

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Isolator memiliki peranan penting dalam sistem saluran transmisi listrik karena menyediakan isolasi dan menahan saluran transmisi listrik secara mekanis. Isolator juga mendukung saluran transmisi dan mentransmisikan sejumlah daya listrik berkualitas tinggi kepada pengguna [1]. Isolator adalah komponen yang mengisolasi kawat penghantar dengan menara transmisi, agar tidak terjadi hubungan dengan tanah (*ground*) [2].

Saat isolator beroperasi dapat mengalami berbagai tekanan listrik dan panas yang dapat merusak kinerjanya. Deteksi dini kerusakan pada isolator di saluran transmisi diperlukan untuk menjaga keandalan dan keselamatan sistem tenaga listrik [3]. Selain itu, operasi saluran transmisi tegangan tinggi menjamin keamanan jaringan listrik [4]. Oleh karena itu, deteksi kerusakan pada isolator merupakan hal penting dalam inspeksi tenaga listrik, karena kerusakan pada isolator dapat mengganggu operasi sistem tenaga yang berpotensi menyebabkan pemadaman listrik berskala besar dan menyebabkan kerugian secara ekonomi [3].

Kerusakan pada isolator saluran transmisi dapat terjadi akibat berbagai faktor lingkungan maupun degradasi material. Arus bocor pada permukaan isolator yang muncul karena kontaminasi digunakan sebagai indikator degradasi permukaan, tingkat polusi isolasi, dan performa isolator secara keseluruhan [5]. Selain itu, kontaminasi yang menempel pada permukaan isolator dapat bercampur dengan kelembaban dari kabut, hujan, atau embun sehingga membentuk lapisan konduktif yang memungkinkan terjadinya arus bocor dan berpotensi menyebabkan *flashover* [6]. Isolator juga mengalami degradasi karena paparan medan listrik, beban mekanis, perubahan suhu panas dan dingin, serta dalam jangka panjang dapat menyebabkan cacat seperti kerusakan termal, korosi, dan bahaya lainnya [7].

Metode inspeksi manual masih melakukan pengukuran langsung di lokasi dan memiliki beberapa kekurangan. Pertama, metode ini bersifat subjektif karena sangat bergantung pada penilaian individu inspektur. Kedua, proses inspeksi

manual mengandung risiko keselamatan tinggi bagi petugas yang harus bekerja di ketinggian dan dekat dengan jalur bertegangan tinggi [1]. Ketiga, inspeksi manual membutuhkan waktu yang lama terutama untuk jaringan transmisi yang membentang luas. Keempat, sulit untuk melakukan inspeksi secara rutin dan menyeluruh pada jaringan transmisi yang tersebar di berbagai lokasi. Tantangan semakin bertambah ketika inspeksi dilakukan menggunakan citra udara. Faktor-faktor seperti kondisi cuaca yang tidak menentu dalam upaya mengidentifikasi proses inspeksi. Kondisi-kondisi ini membuat deteksi kerusakan isolator secara otomatis mendesak untuk dikembangkan [1].

Dalam beberapa tahun terakhir telah terjadi inovasi dalam inspeksi pada saluran transmisi, yaitu menggunakan UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) atau kendaraan udara tanpa awak. UAV telah menjadi solusi yang banyak digunakan untuk inspeksi di saluran transmisi listrik dengan biaya rendah dan fleksibilitas tinggi [8]. Peralihan dari inspeksi manual menjadi inspeksi menggunakan drone (UAV) membuat proses inspeksi dapat dilakukan secara otomatis sehingga meningkatkan keselamatan petugas dan mengurangi hambatan yang disebabkan oleh kondisi medan di lapangan [8]. Inspeksi berbasis UAV memungkinkan pemeriksaan yang biasanya memakan banyak waktu dan harus dilakukan secara manual menjadi lebih efisien, karena digitalisasi melalui UAV tidak hanya mempercepat proses tetapi mempermudah pekerjaan [9].

Isolator tegangan tinggi pada saluran transmisi dapat diklasifikasikan berdasarkan kondisi permukaannya menggunakan metode berbasis citra (*computer vision* atau *image processing*) [10]. Kondisi isolator yang terkontaminasi atau bersih dapat dibedakan dengan mengolah citra isolator, metode ini melakukan ekstraksi fitur kontaminasi permukaan melalui teknik pengolahan citra dan kemudian mengklasifikasikannya dengan jaringan neural, sehingga menunjukkan bahwa klasifikasi kondisi isolator dapat di otomatisasi berdasarkan karakteristik citra [11].

