

BAB III

METODE PENELITIAN

1.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk mengevaluasi kinerja model *Modified Super-Resolution Generative Adversarial Network* (MSRGAN) dalam meningkatkan resolusi gambar yang dikirimkan melalui jaringan *long range* (LoRa) untuk aplikasi kendaraan listrik otonom. Eksperimen meliputi eksplorasi variasi jumlah kapsul mulai dari 32, 64, dan 128, serta dimensi kapsul berjumlah 16 dan 32 pada *generator*. Selanjutnya dilakukan eksplorasi arsitektur residual maupun non-residual, seperti U-Net, *attention mechanism*, dan *fully convolutional networks* (FNCs), serta analisis pengaruh variasi *loss function perceptual* yang memanfaatkan model *pretrained* seperti VGG19, InceptionV3, MobileNet, EfficientNet, Xception, dan Vision Transformer terhadap kualitas gambar yang dihasilkan. Model MSRGAN beserta variasi modifikasinya diuji menggunakan metrik *Peak Signal-to-Noise Ratio* (PSNR) dan *Structural Similarity Index Measure* (SSIM) untuk mengevaluasi kemampuan menghasilkan gambar beresolusi tinggi dalam keterbatasan *data rate* jaringan LoRa.

1.2 Lingkungan Komputasi

Untuk melaksanakan eksperimen ini, diperlukan lingkungan komputasi yang memadai, yang terdiri dari:

1. GPU NVIDIA RTX 3080 Ti, 12GB VRAM
2. CPU Intel® Core™ i7-10700F
3. RAM 32GB

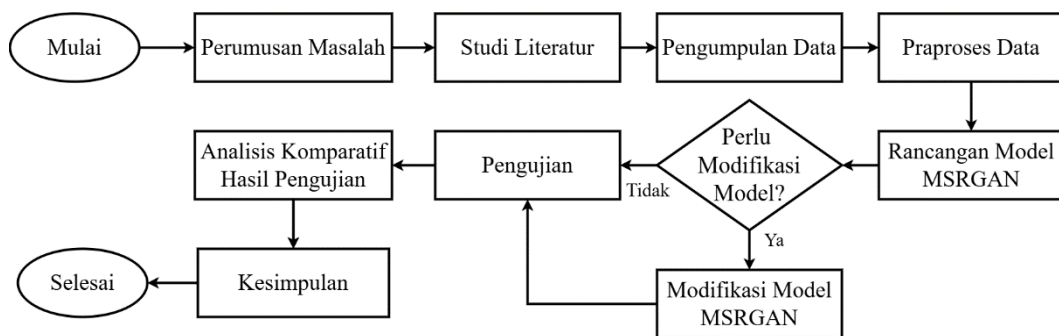
Adapun perangkat lunak yang digunakan yaitu:

1. Microsoft Windows 11
2. Visual Studio Code

Bahasa pemrograman yang akan digunakan pada penelitian ini adalah bahasa pemrograman Python versi 3.10.

1.3 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui sejumlah tahapan terstruktur untuk mencapai tujuan yang telah ditetapkan. Gambar 3.1 menyajikan diagram alur tahapan penelitian yang dilakukan.



Gambar 3. 1 Tahapan Penelitian

1.3.1 Perumusan Masalah

Penelitian ini diawali dari permasalahan pengiriman gambar beresolusi tinggi melalui jaringan dengan *data rate* yang terbatas. Tantangan utama yang dihadapi adalah bagaimana meningkatkan kualitas gambar di sisi penerima tanpa menghambat proses transmisi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan metode peningkatan resolusi gambar yang efisien guna mengatasi kendala tersebut.

1.3.2 Studi Literatur

Studi literatur dalam penelitian ini berfokus pada teori, konsep, dan penelitian sebelumnya yang relevan dengan transmisi gambar melalui LoRa, terutama dalam menghadapi keterbatasan *data rate*. Kajian ini mencakup eksplorasi teknologi LoRa dan tantangan dalam mentransmisikan gambar beresolusi tinggi.

