari sumber yang berbeda secara simultan (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2022). Indeks-indeks komposit seperti *World Risk Index*, *Network Readiness Index*, dan *INFORM Risk Index* masing-masing memiliki struktur data dan metodologi penskalaan yang tidak seragam. Tanpa pendekatan komputasional yang memadai, upaya menemukan hubungan sistemik di antara indikator-indikator tersebut akan rentan terhadap bias seleksi dan kesalahan interpretasi. Teknik seperti analisis regresi multivariat, korelasi Pearson, dan normalisasi data memungkinkan peneliti mengisolasi efek masing-masing variabel independen terhadap variabel dependen yang diamati, sekaligus mengontrol faktor pengganggu seperti tingkat pendapatan nasional atau jumlah populasi yang terpapar.

Yang membedakan pendekatan berbasis Data Science dari analisis statistik konvensional adalah kemampuannya menangani data berdimensi tinggi (*high-dimensional data*), yaitu data dengan jumlah variabel yang jauh lebih banyak dibanding jumlah observasi, dalam konteks sampel yang relatif terbatas (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2022). Penelitian ini melibatkan 55 negara sebagai sampel analitik dengan cakupan variabel yang mencakup puluhan sub-komponen dari lima indeks global berbeda. Rasio variabel terhadap observasi semacam ini memerlukan kehati-hatian metodologis tinggi, terutama dalam pemilihan variabel untuk model regresi dan interpretasi signifikansi statistik. Pendekatan Data Science menyediakan kerangka kerja untuk eksplorasi data secara iteratif, menguji berbagai kombinasi variabel, dan memvalidasi temuan melalui visualisasi diagnostik sebelum menarik kesimpulan inferensial.

Temuan dari pemodelan statistik yang kompleks juga menghadapi tantangan tersendiri di sisi komunikasi. Pemangku kepentingan di sektor kebencanaan, dari pembuat kebijakan hingga praktisi lapangan, membutuhkan informasi yang akurat secara metodologis sekaligus dapat dipahami secara intuitif dalam waktu terbatas (Sakurai & Murayama, 2019). Grafik yang dirancang dengan baik mampu mereduksi kompleksitas model matematis menjadi representasi visual yang mengungkapkan posisi relatif, kecenderungan, dan anomali sekaligus. Sebuah *scatter plot* yang menampilkan posisi Indonesia di antara negara-negara vulkanik lain, misalnya, dapat menyampaikan pesan tentang kesenjangan kapasitas teknologi dan risiko bencana dengan kejelasan yang sulit ditandingi oleh halaman-halaman tabel numerik.

Platform seperti *INFORM Risk Index* milik European Commission Joint Research Centre dan *dashboard World Risk Index* yang diterbitkan Bündnis Entwicklung Hilft menunjukkan

bagaimana data multidimensi dapat disajikan dalam antarmuka yang memungkinkan pengguna melakukan eksplorasi mandiri sesuai kebutuhan spesifik mereka. Pendekatan ini meningkatkan transparansi metodologis sekaligus memberdayakan pengguna di tingkat nasional dan lokal untuk mengontekstualisasikan posisi negara mereka dalam lanskap risiko global tanpa harus memiliki keahlian statistik lanjutan (Bündnis Entwicklung Hilft, 2024; European Commission Joint Research Centre, 2024).

Dalam penelitian ini, pendekatan Data Science dan visualisasi interaktif diposisikan sebagai instrumen, bukan tujuan akhir. Pemetaan posisi Indonesia dalam kuadran kapasitas teknologi versus risiko bencana, pengujian signifikansi hubungan antara NRI dan kemampuan penanggulangan, serta identifikasi gap di setiap fase Sendai *Framework* semuanya difasilitasi oleh metode komputasional yang memungkinkan analisis dilakukan secara sistematis dan hasilnya dikomunikasikan secara efektif kepada para pemangku kepentingan di sektor kebencanaan.

2.7 Kajian Penelitian Terdahulu

Studi mengenai hubungan antara kapasitas teknologi dan ketangguhan bencana telah berkembang dalam dua jalur literatur yang sebagian besar berjalan paralel. Jalur pertama berfokus pada pengukuran *digital divide* sebagai fenomena pembangunan global, dengan penekanan pada kesenjangan akses dan adopsi teknologi informasi antarnegara. Jalur kedua berkonsentrasi pada determinan risiko bencana, dengan perhatian khusus pada faktor-faktor sosial, ekonomi, dan kelembagaan yang mempengaruhi kerentanan suatu populasi. Penelitian ini menempatkan diri pada titik pertemuan kedua jalur tersebut, dengan menguji secara empiris apakah dan seberapa besar kesenjangan teknologi yang terukur melalui indikator global berkorelasi dengan kemampuan penanggulangan bencana vulkanik secara spesifik.

Pada jalur literatur *digital divide*, fondasi konseptual tentang tiga tingkatan kesenjangan digital, yaitu kesenjangan global antara negara maju dan berkembang, kesenjangan sosial dalam suatu negara, dan kesenjangan demokratis dalam partisipasi politik, diletakkan melalui studi klasik yang berpengaruh dalam literatur komunikasi dan pembangunan (Norris, 2001). Kerangka ini kemudian diperluas melalui konsep *deepening divide*, yaitu pergeseran fokus dari sekadar akses fisik menuju kesenjangan dalam keterampilan dan pemanfaatan teknologi yang bermakna (van Dijk, 2005). Dalam konteks kebencanaan, implikasi dari konsep *deepening divide* ini menjadi sangat kritis: memiliki infrastruktur internet tidak otomatis berarti memiliki

kapasitas untuk membangun sistem peringatan dini yang efektif atau mengoordinasikan respons darurat secara efisien.

Sejumlah penelitian yang lebih mutakhir telah mulai menjembatani literatur *digital divide* dengan studi kebencanaan. Analisis data lintas negara selama periode 1980 hingga 2003 menunjukkan bahwa negara dengan tingkat pembangunan ekonomi yang lebih tinggi, pendidikan yang lebih baik, dan sistem keuangan yang lebih maju mengalami kerugian jiwa yang lebih sedikit akibat bencana alam (Toya & Skidmore, 2007). Meskipun studi ini tidak secara eksplisit mengukur kapasitas teknologi digital, temuan mereka tentang pentingnya pembangunan institusional menjadi preseden penting bagi penelitian ini.

Laporan Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction (GAR) yang diterbitkan secara berkala oleh UNDRR secara konsisten menekankan bahwa investasi pada infrastruktur teknologi dan sistem informasi merupakan salah satu faktor pembeda utama antara negara yang berhasil menekan risiko bencana dengan negara yang terus terperangkap dalam siklus kerentanan. GAR 2022 secara khusus menyoroti bahwa kesenjangan dalam akses terhadap data risiko dan sistem peringatan dini telah menciptakan apa yang disebut sebagai *risk information divide*, sebuah dimensi baru dari *digital divide* yang konsekuensinya diukur dalam jumlah korban jiwa dan kerugian ekonomi (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2022).

Dalam konteks bencana vulkanik secara spesifik, penelitian komparatif antarnegara masih sangat terbatas. Mayoritas studi yang ada bersifat studi kasus tunggal yang mendalam, seperti analisis sistem respons terhadap letusan Gunung Pinatubo 1991 (Newhall & Punongbayan, 1996) atau evaluasi sistem pemantauan vulkanik di Jepang (Nakada, 2018). Studi-studi ini memberikan wawasan yang kaya tentang praktik terbaik di tingkat nasional, tetapi tidak memungkinkan generalisasi tentang faktor-faktor sistemik yang membedakan negara dengan kapasitas penanggulangan tinggi dari negara dengan kapasitas rendah dalam skala global.

Sebuah pengecualian penting adalah penelitian yang dilakukan oleh tim Joint Research Centre European Commission dalam pengembangan INFORM Risk Index. Kerangka konseptual INFORM secara eksplisit memasukkan komponen Lack of *Coping capacity* yang mencakup dimensi infrastruktur komunikasi dan tata kelola sebagai penentu kapasitas penanggulangan suatu negara (Marin Ferrer et al., 2017). Temuan mereka menunjukkan bahwa kapasitas penanggulangan suatu negara tidak semata-mata ditentukan oleh kekayaan ekonomi, tetapi juga oleh kualitas institusi dan infrastruktur pendukungnya. Temuan ini sejalan dengan

pendekatan yang diambil dalam penelitian ini, yang menempatkan *Network Readiness Index* sebagai variabel independen utama dan mengontrol efek GDP per Kapita dalam model regresi.

Laporan *Network Readiness Index* 2024 juga memberikan bukti deskriptif tentang korelasi antara kesiapan jaringan digital dengan berbagai indikator pembangunan, termasuk ketangguhan terhadap guncangan eksternal (Portulans Institute, 2024). Meskipun laporan ini tidak secara spesifik menguji hubungan dengan risiko bencana vulkanik, analisis mereka tentang peran teknologi dalam memperkuat kapasitas adaptif masyarakat menjadi landasan empiris yang relevan bagi penelitian ini.

Dari sisi metodologis, penelitian ini mengadopsi pendekatan yang serupa dengan studi-studi komparatif lintas negara yang menggunakan data indeks global. Pemilihan metode *Ordinary Least Squares* dan korelasi Pearson untuk menguji hubungan antarvariabel mengikuti praktik standar dalam literatur pembangunan internasional, sebagaimana dicontohkan dalam studi tentang determinan institusional pembangunan ekonomi (Acemoglu et al., 2001). Penggunaan analisis kuadran berbasis median split untuk tipologi negara juga memiliki preseden dalam studi kebijakan komparatif, antara lain dalam studi tentang keunggulan kompetitif nasional (Porter, 1990).

Penelitian terbaru yang sangat relevan dengan fase pemulihan dalam kerangka analisis ini adalah pengembangan *Recovery Gap Index*, sebuah instrumen pengukuran komprehensif untuk menilai kapasitas pemulihan pascabencana di tingkat nasional (Borre et al., 2025). Studi ini mengoperasionalkan kapasitas pemulihan sebagai fungsi dari kekuatan ekonomi, kapasitas inovasi, dan kematangan kelembagaan suatu negara, dengan argumentasi bahwa kemampuan membangun kembali kehidupan sosial dan ekonomi pascabencana tidak dapat dilepaskan dari fondasi kapasitas jangka panjang yang telah dibangun sebelum bencana terjadi. Temuan tersebut menunjukkan bahwa kesenjangan pemulihan antarnegara jauh lebih lebar dibandingkan kesenjangan pada fase respons akut, dan bahwa negara-negara berpendapatan menengah seperti Indonesia menghadapi tantangan struktural yang berbeda dari negara maju maupun negara berpendapatan rendah dalam memobilisasi kapasitas pemulihan. Kerangka konseptual ini memperkuat justifikasi teoritis penggunaan GDP per Kapita dan GII Score sebagai proksi fase pemulihan dalam *gap analysis* penelitian ini.

Dengan menempatkan diri dalam konstelasi literatur yang telah dipaparkan, penelitian ini mengisi celah yang masih terbuka lebar: analisis kuantitatif lintas negara yang secara spesifik menguji hubungan antara kapasitas teknologi dengan kemampuan penanggulangan bencana vulkanik, menggunakan data tahun 2024 yang mencakup hampir seluruh negara vulkanik aktif

di dunia. Tidak ada penelitian sebelumnya yang menggabungkan kelima indikator global yang digunakan dalam penelitian ini (WRI, NRI, GII, GDP per Kapita, dan INFORM Risk Index) dalam satu kerangka analisis terpadu, apalagi yang kemudian menerjemahkan temuan kuantitatif tersebut ke dalam *gap analysis* per fase penanggulangan bencana berdasarkan kerangka Sendai *Framework*.

2.8 Kerangka Pemikiran

Penelitian ini dibangun di atas premis yang sederhana namun memiliki konsekuensi analitis yang luas. Beban vulkanik historis yang ditanggung suatu negara adalah konstanta geologis yang sulit diubah, tetapi tingkat risiko bencana yang dihasilkan dari beban tersebut bukan takdir yang tidak bisa dinegosiasikan. Di antara paparan ancaman fisik dan dampak kerugian yang diderita masyarakat, terdapat ruang intervensi yang lebarnya ditentukan oleh kapasitas yang dimiliki negara tersebut dalam dimensi teknologi, kelembagaan, dan ekonomi. Ruang inilah yang menjadi fokus utama penelitian ini, dengan Indonesia sebagai kasus sentral.

Untuk mengoperasionalkan premis tersebut ke dalam kerangka analitis yang terukur, penelitian ini menggunakan *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030* sebagai struktur pembanding utama (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2015). Kerangka ini membagi siklus penanggulangan bencana ke dalam empat fase yang saling berkesinambungan, yaitu mitigasi, kesiapsiagaan, respons, dan pemulihan. Masing-masing fase memiliki tuntutan kapasitas yang berbeda, dan kesenjangan di fase mana pun akan melemahkan ketangguhan sistem secara keseluruhan. Pendekatan berbasis fase ini memungkinkan analisis tidak hanya mengidentifikasi bahwa Indonesia tertinggal dari negara-negara *benchmark*, tetapi juga menentukan secara presisi di fase mana ketertinggalan itu paling kritis.

Network Readiness Index digunakan sebagai proksi kuantitatif kapasitas teknologi dan diposisikan sebagai variabel independen utama dalam kerangka ini (Portulans Institute, 2024). Pemilihan NRI didasarkan pada cakupan multidimensinya yang mengukur infrastruktur fisik, tata kelola digital, dan dampak sosial dari adopsi teknologi. Dalam konteks kebencanaan, dimensi-dimensi ini berkorespondensi langsung dengan kemampuan suatu negara membangun sistem peringatan dini yang andal, mengoordinasikan respons lintas lembaga, dan memulihkan konektivitas pascabencana. NRI mengukur seberapa siap ekosistem digital suatu negara menopang fungsi-fungsi keselamatan publik ketika terjadi guncangan, bukan sekadar seberapa canggih teknologi yang dimilikinya.

Kapasitas teknologi tidak berdiri sendiri. Kekuatan ekonomi suatu negara yang diproksikan melalui GDP per Kapita turut menentukan ruang fiskal yang tersedia untuk investasi infrastruktur kebencanaan dan rekonstruksi pascabencana (World Bank, 2024). Kerentanan kelembagaan sistemik yang diukur melalui INFORM Risk Index melengkapi pembacaan kapasitas penanggulangan dari sisi tata kelola dan infrastruktur pendukung (European Commission Joint Research Centre, 2024).

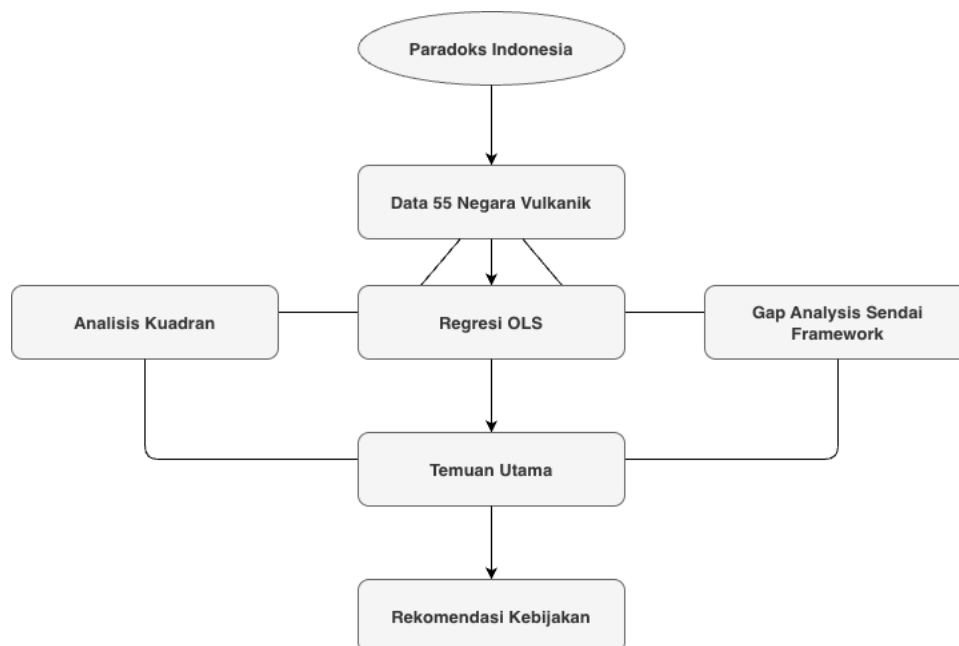
World Risk Index ditempatkan sebagai variabel dependen dalam model analitis ini (Bündnis Entwicklung Hilft, 2024). Dengan struktur kompositnya yang mencakup komponen keterpaparan, kerentanan, dan kapasitas penanggulangan, WRI menyediakan ukuran risiko bencana yang komprehensif dan dapat dibandingkan secara konsisten antarnegara. Sub-komponen *Lack of Coping Capacities* dalam WRI menjadi perhatian khusus karena secara konseptual paling dekat dengan variabel independen yang diuji, sekaligus menjadi titik masuk untuk *gap analysis* yang lebih terperinci.

Setelah hubungan antarvariabel diuji secara statistik melalui regresi *Ordinary Least Squares* dan korelasi Pearson, kerangka berpikir penelitian ini bergerak dari inferensi menuju preskripsi. Sebagai pembanding dipilih tiga negara yang memiliki kapasitas teknologi tinggi, beban vulkanik signifikan, dan kemampuan penanggulangan bencana yang terbukti unggul, yaitu Jepang, Selandia Baru, dan Islandia. Ketiganya mencatatkan skor NRI di atas 64, jauh melampaui median sampel, serta memiliki jumlah gunung berapi aktif yang substansial. Jepang memiliki 105 gunung berapi aktif, Selandia Baru 23, dan Islandia 35. Dari sisi kemampuan penanggulangan, ketiganya menunjukkan skor *Lack of Coping Capacities* yang sangat rendah, berturut-turut sebesar 6,89, 6,19, dan 3,34, berbanding terbalik dengan rata-rata sampel yang mencapai 25,08.

Dalam analisis kuadran yang mempertemukan NRI dengan WRI, hanya Islandia yang menempati kuadran Preventif. Jepang dan Selandia Baru berada di kuadran Waspada karena tingginya paparan fisik menyebabkan skor WRI kedua negara tersebut tetap berada di atas median. Meski demikian, superioritas Jepang dan Selandia Baru dalam mengelola risiko vulkanik tercermin dari rendahnya *Lack of Coping Capacities* dan minimnya korban jiwa dalam beberapa dekade terakhir, sehingga keduanya tetap relevan sebagai *benchmark* tata kelola dan kapasitas penanggulangan. Secara kolektif, ketiga negara ini merepresentasikan praktik terbaik yang dapat dijadikan rujukan untuk mengukur kesenjangan kapasitas Indonesia di setiap fase penanggulangan bencana.

gap analysis kemudian dilakukan untuk mengukur jarak antara Indonesia dengan ketiga negara *benchmark* tersebut di setiap fase Sendai *Framework* (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2015). Pendekatan ini menggeser fokus dari pertanyaan "apakah Indonesia tertinggal?" yang sudah terjawab secara deskriptif oleh data, menuju pertanyaan yang lebih preskriptif, yaitu di dimensi mana kesenjangan terbesar berada dan di mana investasi kapasitas harus diprioritaskan. *Global Innovation Index*, meskipun tidak dimasukkan sebagai syarat inklusi sampel dalam model OLS, tetap digunakan dalam tahap ini untuk memberikan perspektif tambahan tentang kapasitas inovatif jangka panjang yang relevan bagi fase pemulihan.

Seluruh rangkaian analisis ini kemudian diintegrasikan ke dalam antarmuka visual interaktif yang memungkinkan eksplorasi data secara mandiri oleh pengguna. Pendekatan ini memastikan temuan penelitian tidak berhenti sebagai dokumen statis, melainkan dapat berfungsi sebagai sistem pendukung keputusan yang aplikatif bagi para pemangku kepentingan di sektor kebencanaan. Kerangka pemikiran penelitian ini yang menghubungkan kapasitas teknologi, risiko bencana, dan siklus penanggulangan dirangkum dalam Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Kerangka Pemikiran Penelitian

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif komparatif dengan desain non-eksperimental. Pendekatan ini dipilih karena tujuan utama penelitian bukan untuk memanipulasi variabel atau menguji kondisi yang dikontrol secara laboratoris, melainkan untuk menganalisis pola hubungan yang sudah ada di antara negara-negara vulkanik dunia berdasarkan data yang dikumpulkan secara sistematis dari lembaga-lembaga internasional. Dalam desain ini, peneliti bertindak sebagai pengamat terhadap variasi alami yang terjadi di antara unit analisis, yaitu negara, bukan sebagai pihak yang menciptakan variasi tersebut.

Penelitian ini bersifat preskriptif. Artinya, penelitian tidak berhenti pada deskripsi tentang di mana posisi Indonesia berada saat ini, tetapi bergerak lebih jauh untuk mengidentifikasi pola keberhasilan negara-negara *benchmark* dan menerjemahkan temuan tersebut ke dalam rekomendasi yang dapat ditindaklanjuti. Dalam konteks penelitian kebijakan berbasis bukti, pendekatan preskriptif justru relevan karena menghasilkan keluaran yang lebih langsung dapat digunakan oleh pemangku kepentingan di sektor kebencanaan.

Penelitian ini sepenuhnya berbasis data sekunder. Dari sisi cakupan waktu, seluruh data indikator yang digunakan merujuk pada tahun 2024, menjadikan penelitian ini bersifat potong lintang (*cross-sectional*). Pengecualian berlaku untuk data historis erupsi gunung berapi yang mencakup periode 1900 hingga 2025 berdasarkan catatan Smithsonian GVP dan EM-DAT CRED. Tidak ada pengumpulan data primer melalui survei, wawancara, atau observasi lapangan. Seluruh data bersumber dari publikasi lembaga internasional yang memiliki metodologi terverifikasi dan cakupan negara yang luas, sebagaimana akan diuraikan lebih rinci pada sub-bab mengenai sumber data. Pilihan ini sekaligus merupakan keunggulan metodologis karena standar pengukuran yang konsisten antarlembaga memungkinkan perbandingan yang adil tanpa bias instrumen.

Unit analisis dalam penelitian ini adalah negara. Setiap negara diperlakukan sebagai satu observasi yang memiliki nilai pada masing-masing variabel yang digunakan dalam model analisis. Dari total 75 negara yang membentuk populasi penelitian, sebanyak 55 negara memenuhi syarat kelengkapan data untuk dimasukkan ke dalam sampel analitik setelah

prosedur *listwise deletion* (penghapusan observasi yang tidak memiliki data lengkap pada variabel kunci), sebagaimana akan dijelaskan secara rinci pada sub-bab seleksi sampel.

3.2 Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh entitas geografis yang memiliki setidaknya satu gunung berapi aktif berdasarkan catatan Smithsonian Global Volcanism Program (GVP). Pemilihan GVP sebagai penentu populasi didasarkan pada statusnya sebagai database vulkanik global paling otoritatif yang diakui secara luas oleh komunitas ilmiah internasional. GVP mencatat keberadaan gunung berapi yang pernah mengalami aktivitas erupsi dalam rentang waktu Holosen, yaitu sekitar sepuluh ribu tahun terakhir, sehingga kriterianya bersifat geologis dan tidak terpengaruh oleh batas-batas administratif atau politik kontemporer.

Berdasarkan penelusuran terhadap database GVP, tercatat sebanyak 77 entitas geografis yang memiliki gunung berapi aktif. Tidak seluruh entitas tersebut dapat diperlakukan sebagai negara dalam analisis komparatif ini. Dua entitas dieksklusi secara manual dari populasi penelitian. Entitas pertama adalah Antartika, yang meskipun memiliki 19 gunung berapi aktif berdasarkan catatan GVP, bukan merupakan subjek penelitian komparatif karena tidak memiliki populasi permanen, struktur pemerintahan nasional, maupun data pada indikator-indikator pembangunan yang digunakan dalam analisis ini. Entitas kedua adalah Taiwan, yang status politiknya yang dipersengketakan menyebabkan ketidakhadirannya dalam seluruh *dataset* indikator global yang menjadi sumber data penelitian ini, termasuk *World Risk Index*, *Network Readiness Index*, *Global Innovation Index*, GDP per Kapita World Bank, dan INFORM Risk Index. Populasi akhir yang menjadi kerangka pengambilan sampel berjumlah 75 negara.

Dari populasi 75 negara tersebut, tidak seluruhnya dapat diikutsertakan dalam analisis inferensial yang menjadi inti penelitian ini. Model regresi *Ordinary Least Squares* (OLS) yang digunakan untuk menguji hubungan antara kapasitas teknologi dan kemampuan penanggulangan bencana mempersyaratkan ketersediaan data yang lengkap pada empat variabel utama: *World Risk Index Score*, *Network Readiness Index Score*, GDP per Kapita 2024, dan INFORM Risk Index. Keempat variabel ini merupakan tulang punggung model analitik, sehingga observasi yang tidak memiliki nilai pada salah satu atau lebih dari keempat variabel tersebut harus dikeluarkan dari sampel analitik. Prosedur ini dikenal sebagai *listwise deletion*, yaitu penghapusan seluruh observasi yang memiliki data hilang pada variabel-variabel kunci.