Sejumlah teknik *machine learning* dan *deep learning* telah dikembangkan untuk mendeteksi atau mengklasifikasikan kerusakan pada isolator di saluran transmisi seperti metode deteksi objek + segmentasi + klasifikasi multi-kelas

(menggunakan model dua-tahap dengan segmentasi insulator lalu klasifikasi kondisi: sehat, patah, terbakar/terkorosi, atau *missing cap*) [12], deteksi objek *deep learning* dengan kombinasi segmentasi morfologis (menggunakan Faster RCNN diikuti segmentasi dan transformasi bentuk citra isolator untuk mendeteksi cacat) [10], deteksi menggunakan jaringan ringan (*lightweight network*) dengan augmentasi citra, segmentasi, dan model YOLOv4 *bantuan computer vision* [13], *Convolutional Neural Network* (CNN) [14], YOLOv5 [15], Cascade R-CNN (dengan backbone ResNeXt-101 + FPN)[16].

Convolutional Neural Network (CNN) merupakan salah satu metode *deep learning* yang digunakan untuk memproses inputan data gambar, menentukan kepentingan (bobot dan bias yang dapat dipelajari) ke berbagai aspek dalam gambar dan berfungsi untuk membedakan objek satu dengan objek lainnya. CNN adalah salah satu jenis arsitektur *neural network* yang biasa digunakan pada data *image* [17]. CNN umumnya terdiri atas dua komponen utama, yaitu *feature learning* dan *classification layer*. Pada tahap *feature learning*, citra dimasukkan ke jaringan dan diproses melalui rangkaian lapisan konvolusi serta pooling untuk menghasilkan *feature maps* yang merepresentasikan karakteristik penting dari gambar. Hasil ekstraksi fitur ini kemudian diteruskan ke tahap klasifikasi, di mana fitur diubah menjadi vektor melalui proses *flatten* dan diproses oleh beberapa lapisan *fully connected* hingga menghasilkan keluaran berupa prediksi atau nilai akurasi untuk setiap kelas [17].

Arsitektur CNN dapat digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi isolator pada saluran transmisi dengan memanfaatkan data citra hasil inspeksi. Metode inspeksi konvensional sering memiliki keterbatasan dari segi akurasi dan konsistensi dalam mendeteksi kerusakan isolator, maka penerapan arsitektur CNN ini menjadi solusi yang lebih efektif untuk meningkatkan ketepatan proses klasifikasi.

Berdasarkan latar belakang tersebut, klasifikasi kondisi isolator pada saluran transmisi menjadi sangat penting untuk menjaga keandalan dan keselamatan sistem tenaga listrik. Penelitian ini melakukan klasifikasi kondisi isolator menggunakan arsitektur *Convolutional Neural Network* (CNN) berbasis

citra. Pendekatan ini dipilih untuk mempermudah proses identifikasi kerusakan isolator dan meningkatkan akurasi dibandingkan metode inspeksi manual maupun metode berbasis citra konvensional. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengevaluasi model CNN berdasarkan enam kelas, yaitu kaca bersih, kaca polutan, keramik bersih, keramik korosi, keramik polutan, dan keramik korosi+polutan. Selain itu, model CNN yang telah dirancang diimplementasikan ke dalam website menggunakan *framework* Gradio pada platform Hugging Face *Spaces* sehingga pengguna dapat melakukan proses klasifikasi citra isolator melalui website.

1.2. Tinjauan Penelitian Terdahulu

Tinjauan penelitian terdahulu dilakukan untuk menegaskan keaslian penelitian, mencegah plagiarisme, memunculkan ide-ide baru, dan membandingkan dengan penelitian sebelumnya. Tabel 1.1 menyajikan daftar pustaka dari penelitian serupa yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya.

Tabel 1. 1 Tinjauan penelitian terdahulu.

