

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia secara geografis merupakan negara tropis yang memiliki dua pergantian musim utama, yaitu kemarau dan penghujan [1]. Dengan kondisi iklim ini, Indonesia sering mengalami bencana hidrometeorologi di berbagai wilayah. Hal ini tercermin dari data Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) yang mencatat 3.472 kali kejadian bencana sepanjang tahun 2024, di mana bencana hidrometeorologi masih yang paling dominan terjadi [2]. Sepanjang tahun 2024, Provinsi Jawa Barat mencatat 1.389 kejadian bencana hidrometeorologi, menjadikannya wilayah dengan frekuensi kejadian hidrometeorologi yang sangat tinggi di Indonesia [3].

Bencana hidrometeorologi adalah bencana yang disebabkan oleh fenomena cuaca dan iklim ekstrem, meliputi parameter seperti curah hujan tinggi, angin kencang, kekeringan, serta faktor faktor atmosfer lainnya [4]. Fenomena ini merupakan dampak langsung dari ketidakstabilan kondisi iklim dan gangguan siklus hidrologi yang dipicu oleh perubahan lingkungan permukaan bumi [5]. Sebagaimana dinyatakan oleh Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), bencana hidrometeorologi mencakup berbagai jenis kejadian seperti tanah longsor, banjir, banjir bandang, kekeringan, kebakaran hutan, hingga angin puting beliung [6].

Dampak nyata dari bencana alam ini terlihat pada rentetan peristiwa yang baru baru ini melanda Pulau Sumatera, mulai dari banjir bandang di Aceh, Sumatera Utara, hingga Sumatera Barat. Peristiwa tersebut menelan 1.090 korban jiwa dan mengakibatkan 147.236 rumah serta ribuan fasilitas publik termasuk sekolah, jembatan, fasilitas kesehatan, dan rumah ibadah mengalami kerusakan parah [7]. Besarnya kerugian tersebut mencerminkan bahwa mitigasi bencana hidrometeorologi di Indonesia masih sangat minim. Sejalan dengan Prihatin yang menyatakan bahwa bencana sering kali berulang di wilayah yang sama akibat belum adanya langkah perbaikan dan antisipasi yang memadai [8]. Kondisi ini dipertegas oleh data perbandingan antara tahun 2023 dan 2024 [2]. Meskipun jumlah kejadian bencana mengalami penurunan sebesar 35,7% (dari 5.400 menjadi 3.472 kejadian),

dampak negatif yang ditimbulkan justru melonjak secara drastis yakni lebih dari 95% untuk jumlah korban meninggal/hilang dan luka-luka, serta lebih dari 70% untuk jumlah rumah yang mengalami kerusakan [2]. Merujuk pada tren kenaikan dampak tersebut, penguatan mitigasi bencana menjadi krusial untuk menekan risiko kerugian secara signifikan di masa mendatang.

Mitigasi bencana adalah tindakan preventif untuk mengurangi dan membatasi dampak negatif yang ditimbulkan oleh suatu bencana [9]. Melihat sifat iklim yang dinamis, upaya mitigasi bencana menuntut adanya ketersediaan data proyeksi iklim masa depan, sehingga perencanaan preventif dapat disesuaikan dengan skenario perubahan lingkungan yang diprediksi [10], [11]. Namun, data proyeksi iklim yang tersedia secara luas masih berskala global dan beresolusi rendah yang merupakan keluaran dari *General Circulation Models* (GCM) [12].

Keterbatasan resolusi spasial keluaran GCM menyebabkan informasi iklim global sering kali tidak representatif ketika diterapkan pada wilayah kepulauan dengan topografi kompleks seperti Indonesia, sehingga menimbulkan bias yang signifikan dalam analisis dampak lokal [10]. Untuk mengatasi kesenjangan resolusi tersebut, diperlukan penerapan teknik *statistical downscaling*. *Statistical downscaling* adalah pendekatan statistik yang menghubungkan variabel atmosfer berskala global dengan variabel iklim skala lokal [13].