Penerapan prosedur *listwise deletion* pada populasi 75 negara menghasilkan sampel analitik sebanyak 55 negara. Dua puluh negara vulkanik tidak dapat diikutsertakan dalam analisis regresi, korelasi Pearson, dan analisis kuadran karena ketidaklengkapan data pada minimal satu dari empat indikator utama.

Perlu disadari bahwa prosedur *listwise deletion* sebesar 26,7% dari populasi berpotensi menimbulkan bias seleksi sistematis. Dari 20 negara yang dieksklusi, 17 di antaranya tidak tercakup dalam NRI 2024, yang secara umum merupakan negara kepulauan kecil dan negara dengan kapasitas statistik terbatas. Kondisi ini mencerminkan pola bahwa negara-negara yang dieksklusi cenderung memiliki kapasitas teknologi rendah sekaligus kemampuan penanggulangan bencana yang juga rendah.

Pola eksklusi semacam ini berimplikasi pada arah bias yang perlu dipertimbangkan. Apabila negara-negara berkapasitas rendah tersebut dapat diikutsertakan, mereka kemungkinan besar akan mengisi kuadran Reaktif (NRI rendah, WRI tinggi), sehingga memperkuat korelasi negatif antara NRI dan *Lack of Coping Capacities*, bukan memperlemahnya. Model yang dihasilkan dari 55 negara sampel tidak cenderung melebih-lebihkan (overestimate) kekuatan hubungan antara kapasitas teknologi dan kemampuan penanggulangan bencana. Hubungan yang sebenarnya di antara seluruh 75 negara populasi kemungkinan lebih kuat dari yang ditunjukkan model ini. Temuan penelitian ini bersifat konservatif, artinya angka korelasi -0,55 dan $R^2 = 0,307$ lebih mungkin merupakan batas bawah dari hubungan sebenarnya, bukan batas atas. Ketidaktersediaan data pada indeks seperti NRI 2024 bukan bersifat acak, melainkan sistematis. Negara yang tidak tercakup umumnya adalah negara kepulauan kecil dan negara dengan kapasitas statistik terbatas yang secara struktural memiliki kapasitas teknologi rendah sekaligus kemampuan penanggulangan bencana yang juga rendah, sehingga apabila diikutsertakan, mereka kemungkinan besar akan mengisi kuadran Reaktif dan memperkuat korelasi negatif yang ditemukan.

Pemilihan empat variabel tersebut sebagai syarat inklusi didasarkan pada peran masing-masing dalam model analitik. WRI Score dan INFORM Risk Index tersedia untuk seluruh 75 negara populasi, GDP per Kapita tersedia untuk 70 negara, dan NRI mencakup 56 negara namun tetap dijadikan syarat inklusi karena merupakan variabel independen utama model OLS. *Global Innovation Index* tidak dijadikan syarat inklusi karena perannya bersifat komplementer, yaitu digunakan dalam *gap analysis* dan visualisasi, bukan dalam persamaan regresi OLS. Data GII tersedia untuk 52 dari 55 negara sampel analitik.

Tabel 3.1 merinci dua puluh negara vulkanik yang tidak dapat diikutsertakan dalam analisis inferensial akibat ketidaklengkapan data pada minimal satu dari empat indikator utama (WRI Score, NRI Score, GDP per Kapita, INFORM RISK). Ketiadaan data ini merefleksikan kesenjangan kapasitas statistik nasional dan *digital divide* yang menjadi fokus penelitian

Tabel 3.1 Negara-Negara Vulkanik dengan Data Tidak Lengkap pada Indikator Utama
Listwise deletion (WRI, NRI, GDP, INFORM)

No	Negara	Indikator yang Tidak Tersedia	Keterangan
1	Comoros	NRI Score	Negara kepulauan kecil; tidak tercakup dalam laporan NRI 2024
2	Dem. People's Republic of Korea	NRI Score, GDP per Kapita	Data sangat terbatas karena isolasi diplomatik
3	Djibouti	NRI Score	Tidak tercakup dalam laporan NRI 2024
4	Dominica	NRI Score	Negara kepulauan kecil; tidak tercakup dalam laporan NRI 2024
5	Equatorial Guinea	NRI Score	Tidak tercakup dalam laporan NRI 2024
6	Eritrea	NRI Score, GDP per Kapita	Kapasitas statistik nasional sangat terbatas
7	Fiji	NRI Score	Negara kepulauan; tidak tercakup dalam laporan NRI 2024
8	Grenada	NRI Score	Negara kepulauan kecil; tidak tercakup dalam laporan NRI 2024
9	Myanmar	NRI Score	Tidak tercakup dalam laporan NRI 2024

No	Negara	Indikator yang Tidak Tersedia	Keterangan
10	Niger	NRI Score	Tidak tercakup dalam laporan NRI 2024
11	Saint Kitts and Nevis	NRI Score	Negara kepulauan sangat kecil; tidak tercakup NRI 2024
12	Saint Lucia	NRI Score	Negara kepulauan kecil; tidak tercakup dalam laporan NRI 2024
13	Saint Vincent and the Grenadines	NRI Score	Negara kepulauan kecil; tidak tercakup NRI 2024
14	Samoa	NRI Score	Negara kepulauan; tidak tercakup dalam laporan NRI 2024
15	Solomon Islands	NRI Score	Negara kepulauan; tidak tercakup dalam laporan NRI 2024
16	Sudan	NRI Score	Tidak tercakup dalam laporan NRI 2024
17	Syrian Arab Republic	NRI Score, GDP per Kapita	Konflik berkelanjutan; data tidak tersedia secara reliabel
18	Tonga	NRI Score, GDP per Kapita	Negara kepulauan kecil; tidak tercakup NRI 2024
19	Vanuatu	NRI Score	Negara kepulauan; tidak tercakup dalam laporan NRI 2024
20	Yemen	GDP per Kapita	Konflik berkepanjangan; data GDP tidak tersedia World Bank 2024

Global Innovation Index Score tidak dimasukkan sebagai syarat inklusi dalam prosedur *listwise deletion*. Keputusan ini diambil secara metodologis dengan pertimbangan bahwa cakupan GII sedikit lebih sempit dibandingkan NRI. Menjadikan GII sebagai syarat inklusi

akan mengurangi ukuran sampel secara tidak proporsional tanpa memberikan tambahan daya uji yang sepadan dalam model OLS. Meskipun demikian, data GII tetap tersedia untuk 52 dari 55 negara di antara sampel analitik dan digunakan secara ekstensif dalam visualisasi data, *gap analysis*, dan pembahasan mengenai kapasitas inovasi dan pemulihan jangka panjang.

Meskipun Islandia memenuhi syarat kelengkapan data pada keempat indikator utama *listwise deletion* dan termasuk dalam sampel analitik, data sub-indikator DRR (Disaster Risk Reduction) dari INFORM Risk Index 2024 untuk Islandia tidak tersedia (ditandai dengan nilai tidak terdefinisi dalam *dataset* sumber). Ketidaktersediaan ini tidak menyebabkan Islandia dieksklusi dari sampel karena DRR bukan merupakan syarat inklusi dalam prosedur *listwise deletion*, namun berdampak pada perhitungan skor fase Mitigasi Islandia dalam *gap analysis*, di mana indikator DRR tidak dapat diikutsertakan dalam rata-rata.

Data historis erupsi yang digunakan untuk menghitung frekuensi erupsi dan intensitas letusan per negara juga bersumber dari database GVP. Untuk keperluan penelitian ini, data erupsi difilter hanya untuk kejadian yang terjadi sejak tahun 1900, dengan pertimbangan bahwa pencatatan erupsi sebelum abad ke-20 cenderung tidak lengkap untuk banyak negara, terutama di luar kawasan Eropa dan Amerika Utara. Agregasi data historis ini dilakukan dengan mengelompokkan erupsi berdasarkan nomor gunung berapi yang kemudian dipetakan ke negara asal. Proses ini menghasilkan metrik Frekuensi Erupsi, Maximum Volcanic Explosivity Index (VEI), dan Average VEI untuk setiap negara dalam populasi.

Data mengenai dampak historis bencana vulkanik, termasuk jumlah korban jiwa, jumlah penduduk terdampak, jumlah kejadian bencana, dan estimasi kerugian ekonomi, diperoleh dari Emergency Events Database (EM-DAT) yang dikelola oleh Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). Data ini digunakan untuk memberikan konteks empiris terhadap beban vulkanik masing-masing negara, khususnya Indonesia, dan tidak dimasukkan sebagai variabel dalam model OLS. Ketersediaan data EM-DAT yang tidak merata antarnegara, dengan beberapa negara memiliki catatan nol kejadian, tidak diinterpretasikan sebagai ketiadaan dampak, melainkan sebagai keterbatasan dokumentasi di negara-negara dengan kapasitas pelaporan bencana yang rendah.

Untuk keperluan analisis komparatif dan preskriptif, penelitian ini menetapkan tiga negara sebagai *benchmark*, yaitu Jepang, Selandia Baru, dan Islandia. Pemilihan ketiganya didasarkan pada tiga kriteria yang terukur dalam *dataset* penelitian. Pertama, ketiga negara memiliki kapasitas teknologi yang tinggi sebagaimana ditunjukkan oleh skor *Network Readiness Index* yang berada di atas 64, jauh melampaui median negara-negara vulkanik dalam

sampel. Kedua, ketiganya memiliki beban vulkanik yang signifikan, yang tercermin dari jumlah gunung berapi aktif dan frekuensi erupsi historis yang substansial. Jepang memiliki 105 gunung berapi dan mencatat 475 erupsi sejak tahun 1900, dengan catatan bahwa angka ini tidak mencakup 13 gunung berapi di wilayah sengketa Kepulauan Kuril yang dalam database GVP tercatat sebagai 'Japan - administered by Russia' dan dieksklusi secara konsisten dengan perlakuan terhadap Taiwan. Selandia Baru memiliki 23 gunung berapi dengan 188 erupsi, sedangkan Islandia memiliki 35 gunung berapi dengan 51 erupsi sejak tahun 1900. Ketiga, ketiga negara memiliki kemampuan penanggulangan bencana yang terbukti unggul, yang ditunjukkan oleh skor *Lack of Coping Capacities* yang sangat rendah, yaitu 6,89 untuk Jepang, 6,19 untuk Selandia Baru, dan 3,34 untuk Islandia. Angka ini jauh berada di bawah rata-rata sampel sebesar 25,08.

Dalam analisis kuadran yang mempertemukan NRI dengan WRI, hanya Islandia yang menempati kuadran Preventif. Jepang dan Selandia Baru berada di kuadran Waspada karena tingginya paparan fisik menyebabkan skor WRI kedua negara tersebut tetap berada di atas median sampel. Meskipun secara agregat risiko bencana mereka masih tergolong tinggi, kapasitas penanggulangan yang dimiliki Jepang dan Selandia Baru terbukti mampu menekan jumlah korban jiwa dan kerugian akibat erupsi vulkanik secara signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Atas dasar itulah, kedua negara ini tetap dipertahankan sebagai *benchmark* untuk dimensi tata kelola dan kapasitas penanggulangan. Secara kolektif, Jepang, Selandia Baru, dan Islandia merepresentasikan praktik terbaik yang dapat dijadikan rujukan untuk mengukur kesenjangan kapasitas Indonesia di setiap fase penanggulangan bencana.

Kerangka sampel penelitian ini dapat diringkas sebagai berikut. Populasi awal 77 entitas geografis dengan gunung berapi aktif menurut GVP dikurangi dua entitas yang dieksklusi secara manual (Antartika dan Taiwan) menghasilkan populasi penelitian 75 negara. Dari populasi tersebut, 55 negara memenuhi syarat kelengkapan data pada empat variabel utama untuk diikutsertakan dalam analisis inferensial. Di antara 55 negara sampel analitik tersebut, Indonesia menjadi kasus sentral yang posisinya dianalisis secara mendalam, sementara Jepang, Selandia Baru, dan Islandia berfungsi sebagai *benchmark* preskriptif. Daftar lengkap 75 negara populasi beserta status keikutsertaan mereka dalam sampel analitik dan persentase kelengkapan data disajikan pada bagian lampiran.

3.3 Sumber Data

Sumber data dipilih berdasarkan pada tiga kriteria: cakupan negara yang luas, metodologi pengukuran yang terdokumentasi secara transparan, dan kesesuaian indikator dengan kerangka *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction*.

3.3.1 Smithsonian Global Volcanism Program

Smithsonian Global Volcanism Program (GVP) dikelola oleh National Museum of Natural History, Smithsonian Institution. Dari database ini diperoleh tiga jenis data: daftar negara beserta jumlah gunung berapi aktifnya sebagai dasar penentuan populasi, data historis erupsi sejak tahun 1900 hingga 2025 beserta nilai Volcanic Explosivity Index (VEI), dan data atributif gunung berapi (koordinat, tipe, elevasi) untuk visualisasi spasial. Data diakses melalui laman <https://volcano.si.edu/>.

3.3.2 World Risk Index 2024

World Risk Index (WRI) 2024 diterbitkan oleh Bündnis Entwicklung Hilft bekerja sama dengan IFHV Universitas Bochum. Indeks ini mengukur risiko bencana berdasarkan keterpaparan dan kerentanan sosial. Variabel yang digunakan mencakup WRI Score keseluruhan serta sub-komponen kerentanan: *Susceptibility*, *Lack of Coping Capacities*, dan *Lack of Adaptive Capacities*. Data diakses melalui laman WorldRiskReport: <https://weltrisikobericht.de/en/worldriskreport/>.

3.3.3 Network Readiness Index 2024

Network Readiness Index (NRI) 2024 diterbitkan oleh Portulans Institute. Indeks ini mengukur kapasitas teknologi informasi dan komunikasi suatu negara melalui empat pilar: Technology, People, *Governance*, dan Impact. Variabel yang digunakan adalah NRI Score keseluruhan dan skor keempat pilarnya. Data diakses melalui laman <https://networkreadinessindex.org/>.

3.3.4 Global Innovation Index 2024

Global Innovation Index (GII) 2024 diterbitkan oleh World Intellectual Property Organization (WIPO). Indeks ini mengukur kapasitas inovasi melalui masukan inovasi (lima pilar) dan keluaran inovasi (dua pilar). Variabel yang digunakan adalah GII Score keseluruhan

serta pilar Human Capital and Research, Infrastructure, dan Knowledge and Technology *Outputs*. Data diakses melalui laman <https://www.globalinnovationindex.org/>.

3.3.5 GDP per Kapita 2024

Data GDP per Kapita tahun 2024 diperoleh dari World Bank melalui portal World Development Indicators. Data ini digunakan sebagai proksi kapasitas ekonomi dan variabel kontrol dalam model regresi. Data diakses melalui laman <https://data.worldbank.org/>.

3.3.6 INFORM Risk Index 2024

INFORM Risk Index 2024 dikembangkan oleh Joint Research Centre Komisi Eropa. Indeks ini mengukur risiko krisis kemanusiaan dari dimensi bahaya, kerentanan, dan kurangnya kapasitas penanggulangan. Variabel yang digunakan meliputi INFORM Risk Score keseluruhan serta sub-komponen: Lack of *Coping capacity*, DRR, Physical Infrastructure, Institutional, dan Communication. Data diakses melalui laman <https://drmkc.jrc.ec.europa.eu/inform-index>.

3.3.7 EM-DAT CRED

Emergency Events Database (EM-DAT) dikelola oleh Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), Université catholique de Louvain. Data yang digunakan khusus untuk bencana vulkanik, mencakup jumlah korban jiwa, penduduk terdampak, jumlah kejadian, dan estimasi kerugian ekonomi. Data ini tidak dimasukkan ke dalam model OLS, melainkan digunakan sebagai konteks historis beban vulkanik setiap negara. Data diakses melalui laman <https://www.emdat.be/>.

3.4 Operasionalisasi Variabel

Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini dioperasionisasikan melalui indikator terukur yang bersumber dari *dataset* internasional sebagaimana diuraikan pada sub-bab sebelumnya. Tabel 3.2 memetakan setiap variabel penelitian beserta indikator, sumber data, satuan pengukuran, dan arah interpretasi nilainya.

Tabel 3.2 Operasionalisasi Variabel Penelitian

Variabel	Indikator	Sumber	Satuan	Arah
Kapasitas Teknologi (Agregat)	NRI Score	NRI 2024, Portulans Institute	Skor 0–100	Lebih tinggi = lebih baik
Infrastruktur dan Akses Digital	NRI: Technology Pillar	NRI 2024, Portulans Institute	Skor 0–100	Lebih tinggi = lebih baik
Keterampilan dan Adopsi Teknologi	NRI: People Pillar	NRI 2024, Portulans Institute	Skor 0–100	Lebih tinggi = lebih baik
Regulasi dan Kebijakan Digital	NRI: <i>Governance</i> Pillar	NRI 2024, Portulans Institute	Skor 0–100	Lebih tinggi = lebih baik
Kapasitas Inovasi (Agregat)	GII Score	GII 2024, WIPO	Skor 0–100	Lebih tinggi = lebih baik
Modal Manusia dan Penelitian	GII: Human Capital and Research	GII 2024, WIPO	Skor 0–100	Lebih tinggi = lebih baik
Infrastruktur Inovasi	GII: Infrastructure	GII 2024, WIPO	Skor 0–100	Lebih tinggi = lebih baik
Keluaran Pengetahuan dan Teknologi	GII: Knowledge and Technology <i>Outputs</i>	GII 2024, WIPO	Skor 0–100	Lebih tinggi = lebih baik
Kapasitas Ekonomi	GDP per Kapita	World Bank 2024	USD	Lebih tinggi = lebih baik
Risiko Bencana (Agregat)	WRI Score	WRI 2024, Bündnis	Skor 0–100	Lebih tinggi = lebih buruk

Variabel	Indikator	Sumber	Satuan	Arah
Kemampuan Penanggulangan	<i>Lack of Coping Capacities</i>	Entwicklung Hilft WRI 2024, Bündnis Entwicklung Hilft	Skor 0–100	Lebih tinggi = lebih buruk
Risiko Kemanusiaan (Agregat)	INFORM Risk Score	INFORM 2024, JRC Komisi Eropa	Skor 0–10	Lebih tinggi = lebih buruk
Implementasi Pengurangan Risiko Bencana	INFORM: DRR	INFORM 2024, JRC Komisi Eropa	Skor 0–10	Lebih tinggi = lebih buruk
Infrastruktur Fisik	INFORM: Physical Infrastructure	INFORM 2024, JRC Komisi Eropa	Skor 0–10	Lebih tinggi = lebih buruk
Kapasitas Kelembagaan	INFORM: Institutional	INFORM 2024, JRC Komisi Eropa	Skor 0–10	Lebih tinggi = lebih buruk
Komunikasi Darurat	INFORM: Communication	INFORM 2024, JRC Komisi Eropa	Skor 0–10	Lebih tinggi = lebih buruk
Beban Vulkanik	Frekuensi Erupsi (1900–2025)	Smithsonian GVP	Jumlah kejadian	Kontekstual

Variabel	Indikator	Sumber	Satuan	Arah
Intensitas Letusan	Maximum VEI	Smithsonian GVP	Skala 0–8	Kontekstual
Dampak Historis	Jumlah Korban Jiwa	EM-DAT CRED	Jiwa	Kontekstual

Variabel dengan arah lebih tinggi = lebih buruk diinversi sebelum normalisasi dalam prosedur *gap analysis* agar seluruh indikator memiliki arah yang seragam: nilai lebih tinggi selalu mencerminkan ketangguhan yang lebih baik. Variabel berlabel kontekstual tidak dimasukkan ke dalam model OLS maupun *gap analysis*, melainkan digunakan sebagai latar empiris beban vulkanik setiap negara.

3.5 Prosedur Analisis

Analisis dalam penelitian ini dilaksanakan melalui empat tahapan yang berurutan. Tahap pertama: Analisis Kuadran. Seluruh 55 negara sampel dipetakan ke dalam empat kuadran berdasarkan nilai median dua variabel yang dipilih. Pada konfigurasi utama, sumbu horizontal merepresentasikan NRI Score sebagai proksi kapasitas teknologi dan sumbu vertikal merepresentasikan WRI Score sebagai proksi risiko bencana. Garis pembagi ditarik pada nilai median masing-masing sumbu, menghasilkan empat kuadran: Preventif (kapasitas tinggi, risiko rendah), Waspada (kapasitas tinggi, risiko tinggi), Reaktif (kapasitas rendah, risiko tinggi), dan Pasif (kapasitas rendah, risiko rendah). Hasil tahap ini menetapkan posisi tipologis Indonesia dan mengidentifikasi negara-negara *benchmark* di kuadran Preventif.

Tahap kedua: Analisis Korelasi Pearson. Hubungan linear antarvariabel diuji menggunakan koefisien korelasi Pearson pada taraf kepercayaan 95 persen. Pengujian dilakukan secara berpasangan antara seluruh indikator kapasitas (NRI, GII, GDP per Kapita beserta sub-indikatornya) dengan seluruh indikator risiko dan penanggulangan (WRI, *Lack of Coping Capacities*, INFORM Risk, DRR, Institutional, Physical Infrastructure, Communication). Hasil disajikan dalam bentuk *heatmap* korelasi dengan penanda signifikansi statistik.

Tahap ketiga: Analisis Regresi OLS. Untuk mengukur besaran pengaruh kapasitas teknologi terhadap kemampuan penanggulangan bencana, digunakan regresi linear sederhana

dengan metode *Ordinary Least Squares*. Variabel dependen utama adalah *Lack of Coping Capacities* (WRI), sedangkan variabel independen utama adalah NRI Score. GDP per Kapita dan INFORM Risk Score digunakan sebagai variabel kontrol dalam pengujian terpisah untuk memverifikasi bahwa hubungan NRI terhadap kemampuan penanggulangan bukan sekadar pantulan dari kemakmuran ekonomi atau kerentanan kelembagaan. Keluaran model mencakup koefisien regresi, nilai R^2 , dan p-value yang diuji pada taraf kepercayaan 95 persen.

Tahap keempat: *gap analysis*. Kesenjangan kapasitas Indonesia terhadap rata-rata negara *benchmark* (Jepang, Selandia Baru, Islandia) diukur per fase penanggulangan bencana berdasarkan kerangka Sendai *Framework*. Sebelum pengukuran, seluruh indikator dinormalisasi menggunakan metode min-max terhadap 55 negara sampel. Indikator INFORM yang bersifat lebih tinggi = lebih buruk diinversi terlebih dahulu agar arah seluruh indikator seragam. Skor setiap fase dihitung sebagai rata-rata indikator penyusunnya: mitigasi (DRR, Physical Infrastructure, INFORM Infrastructure, GII Infrastructure), kesiapsiagaan (NRI Score, Technology Pillar, People Pillar, Communication), respons (Institutional, Lack of Coping capacity, Governance Pillar), dan pemulihan (GDP per Kapita, GII Score, Human Capital and Research, Knowledge and Technology Outputs). Kesenjangan dihitung sebagai selisih antara rata-rata skor *benchmark* dengan skor Indonesia pada setiap fase.

3.6 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui metode dokumentasi, yaitu penelusuran dan pengunduhan data sekunder dari portal resmi masing-masing lembaga sumber yang telah diidentifikasi pada sub-bab sebelumnya. Seluruh data yang digunakan telah tersedia secara lengkap dan terbuka untuk publik pada saat penelitian ini dilaksanakan, sehingga proses pengumpulan dapat dilakukan secara menyeluruh tanpa kendala akses. Data diunduh dalam format tabular, baik yang tersedia langsung dalam bentuk lembar kerja Microsoft Excel maupun yang tersedia dalam format Comma-Separated Values (CSV). Untuk memudahkan penggabungan dan pemrosesan lebih lanjut, seluruh data yang diperoleh dalam format CSV dikonversi terlebih dahulu ke dalam format Excel.