NO	Judul	Peneliti	Tahun
1	<i>Accurate Surface Condition Classification of High Voltage Insulators based on Deep Convolutional Neural Networks</i>	Arallym Serikbay, Mahdi Bagheri, Amin Zollanvari, dan B. T. Phung.	2021
2	<i>CNN-based Classification of Contaminated High Voltage Insulator Surface</i>	Arallym Serikbay, Mahdi Bagheri, Amin Zollanvari dan Aiman A. Sanskhimov.	2022
3	Metode Pohon Keputusan Untuk Identifikasi <i>Insulator Flashover</i> Dengan Pengolahan Citra Digital	Ady Murdianto, Abd. Rabi, Resi Dwi Jayanti Kartika Sari.	2023
4	Implementasi Jaringan Saraf Tiruan - <i>Backpropagation</i> dalam Pengenalan <i>Flashover</i> pada Isolator	M. Farhan Kamil, Sitti Amaliah, Yosepti Woran, Andi Syofian, Erhaneli.	2023
5	<i>Ensemble Pretrained Convolutional Neural Networks for the Classification of</i>	Arallym Serikbay, Mehdi Bagheri, Amin Zollanvari,	2024

NO	Judul	Peneliti	Tahun
	<i>Insulator Surface Conditions</i>	dan B. T. Phung.	

Penelitian oleh Serikbay et al, [18] berfokus pada pengembangan sistem klasifikasi kondisi permukaan isolator tegangan tinggi menggunakan metode *deep learning* khususnya *Convolutional Neural Network* (CNN) dengan memanfaatkan dataset yang berisi 4.500 citra isolator kaca, keramik, dan silikon dalam 6 kondisi permukaan yang berbeda (bersih, tanah, semen, tetesan air, basah+tanah, basah+semen). Studi ini menggunakan pendekatan pemilihan model secara sistematis melalui pencarian *brute-force* terhadap berbagai kombinasi *hyperparameter* CNN serta membandingkan performanya dengan beberapa arsitektur pra-latih (*transfer learning*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa arsitektur "Starting CNN" yang dirancang peneliti mampu memberikan akurasi validasi tertinggi (98,53%) dan kinerja lebih baik daripada model pra-latih, serta dapat direduksi kompleksitasnya menjadi tiga kali lebih saingan melalui *planning* tanpa penurunan akurasi yang signifikan. Keunikan penelitian ini terletak pada pembuatan dataset yang komprehensif eksplorasi menyeluruh terhadap ruang *hyperparameter*, serta analisis ketahanan model terhadap perbedaan kondisi pencahayaan (siang vs senja) sehingga memberikan gambaran nyata mengenai performa model dalam situasi lapangan.

Penelitian oleh Serikbay et al, [19] berfokus pada klasifikasi jenis kontaminasi permukaan isolator tegangan tinggi dengan memanfaatkan citra UAV dan arsitektur *Convolutional Neural Network* (CNN). Studi Ini menggunakan dataset berisi 7.200 citra isolator dengan 6 kelas kontaminasi (bersih, kontaminasi debu, salju, dan tetesan air) yang dikumpulkan melalui drone dan diperluas dengan teknik *data augmentation*. Melalui pendekatan *grid search hyperparameter tuning* serta perbandingan dengan beberapa *pre-trained* CNN seperti MobileNetV2, InceptionV3, VGG19, penelitian ini menunjukkan bahwa arsitektur CNN yang dibangun sendiri (ConvNet) mencapai akurasi tertinggi sebesar 95,5%, melebihi performa model *pre-trained*. Tetapi, penelitian ini memiliki keterbatasan karena hanya mampu mengklasifikasikan jenis kontaminasi tanpa mengukur tingkat keparahan (*severity*) dan tidak mempertimbangkan latar

belakang gambar yang kompleks atau kondisi lingkungan nyata secara variatif. Keunikan penelitian ini adalah fokus eksklusif pada klasifikasi kontaminasi permukaan (bukan deteksi lokasi atau *fault localization*), penggunaan dataset baru yang lebih besar, serta pengembangan model CNN *custom* yang dirancang khusus untuk efisiensi penyimpanan dan kinerja pada perangkat terbatas.

Penelitian oleh Murdianto et al, [20] membahas identifikasi *flashover* pada isolator menggunakan pengolahan citra digital dengan fokus utama pada penentuan tingkat kerusakan (rendah, sedang, tinggi) melalui perhitungan rasio area *flashover*. Metode yang digunakan meliputi segmentasi *Active Contour*, *Circle Hough transform*, serta klasifikasi *Decision Tree*, dan penelitian tersebut berhasil mencapai akurasi 80% dalam mengelompokkan tingkat *flashover* berdasarkan nilai rasio area. Meskipun hasilnya cukup baik, penelitian ini memiliki kekurangan berupa jumlah dataset yang sangat terbatas (30 gambar), kategori citra yang kurang beragam serta ketergantungan pada satu fitur tunggal, yaitu rasio area, sehingga performa model mudah dipengaruhi variasi pencahayaan dan kualitas citra. Aspek pembeda dari penelitian ini adalah penggunaan rasio area sebagai parameter tunggal untuk klasifikasi serta penerapan metode yang relatif sederhana sehingga mudah diimplementasikan di lapangan untuk kebutuhan inspeksi cepat.