Metode *statistical downscaling* konvensional seperti *Multiple Linear Regression* (MLR) telah banyak diterapkan untuk memodelkan hubungan linier antara variabel atmosfer berskala global dengan variabel iklim skala lokal. Namun, pendekatan ini sering kali memiliki keterbatasan dalam menangkap pola hubungan nonlinier antara variabel data lokal dengan variabel data global [14], [15]. Nonlinieritas ini muncul karena sistem iklim bumi merupakan sistem multidimensi dan multiskala yang kompleks, di mana berbagai proses fisik yang berbeda bekerja pada skala waktu dan spasial yang berbeda pula. Akibatnya, pengabaian terhadap hubungan dinamis antara skala global dan skala lokal ini menyebabkan akurasi prediksi yang dihasilkan oleh model linier menjadi tidak stabil [14]. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, berbagai penelitian terdahulu beralih menerapkan metode *deep learning* non generatif, seperti *Convolutional Neural Networks* (CNN)

[16]. CNN terbukti lebih unggul dalam mengekstraksi fitur spasial dari data iklim dibandingkan metode tradisional seperti MLR maupun *Random Forest* (RF) [16].

Meskipun demikian, penerapan CNN tidak luput dari kendala. Penelitian terdahulu oleh Michel dkk. yang menerapkan CNN untuk *downscaling* statistik kondisi parameter laut berhasil mencapai korelasi tinggi sebesar 0,972 dengan RMSE 27 cm. Namun, penelitian tersebut menghadapi permasalahan *over smoothing* (prediksi terlalu halus), di mana model cenderung meredam variabilitas data. Penggunaan *loss function Mean Squared Error* (MSE) pada arsitektur tersebut menyebabkan bias negatif pada nilai-nilai ekstrem serta penurunan akurasi yang signifikan pada kategori gelombang angin (*wind sea*) yang memiliki dinamika tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun metode berbasis CNN mampu meminimalkan kesalahan rata-rata, metode ini sering gagal mempertahankan detail tekstur untuk data ekstrem [17].

Penelitian terbaru oleh Fan dkk. juga mencatat bahwa model CNN dengan mekanisme *attention* sekalipun masih mengalami *underestimate* (estimasi yang terlalu rendah) terhadap data observasi. Meskipun metode yang diusulkan, seperti *Attention Based Laplacian Pyramid Network* (AttLap), mampu memperbaiki akurasi spasial dan temporal dibandingkan CNN standar, evaluasi terhadap indeks iklim ekstrem menunjukkan selisih nilai yang negatif. Hal ini mengindikasikan bahwa model cenderung memprediksi curah hujan dengan intensitas yang lebih rendah daripada kejadian sebenarnya, terutama pada fenomena presipitasi ekstrem (R95p dan R99p) serta pada periode musim semi dan dingin di mana model gagal menangkap puncak intensitas presipitasi secara penuh [18].

Berdasarkan temuan tersebut, dibutuhkan metode yang dapat menangkap pola hubungan nonlinier antara variabel data lokal dengan variabel data global serta mampu mencegah terjadinya *over smoothing* dan *underestimate*. Penelitian oleh Murukesh dkk. menunjukkan bahwa *Super Resolution Generative Adversarial Networks* (SRGAN) mampu menghasilkan data curah hujan resolusi tinggi yang lebih realistis dibandingkan metode statistik konvensional [19]. Selain itu, Kumar dkk. melaporkan bahwa SRGAN lebih efektif dalam merekonstruksi detail spasial dan mempertahankan intensitas presipitasi dibandingkan model *deep learning* seperti CNN [20]. Penelitian terbaru oleh Liu dkk. melalui pengembangan

Multi Scale SRGAN bahkan menunjukkan peningkatan kemampuan dalam mendeteksi kejadian hujan lebat berintensitas tinggi [21].

Namun demikian, penelitian penelitian tersebut menguji performa SRGAN menggunakan data resolusi rendah sintetis yang diperoleh melalui proses *downsampling* dari data resolusi tinggi [19], [20], [21]. Pendekatan ini belum sepenuhnya merepresentasikan karakteristik data resolusi rendah asli dari *General Circulation Models* (GCM), yang memiliki bias sistematis serta keterbatasan dalam merepresentasikan variabilitas lokal [19], [20].