Untuk data Smithsonian Global Volcanism Program, pengumpulan data dilakukan melalui dua jalur yang berbeda sesuai dengan jenis data yang dibutuhkan. Data mengenai jumlah gunung berapi per negara diperoleh dari fitur ringkasan statistik yang tersedia di situs resmi GVP. Data historis erupsi diekstraksi menggunakan fitur pencarian lanjutan dengan menetapkan filter rentang waktu mulai 1 Januari 1900 hingga 31 Desember 2025. Proses ini

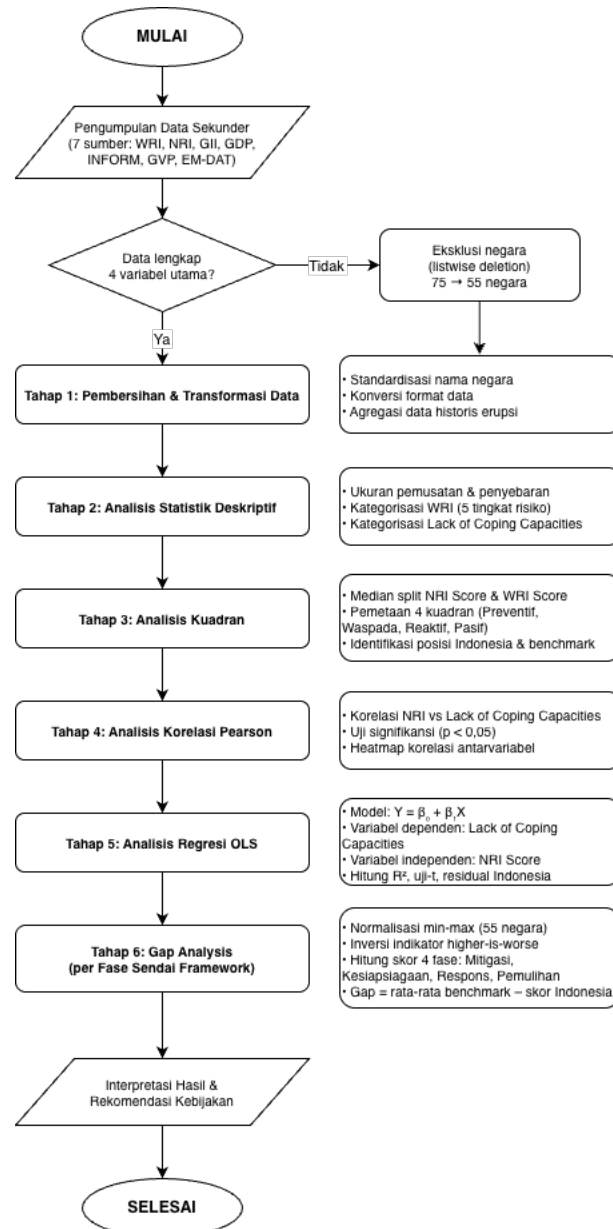
menghasilkan puluhan ribu baris data erupsi yang masing-masing memuat informasi mengenai nomor identifikasi gunung berapi, nama gunung, tahun kejadian, dan nilai Volcanic Explosivity Index. Adapun data atributif masing-masing gunung berapi, seperti koordinat geografis, tipe vulkanik primer, dan elevasi, diperoleh melalui fitur ekspor yang tersedia pada halaman detail setiap gunung berapi dan kemudian digabungkan ke dalam satu berkas data utama.

Data untuk *World Risk Index*, *Network Readiness Index*, *Global Innovation Index*, dan *INFORM Risk Index* seluruhnya tersedia sebagai lampiran data dari laporan tahunan masing-masing lembaga. Untuk keempat indeks ini, pengumpulan data dilakukan dengan mengunduh langsung lampiran data yang disediakan dalam format Excel atau CSV melalui situs resmi penerbit. Data GDP per Kapita diperoleh melalui portal World Bank Data Catalog dengan memilih indikator GDP per Capita dalam satuan dolar Amerika Serikat nilai terkini serta menetapkan tahun 2024 sebagai parameter waktu pencarian. Untuk data EM-DAT, pengumpulan dilakukan melalui portal pencarian publik EM-DAT dengan memilih jenis bencana "Volcanic activity" pada menu filter, menetapkan rentang waktu 1900 hingga 2025, dan mengekspor hasil pencarian ke dalam format Excel.

Setelah seluruh data dari ketujuh sumber tersebut terkumpul dalam satu direktori kerja, langkah selanjutnya adalah melakukan pemeriksaan awal terhadap kelengkapan dan konsistensi data. Pemeriksaan ini mencakup identifikasi terhadap keberadaan nilai yang hilang pada variabel-variabel kunci, ketidakkonsistenan dalam penulisan nama negara antar sumber data yang berbeda, serta format data yang belum seragam, terutama pada kolom koordinat geografis dan nilai desimal. Hasil dari pemeriksaan awal ini menjadi dasar untuk menentukan langkah-langkah pembersihan dan transformasi data yang akan dilakukan sebelum analisis, termasuk di antaranya standardisasi penamaan negara, penanganan observasi dengan data tidak lengkap, serta konversi format teks menjadi numerik. Rangkaian prosedur pembersihan dan transformasi data ini akan diuraikan secara lebih teknis pada sub-bab mengenai teknik analisis data.

3.7 Teknik Analisis Data

Seluruh prosedur analisis dijalankan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan memanfaatkan pustaka Pandas untuk manipulasi data, SciPy untuk pengujian statistik, serta Plotly untuk visualisasi interaktif. Rangkaian prosedur ini diuraikan secara rinci sebagai berikut, dengan alur keseluruhan disajikan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Alur Teknik Analisis Data

3.7.1 Pembersihan dan Transformasi Data

Tahap pertama dalam analisis data adalah pembersihan dan transformasi data mentah agar siap digunakan dalam pengujian statistik. Prosedur ini mencakup empat langkah utama. Langkah pertama adalah standardisasi nama negara di seluruh sumber data. Mengingat data berasal dari tujuh sumber yang berbeda, penulisan nama negara tidak selalu seragam. Sebagai contoh, Rusia tercatat sebagai "Russia" di satu sumber namun sebagai "Russian Federation" di sumber lain. Demikian pula Tanjung Verde muncul sebagai "Cape Verde" dan "Cabo Verde". Standardisasi dilakukan dengan membuat pemetaan nama yang merujuk pada satu bentuk baku

untuk setiap negara, sehingga penggabungan data dari berbagai sumber dapat dilakukan secara akurat.

Langkah kedua adalah penanganan nilai hilang pada variabel-variabel kunci. Sebagaimana telah diuraikan pada sub-bab populasi dan sampel, penelitian ini menerapkan prosedur *listwise deletion* untuk empat variabel utama model regresi, yaitu WRI Score, NRI Score, GDP per Kapita, dan INFORM Risk Index. Negara yang tidak memiliki data lengkap pada keempat variabel tersebut dikeluarkan dari sampel analitik. Untuk variabel lain di luar keempat variabel utama, nilai hilang dibiarkan sebagaimana adanya dan hanya digunakan dalam analisis yang tidak mensyaratkan data lengkap, seperti visualisasi deskriptif dan perhitungan statistik individual.

Langkah ketiga adalah konversi format data. Kolom-kolom yang seharusnya bersifat numerik tetapi tersimpan dalam format teks, seperti koordinat geografis dan nilai desimal yang menggunakan koma sebagai pemisah desimal, dikonversi ke dalam format numerik yang sesuai. Khusus untuk data koordinat gunung berapi, diterapkan fungsi pembersihan untuk menangani berbagai variasi format penulisan yang ditemukan dalam data mentah, termasuk nilai yang tersimpan dalam derajat dan menit.

Langkah keempat adalah agregasi data historis erupsi. Data erupsi yang semula tercatat per kejadian individu diagregasi ke tingkat negara untuk menghasilkan tiga metrik utama: frekuensi erupsi yang dihitung sebagai jumlah total kejadian erupsi sejak tahun 1900, nilai maksimum Volcanic Explosivity Index yang pernah tercatat, dan nilai rata-rata VEI dari seluruh erupsi yang terdokumentasi. Agregasi ini memungkinkan data historis erupsi untuk dianalisis bersama dengan data indikator global lainnya yang bersifat tahunan.

3.7.2 Analisis Statistik Deskriptif

Setelah data dibersihkan dan ditransformasi, tahap selanjutnya adalah analisis statistik deskriptif untuk memperoleh gambaran umum mengenai karakteristik sampel penelitian. Untuk setiap variabel numerik yang digunakan dalam analisis, dihitung ukuran pemusatan yang meliputi nilai rata-rata dan median, serta ukuran penyebaran yang meliputi nilai minimum, maksimum, dan standar deviasi. Hasil perhitungan ini disajikan dalam bentuk tabel dan menjadi dasar untuk memahami distribusi data sebelum melangkah ke analisis inferensial.

Selain statistik deskriptif numerik, pada tahap ini juga dilakukan kategorisasi negara berdasarkan threshold resmi yang ditetapkan oleh World Risk Report 2024. Setiap negara dalam sampel diklasifikasikan ke dalam salah satu dari lima kategori risiko, yaitu Risiko Sangat

Rendah, Risiko Rendah, Risiko Sedang, Risiko Tinggi, dan Risiko Sangat Tinggi, berdasarkan nilai WRI Score masing-masing. Kategorisasi serupa juga diterapkan pada nilai *Lack of Coping Capacities* untuk mengelompokkan negara ke dalam lima tingkatan kapasitas penanggulangan, mulai dari Kapasitas Sangat Tinggi hingga Kapasitas Sangat Rendah. Kategorisasi ini digunakan dalam analisis kuadran dan *gap analysis* untuk memberikan interpretasi yang lebih bermakna terhadap posisi relatif setiap negara.

3.7.3 Analisis Korelasi Pearson

Untuk menguji hubungan antara kapasitas teknologi dengan kemampuan penanggulangan bencana, penelitian ini menggunakan analisis korelasi Pearson. Koefisien korelasi Pearson mengukur kekuatan dan arah hubungan linear antara dua variabel numerik, dengan nilai berkisar antara negatif satu hingga positif satu. Nilai yang mendekati negatif satu menunjukkan hubungan negatif yang kuat, nilai yang mendekati positif satu menunjukkan hubungan positif yang kuat, sedangkan nilai yang mendekati nol menunjukkan tidak adanya hubungan linear.

Secara matematis, koefisien korelasi Pearson dihitung menggunakan rumus sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3.1).

$$r = \frac{n \sum XY - \sum X \cdot \sum Y}{\sqrt{(n \sum X^2 - (\sum X)^2)(n \sum Y^2 - (\sum Y)^2)}} \quad (3.1)$$

Dalam persamaan tersebut, r adalah koefisien korelasi Pearson, n adalah jumlah negara sampel, X adalah nilai NRI Score, dan Y adalah nilai *Lack of Coping Capacities*. Koefisien korelasi Pearson digunakan untuk mengukur seberapa erat hubungan antara kapasitas teknologi (NRI Score) dan kemampuan penanggulangan bencana (*Lack of Coping Capacities*) di antara 55 negara sampel.

Dalam penelitian ini, analisis korelasi Pearson diterapkan secara berpasangan antara variabel-variabel yang mewakili kapasitas teknologi dan inovasi di satu sisi, dengan variabel-variabel yang mewakili risiko dan kapasitas penanggulangan bencana di sisi lain. Variabel kapasitas mencakup NRI Score, GII Score, GDP per Kapita, dan pilar-pilar penyusunnya. Variabel risiko dan penanggulangan mencakup WRI Score, sub-komponen kerentanan WRI, INFORM Risk Index, serta indikator-indikator penanggulangan seperti DRR dan *Lack of Coping capacity*. Tingkat signifikansi statistik untuk setiap koefisien korelasi diuji pada taraf kepercayaan 95 persen. Hasil analisis korelasi disajikan dalam bentuk matriks korelasi dan peta

panas (*heatmap*) untuk memudahkan identifikasi pola hubungan yang paling kuat dan signifikan.

3.7.4 Analisis Regresi *Ordinary Least Squares*

Untuk mengukur seberapa besar variasi dalam kemampuan penanggulangan bencana dapat dijelaskan oleh kapasitas teknologi, penelitian ini menggunakan analisis regresi linear sederhana dengan metode *Ordinary Least Squares*. Pemilihan regresi linear sederhana didasarkan pada tiga pertimbangan metodologis. Pertama, fokus penelitian ini adalah menguji hubungan antara satu variabel independen utama, yaitu NRI Score, dengan variabel dependen *Lack of Coping Capacities*, sehingga model bivariat sudah cukup untuk menjawab rumusan masalah yang ditetapkan. Kedua, penggunaan regresi linear sederhana memungkinkan interpretasi koefisien yang lebih transparan dan langsung, tanpa risiko multikolinearitas yang sering muncul dalam model multivariat ketika variabel-variabel independen seperti NRI, GII, dan GDP per Kapita berkorelasi satu sama lain. Ketiga, pengaruh variabel kontrol seperti GDP per Kapita dan INFORM Risk Score diuji secara terpisah sebagai robustness check untuk memverifikasi bahwa hubungan NRI terhadap kemampuan penanggulangan bencana bersifat independen dari kemakmuran ekonomi dan kerentanan kelembagaan. Dalam model ini, variabel dependen adalah *Lack of Coping Capacities* dan variabel independen utama adalah NRI Score. Model regresi linear sederhana dalam penelitian ini dinyatakan dalam persamaan berikut (3.2)

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X \quad (3.2)$$

Model regresi linear sederhana digunakan untuk memprediksi nilai variabel dependen berdasarkan nilai variabel independen. Parameter β_0 merepresentasikan nilai prediksi kemampuan penanggulangan bencana ketika kapasitas teknologi bernilai nol, sementara β_1 merepresentasikan besaran perubahan kemampuan penanggulangan untuk setiap satu satuan perubahan kapasitas teknologi. Tanda negatif pada β_1 mengindikasikan bahwa peningkatan kapasitas teknologi berhubungan dengan penurunan nilai *Lack of Coping Capacities*, yang berarti kemampuan penanggulangan bencana yang lebih baik. Untuk dapat mengoperasionalkan model regresi linear sederhana tersebut, nilai koefisien kemiringan β_1 diestimasi menggunakan rumus sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3.3).

$$\beta_1 = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (3.3)$$

Dalam persamaan tersebut, β_1 adalah koefisien kemiringan, n adalah jumlah negara sampel, X adalah nilai NRI Score, Y adalah nilai *Lack of Coping Capacities*, dan Σ adalah notasi penjumlahan seluruh observasi. Koefisien kemiringan β_1 mengukur besaran pengaruh kapasitas teknologi terhadap kemampuan penanggulangan bencana. Nilai β_1 yang diperoleh dalam penelitian ini sebesar -0,8489 berarti bahwa setiap kenaikan satu poin NRI Score berhubungan dengan penurunan nilai *Lack of Coping Capacities* sebesar 0,8489 poin, dengan asumsi faktor lain konstan. Estimasi ini diperoleh melalui metode *Ordinary Least Squares* yang meminimalkan jumlah kuadrat selisih antara nilai aktual dan nilai prediksi. Setelah nilai β_1 diperoleh, nilai intersep β_0 dapat dihitung menggunakan rumus sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3.4).

$$\beta_0 = \bar{Y} - \beta_1 \bar{X} \quad (3.4)$$

Intersep β_0 dihitung berdasarkan rata-rata kedua variabel dan koefisien kemiringan yang telah diperoleh sebelumnya. Nilai intersep dalam penelitian ini sebesar 69,0140 merepresentasikan nilai prediksi *Lack of Coping Capacities* ketika NRI Score bernilai nol. Meskipun kondisi NRI Score = 0 tidak realistis dalam konteks sampel penelitian ini, intersep tetap diperlukan sebagai komponen matematis yang memastikan garis regresi melewati titik rata-rata kedua variabel. Setelah seluruh parameter model diperoleh, kemampuan model dalam menjelaskan variasi data diukur menggunakan koefisien determinasi R^2 sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3.5).

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{\text{res}}}{SS_{\text{tot}}} = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.5)$$

Dalam persamaan tersebut, y_i adalah nilai aktual *Lack of Coping Capacities* negara ke- i , $\hat{y}_i$ adalah nilai prediksi model, $\bar{y}$ adalah rata-rata nilai aktual seluruh sampel, SS_{res} adalah jumlah kuadrat residual, dan SS_{tot} adalah jumlah kuadrat total dari variabel dependen. Koefisien determinasi R^2 mengukur proporsi variasi dalam variabel dependen yang dapat dijelaskan oleh variabel independen dalam model. Nilai $R^2 = 0,307$ yang diperoleh dalam penelitian ini berarti

bahwa 30,7 persen variasi kemampuan penanggulangan bencana di antara 55 negara sampel dapat dijelaskan oleh perbedaan kapasitas teknologi yang diukur melalui NRI Score. Sisanya sebesar 69,3 persen dipengaruhi oleh faktor-faktor lain di luar model, seperti kualitas tata kelola, kondisi geografis, dan kapasitas fiskal negara. Selain mengukur kemampuan penjelas model secara keseluruhan, penelitian ini juga menghitung residual setiap negara untuk mengidentifikasi negara-negara yang kondisinya menyimpang secara signifikan dari prediksi model, termasuk Indonesia. Residual setiap negara dihitung menggunakan rumus sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3.6).

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (3.6)$$

Dalam persamaan tersebut, e_i adalah residual negara ke- i , y_i adalah nilai aktual Lack of Coping Capacities, dan $\hat{y}_i$ adalah nilai prediksi model. Residual positif menunjukkan bahwa kemampuan penanggulangan bencana suatu negara lebih buruk dari yang diprediksi berdasarkan kapasitas teknologinya, sementara residual negatif menunjukkan kondisi yang lebih baik dari prediksi. Dalam penelitian ini, residual positif Indonesia sebesar +27,70 poin mengindikasikan bahwa kemampuan penanggulangan bencana Indonesia secara signifikan lebih buruk dibandingkan prediksi model, yang menjadi bukti empiris adanya paradoks digital divide pada konteks kebencanaan. Untuk memastikan bahwa hubungan yang ditemukan bersifat nyata secara statistik dan bukan merupakan hasil kebetulan, signifikansi koefisien regresi diuji menggunakan statistik uji-t sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3.7).

$$t = \frac{\beta_1}{SE(\beta_1)}, \quad SE(\beta_1) = \sqrt{\frac{\sum e_i^2}{(n-2) \sum (X_i - \bar{X})^2}} \quad (3.7)$$

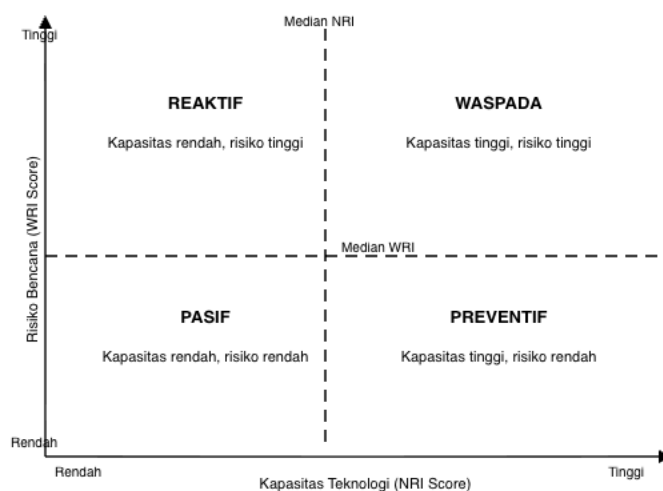
Dalam persamaan tersebut, t adalah nilai statistik uji, β_1 adalah koefisien kemiringan, $SE(\beta_1)$ adalah standar error koefisien, e_i adalah residual negara ke- i , n adalah jumlah sampel, X_i adalah nilai NRI Score negara ke- i , dan $\bar{X}$ adalah rata-rata NRI Score seluruh sampel. Uji-t digunakan untuk menguji apakah koefisien regresi β_1 secara statistik berbeda dari nol, atau dengan kata lain, apakah hubungan antara kapasitas teknologi dan kemampuan penanggulangan bencana bersifat nyata dan bukan merupakan hasil kebetulan semata. Hipotesis nol ($H_0: \beta_1 = 0$) ditolak apabila nilai $|t|$ melebihi nilai kritis pada taraf kepercayaan

95 persen dengan derajat kebebasan (n-2). Penolakan H_0 mengonfirmasi bahwa kapasitas teknologi memiliki pengaruh yang signifikan secara statistik terhadap kemampuan penanggulangan bencana di antara negara-negara vulkanik.

3.7.5 Analisis Kuadran

Untuk memetakan posisi relatif negara-negara vulkanik dalam lanskap kapasitas teknologi versus risiko bencana, penelitian ini menggunakan analisis kuadran dengan pendekatan median split. Pendekatan ini membagi sampel ke dalam empat kuadran berdasarkan posisi setiap negara relatif terhadap nilai median dari variabel yang ditempatkan pada sumbu horizontal dan sumbu vertikal.

Sumbu horizontal merepresentasikan indikator kapasitas yang dapat dipilih secara interaktif, seperti NRI Score, GII Score, GDP per Kapita, atau sub-komponen kapasitas lainnya. Sumbu vertikal merepresentasikan indikator risiko atau penanggulangan, seperti WRI Score, *Lack of Coping Capacities*, atau INFORM Risk Index. Garis vertikal ditarik pada nilai median variabel sumbu horizontal, sementara garis horizontal ditarik pada nilai median variabel sumbu vertikal. Perpotongan kedua garis median ini membentuk empat kuadran dengan karakteristik sebagai berikut: kuadran Preventif yang menandakan kapasitas tinggi dan risiko rendah, kuadran Waspada yang menandakan kapasitas tinggi namun risiko juga tinggi, kuadran Reaktif yang menandakan kapasitas rendah dan risiko tinggi, serta kuadran Pasif yang menandakan kapasitas rendah namun risiko juga rendah. Pembagian empat kuadran tersebut divisualisasikan pada Gambar 3.2 agar hubungan antara kapasitas teknologi dan risiko bencana dapat dipahami secara lebih jelas.



Gambar 3.2 Ilustrasi Pembagian Empat Kuadran Analisis

Analisis kuadran ini menjadi dasar untuk mengidentifikasi negara-negara yang masuk dalam kategori Preventif, yang selanjutnya ditetapkan sebagai *benchmark* dalam *gap analysis*. Posisi Indonesia dalam kuadran ini juga menjadi jawaban empiris terhadap rumusan masalah pertama penelitian.

3.7.6 *gap analysis*

Tahap akhir dari rangkaian analisis kuantitatif adalah *gap analysis*, yang bertujuan untuk mengukur kesenjangan kapasitas Indonesia dibandingkan dengan negara-negara *benchmark* di setiap fase penanggulangan bencana berdasarkan kerangka Sendai *Framework*. Berbeda dari pendekatan selisih aritmatika sederhana, *gap analysis* dalam penelitian ini menggunakan prosedur normalisasi min-max yang diterapkan pada seluruh 55 negara sampel analitik, sehingga perbandingan antara indikator-indikator dengan satuan pengukuran yang berbeda dapat dilakukan secara adil dan konsisten.

Sebelum normalisasi dilakukan, sejumlah indikator yang berasal dari INFORM Risk Index terlebih dahulu menjalani proses inversi. Indikator-indikator tersebut, yaitu kurangnya kapasitas penanggulangan (*Lack of Coping capacity*), implementasi pengurangan risiko bencana (DRR), infrastruktur fisik (*Physical Infrastructure*), kapasitas kelembagaan (*Institutional*), dan komunikasi (*Communication*), bersifat *higher-is-worse*, artinya nilai yang lebih tinggi mencerminkan kondisi yang lebih buruk. Agar arah seluruh indikator seragam sehingga nilai yang lebih tinggi selalu mencerminkan ketangguhan yang lebih baik, indikator-indikator *higher-is-worse* dinormalisasi sekaligus dengan rumus inversi: nilai ternormalisasi = $(\text{nilai maksimum sampel} - \text{nilai observasi}) / (\text{nilai maksimum sampel} - \text{nilai minimum sampel})$. Dengan rumus ini, negara dengan nilai aktual tertinggi (kondisi terburuk) mendapatkan skor normalisasi 0, sementara negara dengan nilai aktual terendah (kondisi terbaik) mendapatkan skor normalisasi 1.

Setelah proses di atas, indikator-indikator yang bersifat *higher-is-better* (seperti NRI Score, GII Score, dan GDP per Kapita) dinormalisasi menggunakan rumus min-max standar: nilai ternormalisasi = $(\text{nilai observasi} - \text{nilai minimum sampel}) / (\text{nilai maksimum sampel} - \text{nilai minimum sampel})$. Hasilnya adalah skor dalam rentang 0 hingga 1 untuk seluruh indikator, di mana nilai 0 mencerminkan negara dengan ketangguhan terendah dalam sampel dan nilai 1 mencerminkan negara dengan ketangguhan tertinggi untuk indikator tersebut. Kasus

tepi di mana seluruh nilai dalam satu kolom identik ditangani dengan mengembalikan nilai tengah 0,5 untuk seluruh observasi, menghindari pembagian dengan nol.