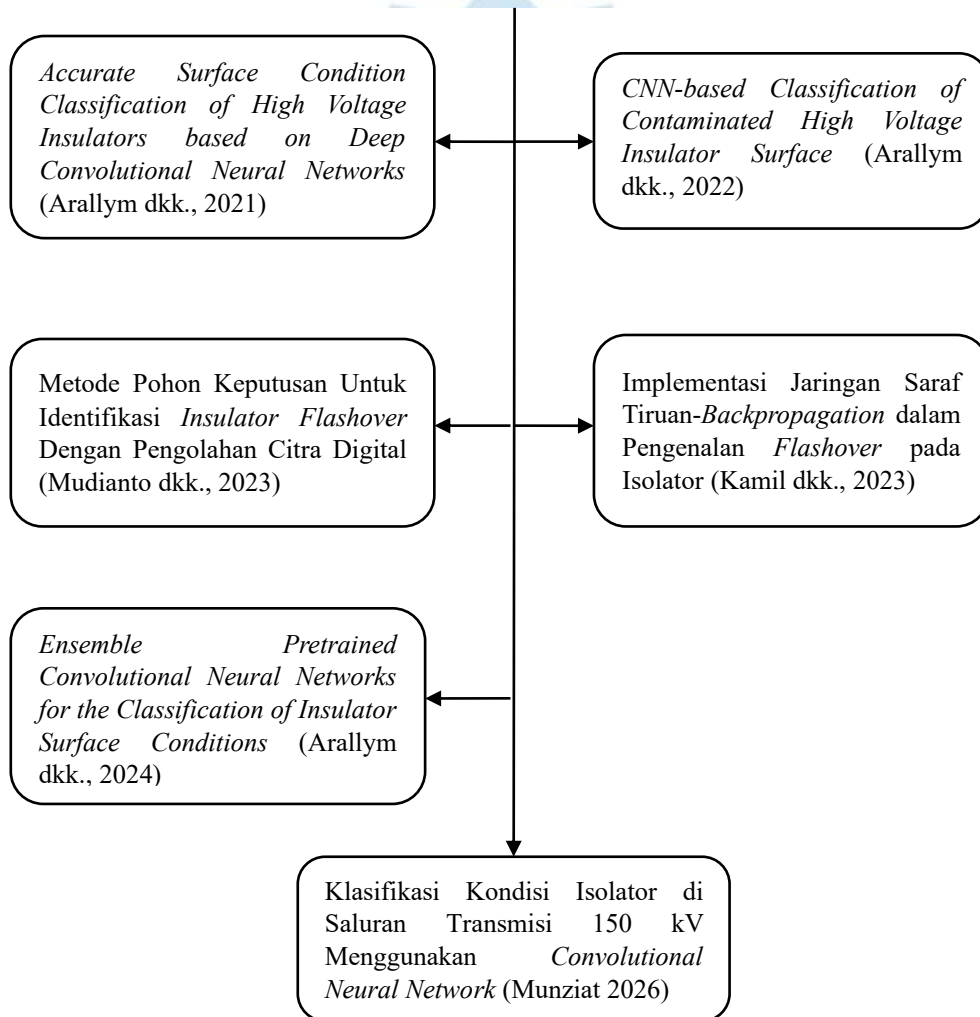
Penelitian oleh Kamil et al, [21] mengusulkan pengenalan nilai tegangan *flashover* 150 kV Payakumbuh-Koto Panjang berdasarkan variabel suhu dan kelembaban dengan menggunakan metode Jaringan Saraf Tiruan (JST) *Backpropagation*. Penelitian ini menghasilkan temuan bahwa JST mampu memprediksi nilai *flashover* dengan selisih *error* yang sangat kecil, baik pada proses pelatihan maupun pengujian, yang menunjukkan bahwa karakteristik *flashover* dapat dipelajari secara efektif oleh model. Meskipun demikian, penelitian ini memiliki kekurangan berupa ukuran dataset yang sangat terbatas, hanya mencakup beberapa sampel isolator berlumut dan berdebu, sehingga generalitas model terhadap kondisi insulator yang lebih beragam belum dapat dijamin. Selain itu, penelitian hanya menggunakan dua fitur input (suhu dan kelembaban), tanpa mempertimbangkan faktor lain seperti tingkat kontaminasi,