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengimplementasikan algoritma SRGAN untuk melakukan *statistical downscaling* pada data curah hujan *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) di wilayah Jawa Barat. Proses ini bertujuan untuk mentransformasikan data resolusi rendah asli dari GCM menjadi data resolusi tinggi yang setara dengan *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data version 2* (CHIRPS2), sehingga dapat mengurangi keterbatasan resolusi spasial dan bias serta menghasilkan proyeksi curah hujan yang lebih representatif untuk mendukung analisis mitigasi bencana hidrometeorologi di tingkat regional.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan SRGAN dalam melakukan *statistical downscaling* menggunakan data *low resolution* asli dari model iklim global CMIP6, sehingga dapat memberikan pemahaman yang lebih realistis terhadap performa model dalam aplikasi iklim regional.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan mengimplementasikan model SRGAN untuk melakukan *statistical downscaling* pada data curah hujan CMIP6 agar memiliki resolusi spasial yang setara dengan data CHIRPS2 di wilayah Jawa Barat?
2. Seberapa baik performa model SRGAN dalam merekonstruksi data curah hujan resolusi tinggi dari data proyeksi CMIP6 jika dievaluasi

menggunakan parameter *Root Mean Squared Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan *Pearson Correlation Coefficient* (PCC)?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan mengimplementasikan SRGAN untuk melakukan *statistical downscaling* pada data curah hujan CMIP6 sehingga menghasilkan data curah hujan dengan resolusi spasial yang lebih tinggi dan karakteristik yang mendekati data observasi CHIRPS2 di wilayah Jawa Barat.
2. Mengevaluasi tingkat akurasi hasil rekonstruksi curah hujan yang dihasilkan oleh model SRGAN terhadap data CHIRPS2 menggunakan parameter RMSE, MAE, dan PCC, serta menilai potensinya sebagai informasi pendukung dalam analisis mitigasi bencana hidrometeorologi pada skala regional.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki sejumlah batasan agar ruang lingkup penelitian tetap terarah sesuai dengan tujuan, yaitu sebagai berikut:

1. Penelitian ini berfokus pada implementasi dan evaluasi arsitektur SRGAN. Penelitian ini tidak melakukan perbandingan performa dengan metode *downscaling* lain.
2. Model difungsikan secara terbatas pada *downscaling*. Penelitian ini tidak mencakup tugas *forecasting* (prediksi/peramalan) curah hujan di masa depan.
3. Objek penelitian secara spesifik adalah data curah hujan di Jawa Barat. Penelitian ini tidak mencakup variabel iklim lain seperti suhu, kelembaban, kecepatan angin, atau radiasi matahari.
4. Data temporal yang digunakan dalam penelitian ini dibatasi hingga tahun 2014. Hal ini dikarenakan batas akhir dari rentang data skenario historis pada CMIP6 hanya tersedia hingga tahun 2014 (sebelum beralih ke skenario proyeksi masa depan).

1.5 Manfaat

Penelitian tugas akhir ini diharapkan memberikan beberapa manfaat, antara lain:

1.5.1 Bagi Literatur

Penelitian ini akan memberikan manfaat bagi literatur, di antaranya:

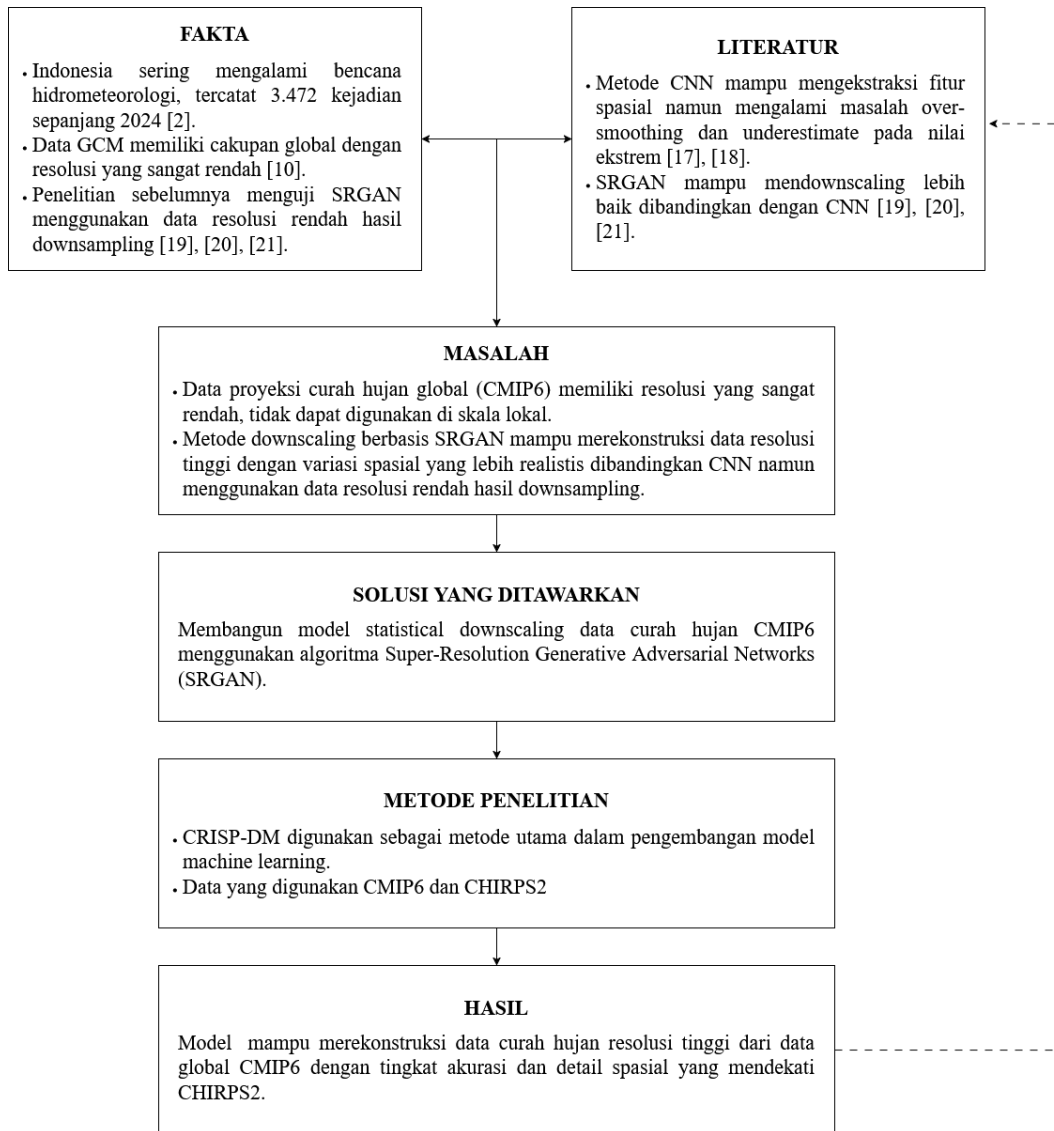
1. Mendorong pengembangan riset yang menggabungkan *Artificial Intelligence* dengan ilmu lingkungan (*Climate Science*), khususnya dalam teknik *statistical downscaling*.
2. Menjadi referensi ilmiah mengenai efektivitas algoritma SRGAN dalam merekonstruksi data curah hujan CMIP6.
3. Memperkaya literatur mengenai pemanfaatan data CMIP6 dan CHIRPS2 untuk wilayah dengan topografi kompleks seperti Indonesia.

1.5.2 Bagi Operasional

1. Menyediakan cara untuk menyediakan data proyeksi curah hujan masa depan dengan resolusi tinggi yang dapat digunakan sebagai acuan dalam perencanaan mitigasi bencana hidrometeorologi pada skala lokal.
2. Membantu pembuat kebijakan dalam merumuskan strategi adaptasi perubahan iklim yang lebih presisi hingga ke tingkat regional, guna meminimalkan risiko korban jiwa dan kerugian materiil.
3. Meningkatkan ketersediaan informasi iklim yang akurat untuk mendukung sektor sektor vital lainnya, seperti pertanian dan tata kelola sumber daya air pada skala lokal.

1.6 Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran ini menggambarkan alur penelitian berdasarkan fakta, literatur, masalah, solusi, metodologi yang digunakan, hingga hasil yang diharapkan dalam penelitian ini.