Normalisasi min-max diterapkan pada seluruh indikator agar dapat dibandingkan dalam skala yang seragam (0–1). Untuk indikator yang bersifat *higher-is-better*, rumus normalisasi adalah sebagai berikut.

$$z_i = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (3.8)$$

Normalisasi min-max diterapkan untuk menyamakan skala seluruh indikator ke dalam rentang 0 hingga 1, sehingga perbandingan antara indikator-indikator dengan satuan pengukuran yang berbeda dapat dilakukan secara adil dan konsisten. Pada rumus ini, negara dengan nilai indikator tertinggi dalam sampel memperoleh skor normalisasi 1 yang mencerminkan ketangguhan tertinggi, sementara negara dengan nilai terendah memperoleh skor 0. Rumus ini diterapkan pada indikator yang bersifat *higher-is-better*, yaitu indikator di mana nilai yang lebih tinggi mencerminkan kondisi yang lebih baik, seperti NRI Score, GII Score, dan GDP per Kapita.

$$z_i = \frac{\max(x) - x_i}{\max(x) - \min(x)} \quad (3.9)$$

Rumus normalisasi dengan inversi diterapkan pada indikator yang bersifat *higher-is-worse*, yaitu indikator di mana nilai yang lebih tinggi justru mencerminkan kondisi yang lebih buruk, seperti Lack of *Coping capacity*, DRR, Physical Infrastructure, Institutional, dan Communication dari INFORM Risk Index. Dengan inversi, arah seluruh indikator menjadi seragam: nilai skor normalisasi yang lebih tinggi selalu mencerminkan ketangguhan yang lebih baik, tanpa memandang arah asli indikator tersebut. Hal ini memastikan bahwa perhitungan rata-rata *gap analysis* antarfasa Sendai *Framework* dilakukan secara konsisten dan dapat diinterpretasikan dalam satu arah yang sama.

Setelah seluruh indikator diinversi dan dinormalisasi, nilai setiap fase dihitung sebagai rata-rata dari indikator-indikator penyusunnya. Fase mitigasi diwakili oleh implementasi pengurangan risiko bencana (DRR), infrastruktur fisik (Physical Infrastructure), infrastruktur menurut INFORM (INFORM Infrastructure), dan infrastruktur menurut GII (GII Infrastructure). Fase kesiapsiagaan diwakili oleh pilar teknologi NRI (Technology Pillar), pilar masyarakat NRI (People Pillar), skor NRI secara keseluruhan (NRI Score), dan indikator

komunikasi INFORM (Communication). Fase respons diwakili oleh indikator kelembagaan INFORM (Institutional), kurangnya kapasitas penanggulangan menurut INFORM (Lack of *Coping capacity*), dan pilar tata kelola NRI (*Governance Pillar*). Fase pemulihan diwakili oleh GDP per Kapita, pilar modal manusia dan penelitian GII (Human Capital and Research), skor GII secara keseluruhan (GII Score), serta indikator keluaran pengetahuan dan teknologi GII (*Knowledge and Technology Outputs*).

Kesenjangan pada setiap fase kemudian dihitung sebagai selisih antara rata-rata skor ternormalisasi negara-negara *benchmark*, yaitu Jepang, Selandia Baru, dan Islandia, dengan skor ternormalisasi Indonesia. Nilai selisih yang lebih besar menunjukkan kesenjangan yang lebih lebar pada fase tersebut dan mengindikasikan kebutuhan investasi kapasitas yang lebih mendesak. Hasil *gap analysis* ini menjadi dasar empiris untuk merumuskan urutan prioritas kebijakan yang dibahas pada sub-bab selanjutnya.

3.8 Pengembangan *Dashboard* sebagai Alat Bantu Analisis

Selain analisis statistik, penelitian ini mengembangkan *dashboard* analitik berbasis web sebagai alat bantu visualisasi dan eksplorasi data. *Dashboard* tidak diposisikan sebagai produk utama penelitian atau objek evaluasi utama, melainkan sebagai media pendukung untuk menyajikan hasil analisis kuantitatif secara lebih terstruktur, interaktif, dan mudah ditelusuri. Fokus utama penelitian tetap berada pada analisis hubungan antara kapasitas teknologi dan kemampuan penanggulangan bencana vulkanik, sedangkan *dashboard* berfungsi sebagai sarana penyajian visual terhadap hasil analisis tersebut.

Data yang digunakan dalam *dashboard* berasal dari *dataset* yang sama dengan analisis utama, yaitu data vulkanik dari Smithsonian Global Volcanism Program, indikator risiko dari *World Risk Index*, kapasitas teknologi dari *Network Readiness Index*, kapasitas inovasi dari *Global Innovation Index*, kapasitas ekonomi dari GDP per kapita, indikator kerentanan dari INFORM Risk Index, serta data historis kejadian bencana dari EM-DAT CRED. Seluruh data tersebut terlebih dahulu melalui proses pembersihan, standardisasi nama negara, penggabungan antarsumber, serta penyaringan sampel analitik sebagaimana telah dijelaskan pada sub-bab sebelumnya.

Tahapan pengembangan *dashboard* dilakukan setelah proses analisis data utama selesai. Tahapan tersebut meliputi penyusunan tabel master, pemetaan variabel ke dalam modul visualisasi, perancangan tampilan interaktif, serta pengecekan konsistensi antara hasil perhitungan statistik dan visualisasi yang ditampilkan. *Dashboard* memuat beberapa modul,

antara lain profil negara vulkanik, analisis kuadran, korelasi dan regresi, perbandingan Indonesia dengan negara *benchmark*, analisis ketangguhan per fase Sendai *Framework*, peta distribusi gunung berapi, serta *dataset* master.

Pembahasan teknis mengenai tampilan antarmuka, struktur modul, dan hasil implementasi *dashboard* disajikan pada Bab IV karena bagian tersebut merupakan hasil pengembangan alat bantu visualisasi. Pada Bab III, pembahasan *dashboard* dibatasi pada posisinya dalam metodologi penelitian, yaitu sebagai media pendukung untuk menelusuri dan mengomunikasikan hasil analisis secara visual.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan temuan empiris dari rangkaian analisis kuantitatif yang telah dilakukan terhadap 55 negara sampel analitik.

4.1 Gambaran Umum Data

Sampel analitik terdiri dari 55 negara vulkanik yang memiliki data lengkap pada empat indikator utama: *World Risk Index Score*, *Network Readiness Index Score*, GDP per Kapita 2024, dan INFORM Risk Index. Tabel 4.1 menyajikan ringkasan statistik deskriptif untuk variabel-variabel utama yang digunakan dalam analisis.

Tabel 4.1 Statistik Deskriptif Sampel Analitik (n=55)

Variabel	N	Mean	Median	Std Dev	Min	Maks
WRI SCORE	55	14,35	11,40	11,27	1,17	46,91
NRI SCORE	55	51,76	49,93	14,07	21,49	78,96
GII SCORE	52	33,74	30,05	14,71	12,3	62,4
GDP per Kapita (USD)	55	20.772,45	8.452,37	24.089,34	649,38	86.785,43
INFORM Risk Index	55	3,94	3,6	1,64	1,4	7,8
Jumlah Gunung Berapi	55	20,89	8,00	22,14	1	101

Variabel	N	Mean	Median	Std Dev	Min	Maks
Frekuensi Erupsi	55	64,2	5,00	178,40	0	763
<i>Lack of Coping Capacities</i>	55	25,08	13,51	21,57	3,24	73,82

Dari Tabel 4.1 dapat diamati beberapa karakteristik penting dari sampel penelitian. Rata-rata *World Risk Index* di antara 55 negara vulkanik adalah 14,35 dengan standar deviasi sebesar 11,27. Rentang nilai yang cukup lebar, dari 1,17 hingga 46,91, menunjukkan adanya variasi yang substansial dalam tingkat risiko bencana di antara negara-negara vulkanik. Median WRI sebesar 11,40 yang lebih rendah dari rata-rata mengindikasikan bahwa distribusi WRI menceng ke kanan, dengan beberapa negara memiliki skor risiko yang sangat tinggi sementara mayoritas negara berada pada tingkat risiko yang lebih moderat.

Untuk *Network Readiness Index*, rata-rata skor adalah 51,76 dengan standar deviasi 14,07. Rentang NRI terbentang dari 21,49 hingga 78,96, memperlihatkan kesenjangan kapasitas teknologi yang sangat lebar di antara negara-negara vulkanik. Median NRI sebesar 49,93 yang sedikit di bawah rata-rata menunjukkan distribusi yang relatif simetris dengan sedikit kecenderungan menceng ke kanan. *Global Innovation Index* memiliki rata-rata 33,74 dengan standar deviasi 14,71, dengan cakupan data yang sedikit lebih terbatas yaitu 52 negara.

Variabel beban vulkanik menunjukkan karakteristik yang sangat timpang. Rata-rata jumlah gunung berapi adalah 20,89, namun median hanya 8. Kesenjangan antara rata-rata dan median yang sangat besar ini disebabkan oleh keberadaan beberapa negara dengan jumlah gunung berapi yang sangat tinggi, terutama Indonesia dengan 101 gunung berapi dan Jepang dengan jumlah yang juga substansial. Pola serupa terlihat pada frekuensi erupsi, dengan rata-rata 64,2 erupsi per negara namun median hanya 5. Indonesia sendiri mencatat 763 erupsi, nilai maksimum dalam sampel, yang jauh melampaui negara-negara lainnya.

Sementara itu, rata-rata kurangnya kapasitas penanggulangan menurut *World Risk Index* (*Lack of Coping Capacities*) di antara 55 negara sampel adalah 25,08 dengan standar deviasi 21,57. Rentang nilai yang lebar dari 3,24 hingga 73,82 menunjukkan disparitas kapasitas penanggulangan yang sangat tajam di antara negara-negara vulkanik. Adapun INFORM Risk Index (INFORM RISK) memiliki rata-rata 3,94 dengan standar deviasi 1,64.

Statistik deskriptif ini memberikan konfirmasi awal terhadap premis dasar penelitian: negara-negara vulkanik dunia sangat heterogen, baik dalam hal paparan ancaman fisik maupun dalam hal kapasitas teknologi dan ekonomi yang dimiliki. Heterogenitas inilah yang menjadi ruang analitis untuk menguji hubungan antara kapasitas teknologi dan kemampuan penanggulangan bencana.

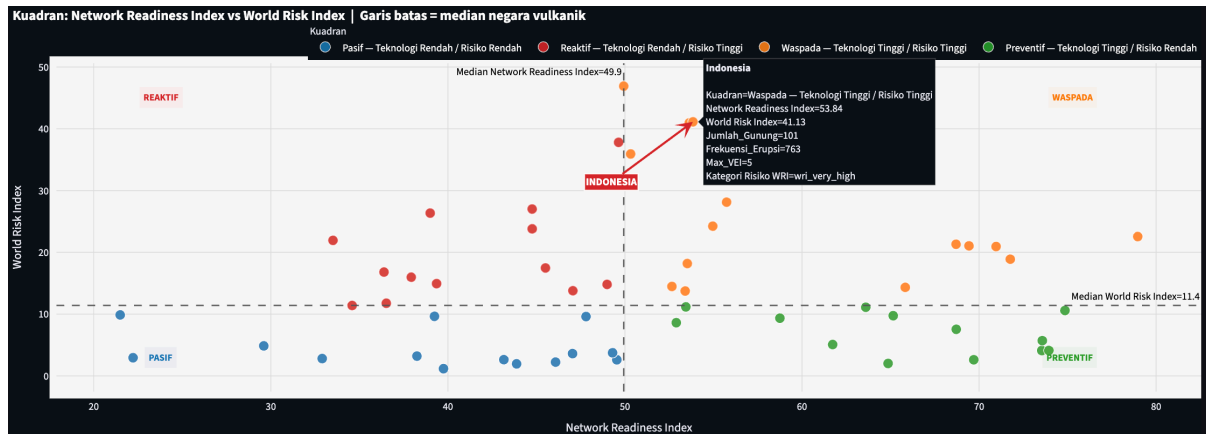
4.2 Posisi Indonesia dalam Analisis Kuadran

Analisis kuadran mempertemukan dua dimensi kunci dalam penelitian ini, yaitu kapasitas teknologi yang diproksikan melalui *Network Readiness Index* (NRI Score) pada sumbu horizontal dan risiko bencana yang diproksikan melalui *World Risk Index* (WRI Score) pada sumbu vertikal. Dengan membagi bidang kartesius pada nilai median masing-masing variabel, seluruh negara sampel dapat dikelompokkan ke dalam empat kuadran yang masing-masing merepresentasikan konfigurasi kapasitas dan risiko yang berbeda. Konfigurasi ini memberikan gambaran posisi relatif setiap negara sekaligus memungkinkan identifikasi pola sistemik yang menghubungkan penguasaan teknologi dengan ketangguhan bencana.

Berdasarkan perhitungan terhadap 55 negara sampel analitik, median *Network Readiness Index* berada pada nilai 49,93, sementara median *World Risk Index* berada pada nilai 11,40. Garis vertikal pada NRI 49,93 dan garis horizontal pada WRI 11,40 membentuk empat kuadran dengan karakteristik sebagai berikut. Kuadran kanan bawah, yang dalam penelitian ini disebut sebagai kuadran Preventif, menampung negara-negara dengan NRI di atas median dan WRI di bawah median. Negara-negara dalam kuadran ini memiliki kapasitas teknologi yang relatif tinggi sekaligus tingkat risiko bencana yang relatif rendah, suatu konfigurasi yang secara normatif paling ideal dalam kerangka pengurangan risiko bencana.

Kuadran kanan atas, yang disebut sebagai kuadran Waspada, menampung negara-negara dengan NRI di atas median namun WRI juga di atas median. Negara-negara dalam kuadran ini memiliki kapasitas teknologi yang memadai, tetapi tetap menghadapi risiko bencana yang tinggi karena faktor-faktor lain seperti tingkat paparan yang ekstrem atau kerentanan sosial yang sulit direduksi hanya dengan teknologi. Kuadran kiri atas, yang disebut sebagai kuadran Reaktif, menampung negara-negara dengan NRI di bawah median namun WRI di atas median. Negara-negara dalam kuadran ini menghadapi situasi yang paling rentan: kapasitas teknologi yang terbatas berhadapan dengan tingkat risiko bencana yang tinggi. Terakhir, kuadran kiri bawah, yang disebut sebagai kuadran Pasif, menampung negara-negara dengan NRI di bawah

median dan WRI di bawah median, suatu konfigurasi di mana rendahnya kapasitas teknologi belum berujung pada risiko tinggi karena rendahnya paparan atau faktor kerentanan lainnya.



Gambar 4.1 Analisis Kuadran: Kapasitas Teknologi (NRI) vs Risiko Bencana (WRI)

Gambar 4.1 menampilkan sebaran 55 negara sampel dalam bidang kapasitas teknologi versus risiko bencana. Indonesia, yang ditandai dengan anotasi khusus pada grafik, berada pada koordinat NRI 53,84 dan WRI 41,13. Posisi ini menempatkan Indonesia di kuadran Waspada, bersama dengan 14 negara lainnya termasuk Jepang, Selandia Baru, Filipina, Meksiko, dan Amerika Serikat. Masuknya Indonesia dalam kuadran Waspada mengandung makna yang paradoksial sekaligus mengkonfirmasi argumen utama penelitian ini tentang adanya kesenjangan antara kapasitas teknologi agregat dan kesiapan bencana yang nyata.

Skor NRI Indonesia sebesar 53,84 menempatkannya di atas median negara-negara vulkanik, artinya secara agregat Indonesia memiliki kapasitas teknologi yang lebih baik dibandingkan lebih dari separuh negara vulkanik di dunia. Namun skor WRI Indonesia sebesar 41,13 berada di atas median sekaligus masuk dalam kategori Risiko Sangat Tinggi berdasarkan threshold resmi World Risk Report 2024. Kapasitas teknologi yang dimiliki Indonesia belum cukup untuk menekan risiko bencana ke tingkat yang lebih moderat, apalagi ke level negara-negara di kuadran Preventif.

Jarak Indonesia ke kuadran Preventif dapat diukur secara kuantitatif. Selisih antara posisi Indonesia (NRI 53,84; WRI 41,13) dengan median negara-negara di kuadran Preventif (NRI 65,15; WRI 7,54) menunjukkan bahwa untuk bergerak ke posisi tersebut, Indonesia perlu meningkatkan skor NRI sebesar 11,31 poin dan menurunkan skor WRI sebesar 33,59 poin.

Negara-negara yang menghuni kuadran Preventif umumnya merupakan negara-negara maju dengan kapasitas teknologi tinggi dan sistem penanggulangan bencana yang telah

matang. Keberadaan mereka di kuadran ini menunjukkan bahwa kombinasi antara kapasitas teknologi yang memadai dan tata kelola risiko yang efektif dapat menekan tingkat risiko bencana secara signifikan, bahkan untuk negara-negara yang memiliki paparan vulkanik. Sebaliknya, kuadran Reaktif sebagian besar dihuni oleh negara-negara dengan kapasitas fiskal terbatas, infrastruktur teknologi yang belum berkembang, dan sistem penanggulangan bencana yang masih dalam tahap awal pembangunan. Ketiadaan data yang lengkap pada banyak negara di kuadran ini, sebagaimana telah dibahas pada BAB 3, semakin mempertegas urgensi perhatian global terhadap kesenjangan kapasitas penanggulangan bencana di negara-negara paling rentan.

4.3 Analisis Korelasi dan Regresi

Setelah memetakan posisi Indonesia dalam lanskap kapasitas teknologi dan risiko bencana global, langkah analitis selanjutnya adalah menguji secara statistik hubungan antara kedua variabel tersebut. Analisis korelasi dan regresi digunakan untuk menjawab pertanyaan penelitian kedua: seberapa besar dan signifikan hubungan antara kapasitas teknologi suatu negara dengan kemampuan penanggulangan bencana vulkaniknya. Dalam sub-bab ini, hasil pengujian disajikan secara berurutan, dimulai dari matriks korelasi antarvariabel, dilanjutkan dengan model regresi linear sederhana, dan diakhiri dengan interpretasi temuan dalam konteks Indonesia.

4.3.1 Hasil Analisis Korelasi

Analisis korelasi Pearson dilakukan terhadap pasangan variabel kapasitas teknologi dan variabel risiko serta penanggulangan bencana. Koefisien korelasi mengukur kekuatan dan arah hubungan linear antarvariabel, dengan nilai berkisar antara -1 hingga +1. Nilai negatif menunjukkan hubungan terbalik, di mana peningkatan pada satu variabel disertai penurunan pada variabel lainnya. Dalam konteks penelitian ini, hubungan negatif antara kapasitas teknologi dan indikator risiko bencana merupakan konfigurasi yang diharapkan. Hasil analisis korelasi Pearson antarvariabel disajikan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Heatmap Korelasi Pearson: Indikator Kapasitas vs Risiko

Gambar 4.2 menampilkan matriks korelasi antara variabel-variabel kapasitas dengan variabel-variabel risiko dan penanggulangan. Pola yang paling mencolok adalah konsistensi arah hubungan negatif antara indikator kapasitas dengan sub-komponen kerentanan WRI. Korelasi antara *Network Readiness Index* dengan *Lack of Coping Capacities* tercatat sebesar -0,55 dengan nilai signifikansi pada taraf 99,9 persen (ditandai dengan tiga bintang pada heatmap). Angka ini menunjukkan hubungan negatif yang sedang menuju kuat, bermakna bahwa negara dengan skor NRI lebih tinggi cenderung memiliki nilai *Lack of Coping Capacities* yang lebih rendah. Karena *Lack of Coping Capacities* mengukur keterbatasan kemampuan penanggulangan, nilai yang lebih rendah justru menunjukkan kapasitas yang lebih baik. Korelasi negatif ini mengonfirmasi bahwa kapasitas teknologi yang lebih tinggi berasosiasi dengan kemampuan penanggulangan bencana yang lebih baik.

Analisis korelasi juga mengungkapkan hubungan yang lebih kuat antara NRI dengan *Vulnerability* (koefisien -0,75) dan antara NRI dengan *Susceptibility* (koefisien -0,80), keduanya signifikan pada taraf kepercayaan 99,9 persen. Meskipun kedua variabel ini tidak dimasukkan sebagai variabel dependen utama dalam model OLS, analisis korelasinya disertakan sebagai bukti tambahan tentang dimensi kerentanan mana yang paling erat berkaitan

dengan kapasitas teknologi. Negara dengan infrastruktur teknologi yang maju cenderung memiliki tingkat kerentanan yang lebih rendah baik secara sosial-ekonomi maupun struktural. Analisis korelasi terhadap *Vulnerability* dan *Susceptibility* berfungsi sebagai konteks interpretatif yang melengkapi model OLS utama, bukan sebagai pengujian hipotesis yang berdiri sendiri.

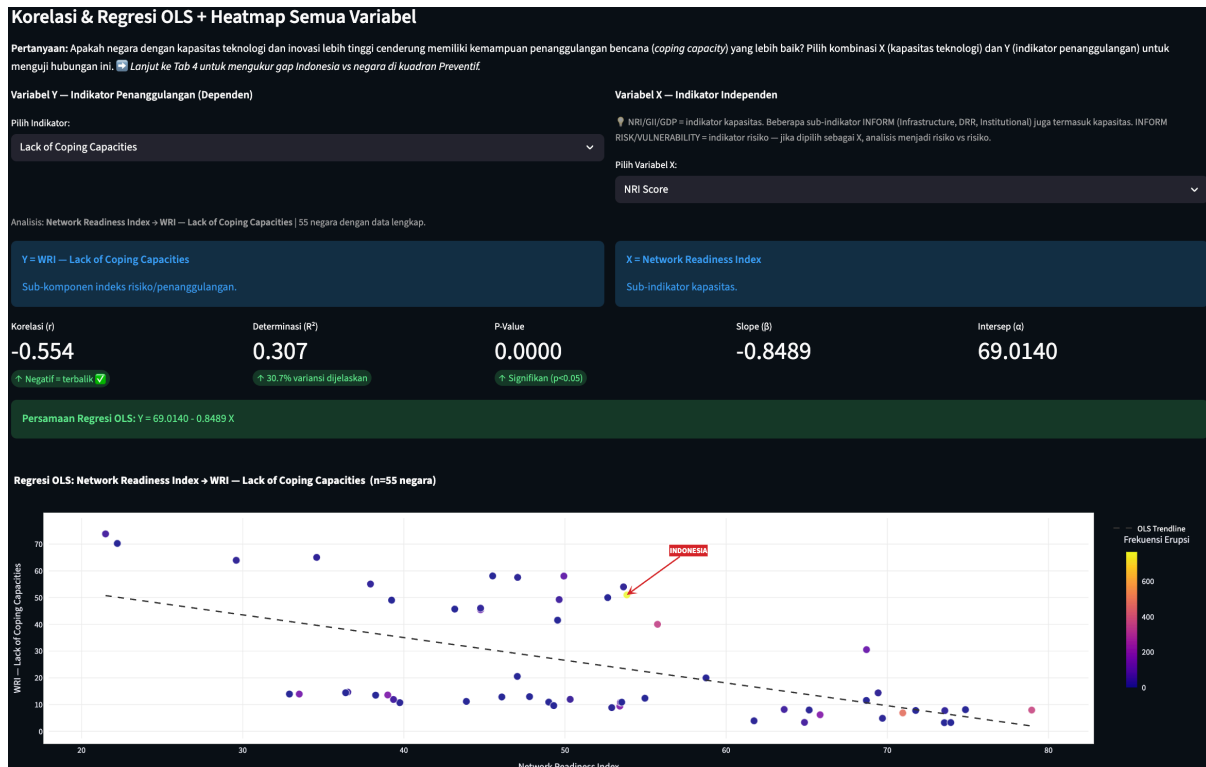
Hasil analisis korelasi juga mengungkapkan bahwa hubungan antara NRI dengan WRI Score secara agregat justru sangat lemah dan tidak signifikan, dengan koefisien hanya 0,06 tanpa tanda signifikansi pada *heatmap*. Temuan ini, meskipun tampak paradoksial mengingat kedua variabel digunakan sebagai sumbu utama analisis kuadran, justru memperkuat argumen teoretis penelitian ini. WRI Score sebagai indeks komposit terdiri dari dua komponen besar: keterpaparan (*exposure*) dan kerentanan (*vulnerability*). Komponen keterpaparan mencerminkan intensitas ancaman alam yang dihadapi suatu negara, yang sepenuhnya ditentukan oleh lokasi geografis dan kondisi geologis yang bersifat *given* dan tidak dapat dimodifikasi oleh kapasitas teknologi sebaik apapun. Negara yang secara geologis terletak di atas pertemuan lempeng tektonik, seperti Indonesia, Jepang, atau Islandia, akan selalu memiliki skor keterpaparan yang tinggi terlepas dari seberapa maju teknologi yang dimilikinya.

Inilah yang menyebabkan korelasi NRI-WRI secara agregat tidak signifikan: teknologi dapat mengurangi dampak bencana, tetapi tidak dapat mengurangi frekuensi atau intensitas ancaman alam itu sendiri. Oleh karena itu, untuk menguji hipotesis bahwa kapasitas teknologi berhubungan dengan kemampuan penanggulangan bencana, variabel dependen yang tepat bukan WRI Score secara keseluruhan, melainkan sub-komponen kerentanannya, khususnya *Lack of Coping Capacities*, yang secara konseptual memang mengukur sejauh mana suatu negara mampu merespons ancaman yang ada. Korelasi NRI dengan *Lack of Coping Capacities* sebesar -0,55 yang signifikan pada taraf 99,9 persen mengkonfirmasi bahwa pemilihan variabel dependen ini secara konseptual dan empiris tepat. Penggunaan WRI Score dalam analisis kuadran tetap dipertahankan karena fungsinya berbeda: bukan untuk mengukur hubungan kausalitas, melainkan untuk memetakan posisi relatif negara-negara berdasarkan kombinasi paparan dan kerentanan yang mereka tanggung secara agregat.