kondisi fisik isolator atau parameter lingkungan lainnya yang dapat mempengaruhi *flashover*. Keunikan penelitian ini terletak pada pendekatannya yang mengkombinasikan data eksperimen *flashover* dengan pemodelan JST untuk memprediksi tegangan *breakdown* isolator secara kuantitatif sehingga memberikan alternatif metode evaluasi yang lebih cepat dibandingkan pengujian fisik konvensional.

Selanjutnya, penelitian oleh Serikbay et al, [22] melakukan klasifikasi kondisi permukaan isolator tegangan tinggi meliputi kelas (bersih, air, debu, semen, dan salju) dengan fokus pada pemilihan subnet terbaik dari 7 arsitektur CNN pra-latih dan menggabungkannya menggunakan metode *soft voting ensemble*. Penelitian ini menggunakan dataset eksperimental yang dibuat sendiri berisi 3.752 gambar isolator terdiri dari isolator kaca, keramik, dan polimer, kemudian diperluas menjadi 7.500 gambar melalui augmentasi, tiap model diproses dengan membekukan *convolutional base*, menambahkan *pooling*, serta *dense layer* ber-*softmax*, lalu dievaluasi pada 127 kombinasi model untuk memilih *ensemble* terbaik. Hasil utama menunjukkan bahwa kombinasi VGG16 + EfficientNetB0 memberikan akurasi tertinggi pada data uji ($\pm 93,3\%$) serta analisis tambahan mengungkap sensitivitas performa terhadap variasi pencahayaan (siang dan senja). Kekurangan penelitian ini terletak pada penggunaan data yang sebagian besar dikumpulkan di lingkungan terkontrol dengan kontaminasi buatan dan jumlah citra industri nyata yang sangat terbatas, sehingga validasi lapangan yang lebih luas masih diperlukan. Keunikan studi ini adalah penyusunan dataset multi-material dan multi-kontaminan yang belum tersedia sebelumnya, serta pendekatan *ensemble* model-subnet *selection* yang tidak menggunakan strategi menggabungkan beberapa model terbaik, sehingga mampu menggabungkan kekuatan berbagai ekstraktor fitur CNN secara lebih efektif.

Berdasarkan Tabel 1.1, penelitian mengenai klasifikasi kondisi isolator berbasis citra telah banyak dilakukan dengan berbagai metode kecerdasan buatan. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada jenis isolator atau kondisi permukaan tertentu. Posisi penelitian ini berada pada pengembangan model klasifikasi kondisi permukaan isolator tegangan tinggi menggunakan arsitektur

Convolutional Neural Network ke dalam enam kelas, yaitu kaca bersih, kaca polutan, keramik bersih, keramik korosi, keramik polutan, dan keramik korosi+polutan. Mengacu pada penelitian Serikbay *et al.* [18], penelitian ini menggunakan arsitektur *Convolutional Neural Network* untuk mengklasifikasikan kondisi isolator berdasarkan citra serta mengimplementasikan model yang telah dirancang ke dalam website menggunakan *framework* Gradio pada platform Hugging Face Spaces guna mempermudah proses klasifikasi citra isolator. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berfokus pada perancangan dan evaluasi model CNN, tetapi juga pada implementasi model agar lebih mudah digunakan dalam proses klasifikasi kondisi isolator.



Gambar 1. 1 Hubungan penelitian.

1.3. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana rancangan dan implementasi model *Convolutional Neural Network* (CNN) berbasis citra untuk mengklasifikasikan kondisi isolator ke dalam enam kelas, yaitu kaca bersih, kaca polutan, keramik bersih, keramik korosi, keramik polutan, dan keramik korosi+polutan?
2. Bagaimana kinerja model CNN dalam mengklasifikasikan kondisi isolator berbasis citra serta bagaimana hasil klasifikasi yang diperoleh pada masing-masing kelas kondisi isolator?