Untuk mengatasi kendala tersebut, penelitian ini mendalami konsep super-resolusi berbasis SRGAN sebagai pendekatan inovatif yang memanfaatkan pembelajaran *adversarial* antara *generator* dan *discriminator*. Selain itu, penelitian ini mengintegrasikan *Capsule Network* (CapsNet) dalam SRGAN untuk meningkatkan pemahaman model terhadap hubungan spasial dalam gambar.

Studi ini juga membandingkan arsitektur residual dan non-residual serta mengevaluasi penerapan *perceptual loss function* yang memanfaatkan model *pretrained* seperti VGG19, InceptionV3, MobileNet, EfficientNet, Xception, dan Vision Transformer. Penelitian sebelumnya yang mendukung pengembangan SRGAN digunakan sebagai referensi untuk menilai efektivitas teknik ini dalam aplikasi praktis, seperti kendaraan listrik otonom.

Literatur yang digunakan mencakup buku, jurnal ilmiah, dan artikel konferensi internasional yang relevan, sehingga memberikan landasan teoritis yang kuat bagi penelitian ini.

1.3.3 Pengumpulan Data

Dataset beresolusi 800x800 piksel digunakan dalam penelitian ini diperoleh secara mandiri oleh penulis. Dataset yang dikumpulkan tidak bersifat publik karena mengandung informasi yang berkaitan dengan privasi individu. Proses pengumpulan data dilakukan dengan memilih gambar-gambar yang relevan dan memastikan bahwa setiap gambar memenuhi standar kualitas serta konsistensi resolusi yang diperlukan. Dataset ini terdiri dari 200 gambar yang dirancang untuk mendukung pengembangan model MSRGAN dan diharapkan dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap penelitian dalam meningkatkan kualitas gambar tanpa mengorbankan aspek privasi data.

1.3.4 Praproses Data

Pada tahapan ini dimulai dengan memuat dataset utama. Dataset terdiri dari 200 gambar yang diubah ukurannya menjadi dimensi target sebesar 800x800 piksel dengan tiga saluran warna (RGB). Jumlah maksimum gambar yang digunakan adalah 200 gambar, sesuai dengan parameter yang telah ditentukan. Langkah ini bertujuan untuk menjaga efisiensi proses training tanpa mengurangi kualitas data yang dibutuhkan oleh model. Gambar uji juga dimuat sebagai bagian dari praproses data. Gambar uji berukuran 40x40 piksel sebanyak 25 gambar dengan tiga saluran warna (RGB). Gambar uji bertujuan untuk menguji performa model dalam melakukan peningkatan resolusi gambar. Langkah ini mensimulasikan kondisi

nyata di mana gambar input memiliki resolusi rendah, sebagaimana yang terjadi dalam transmisi data berbasis LoRa pada kendaraan listrik otonom.

Setiap gambar yang dimuat, baik dari dataset utama maupun gambar uji, akan diproses lebih lanjut untuk memastikan kesesuaiannya dengan kebutuhan model. Langkah-langkah ini dirancang untuk mendukung stabilitas *training*, sehingga model dapat bekerja secara optimal dalam menghasilkan output gambar beresolusi tinggi dari input gambar beresolusi rendah.