4.3.2 Hasil Analisis Regresi Linear Sederhana

Untuk mengukur seberapa besar variasi dalam kemampuan penanggulangan bencana dapat dijelaskan oleh kapasitas teknologi, dilakukan analisis regresi linear sederhana dengan metode *Ordinary Least Squares*. Variabel dependen yang dipilih adalah *Lack of Coping Capacities*,

dengan pertimbangan bahwa indikator ini merupakan ukuran paling langsung dari kemampuan penanggulangan bencana dalam kerangka *World Risk Index*. Variabel independen adalah *Network Readiness Index*, sebagai proksi utama kapasitas teknologi suatu negara. Hasil analisis regresi OLS divisualisasikan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Regresi OLS: NRI Score terhadap *Lack of Coping Capacities*

Gambar 4.3 menampilkan diagram sebar dan garis regresi untuk 55 negara sampel. Persamaan regresi yang dihasilkan adalah $Y = 69,0140 - 0,8489X$, dengan Y merepresentasikan *Lack of Coping Capacities* dan X merepresentasikan NRI Score. Koefisien kemiringan sebesar -0,8489 bermakna bahwa setiap kenaikan satu poin pada skor NRI suatu negara, secara rata-rata berasosiasi dengan penurunan sebesar 0,85 poin pada skor *Lack of Coping Capacities*. Mengingat skor *Lack of Coping Capacities* yang lebih rendah menunjukkan kapasitas penanggulangan yang lebih baik, arah hubungan negatif ini sesuai dengan ekspektasi teoretis.

Koefisien determinasi yang dihasilkan model adalah sebesar 0,307, yang berarti bahwa 30,7 persen variasi dalam *Lack of Coping Capacities* di antara 55 negara vulkanik dapat dijelaskan oleh variasi dalam *Network Readiness Index*. Dalam konteks penelitian sosial yang melibatkan data lintas negara, nilai R-squared sebesar ini tergolong moderat dan bermakna secara substantif. Artinya, meskipun kapasitas teknologi bukan satu-satunya faktor yang menentukan

kemampuan penanggulangan bencana, kontribusinya cukup substansial untuk tidak diabaikan dalam perumusan kebijakan.

4.3.3 Posisi Indonesia dalam Model Regresi

Salah satu kegunaan model regresi adalah kemampuannya untuk mengidentifikasi negara-negara yang memiliki kinerja lebih baik atau lebih buruk dibandingkan prediksi berdasarkan kapasitas teknologinya. Selisih antara nilai aktual dan nilai prediksi, yang dikenal sebagai residual, menjadi indikator apakah suatu negara telah mengoptimalkan kapasitas teknologinya untuk penanggulangan bencana atau justru sebaliknya.

Berdasarkan model regresi yang dihasilkan, dengan skor NRI sebesar 53,84, nilai *Lack of Coping Capacities* yang diprediksi untuk Indonesia adalah $69,0140 - (0,8489 \times 53,84) = 23,31$. Nilai aktual *Lack of Coping Capacities* Indonesia adalah 51,01. Indonesia memiliki residual positif sebesar 27,70 poin, yang berarti kemampuan penanggulangan bencana Indonesia secara signifikan lebih buruk dibandingkan prediksi berdasarkan kapasitas teknologinya.

Residual positif sebesar ini menempatkan Indonesia sebagai salah satu negara dengan kinerja penanggulangan bencana paling di bawah ekspektasi model. Indonesia sebenarnya memiliki kapasitas teknologi yang seharusnya cukup untuk menghasilkan kemampuan penanggulangan yang lebih baik, tapi kapasitas itu belum tercermin dalam data penanggulangan bencana aktual. Ini adalah bukti konkret dari paradoks *digital divide* yang menjadi kerangka penelitian ini.

Sebagai perbandingan, Tabel 4.2 menyajikan data kapasitas teknologi dan kemampuan penanggulangan untuk Indonesia dan ketiga negara *benchmark*.

Tabel 4.2 Perbandingan Kapasitas Teknologi dan Kemampuan Penanggulangan: Indonesia vs *Benchmark*

Negara	NRI Score	GII Score	<i>Lack of Coping Capacities</i> (Aktual)	<i>Lack of Coping Capacities</i> (Prediksi)	Residual
Indonesia	53,84	30,6	51,01	23,31	+27,70

Negara	NRI Score	GII Score	<i>Lack of Coping Capacities (Aktual)</i>	<i>Lack of Coping Capacities (Prediksi)</i>	Residual
Jepang	70,96	54,1	6,89	8,78	-1,89
Selandia Baru	65,83	45,9	6,19	13,13	-6,94
Islandia	64,86	48,5	3,34	13,96	-10,62

Tabel 4.2 menunjukkan perbedaan mendasar antara Indonesia dan ketiga negara *benchmark*. Jepang, Selandia Baru, dan Islandia seluruhnya memiliki residual negatif, artinya kemampuan penanggulangan bencana mereka lebih baik dibandingkan prediksi berdasarkan kapasitas teknologinya. Ketiganya berhasil menerjemahkan kapasitas teknologi yang tinggi ke dalam sistem penanggulangan bencana yang efektif. Indonesia berada di posisi sebaliknya: residual positif yang sangat besar menunjukkan adanya kebocoran dalam proses translasi kapasitas teknologi menjadi kesiapan bencana yang nyata.

4.3.4 Kelayakan Model Regresi sebagai Dasar Rekomendasi Kebijakan

Nilai R^2 sebesar 0,307 juga perlu ditempatkan dalam perspektif yang tepat. Dalam studi komparatif lintas negara yang melibatkan fenomena sosial-ekonomi kompleks seperti ketangguhan bencana, satu variabel independen yang mampu menjelaskan 30,7 persen variasi dependen sudah tergolong kontribusi yang substantif. Sebagai perbandingan, studi-studi serupa dalam literatur pembangunan internasional umumnya melaporkan R^2 antara 0,15 hingga 0,40 untuk model satu prediktor dengan data agregat tingkat negara. Lebih dari itu, rekomendasi yang dihasilkan penelitian ini tidak bertumpu semata pada kekuatan prediktif model regresi, melainkan pada sintesis antara temuan statistik, analisis kuadran, *gap analysis* per fase Sendai

Framework, dan perbandingan dengan negara-negara *benchmark*. Model regresi berfungsi sebagai konfirmasi empiris awal, bukan sebagai satu-satunya landasan preskriptif.

Sebagai bagian dari verifikasi model, dilakukan pengujian normalitas residual menggunakan uji Shapiro-Wilk terhadap 55 nilai residual yang dihasilkan model. Hasil pengujian menghasilkan statistik $W = 0,934$ dengan nilai signifikansi $p = 0,005$, yang berarti distribusi residual tidak sepenuhnya memenuhi asumsi normalitas OLS secara formal. Kondisi ini lazim ditemukan pada data lintas negara berskala makro dengan sampel terbatas, terutama ketika terdapat negara dengan beban vulkanik ekstrem seperti Indonesia yang menghasilkan residual sangat besar. Mengingat penelitian ini bersifat asosiatif dan tidak mengklaim hubungan kausal, pelanggaran asumsi normalitas tidak menggugurkan validitas interpretasi koefisien dan R^2 sebagai ukuran kekuatan asosiasi antarvariabel. Temuan ini memperkuat catatan metodologis pada Sub-bab 4.5.3 bahwa hasil model perlu diinterpretasikan dengan kehati-hatian.

4.4 *gap analysis per Fase Sendai Framework*

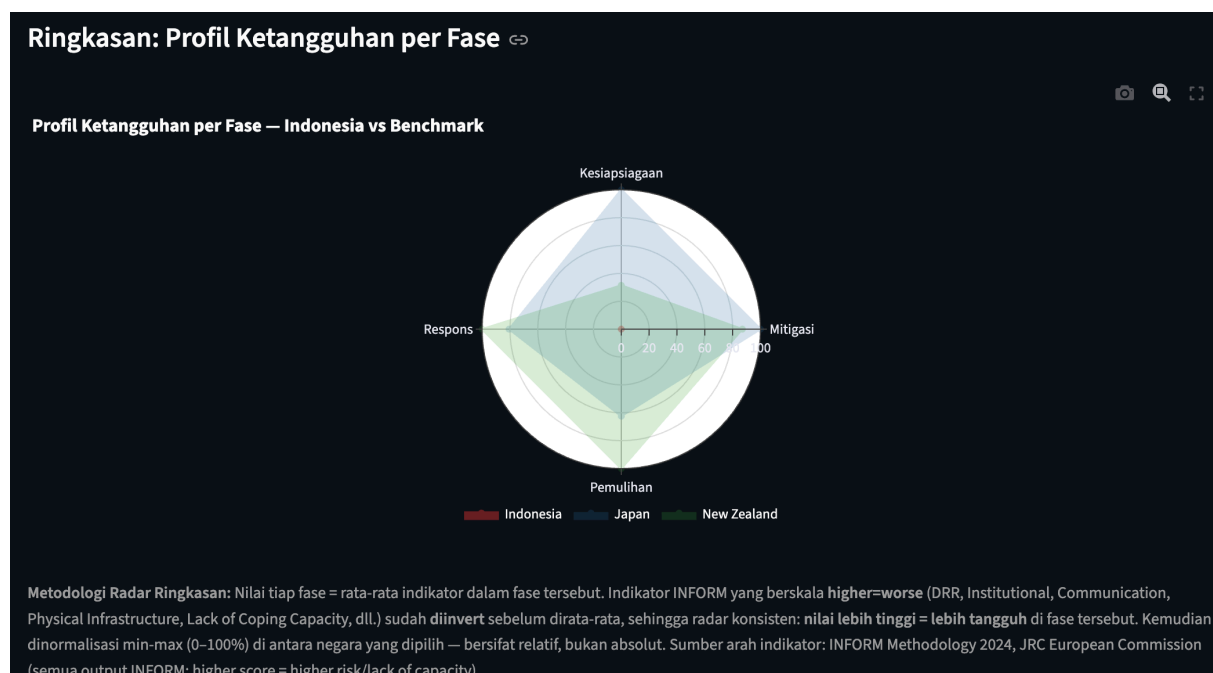
Analisis kuadran dan regresi yang telah dipaparkan pada sub-bab sebelumnya memberikan gambaran makro tentang posisi Indonesia dalam lanskap kapasitas teknologi dan risiko bencana global. Namun untuk merumuskan rekomendasi kebijakan yang presisi, diperlukan analisis yang lebih terperinci pada level dimensi penanggulangan bencana. *gap analysis per fase Sendai Framework* menjawab kebutuhan ini dengan mengukur jarak antara Indonesia dan negara-negara *benchmark* pada setiap tahapan siklus penanggulangan bencana, yaitu mitigasi, kesiapsiagaan, respons, dan pemulihan.

Analisis pada sub-bab ini menggunakan rata-rata skor ternormalisasi ketiga negara *benchmark*, yaitu Jepang, Selandia Baru, dan Islandia, sebagai nilai acuan dalam perhitungan kesenjangan di setiap fase. Pendekatan rata-rata ini dipilih untuk menghasilkan gambaran posisi Indonesia yang lebih representatif dibandingkan perbandingan terhadap satu negara *benchmark* secara individual.

Kerangka *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030* membagi penanggulangan bencana ke dalam empat prioritas yang saling terkait. Prioritas pertama adalah memahami risiko bencana, yang dalam analisis ini dipetakan ke dalam fase mitigasi. Prioritas kedua adalah memperkuat tata kelola risiko bencana, yang berkorespondensi dengan fase respons. Prioritas ketiga adalah berinvestasi dalam pengurangan risiko bencana demi ketangguhan, yang mencakup fase pemulihan. Prioritas keempat adalah meningkatkan

kesiapsiagaan bencana untuk respons yang efektif, yang secara langsung berkaitan dengan fase kesiapsiagaan.

Untuk setiap fase, dipilih indikator-indikator yang tersedia dalam *dataset* dan secara konseptual relevan dengan dimensi yang diukur. Fase mitigasi diwakili oleh implementasi pengurangan risiko bencana (DRR), infrastruktur fisik (Physical infrastructure), infrastruktur menurut INFORM (INFORM - Infrastructure), dan infrastruktur menurut GII (GII - Infrastructure). Fase kesiapsiagaan diwakili oleh pilar teknologi NRI (Technology Pillar), pilar masyarakat NRI (People Pillar), skor NRI secara keseluruhan (NRI Score), dan indikator komunikasi INFORM (Communication). Fase respons diwakili oleh indikator kelembagaan INFORM (Institutional), kurangnya kapasitas penanggulangan menurut INFORM (Lack of *Coping capacity*), dan pilar tata kelola NRI (*Governance Pillar*). Fase pemulihan diwakili oleh GDP per Kapita (GDP Per Capita 2024), pilar modal manusia dan penelitian GII (Human capital and research), skor GII secara keseluruhan (GII Score), serta indikator keluaran pengetahuan dan teknologi GII (*Knowledge and technology outputs*). Sebelum nilai rata-rata setiap fase dihitung, indikator-indikator INFORM yang bersifat *higher-is-worse*, yaitu Lack of *Coping capacity*, DRR, Physical Infrastructure, Institutional, dan Communication, terlebih dahulu diinversi dan seluruh indikator dinormalisasi menggunakan metode min-max terhadap 55 negara sampel analitik, sehingga nilai yang lebih tinggi pada setiap indikator secara konsisten mencerminkan ketangguhan yang lebih baik. Profil ketangguhan Indonesia dibandingkan negara *benchmark* per fase Sendai *Framework* disajikan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 *Radar chart*: Profil Ketangguhan Indonesia vs *Benchmark* per Fase Sendai

Gambar 4.4 menampilkan *radar chart* yang memvisualisasikan profil ketangguhan Indonesia dibandingkan dengan Jepang, Selandia Baru, dan Islandia pada keempat fase penanggulangan bencana. *Radar chart* ini menggunakan skala 0 hingga 1 yang dinormalisasi min-max terhadap seluruh 55 negara sampel analitik, bukan normalisasi relatif di antara empat negara yang ditampilkan, sehingga posisi setiap negara mencerminkan kinerjanya dalam kerangka referensi yang konsisten dengan seluruh analisis kuantitatif penelitian ini. Dari visualisasi tersebut, terlihat dengan jelas bahwa Indonesia tertinggal di seluruh fase dibandingkan ketiga negara *benchmark*. Tidak ada satu fase pun di mana Indonesia mampu menyamai atau mendekati level *benchmark*.

4.4.1 Sintesis Temuan *gap analysis*

Dari keempat fase yang dianalisis, Indonesia menunjukkan pola ketertinggalan yang konsisten dan sistemik di seluruh siklus penanggulangan bencana. Tidak ada satu fase pun yang dapat diabaikan, namun berdasarkan hasil normalisasi min-max terhadap 55 negara sampel analitik, tiga fase yang menunjukkan kesenjangan paling lebar antara Indonesia dan rata-rata negara-negara *benchmark* adalah pemulihan, respons, dan mitigasi, dengan fase kesiapsiagaan menunjukkan gap yang lebih kecil namun tetap substansial.

Kesenjangan terbesar ditemukan pada fase pemulihan. Jarak antara kapasitas ekonomi dan inovasi Indonesia dengan negara-negara *benchmark* memang paling lebar di fase ini, mencerminkan keterbatasan dalam kemampuan membangun kembali kehidupan sosial dan ekonomi pascabencana (Borre et al., 2025). GDP per Kapita Indonesia sebesar USD 4.925 berada sangat jauh di bawah Islandia, Jepang, dan Selandia Baru, dan kesenjangan ini turut diperparah oleh selisih yang besar pada kapasitas inovasi yang diukur melalui skor GII beserta pilar-pilar penyusunnya. Kondisi ini mengindikasikan bahwa bahkan jika Indonesia mampu merespons bencana dengan baik dalam jangka pendek, kapasitas jangka panjang untuk memulihkan aset, infrastruktur, dan aktivitas ekonomi pascabencana masih sangat terbatas dibandingkan negara-negara *benchmark*.

Kesenjangan terbesar kedua terdapat pada fase respons. Ketertinggalan pada fase ini mencerminkan persoalan yang bersifat kelembagaan dan tata kelola, bukan sekadar kekurangan peralatan atau infrastruktur teknologi. Rendahnya skor Indonesia pada indikator kelembagaan INFORM dan kurangnya kapasitas penanggulangan mengindikasikan bahwa kemampuan untuk memobilisasi sumber daya secara cepat, mengoordinasikan berbagai lembaga dalam

situasi darurat, dan memastikan rantai komando yang jelas masih menghadapi kendala sistemik yang belum terselesaikan.

Kesenjangan yang juga sangat lebar ditemukan pada fase mitigasi. Ketertinggalan pada fase ini mencerminkan masih lemahnya investasi jangka panjang dalam infrastruktur fisik untuk pengurangan risiko bencana dan implementasi program pengurangan risiko bencana secara menyeluruh. Negara-negara *benchmark* telah mengintegrasikan mitigasi ke dalam perencanaan tata ruang dan pembangunan infrastruktur publik secara sistematis, sementara Indonesia masih menghadapi kendala pendanaan dan koordinasi lintas sektor dalam membangun infrastruktur pelindung seperti sabo dam (bendungan pengendali sedimen untuk menahan aliran lahar) dan kanal pengalih lahar di kawasan rawan vulkanik (Malawani et al., 2021).

Fase kesiapsiagaan menunjukkan kesenjangan yang lebih kecil dibandingkan ketiga fase lainnya, meskipun tetap signifikan. Temuan ini mengindikasikan bahwa kapasitas teknologi Indonesia yang tidak rendah, sebagaimana tercermin dari skor NRI di atas median negara-negara vulkanik, sebagian telah berkontribusi pada sistem pemantauan dan komunikasi kebencanaan. Penerjemahan kapasitas teknologi umum ke dalam sistem kesiapsiagaan bencana yang spesifik dan menjangkau seluruh wilayah rawan masih belum optimal (Saifudin et al., 2023).

Temuan ini memberikan arah yang jelas bagi perumusan prioritas kebijakan. Investasi kapasitas penanggulangan bencana vulkanik di Indonesia perlu memberikan perhatian paling mendesak pada penguatan fondasi ekonomi dan inovasi untuk pemulihan jangka panjang, pembenahan tata kelola kelembagaan untuk respons yang lebih efektif, dan peningkatan investasi infrastruktur fisik untuk mitigasi, dengan tetap mempertahankan penguatan kapasitas kesiapsiagaan secara berkelanjutan. Ringkasan nilai gap Indonesia dibandingkan rata-rata negara *benchmark* pada setiap fase Sendai *Framework* disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Ringkasan Gap Indonesia vs Rata-rata *Benchmark* per Fase Sendai *Framework*

Fase	Score Indonesia (0-1)	Rata-rata Benchmark (0-1)	Gap (Benchmark – Indonesia)	Urutan Prioritas
Pemulihan	0,23	0,65	0,42	1 (Terbesar)
Respons	0,56	0,92	0,36	2
Mitigasi	0,59	0,88	0,29	3
Kesiapsiagaan	0,63	0,76	0,13	4 (Terkecil)

4.5 Pembahasan dan Implikasi Kebijakan

Setelah memaparkan seluruh temuan empiris secara berurutan dari gambaran umum data hingga *gap analysis* per fase, sub-bab ini bertujuan untuk mengintegrasikan temuan-temuan tersebut ke dalam suatu sintesis yang bermakna. Pembahasan disusun dengan mengaitkan kembali hasil analisis dengan kerangka teoretis yang telah dibangun pada BAB 2, khususnya konsep *digital divide* dalam konteks kebencanaan dan kerangka Sendai *Framework*. Selanjutnya, dari sintesis tersebut dirumuskan implikasi kebijakan yang dapat menjadi rujukan bagi para pemangku kepentingan di sektor kebencanaan nasional.

4.5.1 Paradoks *Digital divide* Indonesia: Konfirmasi Empiris

Yang paling mengejutkan dari seluruh hasil analisis ini bukan seberapa buruk angka Indonesia, melainkan seberapa besar jarak antara angka itu dengan apa yang seharusnya bisa dicapai. Dengan skor NRI 53,84, di atas separuh negara vulkanik dalam sampel, Indonesia sebenarnya bukan negara yang teknologinya tertinggal. Tapi skor WRI-nya 41,13, masuk kategori Risiko Sangat Tinggi, dan *Lack of Coping Capacities*-nya 51,01. Angka-angka ini tidak konsisten satu sama lain.

Model regresi membuat inkonsistensi itu lebih konkret. Berdasarkan kapasitas teknologi yang dimilikinya, Indonesia seharusnya punya *Lack of Coping Capacities* sekitar 23,31. Angka aktualnya hampir dua kali lipat: 51,01. Selisih 27,70 poin itu bukan sekadar noise statistik, melainkan sinyal bahwa ada sesuatu yang tidak berjalan dalam proses translasi kapasitas teknologi menjadi kesiapan bencana yang nyata.

Ketiga negara *benchmark* menunjukkan pola yang berlawanan. Jepang, Selandia Baru, dan Islandia semuanya punya residual negatif, artinya kinerja penanggulangan bencana mereka justru lebih baik dari prediksi model. Islandia bahkan masuk kuadran Preventif meski punya banyak gunung berapi aktif. Ini bukan semata soal mereka punya teknologi yang jauh lebih canggih, tapi lebih soal bagaimana teknologi yang ada benar-benar diintegrasikan ke dalam sistem penanggulangan. Di situlah jarak sesungguhnya antara Indonesia dan negara-negara itu berada.

4.5.2 Kesenjangan Sistemik di Sepanjang Siklus Penanggulangan

Dari keempat fase yang dianalisis, tidak ada satu pun di mana Indonesia mendekati level negara-negara *benchmark*. Tapi ketertinggalannya tidak merata. Ada tiga fase yang jaraknya jauh lebih lebar secara berurutan, yaitu pemulihan, respons, dan mitigasi.

Fase pemulihan menjadi yang paling mengkhawatirkan. GDP per Kapita Indonesia di angka USD 4.925 dan skor GII yang jauh di bawah *benchmark* bukan sekadar angka. Ini mencerminkan betapa terbatasnya ruang untuk membangun kembali setelah bencana besar. Negara yang ekonominya kuat dan ekosistem inovasinya matang bisa bergerak cepat pascabencana, membiayai rekonstruksi, mengembangkan solusi teknis baru, dan menarik investasi pemulihan. Indonesia belum ada di posisi itu. Kesenjangan di fase ini bukan soal kurang anggaran tahun ini, tapi soal jarak pembangunan yang sudah berlangsung puluhan tahun.

Fase respons menyimpan masalah yang berbeda jenisnya. Bukan soal tidak punya alat atau teknologi, tapi soal apakah lembaga-lembaga yang ada bisa bergerak bersama ketika bencana benar-benar terjadi. Skor Indonesia yang rendah pada indikator kelembagaan INFORM mengindikasikan bahwa koordinasi antar-instansi dalam situasi darurat masih menjadi titik lemah yang nyata. Menambah peralatan tidak akan memperbaiki ini kalau struktur tata kelolanya belum dibenahi.

Fase mitigasi menutup gambaran ini dengan persoalan yang lebih kasat mata. Sabo dam, kanal pengalih lahar, relokasi permukiman dari zona bahaya, negara-negara *benchmark* sudah

mengerjakan ini selama puluhan tahun secara konsisten. Indonesia masih sering tersandung di koordinasi lintas sektor dan keterbatasan pendanaan sebelum proyek-proyek semacam ini selesai dibangun.

4.5.3 Keterbatasan dan Catatan Metodologis

Sebelum melangkah ke implikasi kebijakan, penting untuk mengakui keterbatasan penelitian ini. Pertama, analisis sepenuhnya bertumpu pada data sekunder yang bersifat agregat di tingkat negara. Variasi internal dalam suatu negara, baik dalam hal kapasitas teknologi maupun risiko bencana, tidak tertangkap dalam analisis ini. Indonesia adalah negara kepulauan yang sangat luas dengan disparitas kapasitas yang tajam antarprovinsi. Temuan di tingkat nasional ini perlu ditindaklanjuti dengan analisis yang lebih granular di tingkat subnasional.

Kedua, model regresi yang digunakan bersifat asosiatif dan tidak dapat secara definitif menyimpulkan kausalitas. Hubungan negatif antara NRI dan *Lack of Coping Capacities* yang ditemukan dalam penelitian ini menunjukkan adanya korelasi yang signifikan, tetapi tidak membuktikan bahwa peningkatan NRI secara langsung akan menurunkan *Lack of Coping Capacities*. Penelitian dengan desain longitudinal atau metode campuran dibutuhkan untuk menguji hubungan kausal ini secara lebih definitif.