1.4. Tujuan

Tujuan penelitian penting untuk menggambarkan tindakan yang diambil dalam penelitian ini. Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan mengimplementasikan model klasifikasi kondisi isolator berbasis citra menggunakan arsitektur CNN.
2. Mengevaluasi kinerja model CNN dalam mengklasifikasikan kondisi isolator berbasis citra serta menganalisis hasil klasifikasi yang diperoleh.

1.5. Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah mengembangkan model klasifikasi kondisi isolator berbasis *deep learning* yang mampu mengidentifikasi kondisi isolator berdasarkan citra. Model yang dihasilkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan teknologi inspeksi isolator berbasis citra serta mendukung penelitian lanjutan dalam penerapan pemeliharaan berbasis kondisi (*Condition Based Maintenance*) pada saluran transmisi. Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1.5.1. Manfaat Akademis

Penelitian ini memberikan kontribusi akademis berupa pengembangan model CNN untuk klasifikasi kondisi isolator berbasis citra pada saluran transmisi 150 kV. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkaya referensi dan menjadi bahan rujukan bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan pemanfaatan

deep learning dalam inspeksi dan pemantauan kondisi isolator.

1.5.2. Manfaat Praktis

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan teknologi inspeksi isolator berbasis citra pada saluran transmisi 150 kV. Model klasifikasi yang dihasilkan telah diimplementasikan ke dalam website untuk mempermudah proses identifikasi kondisi isolator berdasarkan citra pada saluran transmisi 150 kV.

1.6. Batasan Masalah

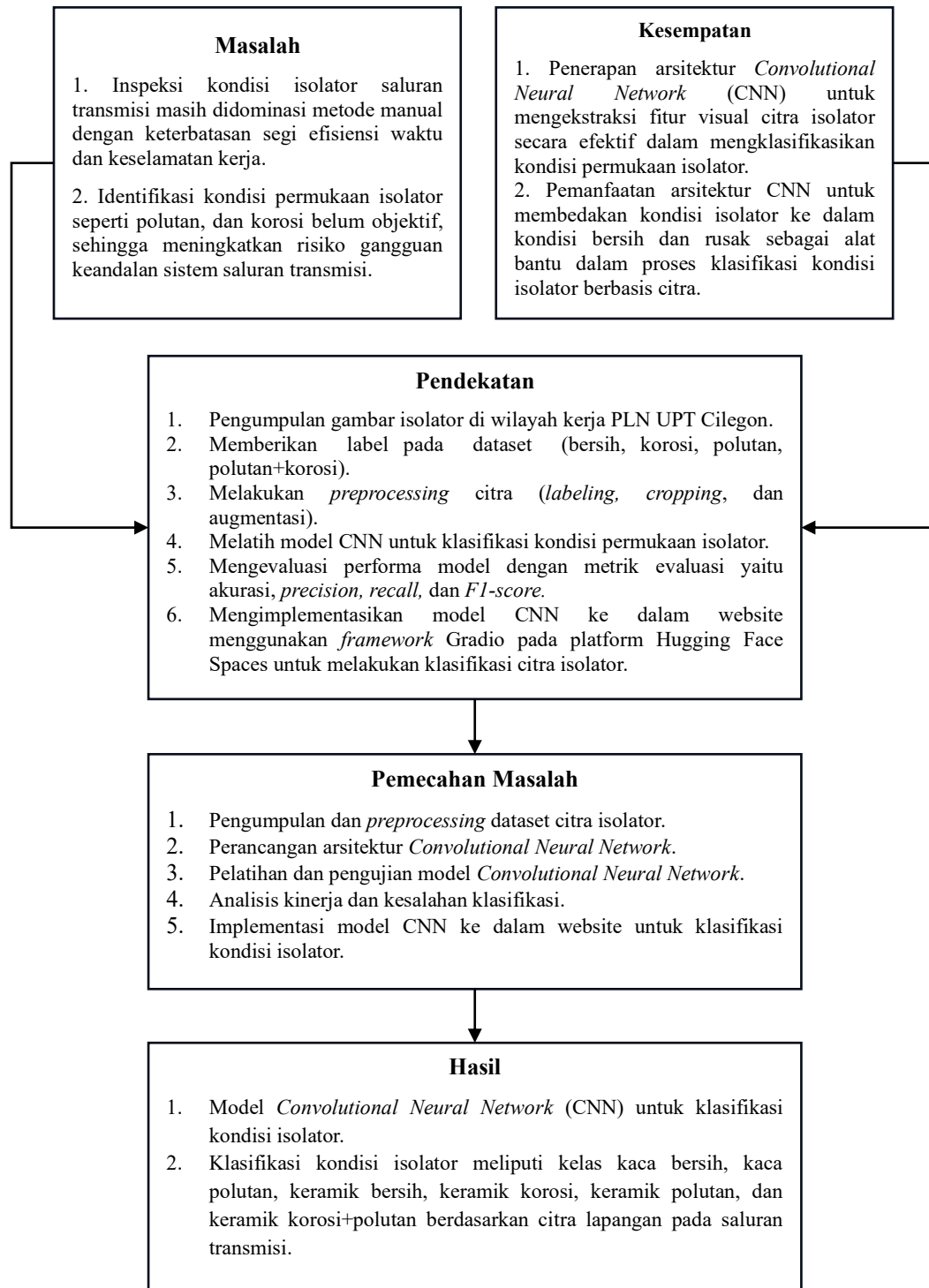
Ruang lingkup penelitian ini mencakup pengolahan citra dan klasifikasi kondisi isolator pada saluran transmisi 150 kV menggunakan arsitektur *Convolutional Neural Network* (CNN). Agar penelitian lebih terarah dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan, maka ditetapkan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