Gambar 1.1 Kerangka Berpikir

Gambar 1.1 menunjukkan kerangka berpikir penelitian yang disusun berdasarkan hubungan antara fakta empiris, temuan literatur, permasalahan yang diidentifikasi, solusi yang diusulkan, serta metode penelitian yang digunakan. Berdasarkan fakta yang ada, Indonesia merupakan negara yang sering mengalami bencana hidrometeorologi. Data BNPB mencatat bahwa sepanjang tahun 2024 terjadi 3.472 kejadian bencana, di mana sebagian besar merupakan bencana hidrometeorologi. Di sisi lain, data iklim global yang dihasilkan oleh GCM memiliki cakupan global namun dengan resolusi spasial yang relatif rendah. Kondisi tersebut menyebabkan informasi iklim yang dihasilkan sering kali kurang representatif ketika digunakan untuk analisis pada skala lokal. Selain itu, beberapa

penelitian sebelumnya yang menerapkan metode SRGAN masih menggunakan data resolusi rendah sintetis yang diperoleh melalui proses *downsampling* dari data resolusi tinggi.

Dari sisi literatur, metode CNN diketahui mampu mengekstraksi fitur spasial dari data iklim secara efektif. Namun demikian, beberapa penelitian melaporkan bahwa model CNN masih mengalami permasalahan *over smoothing* dan *underestimate* pada nilai ekstrem. Sementara itu, penelitian lain menunjukkan bahwa metode SRGAN mampu melakukan proses *downscaling* secara lebih baik dibandingkan CNN karena mampu mempertahankan detail spasial dan variabilitas curah hujan secara lebih realistis.

Berdasarkan fakta dan temuan literatur tersebut, permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini adalah bahwa data proyeksi curah hujan global dari CMIP6 memiliki resolusi spasial yang rendah sehingga tidak dapat langsung digunakan untuk analisis pada skala regional. Selain itu, metode *downscaling* berbasis SRGAN yang telah dikembangkan sebelumnya umumnya masih menggunakan data resolusi rendah hasil *downsampling*, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan karakteristik data resolusi rendah asli dari model iklim global.

Sebagai solusi atas permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan pembangunan model *statistical downscaling* data curah hujan CMIP6 menggunakan algoritma SRGAN. Model ini diharapkan mampu merekonstruksi data resolusi tinggi dengan variasi spasial yang lebih realistis dibandingkan metode sebelumnya.

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Cross Industry Standard Process for Data Mining* (CRISP-DM) sebagai kerangka utama dalam pengembangan model *machine learning*. Dataset yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data proyeksi iklim CMIP6 sebagai data resolusi rendah dan data observasi CHIRPS2 sebagai referensi resolusi tinggi.

Melalui pendekatan tersebut, hasil yang diharapkan dari penelitian ini adalah SRGAN mampu merekonstruksi data curah hujan resolusi tinggi dari data global CMIP6 dengan tingkat akurasi serta detail spasial yang mendekati data observasi CHIRPS2.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan memuat sistematika penulisan laporan tugas akhir dengan memberikan gambaran kandungan setiap bab, urutan penulisan, serta keterkaitan antara satu bab dengan bab lainnya dalam sebuah laporan tugas akhir. Berikut sistematika penulisan laporan tugas akhir.

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, kerangka pemikiran penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas literatur atau penelitian sebelumnya, teori teori, model, dan rumus yang menjadi dasar dalam analisis permasalahan terkait topik yang diangkat.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian mencakup penjelasan mengenai langkah langkah dan teknik yang akan diterapkan, disajikan secara sistematis dan terstruktur.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan temuan atau hasil penelitian yang diperoleh dari langkah langkah penelitian yang telah dilaksanakan, serta analisis hasil atau temuan sebagai respons terhadap rumusan masalah penelitian.

BAB V SIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berfokus pada penarikan kesimpulan dari hasil penelitian yang diperoleh serta menjawab pertanyaan penelitian atau rumusan masalah. Selain itu, bab ini juga memberikan saran untuk penelitian selanjutnya yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kualitas penelitian tersebut.