Ketiga, sampel analitik sebanyak 55 negara, meskipun mencakup sebagian besar negara vulkanik utama, tetap menyisakan 20 negara yang tidak dapat diikutsertakan karena ketidaklengkapan data. Negara-negara yang dieksklusi ini sebagian besar adalah negara kepulauan kecil dan negara dengan kapasitas statistik terbatas, yang justru mungkin merupakan entitas yang paling rentan. Dengan demikian, temuan penelitian ini lebih merepresentasikan negara-negara vulkanik yang telah memiliki kapasitas dasar dalam pelaporan statistik internasional.

Keempat, data sub-indikator DRR dari INFORM Risk Index 2024 tidak tersedia untuk Islandia, sehingga skor fase Mitigasi Islandia sebagai *benchmark* dihitung dari tiga indikator (Physical Infrastructure, INFORM Infrastructure, dan GII Infrastructure) alih-alih empat. Meskipun demikian, hal ini tidak mengubah kesimpulan utama mengenai urutan besaran gap per fase, mengingat ketiga indikator yang tersedia sudah mencerminkan kapasitas mitigasi infrastruktur Islandia yang secara konsisten tinggi.

4.5.4 Implikasi Kebijakan untuk Indonesia

Berdasarkan sintesis temuan pada Tabel 4.3, dapat dirumuskan empat prioritas kebijakan yang dikaitkan langsung dengan besaran gap terukur per fase Sendai *Framework*.

Pertama, memperkuat fondasi ekonomi dan kapasitas inovasi untuk pemulihan jangka panjang. Fase pemulihan mencatat gap terbesar sebesar 0,42 poin (Indonesia 0,23 vs rata-rata *benchmark* 0,65), menjadikannya prioritas utama yang memerlukan kebijakan struktural jangka panjang di luar sektor kebencanaan semata.

Kedua, memperkuat tata kelola dan koordinasi kelembagaan untuk respons darurat. Fase respons mencatat gap terbesar kedua sebesar 0,36 poin (Indonesia 0,56 vs *benchmark* 0,92), mencerminkan kelemahan kelembagaan yang tidak dapat diselesaikan hanya dengan penambahan teknologi.

Ketiga, meningkatkan investasi pada infrastruktur fisik untuk mitigasi vulkanik. Gap fase mitigasi sebesar 0,29 poin (Indonesia 0,59 vs *benchmark* 0,88) mencerminkan ketertinggalan pada indikator DRR dan infrastruktur fisik.

Keempat, mengintegrasikan kapasitas teknologi ke dalam sistem kesiapsiagaan yang merata. Gap fase kesiapsiagaan paling kecil sebesar 0,13 poin (Indonesia 0,63 vs *benchmark* 0,76), namun residual positif +27,70 poin menunjukkan kapasitas NRI belum termanifestasi merata hingga wilayah terpencil. Elaborasi lengkap disajikan pada Sub-bab 5.2.1.

4.6 Hasil Pengembangan *Dashboard* Analitik

Bagian ini memaparkan hasil pengembangan sistem *dashboard* analitik yang dibangun sebagai alat bantu visualisasi untuk menyajikan hasil analisis secara interaktif, bukan sebagai produk penelitian yang berdiri sendiri. Sub-bab berikut menguraikan hasil implementasi setiap modul beserta tampilannya.

4.6.1 *Pipeline* Integrasi dan Harmonisasi Data

Salah satu tantangan teknis terbesar dalam penelitian komparatif lintas negara yang melibatkan banyak sumber data adalah ketidakseragaman format dan konvensi penamaan yang digunakan oleh masing-masing lembaga penerbit. Setiap sumber data dalam penelitian ini menggunakan ejaan dan bentuk nama negara yang berbeda-beda, sehingga penggabungan langsung antar *dataset* tanpa pra-pemrosesan akan menghasilkan banyak nilai yang hilang secara artifisial akibat kegagalan pencocokan nama. Untuk mengatasi permasalahan ini, sistem

mengimplementasikan sebuah *pipeline* integrasi data yang terdiri dari beberapa tahapan yang dijalankan secara berurutan setiap kali sistem dimuat.

Standardisasi nama negara dilakukan karena tujuh sumber data menggunakan konvensi penamaan yang berbeda. Sistem membangun tabel pemetaan nama secara eksplisit untuk setiap sumber. Misalnya, negara yang tercatat sebagai "Russia" di Smithsonian GVP dipetakan menjadi "Russian Federation", "Cabo Verde" menjadi "Cape Verde", dan "Turkiye" menjadi "Turkey". Tabel 4.4 menyajikan sebagian contoh pemetaan yang diterapkan.

Tabel 4.4 Pemetaan Standardisasi Nama Negara Antarsumber Data

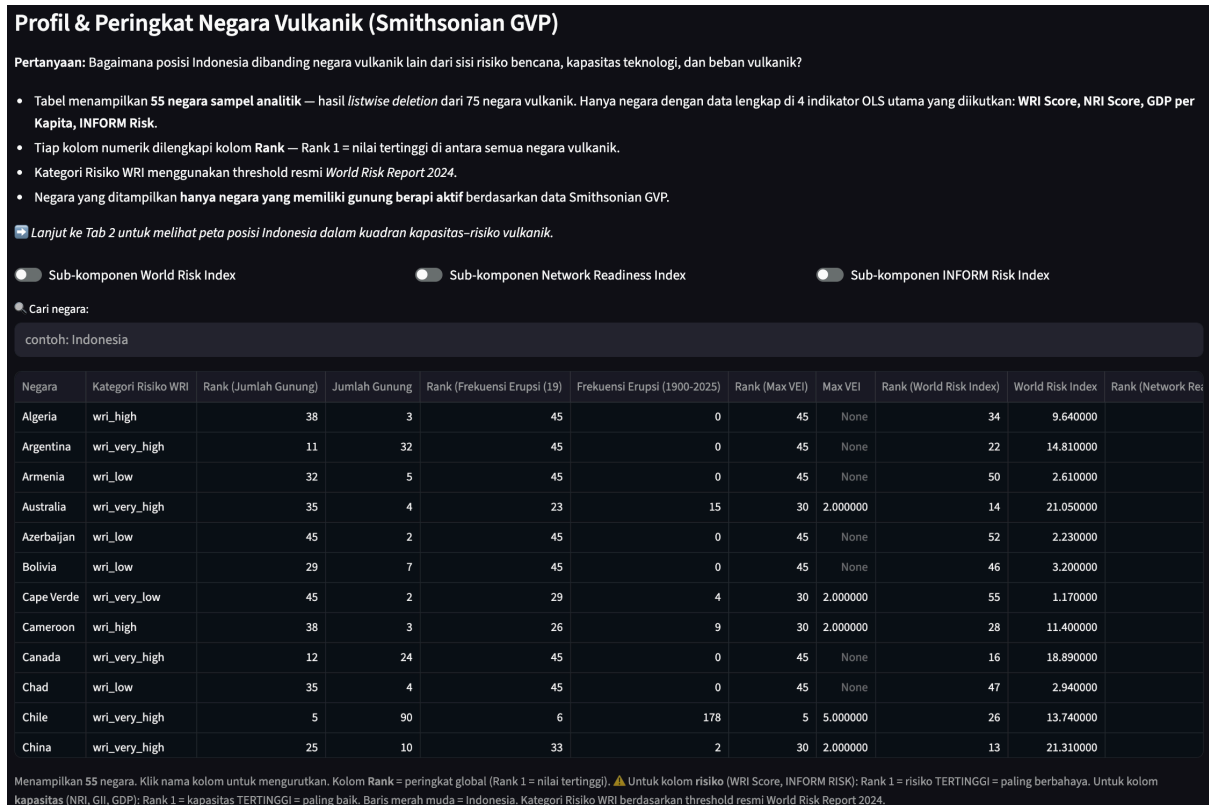
Negara	Sumber	Nama Terstandarisasi
Russia	Smithsonian GVP	Russian Federation
South Korea	Smithsonian GVP	Republic of Korea
Turkiye	Smithsonian GVP / GDP World Bank	Turkey
Burma (Myanmar)	Smithsonian GVP	Myanmar
DR Congo	Smithsonian GVP	Democratic Republic of the Congo
Union of the Comoros	Smithsonian GVP	Comoros
Cabo Verde	Smithsonian GVP / GDP World Bank	Cape Verde
Congo, Dem. Rep.	GDP World Bank	Democratic Republic of the Congo
Korea, Dem. People's Rep.	GDP World Bank	Dem. People's Republic of Korea
Korea, Rep.	GDP World Bank	Republic of Korea
Iran, Islamic Rep.	GDP World Bank	Iran
St. Kitts and Nevis	GDP World Bank	Saint Kitts and Nevis
St. Lucia	GDP World Bank	Saint Lucia
St. Vincent and the Grenadines	GDP World Bank	Saint Vincent and the Grenadines

Negara	Sumber	Nama Terstandarisasi
Viet Nam	GDP World Bank / INFORM / EM-DAT	Vietnam
Yemen, Rep.	GDP World Bank	Yemen
Korea DPR	INFORM Risk Index	Dem. People's Republic of Korea
Korea Republic of	INFORM Risk Index	Republic of Korea
Syria	INFORM Risk Index	Syrian Arab Republic
United States of America	INFORM Risk Index / EM-DAT	United States
Congo	INFORM Risk Index	Democratic Republic of the Congo
Bolivia (Plurinational State of)	EM-DAT	Bolivia

4.6.2 Modul Profil dan Peringkat Negara Vulkanik (Tab 1)

Tab pertama *dashboard* berfungsi sebagai titik masuk eksplorasi data. Modul ini menampilkan 55 negara sampel analitik, yang diturunkan dari 77 negara vulkanik Smithsonian GVP, dikurangi 2 (Antartika & Taiwan) sehingga menghasilkan populasi 75 negara, kemudian disaring menggunakan *listwise deletion* berdasarkan kelengkapan data keempat indikator utama OLS. Data lengkap 75 negara populasi tersedia di Tab 7. Setiap kolom numerik dilengkapi kolom peringkat yang dihitung otomatis menggunakan fungsi `rank()` dari Pandas dengan metode min-ranking, sehingga posisi relatif suatu negara dapat dibaca langsung tanpa perlu menyortir secara manual.

Tabel utama menerapkan sorotan visual pada baris Indonesia menggunakan fungsi `Styler` dari Pandas. Di bawah tabel, dua grafik distribusi disajikan berdampingan: distribusi kategori risiko berdasarkan threshold resmi WRI 2024 dan distribusi kategori kapasitas penanggulangan berdasarkan nilai *Lack of Coping Capacities*. Keduanya dirender sebagai *bar chart* horizontal menggunakan Plotly Express. Komponen filter di *sidebar* berupa *multiselect* memungkinkan pengguna menyaring tampilan berdasarkan kategori risiko WRI tanpa manipulasi data secara manual. Tampilan antarmuka Tab 1 *dashboard* disajikan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Tampilan Modul Profil dan Peringkat Negara Vulkanik (Tab 1)

Gambar 4.5 menyajikan tampilan antarmuka Tab 1 pada *dashboard* analitik sebagai alat bantu visualisasi, bukan representasi temuan penelitian yang berdiri sendiri. Pada tab ini, pengguna dapat menelusuri seluruh 55 negara sampel beserta nilai indeks masing-masing secara interaktif tanpa filter aktif, sehingga seluruh data tersaji secara utuh sebagai titik awal eksplorasi.

4.6.3 Modul Analisis Kuadran (Tab 2)

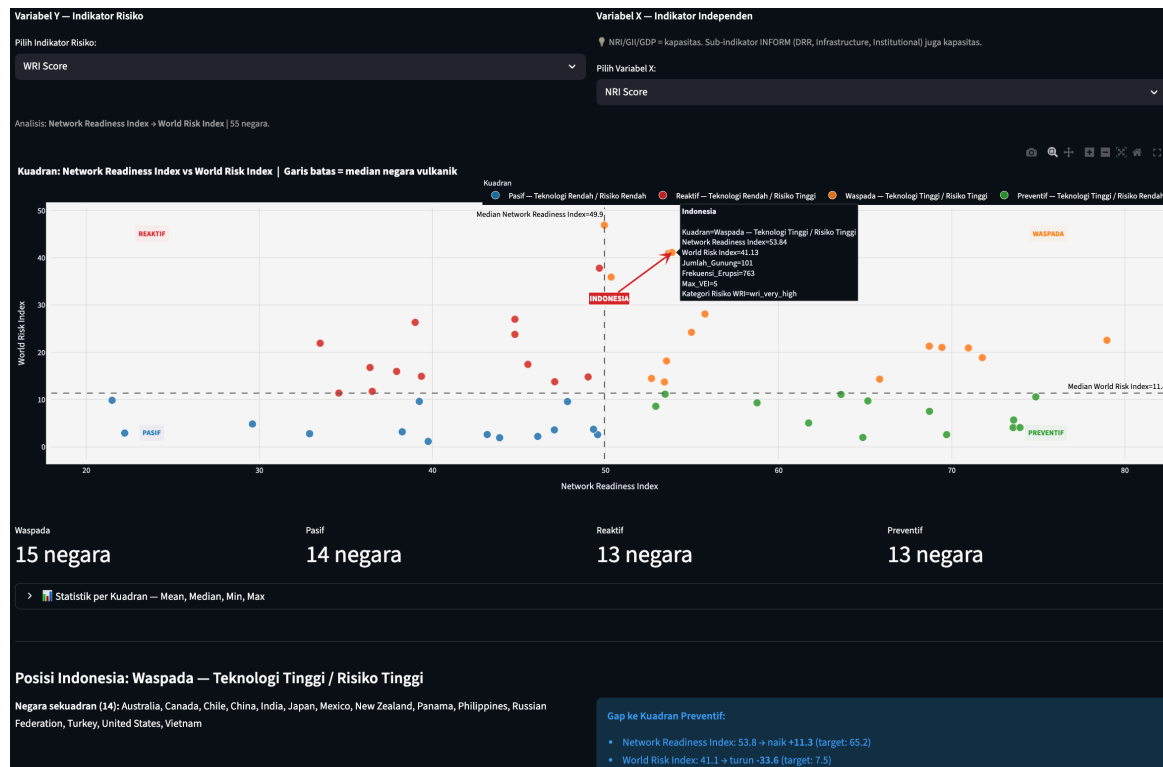
Tab kedua mengimplementasikan analisis kuadran secara interaktif. Pengguna dapat memilih variabel X dan variabel Y secara bebas dari *dropdown* yang mencakup seluruh indikator kapasitas dan risiko yang tersedia, sehingga kuadran tidak terkunci pada pasangan NRI-WRI saja melainkan dapat dikonfigurasi ulang untuk kombinasi variabel apapun.

Logika pembentukan kuadran dieksekusi langsung dalam Python menggunakan nilai median dari variabel yang dipilih, yang dihitung ulang setiap kali pengguna mengubah pilihan.

Garis pembagi median pada sumbu X dan Y digambar menggunakan fungsi `add_vline` dan `add_hline` dari Plotly, dengan label keempat kuadran (Preventif, Waspada, Reaktif, Pasif) ditempatkan sebagai anotasi teks di sudut masing-masing kuadran menggunakan

`add_annotation`. Anotasi khusus untuk titik Indonesia juga ditambahkan menggunakan `add_annotation` dengan latar belakang merah dan panah penunjuk agar posisi Indonesia selalu *terhighlight* secara visual.

Di bawah *scatter plot*, modul menampilkan tabel keanggotaan kuadran yang memuat daftar negara beserta nilai X, Y, dan label kuadrannya, serta *bar chart* distribusi jumlah negara per kuadran. Tampilan antarmuka Tab 2 *dashboard* disajikan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Tampilan Modul Analisis Kuadran Kapasitas Teknologi vs Risiko Bencana
(Tab 2)

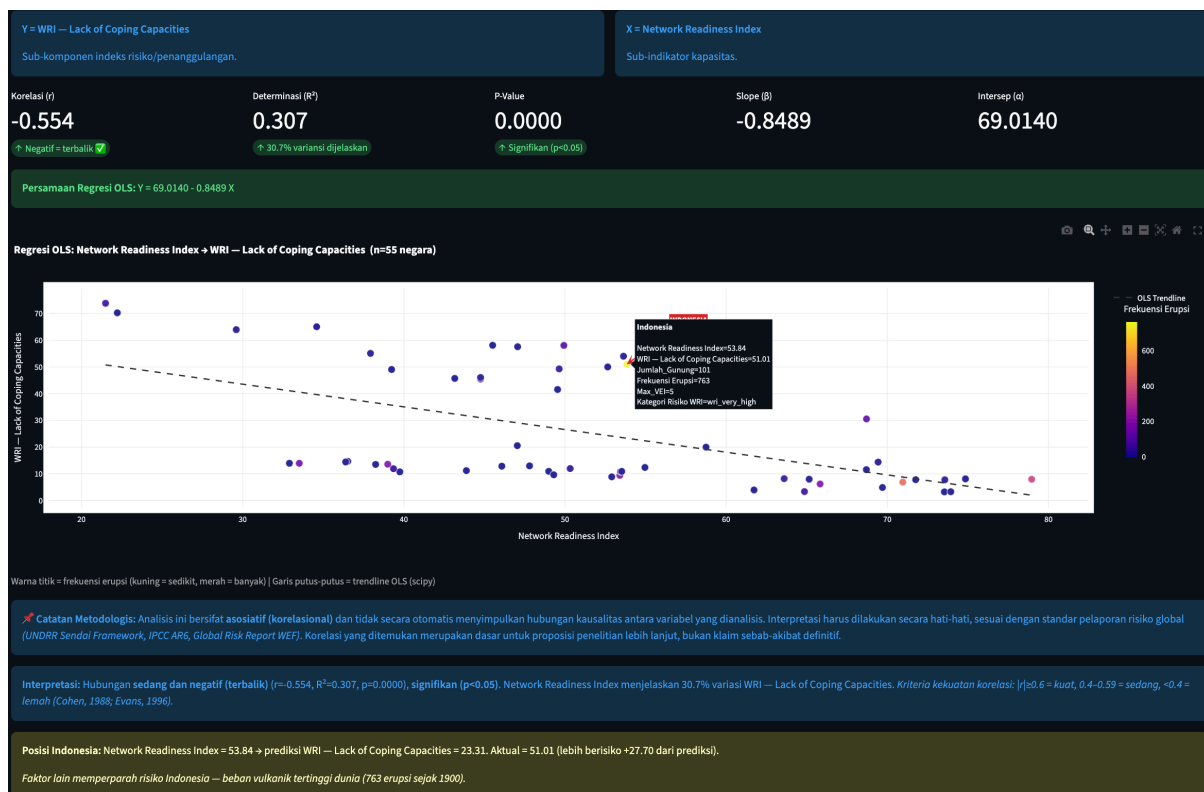
Gambar 4.6 menyajikan tampilan antarmuka modul analisis kuadran pada *dashboard* analitik, yang memperlihatkan sebaran 55 negara sampel dalam bidang kapasitas teknologi versus risiko bencana dengan posisi Indonesia *terhighlight* di kuadran Waspada, sebagai alat bantu eksplorasi data, bukan temuan penelitian yang berdiri sendiri.

4.6.4 Modul Korelasi dan Regresi OLS (Tab 3)

Tab ketiga merupakan inti analitik *dashboard*. Modul ini menyediakan dua fungsi utama: pengujian regresi OLS antara pasangan variabel yang dipilih pengguna, dan visualisasi *heatmap* korelasi Pearson untuk seluruh variabel secara serentak.

Pada fungsi regresi, pengguna memilih variabel dependen Y dari daftar sub-indikator WRI dan variabel independen X dari daftar yang mencakup NRI, GII, GDP, dan sub-indikator INFORM. Setelah variabel dipilih, sistem menjalankan fungsi linregress dari SciPy terhadap subset data yang bebas dari nilai kosong pada kedua variabel. Lima metrik statistik utama ditampilkan dalam komponen st.metric yang tersusun dalam lima kolom berdampingan: nilai r , R^2 , p-value, slope, dan intercept. Persamaan regresi ditampilkan dalam format teks menggunakan st.success. *Scatter plot* dengan *trendline* OLS dibangun menggunakan kombinasi Plotly Express untuk titik data dan go.Scatter untuk garis *trendline* yang dihitung secara manual dari parameter linregress, tanpa bergantung pada paket tambahan seperti statsmodels.

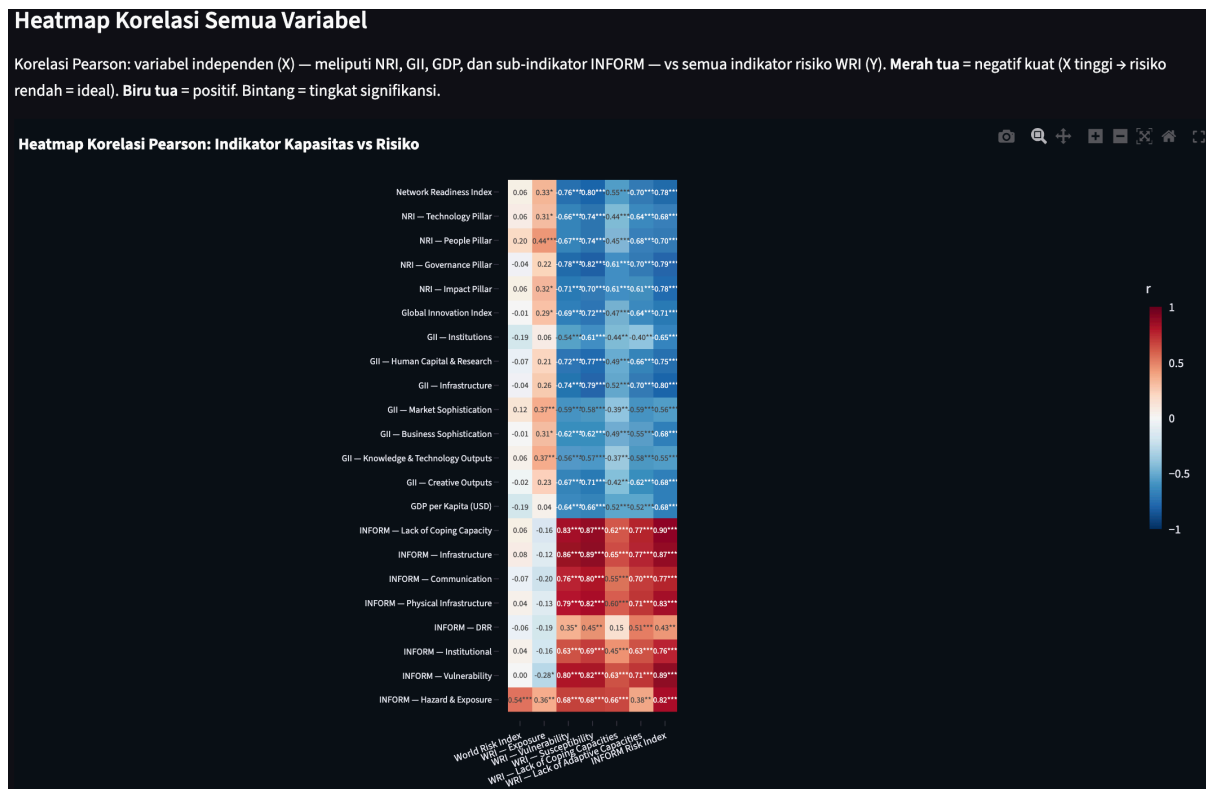
Untuk *heatmap* korelasi, sistem menghitung matriks korelasi Pearson menggunakan pearsonr dari SciPy agar nilai p-value tersedia untuk setiap pasangan variabel. Matriks ini dirender menggunakan go.Heatmap dengan skala warna divergen, di mana korelasi positif kuat ditampilkan dalam warna hangat dan korelasi negatif kuat dalam warna dingin. Tampilan modul regresi OLS pada Tab 3 disajikan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Tampilan Modul Regresi OLS NRI Score terhadap *Lack of Coping Capacities* (Tab 3)

Gambar 4.7 menyajikan tampilan antarmuka modul regresi OLS pada *dashboard* analitik, yang menampilkan diagram sebar NRI Score terhadap *Lack of Coping Capacities* beserta garis regresi, metrik statistik utama, dan posisi Indonesia sebagai alat bantu visualisasi, bukan representasi temuan penelitian yang berdiri sendiri.

Tampilan *heatmap* korelasi Pearson antarvariabel pada Tab 3 disajikan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Tampilan *Heatmap* Korelasi Pearson Antarvariabel (Tab 3)

Gambar 4.8 menyajikan tampilan antarmuka *heatmap* korelasi Pearson antarvariabel pada *dashboard* analitik sebagai alat bantu visualisasi hubungan antara indikator kapasitas dan risiko, bukan representasi temuan penelitian yang berdiri sendiri.