- i Menggunakan *software Google Colab* untuk menjalankan arsitektur CNN.
- ii Dataset citra isolator yang digunakan diperoleh dari wilayah kerja PLN UPT Cilegon.
- iii Kondisi isolator yang dikaji meliputi isolator bersih, polutan, korosi, dan korosi+polutan.
- iv Klasifikasi dilakukan terhadap enam kelas, yaitu kaca bersih, kaca polutan, keramik bersih, keramik korosi, keramik polutan, dan keramik korosi+polutan.
- v Implementasi model dibatasi pada penyajian hasil klasifikasi kondisi isolator melalui website sebagai media penggunaan model CNN.
- vi Website tidak dilengkapi dengan fitur penyimpanan data hasil klasifikasi maupun riwayat penggunaan ke dalam basis data (*database*).

1.7. Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir adalah struktur yang menggambarkan cara berpikir secara sistematis, merangkum informasi yang muncul dari perumusan masalah penelitian, dan menguraikan langkah-langkah penelitian secara logis, dengan tujuan untuk mengejar suatu solusi atau jawaban terhadap masalah yang ada.

Kerangka pemikiran penelitian ini dijelaskan pada Gambar 1.2.



Gambar 1. 2 Kerangka berpikir penelitian.

1.8. Sistematika Penulisan

Tugas akhir ini disusun dengan enam bab yang masing-masing memiliki penguraian spesifik. Setiap bab dalam tugas akhir ini dijelaskan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang masalah, penelitian terkait, rumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan masalah, kerangka berpikir dan sistematika penulisan.

BAB II TEORI DASAR

Bab ini membahas teori-teori yang mendukung penelitian, meliputi isolator pada saluran transmisi, jenis-jenis kondisi kerusakan isolator, dasar-dasar pengolahan citra digital, *Convolutional Neural Network (CNN)*, *transfer learning* menggunakan MobileNetV2, metode evaluasi kinerja model, serta teori mengenai Hugging Face sebagai platform implementasi model.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metodologi penelitian yang meliputi tahapan penelitian, pengumpulan dan pengolahan dataset, perancangan arsitektur CNN, proses pelatihan dan pengujian model, implementasi model ke dalam website menggunakan *framework* Gradio, serta kebutuhan fungsional dan nonfungsional.

BAB IV PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI

Bab ini berisi penjelasan mengenai persiapan data, *preprocessing* data, perancangan arsitektur CNN, perancangan website menggunakan *framework* Gradio, serta implementasi model CNN ke dalam website untuk melakukan klasifikasi kondisi isolator pada saluran transmisi 150 kV.

BAB V HASIL DAN ANALISIS

Bab ini menyajikan hasil pelatihan dan pengujian model CNN, analisis performa model menggunakan metrik *accuracy*, *precision*, *recall*, dan *F1-score*, analisis *confusion matrix*, validasi ahli, serta pengujian implementasi model pada website.

BAB VI PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil penelitian serta saran yang dapat digunakan sebagai acuan untuk pengembangan penelitian selanjutnya.