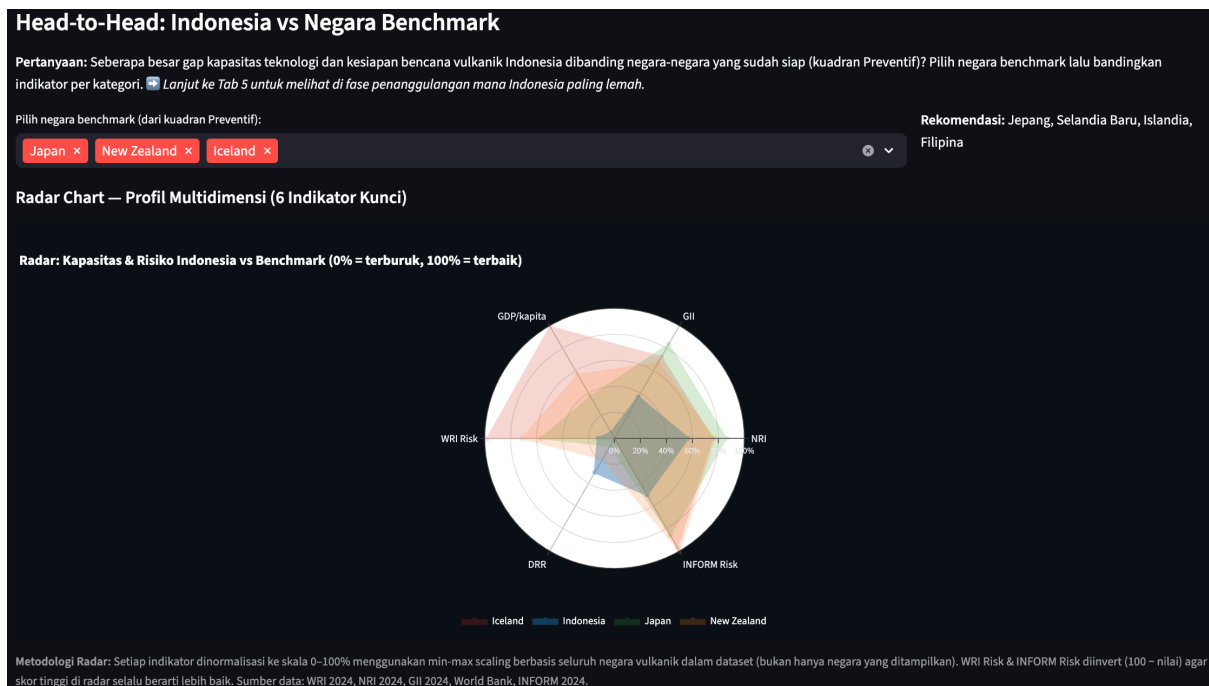
4.6.5 Modul Perbandingan Head-to-Head Indonesia (Tab 4)

Tab keempat dirancang untuk mengukur jarak kapasitas Indonesia terhadap negara-negara dalam kuadran Preventif. Pengguna dapat memilih hingga lima negara *benchmark* melalui komponen *st.multiselect*. Sistem secara default memuat Jepang, Selandia Baru, dan Islandia sebagai negara *benchmark* awal. Islandia merupakan satu-satunya negara di antara ketiganya yang menempati kuadran Preventif, sementara Jepang dan Selandia Baru berada di kuadran

Waspada karena paparan fisik yang ekstrem. Meskipun demikian, ketiganya dipilih secara kolektif karena keunggulan kapasitas penanggulangan yang tercermin dari skor *Lack of Coping Capacities* yang sangat rendah serta rekam jejak pengelolaan risiko vulkanik yang terbukti efektif.

Visualisasi utama modul ini adalah diagram radar (*radar chart* atau spider chart) enam dimensi yang menampilkan profil multidimensi Indonesia dan negara *benchmark* secara bersamaan. Keenam dimensi yang diplot adalah NRI Score, GII Score, GDP per Kapita, WRI Score, DRR, dan INFORM Risk. Indikator berbasis risiko (WRI Score dan INFORM Risk) diinvert sebelum diplot agar skala radar konsisten, yaitu nilai lebih tinggi selalu berarti kondisi lebih baik. Seluruh nilai dinormalisasi ke skala 0 hingga 100 persen menggunakan min-max scaling berbasis seluruh 55 negara sampel analitik sebelum dirender pada grafik polar.

Di bawah *radar chart*, nilai aktual per indikator disajikan dalam sub-tab terpisah menggunakan st.tabs yang terbagi menjadi empat kelompok: Indeks Utama, Sub-indikator NRI, Sub-indikator GII, dan Kesiapan Bencana. Setiap sub-tab menampilkan *grouped bar chart* yang memungkinkan pembacaan langsung nilai aktual setiap negara per indikator. Tampilan modul perbandingan head-to-head Indonesia dengan negara *benchmark* pada Tab 4 disajikan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Tampilan Modul Perbandingan Head-to-Head Indonesia vs Negara *Benchmark*
(Tab 4)

Gambar 4.9 menyajikan tampilan antarmuka modul perbandingan head-to-head pada *dashboard* analitik, yang menampilkan *radar chart* profil multidimensi Indonesia dibandingkan Jepang, Selandia Baru, dan Islandia, sebagai alat bantu visualisasi, bukan representasi temuan penelitian yang berdiri sendiri.

4.6.6 Modul Analisis Ketangguhan per Fase Penanggulangan Bencana (Tab 5)

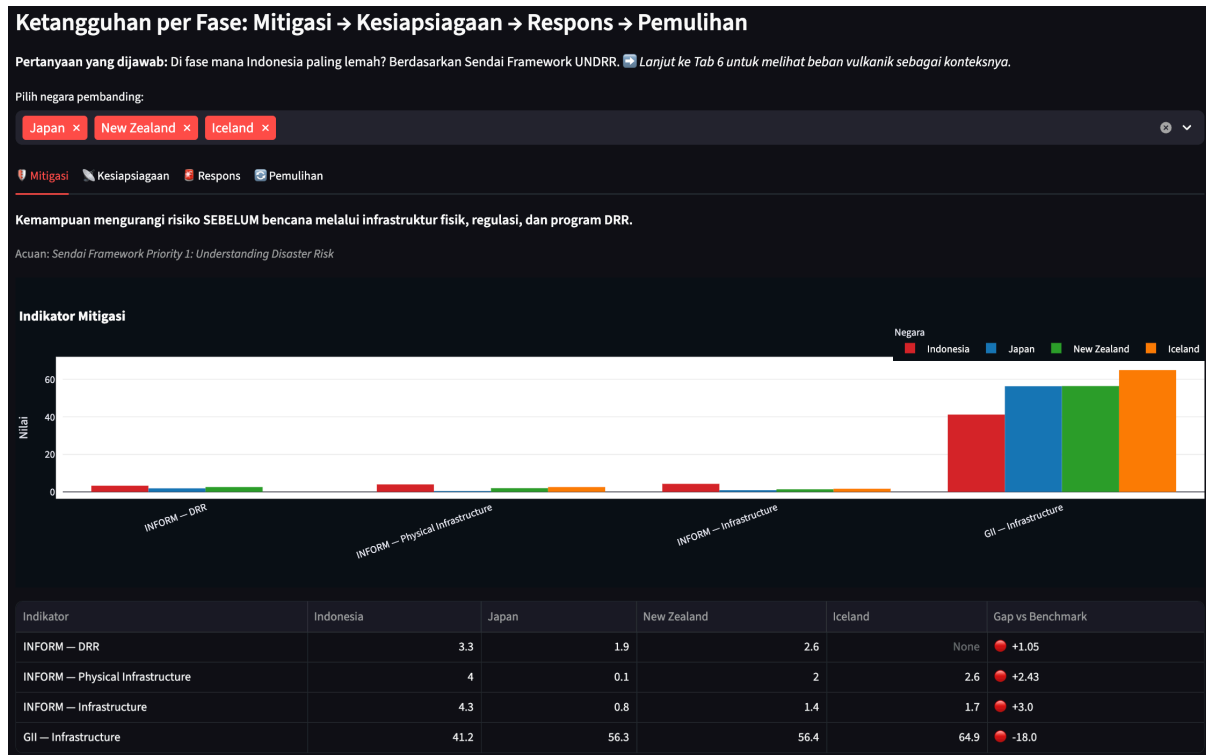
Tab kelima mengimplementasikan kerangka Sendai *Framework* UNDRR ke dalam struktur visualisasi empat fase penanggulangan bencana: Mitigasi, Kesiapsiagaan, Respons, dan Pemulihan. Setiap fase dipetakan ke sekumpulan indikator dari *dataset* yang relevan secara konseptual dengan fase tersebut.

Tampilan tab ini menggunakan *st.tabs* bersarang untuk memisahkan keempat fase. Pada setiap fase, sistem menampilkan *grouped bar chart* yang membandingkan nilai setiap indikator antara Indonesia dan negara *benchmark* yang dipilih pengguna. Di bawah grafik, tabel numerik menampilkan nilai aktual beserta kolom gap, yaitu selisih antara nilai Indonesia dan rata-rata nilai *benchmark*. Arah interpretasi gap dibedakan secara programatik: untuk indikator berbasis risiko seperti DRR dan INFORM, gap positif berarti kondisi lebih buruk, sementara untuk indikator kapasitas seperti NRI dan GII, gap negatif yang berarti lebih buruk. Indikator dengan gap terburuk diidentifikasi otomatis dan ditampilkan sebagai *insight* menggunakan *st.info*.

Bagian penutup tab ini menyajikan *radar chart* ringkasan yang memplot skor ketangguhan Indonesia per fase dalam satu grafik polar. Skor per fase dihitung sebagai rata-rata indikator pembentuk fase tersebut, dengan indikator berbasis risiko diinvert terlebih dahulu sebelum dirata-rata agar arah skala konsisten. Nilai kemudian dinormalisasi menggunakan min-max scaling berbasis seluruh negara yang ditampilkan sebelum dirender.

Pada bagian akhir tab ini ditampilkan pula Tabel Ringkasan Rata-rata per Fase Bencana berdasarkan kuadran Preventif dan Reaktif. Tabel tersebut tidak mencakup keseluruhan 55 negara sampel penelitian, melainkan hanya sub-sampel yang terdiri dari 13 negara pada kuadran Preventif (Teknologi Tinggi / Risiko Rendah) dan 13 negara pada kuadran Reaktif (Teknologi Rendah / Risiko Tinggi). Pemilihan sub-sampel dengan jumlah total $n = 26$ ini dilakukan secara sengaja dengan pertimbangan metodologis. Negara-negara yang berada pada kuadran Waspada (High Tech / High Risk) dan Pasif (Low Tech / Low Risk) dikeluarkan sementara dari perhitungan tabel ini karena karakteristiknya yang bersifat campuran berpotensi mendistorsi kemurnian analisis kontras. Dengan membandingkan hanya dua kutub ekstrem,

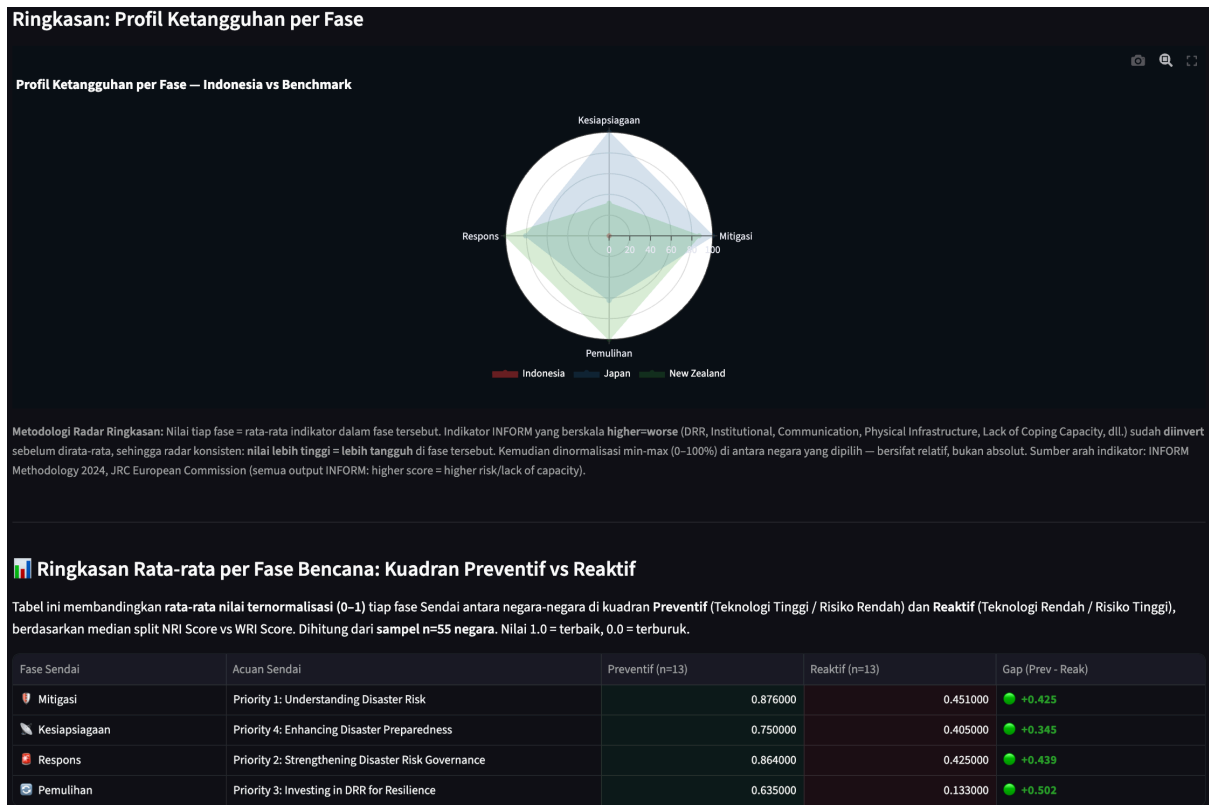
penelitian dapat mengisolasi pengaruh kapasitas teknologi (NRI) terhadap ketangguhan bencana (WRI) secara lebih presisi, sesuai dengan tujuan pengujian hipotesis penelitian. Tampilan modul analisis ketangguhan pada fase mitigasi di Tab 5 disajikan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Tampilan Modul Analisis Ketangguhan Fase Mitigasi (Tab 5)

Gambar 4.10 menyajikan tampilan antarmuka modul analisis ketangguhan fase mitigasi pada *dashboard* analitik, yang menampilkan perbandingan indikator mitigasi Indonesia dengan negara *benchmark*, sebagai alat bantu visualisasi, bukan representasi temuan penelitian yang berdiri sendiri.

Radar ringkasan ketangguhan Indonesia per fase penanggulangan bencana pada Tab 5 disajikan pada Gambar 4.11.



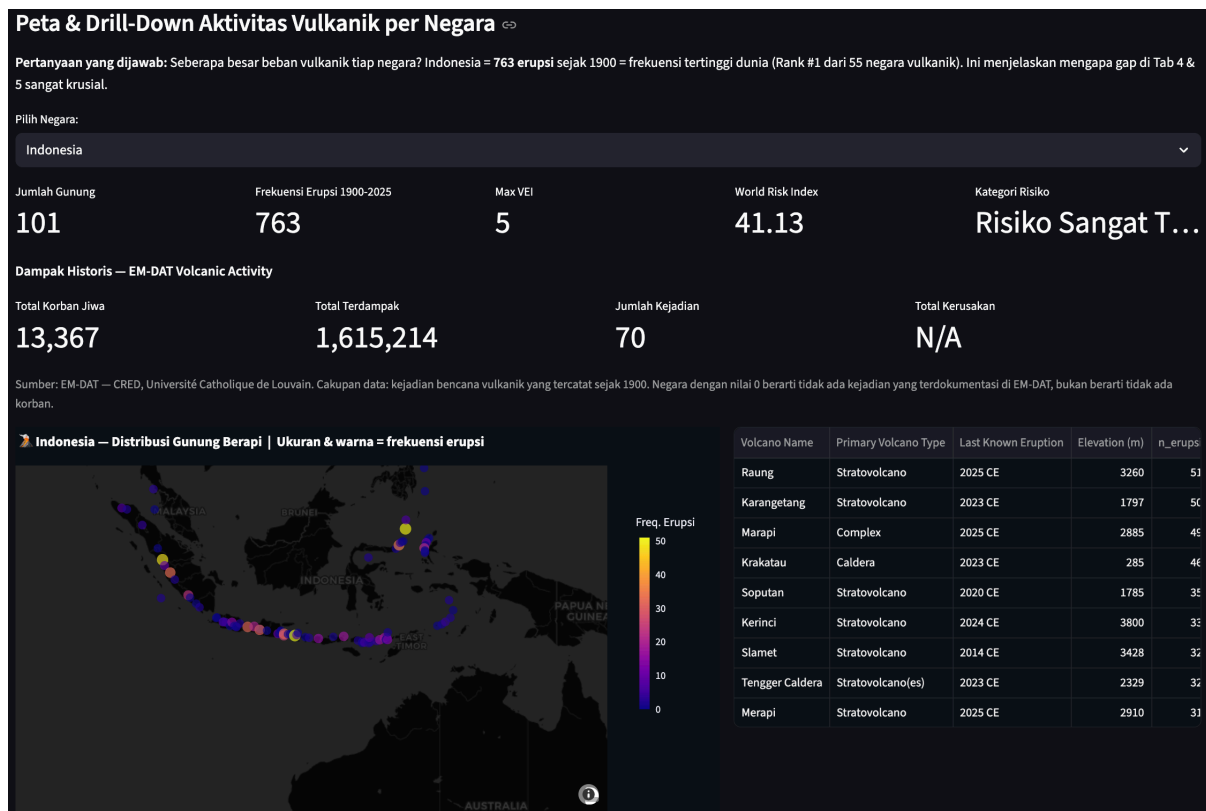
Gambar 4.11 Radar Ringkasan Ketangguhan Indonesia per Fase Penanggulangan (Tab 5)

Gambar 4.11 menyajikan tampilan radar ringkasan ketangguhan Indonesia per fase penanggulangan bencana pada *dashboard* analitik, yang memperlihatkan ketertinggalan Indonesia di seluruh fase dibandingkan negara *benchmark*, sebagai alat bantu visualisasi, bukan representasi temuan penelitian yang berdiri sendiri.

4.6.7 Modul Peta dan Drill-Down Vulkanik (Tab 6)

Tab keenam menyajikan konteks beban vulkanik Indonesia dan negara-negara lain dalam dimensi geografis dan historis. Modul ini menampilkan peta sebaran titik gunung berapi per negara menggunakan scatter mapbox dari Plotly Express, di mana ukuran dan warna setiap titik merepresentasikan frekuensi erupsi gunung berapi tersebut sejak tahun 1900. Pengguna dapat memilih negara dari *dropdown*, kemudian sistem menampilkan seluruh gunung berapi aktif negara tersebut beserta profil erupsi historisnya. Indonesia secara konsisten menampilkan kepadatan titik tertinggi dengan 101 gunung berapi aktif, menjadikannya salah satu negara dengan jumlah gunung api aktif terbanyak di dunia dan menempati peringkat risiko vulkanik tertinggi berdasarkan populasi terpapar.

Di bawah peta, modul penelusuran mendalam (drill-down) memungkinkan pengguna memilih satu negara dari *dropdown* untuk melihat profil vulkanik terperinci. Informasi yang ditampilkan mencakup jumlah gunung berapi aktif, frekuensi erupsi historis, nilai VEI maksimum dan rata-rata, serta tabel daftar nama gunung berapi beserta tipe dan nilai VEI masing-masing. Data ini diambil langsung dari lembar kerja Smithsonian GVP dalam berkas Excel melalui proses filter dinamis berbasis nama negara yang dipilih. Tampilan modul peta distribusi gunung berapi per negara pada Tab 6 disajikan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Tampilan Modul Peta Distribusi Gunung Berapi per Negara (Tab 6)

Gambar 4.12 menyajikan tampilan antarmuka modul peta distribusi gunung berapi per negara pada *dashboard* analitik, yang menampilkan sebaran titik gunung berapi Indonesia dengan 101 gunung aktif dan 763 erupsi sejak 1900, sebagai alat bantu visualisasi, bukan representasi temuan penelitian yang berdiri sendiri.

4.6.8 Modul *Dataset* Master dan Ekspor (Tab 7)

Tab ketujuh berfungsi sebagai antarmuka akses data penuh. Modul ini menampilkan tabel populasi yang memuat seluruh 75 negara vulkanik beserta nilai lengkap dari semua sumber

data, dengan baris oranye menandai 20 negara yang dieksklusi akibat data tidak lengkap. Di atasnya, tiga metrik ringkasan menampilkan alur seleksi sampel: 77 negara GVP → 75 negara populasi (setelah eksklusi Antartika & Taiwan) → 55 negara sampel analitik (setelah *listwise deletion*). Di bawah tabel, tersedia tabel statistik deskriptif yang mencakup rata-rata, median, standar deviasi, nilai minimum, dan nilai maksimum untuk setiap kolom numerik pada 55 negara sampel analitik, beserta fitur ekspor CSV.

Tombol unduh yang dibangun menggunakan `st.download_button` memungkinkan pengguna mengekspor kedua tabel dalam format CSV. Data yang diekspor identik dengan data yang ditampilkan pada tabel, termasuk kolom peringkat dan kolom kategori yang dihitung sistem. Tabel statistik deskriptif pada tab ini menjadi sumber utama nilai-nilai yang dilaporkan pada Tabel 4.1 di BAB 4, karena seluruh angka mean, median, dan standar deviasi diambil langsung dari *output* tabel ini pada saat sesi analisis dilakukan. Tampilan modul *dataset* master dan statistik deskriptif pada Tab 7 disajikan pada Gambar 4.13.

	World Risk Index	Network Readiness Index	Global Innovation Index	GDP per Kapita (USD)	Jumlah Gunung	Frekuensi Erupsi (1900-2025)	Max VEI	INFORM Risk Index	INFORM — Lack of Coping Capacity	INFORM — DRR	WRI — Lack of Coping Capacities
count	55	55	52	55	55	55	35	55	55	49	55
mean	14.35	51.76	33.74	20772.45	20.89	64.2	3.31	3.94	3.87	3.58	25.08
std	11.27	14.07	14.71	24089.34	33.48	137.54	1.3	1.64	1.77	1.49	21.57
min	1.17	21.49	12.3	649.38	1	0	1	1.4	1.2	1.5	3.24
25%	4.49	41.46	21.22	4519.63	2	0	2	2.45	2.2	2.5	9.15
50%	11.4	49.93	30.05	8452.37	8	5	3	3.6	4	3.2	13.51
75%	21	64.23	45.45	33804.37	22	48.5	4	4.85	4.5	4.4	45.89
max	46.91	78.96	62.4	86785.43	165	763	6	7.8	8.7	7.5	73.82

Gambar 4.13 Tampilan Modul *Dataset* Master dan Statistik Deskriptif (Tab 7)

Gambar 4.13 menyajikan tampilan antarmuka modul *dataset* master dan statistik deskriptif pada *dashboard* analitik, yang menampilkan tabel lengkap 75 negara populasi beserta ringkasan statistik deskriptif 55 negara sampel analitik, sebagai alat bantu visualisasi, bukan representasi temuan penelitian yang berdiri sendiri. Ringkasan fungsi tujuh modul *dashboard* analitik disajikan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Ringkasan Fungsi Tujuh Modul *Dashboard* Analitik

Tab	Nama Modul	Fungsi Utama
Tab 1	Profil dan Peringkat Negara Vulkanik	Menampilkan 55 negara populasi dengan peringkat per indikator dan distribusi kategori risiko dan kapasitas teknologi

Tab	Nama Modul	Fungsi Utama
Tab 2	Analisis Kuadran	Memetakan posisi negara dalam kuadran kapasitas-risiko berdasarkan variabel yang dipilih pengguna secara dinamis
Tab 3	Korelasi dan Regresi OLS	Menguji hubungan statistik antara indikator kapasitas teknologi dan kemampuan penanggulangan bencana beserta <i>heatmap</i> korelasi Pearson
Tab 4	Head-to-Head Indonesia	Membandingkan profil multidimensi Indonesia dengan negara <i>benchmark</i> melalui <i>radar chart</i> dan <i>grouped bar chart</i> per kategori indikator
Tab 5	Ketangguhan per Fase Penanggulangan	Menganalisis posisi Indonesia per fase Sendai <i>Framework</i> dibandingkan negara <i>benchmark</i> dengan identifikasi gap otomatis
Tab 6	Peta dan Drill-Down Vulkanik	Menyajikan peta sebaran titik gunung berapi per negara menggunakan scatter mapbox dan profil vulkanik terperinci per negara
Tab 7	<i>Dataset</i> Master dan Ekspor	Menampilkan <i>dataset</i> lengkap 75 negara beserta statistik deskriptif sampel analitik dan fitur ekspor CSV

4.6.9 Struktur *Dashboard*

Dashboard dibangun menggunakan struktur tujuh tab yang masing-masing merepresentasikan satu tahap dalam alur analisis penelitian. Navigasi antartab dilakukan melalui komponen `st.tabs` milik Streamlit yang merender tab secara horizontal di bagian atas halaman.

Setiap tab dirancang untuk menjawab satu pertanyaan analitis yang spesifik dan saling berkesinambungan. Ketujuh tab dirancang secara berkesinambungan mengikuti alur analisis penelitian, sebagaimana diringkas pada Tabel 4.5.

Untuk keperluan Tab 1, diimplementasikan fungsi `build_ranking_table()` yang secara dinamis menambahkan kolom ranking di sebelah kiri setiap kolom numerik. Ranking dihitung dengan metode descending sehingga Rank 1 selalu berarti nilai tertinggi untuk semua kolom, baik kolom risiko maupun kolom kapasitas.

Dashboard juga dilengkapi dengan fitur bilingual yang memungkinkan pengguna beralih antara tampilan Bahasa Indonesia dan Bahasa Inggris secara dinamis melalui tombol toggle di *sidebar*. Seluruh teks antarmuka, label grafik, dan keterangan metodologi tersimpan dalam kamus terjemahan terpusat bernama `_TRANS` yang memuat lebih dari 200 pasang terjemahan. Fungsi `T(key)` dipanggil setiap kali teks perlu ditampilkan sehingga seluruh antarmuka berubah secara serentak saat bahasa diganti tanpa perlu memuat ulang data.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk memetakan posisi Indonesia di antara negara-negara vulkanik dunia berdasarkan kapasitas teknologi dan tingkat risiko bencana, menganalisis hubungan kuantitatif antara kapasitas teknologi dengan kemampuan penanggulangan bencana vulkanik, serta merumuskan prioritas kebijakan berdasarkan kesenjangan yang teridentifikasi. Berdasarkan analisis terhadap 55 negara sampel vulkanik menggunakan data tahun 2024 dari *World Risk Index*, *Network Readiness Index*, dan indikator pendukung lainnya, berikut disajikan tiga kesimpulan yang masing-masing menjawab secara langsung rumusan masalah (a), (b), dan (c) sebagaimana dirumuskan dalam Bab I.

Menjawab rumusan masalah (a) tentang posisi Indonesia di antara negara-negara vulkanik dunia, analisis kuadran menempatkan Indonesia pada kuadran Waspada. Skor NRI Indonesia sebesar 53,84 berada di atas median negara-negara vulkanik dalam sampel (49,93), namun skor WRI sebesar 41,13 berada di atas median (11,40) sekaligus masuk dalam kategori Risiko Sangat Tinggi berdasarkan ambang batas resmi World Risk Report 2024. Secara agregat kapasitas teknologi Indonesia tidaklah rendah, tetapi modal teknologi tersebut belum cukup untuk menekan tingkat risiko bencana ke level yang lebih moderat, apalagi menyamai negara-negara di kuadran Preventif. Jarak menuju posisi median kuadran Preventif masih cukup lebar, memerlukan peningkatan skor NRI sebesar 11,31 poin dan penurunan skor WRI sebesar 33,59 poin.

Menjawab rumusan masalah (b) tentang hubungan antara kapasitas teknologi dengan kemampuan penanggulangan bencana, terdapat hubungan negatif yang signifikan antara kedua variabel tersebut. Korelasi antara NRI Score dan *Lack of Coping Capacities* (WRI) mencapai -0,55 dan signifikan pada taraf kepercayaan 99,9 persen ($p < 0,001$), menandakan bahwa negara dengan kapasitas teknologi yang lebih tinggi cenderung memiliki keterbatasan kapasitas penanggulangan yang lebih rendah. Model regresi linear sederhana menghasilkan persamaan $Y = 69,0140 - 0,8489X$, dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,307, yang berarti 30,7 persen variasi dalam *Lack of Coping Capacities* di antara 55 negara sampel dapat dijelaskan oleh variasi dalam NRI Score. Posisi Indonesia dalam model ini bersifat paradoks dan menjadi konfirmasi empiris dari kerangka *digital divide*. Dengan residual positif sebesar +27,70 poin, kapasitas penanggulangan bencana Indonesia jauh lebih buruk dibandingkan

prediksi berdasarkan modal teknologinya. Jepang, Selandia Baru, dan Islandia secara konsisten menunjukkan residual negatif, mengindikasikan bahwa mereka berhasil mengoptimalkan kapasitas teknologi ke dalam sistem penanggulangan bencana yang efektif. Di antara ketiganya, hanya Islandia yang berada di kuadran Preventif, sementara Jepang dan Selandia Baru tetap berada di kuadran Waspada karena paparan fisik yang ekstrem. Rendahnya skor *Lack of Coping Capacities* dan rekam jejak penanggulangan bencana yang unggul menjadikan Jepang dan Selandia Baru tetap relevan sebagai *benchmark* tata kelola risiko vulkanik.

Menjawab rumusan masalah (c) tentang langkah prioritas yang perlu diambil Indonesia, *gap analysis* berdasarkan empat fase Sendai *Framework* mengidentifikasi bahwa ketertinggalan Indonesia bersifat sistemik di seluruh siklus penanggulangan bencana. Urutan kesenjangan dari yang terbesar adalah fase pemulihan (gap 0,42), fase respons (gap 0,36), fase mitigasi (gap 0,29), dan fase kesiapsiagaan (gap 0,13). Pola ini mengindikasikan bahwa meskipun modal teknologi Indonesia telah memberikan kontribusi pada kesiapsiagaan, kesenjangan struktural pada kapasitas ekonomi, inovasi, dan tata kelola kelembagaan menjadi hambatan utama yang belum terselesaikan. Berdasarkan urutan besaran gap tersebut, prioritas kebijakan yang perlu diambil Indonesia secara berurutan adalah: (1) memperkuat fondasi ekonomi dan kapasitas inovasi untuk pemulihan jangka panjang; (2) memperkuat tata kelola dan koordinasi kelembagaan untuk respons darurat; (3) meningkatkan investasi infrastruktur fisik untuk mitigasi vulkanik; dan (4) mengintegrasikan kapasitas teknologi yang ada ke dalam sistem kesiapsiagaan yang merata.

5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan yang telah dipaparkan, penelitian ini mengajukan saran yang ditujukan kepada dua pihak utama: para pemangku kebijakan di sektor kebencanaan nasional, dan peneliti selanjutnya yang berminat mengembangkan kerangka analisis serupa.

5.2.1 Saran untuk Pemangku Kebijakan

Berdasarkan sintesis temuan yang telah dipaparkan, dapat dirumuskan empat prioritas kebijakan yang perlu menjadi perhatian utama pemerintah Indonesia, khususnya Badan Nasional Penanggulangan Bencana dan kementerian terkait lainnya. Urutan prioritas ini didasarkan pada besaran kesenjangan yang terukur melalui *gap analysis* per fase Sendai *Framework*, dengan fase yang memiliki kesenjangan terbesar mendapatkan perhatian paling mendesak.

Prioritas Pertama: Memperkuat Fondasi Ekonomi dan Kapasitas Inovasi untuk Pemulihan Jangka Panjang

Fase pemulihan menunjukkan kesenjangan terbesar antara Indonesia dan negara-negara *benchmark*, mencerminkan jarak struktural dalam kapasitas ekonomi dan ekosistem inovasi nasional. Penguatan kapasitas pemulihan tidak bisa dicapai melalui intervensi jangka pendek semata, melainkan memerlukan komitmen jangka panjang dalam dua arah. Pertama, pemerintah perlu memastikan tersedianya anggaran pemulihan bencana yang terencana dan tidak bergantung semata pada realokasi anggaran darurat pascakejadian, misalnya melalui pembentukan dana cadangan bencana yang dikelola secara transparan oleh BNPB bersama Kementerian Keuangan. Kedua, investasi dalam kapasitas inovasi nasional, termasuk penelitian terapan di bidang teknologi kebencanaan, perlu diperluas dan diarahkan secara spesifik untuk mendukung rekonstruksi pascabencana vulkanik. Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi bersama lembaga riset nasional punya posisi strategis untuk mendorong kolaborasi antara perguruan tinggi dan lembaga kebencanaan dalam menghasilkan solusi inovatif yang kontekstual.

Prioritas Kedua: Memperkuat Tata Kelola dan Koordinasi Kelembagaan untuk Respons Darurat

Fase respons menunjukkan kesenjangan terbesar kedua, yang mencerminkan persoalan koordinasi antarlembaga, kejelasan rantai komando, dan mobilisasi sumber daya dalam situasi darurat yang belum terselesaikan secara sistemik. Badan Nasional Penanggulangan Bencana bersama kementerian terkait perlu segera menyusun dan mensimulasikan protokol respons terpadu yang mengikat seluruh jenjang pemerintahan, dari pusat hingga daerah rawan bencana. Investasi dalam sistem komando tanggap darurat yang terstandardisasi serta pelatihan berkala bagi aparat di daerah rawan vulkanik merupakan langkah konkret yang dapat segera diambil. Rendahnya skor Indonesia pada indikator kelembagaan dan kapasitas penanggulangan dalam INFORM Risk Index mengindikasikan bahwa persoalan ini bersifat mendasar dan tidak dapat diselesaikan hanya dengan penambahan peralatan teknologi tanpa disertai pembenahan tata kelola yang menyertainya.

Prioritas Ketiga: Meningkatkan Investasi pada Infrastruktur Fisik untuk Mitigasi Vulkanik

Fase mitigasi juga menunjukkan kesenjangan yang sangat lebar, terutama pada indikator implementasi pengurangan risiko bencana dan infrastruktur fisik. Pemerintah perlu mengubah paradigma perencanaan pembangunan yang selama ini cenderung menempatkan infrastruktur mitigasi bencana sebagai pos pengeluaran sekunder. Infrastruktur seperti sabo dam, kanal

pengalihan lahar, tanggul penahan material vulkanik, dan sistem drainase di kawasan rawan harus diposisikan sebagai investasi jangka panjang untuk menyelamatkan nyawa dan aset ekonomi. Kementerian Pekerjaan Umum dan BNPB perlu menyusun peta jalan pembangunan infrastruktur mitigasi vulkanik yang terintegrasi dengan Rencana Tata Ruang Wilayah di provinsi-provinsi dengan risiko vulkanik tinggi.

Prioritas Keempat: Mengintegrasikan Kapasitas Teknologi yang Telah Ada ke dalam Sistem Kesiapsiagaan

Meskipun fase kesiapsiagaan menunjukkan kesenjangan yang lebih kecil dibandingkan ketiga fase sebelumnya, penguatan pada dimensi ini tetap diperlukan secara berkelanjutan. Indonesia memiliki modal teknologi yang tidak rendah, tercermin dari skor NRI 53,84 yang berada di atas median negara vulkanik. Namun modal ini belum dimanfaatkan secara optimal untuk kebencanaan, sebagaimana ditunjukkan oleh skor *Lack of Coping Capacities* yang jauh lebih tinggi dari prediksi model. Kementerian Komunikasi dan Digital bersama BNPB perlu memprioritaskan program yang menjembatani kesenjangan ini, seperti memperluas jangkauan sistem peringatan dini berbasis seluler hingga ke wilayah-wilayah terpencil di sekitar gunung berapi aktif, membangun pusat data kebencanaan terintegrasi yang memanfaatkan teknologi komputasi awan untuk analisis risiko secara *real-time*, serta meningkatkan kapasitas literasi digital aparaturnya kebencanaan di tingkat lokal agar mampu mengoperasikan dan merawat peralatan teknologi yang telah tersedia.

5.2.2 Saran untuk Penelitian Selanjutnya

Pertama, penelitian ini sepenuhnya bertumpu pada data agregat di tingkat negara, sehingga tidak dapat menangkap variasi kapasitas dan risiko di tingkat subnasional. Indonesia adalah negara kepulauan dengan disparitas kapasitas teknologi dan kesiapan bencana yang sangat tajam antarprovinsi, bahkan antarkabupaten. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan analisis yang lebih granular, misalnya membandingkan kabupaten/kota di sekitar gunung berapi aktif di Indonesia menggunakan indikator-indikator yang setara di tingkat lokal.

Kedua, model regresi yang digunakan bersifat asosiatif dan tidak dapat membuktikan hubungan kausal. Diperlukan penelitian dengan desain longitudinal atau studi kasus mendalam terhadap negara-negara yang berhasil melakukan transformasi kapasitas penanggulangan bencana (seperti Islandia atau Selandia Baru) untuk mengidentifikasi mekanisme kausal yang menghubungkan investasi teknologi dengan perbaikan kapasitas penanggulangan.

Ketiga, sebanyak 20 negara vulkanik tidak dapat diikutsertakan dalam sampel analitik karena ketidaklengkapan data. Sebagian besar dari negara yang dieksklusi adalah negara kepulauan kecil dan negara dengan kapasitas statistik terbatas, yang justru kemungkinan merupakan entitas paling rentan terhadap bencana vulkanik. Penelitian selanjutnya dapat berfokus secara spesifik pada negara-negara tersebut dengan pendekatan pengumpulan data primer atau kolaborasi dengan lembaga internasional untuk mengisi kesenjangan data.

Keempat, kerangka analisis yang dikembangkan dalam penelitian ini, yang meliputi analisis kuadran, regresi OLS, dan *gap analysis* berbasis Sendai *Framework*, dapat diadaptasi untuk jenis bencana geologis lain, seperti gempa bumi tektonik dan tsunami, atau bahkan bencana hidrometeorologi. Dengan mengganti data paparan vulkanik dengan data paparan bencana yang relevan, kerangka ini dapat menjadi alat bantu evaluasi kapasitas kebencanaan nasional secara lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

- Acemoglu, D., Johnson, S., & Robinson, J. A. (2001). The Colonial Origins of Comparative Development: An Empirical Investigation. *American Economic Review*, 91(5), 1369–1401. <https://doi.org/10.1257/aer.91.5.1369>
- Birkmann, J., Jamshed, A., McMillan, J. M., Feldmeyer, D., Totin, E., Solecki, W., Ibrahim, Z. Z., Roberts, D., Bezner Kerr, R., Poertner, H.-O., Pelling, M., Djalante, R., Garschagen, M., Leal Filho, W., Guha-Sapir, D., & Alegría, A. (2022). Understanding Human Vulnerability to Climate Change: A Global Perspective on Index Validation for Adaptation Planning. *Science of the Total Environment*, 803, 150065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150065>
- Borre, A., Ghizzoni, T., Trasforini, E., Ottonelli, D., Rudari, R., & Ferraris, L. (2025). Developing the Recovery Gap Index: A Comprehensive Tool for Assessing National Disaster Recovery Capacities. *Sustainability*, 17(3), 1044. <https://doi.org/10.3390/su17031044>
- Bündnis Entwicklung Hilft. (2024). *World Risk Report 2024*. <https://weltrisikobericht.de/en/worldriskreport/>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). (2024). *EM-DAT: The International Disaster Database*. <https://www.emdat.be/>
- Dewanti, D. S., Ayuwat, D., & Yongvanit, S. (2019). Early Warning System through Sustainability Livelihoods Approach for Volcanic Disaster Management. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 398, 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/398/1/012015>
- European Commission Joint Research Centre. (2024). *INFORM Risk Index 2024*. <https://drmkc.jrc.ec.europa.eu/inform-index>
- Garschagen, M., Doshi, D., Reith, J., Hagenlocher, M., Handmer, J., Heckmann, T., Mucke, P., & Radtke, K. (2021). Global Patterns of Disaster and Climate Risk: An Analysis of the Consistency of Leading Index-Based Assessments and Their Results. *Climatic Change*, 169, 11. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03209-7>
- Izumi, T., Shaw, R., Djalante, R., Ishiwatari, M., & Komino, T. (2019). Disaster Risk Reduction and Innovations. *Progress in Disaster Science*, 2, 100033. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100033>

- Lythreatis, S., Singh, S. K., & El-Kassar, A.-N. (2022). The *Digital divide: A Review and Future Research Agenda*. *Technological Forecasting and Social Change*, 175, 121359. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121359>
- Malawani, A. N., Lavigne, F., Gomez, C., Mutaqin, B. W., & Hadmoko, D. S. (2021). Review of Local and Global Impacts of Volcanic Eruptions and Disaster Management Practices: The Indonesian Example. *Geosciences*, 11(3), 109. <https://doi.org/10.3390/geosciences11030109>
- Marin Ferrer, M., Vernaccini, L., & Poljansek, K. (2017). *INFORM Index for Risk Management: Concept and Methodology, Version 2017*. <https://doi.org/10.2760/094023>
- Nakada, S. (2018). Volcanic Archipelago: Volcanism as a Geoheritage Characteristic of Japan. *Natural Heritage of Japan*, 19–28. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61896-8_3
- Newhall, C. G., & Punongbayan, R. S. (1996). *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines* (C. G. Newhall & R. S. Punongbayan, Eds.). Philippine Institute of Volcanology and Seismology & University of Washington Press.
- Norris, P. (2001). *Digital divide: Civic Engagement, Information Poverty, and the Internet Worldwide*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139164887>
- Porter, M. E. (1990). *The Competitive Advantage of Nations*. Free Press.
- Portulans Institute. (2024). *Network Readiness Index 2024*. <https://networkreadinessindex.org/>
- Saifudin, I. M. M. Y., Setyaningrum, N., Hermawati, H., Majiidah, A. N., Afriliyani, S., Sari, D. N. A., Riyadi, M. E., Setyorini, A., & Astuti, N. L. S. (2023). Disaster Health Literacy, Risk Perception, and Preparedness towards Resilience in a Volcano-Prone Community: A Cross-Sectional Study in Yogyakarta, Indonesia. *Journal of Community Empowerment for Health*, 6(3), 154–160. <https://doi.org/10.22146/jcoemph.86343>
- Sakurai, M., & Murayama, Y. (2019). Information Technologies and Disaster Management: Benefits and Issues. *Progress in Disaster Science*, 2, 100012. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100012>
- Shaw, R. (2020). Thirty Years of Science, Technology, and Academia in Disaster Risk Reduction and Emerging Responsibilities. *International Journal of Disaster Risk Science*, 11, 414–425. <https://doi.org/10.1007/s13753-020-00264-z>
- Smithsonian Institution. (2024). *Global Volcanism Program: Volcanoes of the World (v. 5.2.2)*. <https://volcano.si.edu/>
- Tilling, R. I. (2008). The Critical Role of Volcano Monitoring in Risk Reduction. *Advances in Geosciences*, 14, 3–11. <https://doi.org/10.5194/adgeo-14-3-2008>

- Toya, H., & Skidmore, M. (2007). Economic Development and the Impacts of Natural Disasters. *Economics Letters*, 94(1), 20–25. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2006.06.020>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*. <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2022). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2022*. <https://www.undrr.org/gar2022>
- van Dijk, J. A. G. M. (2005). *The Deepening Divide: Inequality in the Information Society*. SAGE Publications. <https://doi.org/10.4135/9781452229812>
- World Bank. (2024). *GDP per Capita (Current US\$)*. <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD>
- World Intellectual Property Organization. (2024). *Global Innovation Index 2024*. <https://www.globalinnovationindex.org/>

LAMPIRAN

Lampiran A. 75 Daftar Populasi Negara Vulkanik dan Status Keikutsertaan dalam Sampel Analitik

No	Negara	Jumlah Gunung Berapi	Keterangan	Alasan Eksklusi (jika tidak termasuk)
1	Algeria	3	Termasuk	—
2	Argentina	32	Termasuk	—
3	Armenia	5	Termasuk	—
4	Australia	4	Termasuk	—
5	Azerbaijan	2	Termasuk	—
6	Bolivia	7	Termasuk	—
7	Myanmar	1	Dikeluarkan	Data tidak lengkap pada: NRI Score
8	Cape Verde	2	Termasuk	—
9	Cameroon	3	Termasuk	—
10	Canada	24	Termasuk	—
11	Chad	4	Termasuk	—
12	Chile	90	Termasuk	—
13	China	10	Termasuk	—
14	Colombia	14	Termasuk	—
15	Costa Rica	10	Termasuk	—
16	Djibouti	4	Dikeluarkan	Data tidak lengkap pada: NRI Score

No	Negara	Jumlah Gunung Berapi	Keterangan	Alasan Eksklusi (jika tidak termasuk)
17	Dominica	5	Dikeluarkan	Data tidak lengkap pada: NRI Score
18	Democratic Republic of the Congo	4	Termasuk	—
19	Ecuador	36	Termasuk	—
20	El Salvador	17	Termasuk	—
21	Equatorial Guinea	1	Dikeluarkan	Data tidak lengkap pada: NRI Score
22	Eritrea	8	Dikeluarkan	Data tidak lengkap pada: NRI Score, GDP per Kapita
23	Ethiopia	50	Termasuk	—
24	Fiji	2	Dikeluarkan	Data tidak lengkap pada: NRI Score
25	France	20	Termasuk	—
26	Georgia	2	Termasuk	—
27	Germany	1	Termasuk	—
28	Greece	5	Termasuk	—
29	Grenada	2	Dikeluarkan	Data tidak lengkap pada: NRI Score
30	Guatemala	20	Termasuk	—
31	Honduras	3	Termasuk	—

No	Negara	Jumlah Gunung Berapi	Keterangan	Alasan Eksklusi (jika tidak termasuk)
32	Iceland	35	Termasuk	—
33	India	2	Termasuk	—
34	Indonesia	101	Termasuk	—
35	Iran	1	Termasuk	—
36	Italy	13	Termasuk	—
37	Japan	105	Termasuk	—
38	Jordan	1	Termasuk	—
39	Kenya	21	Termasuk	—
40	Mexico	35	Termasuk	—
41	Mongolia	2	Termasuk	—
42	Netherlands	2	Termasuk	—
43	New Zealand	23	Termasuk	—
44	Nicaragua	13	Termasuk	—
45	Niger	1	Dikeluarkan	Data tidak lengkap pada: NRI Score

No	Negara	Jumlah Gunung Berapi	Keterangan	Alasan Eksklusi (jika tidak termasuk)
46	Dem. People's Republic of Korea	1	Dikeluarkan	Data tidak lengkap pada: NRI Score, GDP per Kapita
47	Norway	2	Termasuk	—
48	Panama	1	Termasuk	—
49	Papua New Guinea	39	Termasuk	—
50	Peru	13	Termasuk	—
51	Philippines	23	Termasuk	—
52	Portugal	13	Termasuk	—
53	Russian Federation	107	Termasuk	—
54	Rwanda	1	Termasuk	—
55	Saint Kitts and Nevis	2	Dikeluarkan	Data tidak lengkap pada: NRI Score
56	Saint Lucia	1	Dikeluarkan	Data tidak lengkap pada: NRI Score

No	Negara	Jumlah Gunung Berapi	Keterangan	Alasan Eksklusi (jika tidak termasuk)
57	Saint Vincent and the Grenadines	1	Dikeluarkan	Data tidak lengkap pada: NRI Score
58	Samoa	2	Dikeluarkan	Data tidak lengkap pada: NRI Score
59	Saudi Arabia	8	Termasuk	—
60	Solomon Islands	7	Dikeluarkan	Data tidak lengkap pada: NRI Score
61	South Africa	2	Termasuk	—
62	Republic of Korea	2	Termasuk	—
63	Spain	8	Termasuk	—
64	Sudan	4	Dikeluarkan	Data tidak lengkap pada: NRI Score
65	Syrian Arab Republic	1	Dikeluarkan	Data tidak lengkap pada: NRI Score, GDP per Kapita
66	Tanzania	5	Termasuk	—
67	Tonga	21	Dikeluarkan	Data tidak lengkap pada: NRI Score, GDP per Kapita

No	Negara	Jumlah Gunung Berapi	Keterangan	Alasan Eksklusi (jika tidak termasuk)
68	Turkey	7	Termasuk	—
69	Uganda	2	Termasuk	—
70	Comoros	2	Dikeluarkan	Data tidak lengkap pada: NRI Score
71	United Kingdom	14	Termasuk	—
72	United States	165	Termasuk	—
73	Vanuatu	14	Dikeluarkan	Data tidak lengkap pada: NRI Score
74	Vietnam	2	Termasuk	—
75	Yemen	10	Dikeluarkan	Data tidak lengkap pada: GDP per Kapita

Sumber: Smithsonian Institution Global Volcanism Program (GVP), diolah oleh peneliti.

Keterangan: Sampel analitik akhir terdiri dari 55 negara setelah eksklusi 20 negara berdasarkan kriteria kelengkapan data indeks (NRI, WRI, GII, INFORM, GDP).

Jumlah gunung berapi Jepang (118) mencakup 13 gunung di Kepulauan Kuril yang dalam database GVP tercatat sebagai wilayah yang diadministrasikan Rusia; angka yang digunakan dalam analisis adalah 105.