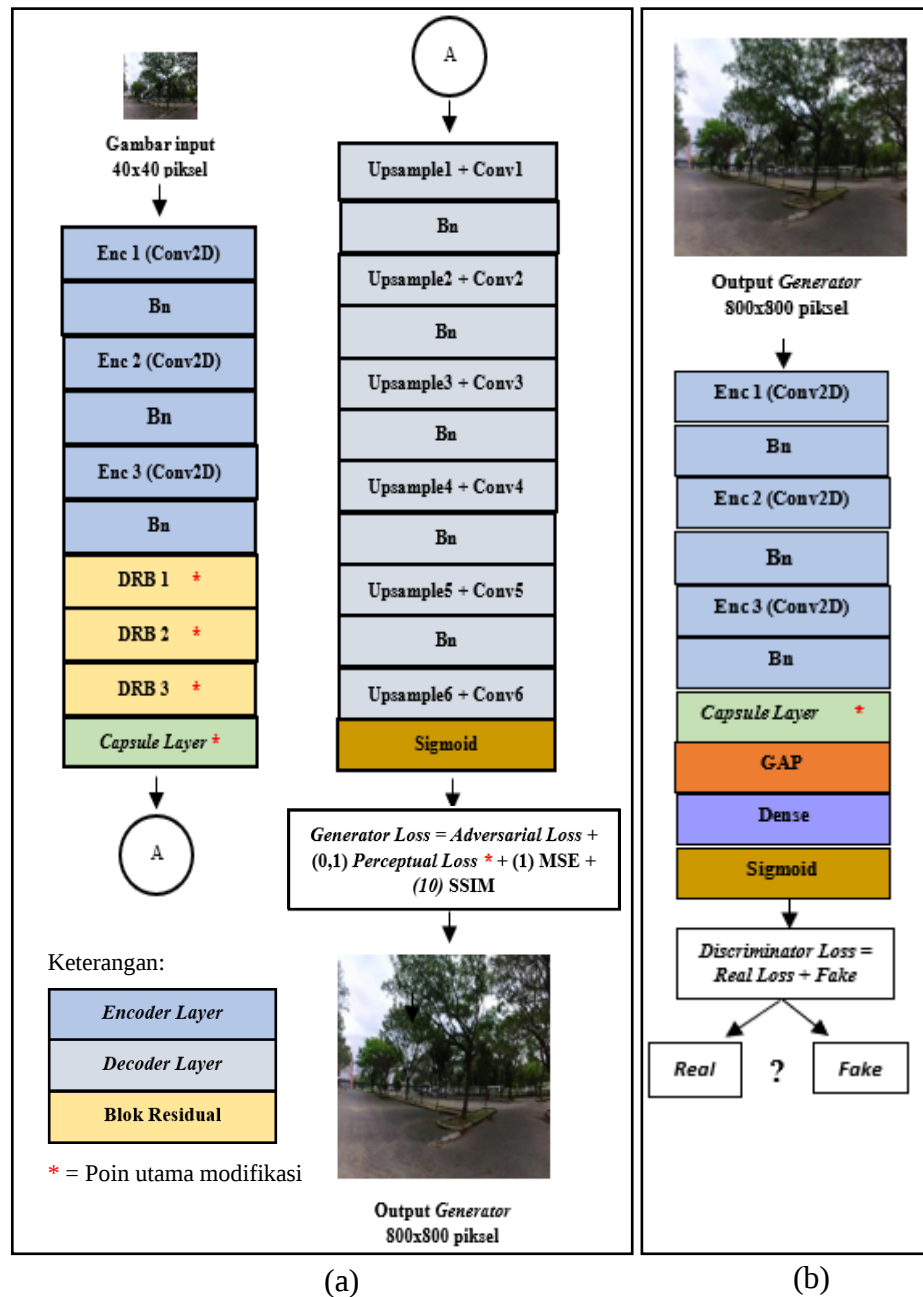
1.3.5 Rancangan Model MSRGAN

Pada Gambar 3.2 menampilkan ilustrasi arsitektur MSRGAN, yang terdiri dari *generator* dan *discriminator*. Arsitektur *generator* pada model MSRGAN dimulai dengan tiga lapisan konvolusi *encoding* yang bertujuan untuk mengekstraksi fitur penting dari gambar input yang beresolusi 40x40 piksel. *Encoder* pertama (Enc 1) mengurangi dimensi gambar dari 40x40x3 menjadi 20x20x64 menggunakan *kernel* 4x4 dan *stride* 2x2, diikuti dengan *Batch Normalization* (BN) untuk menjaga stabilitas selama *training*. Enc 2 dan Enc 3 mengurangi dimensi gambar menjadi 10x10x128 dan 5x5x256, masing-masing dengan peningkatan jumlah filter untuk menangkap fitur yang lebih abstrak dan kompleks.

Setelah tahap *encoding*, *generator* menggunakan *Dense Residual Block* (DRB) yang terdiri dari tiga lapisan, masing-masing dengan 256 *neuron* dan ukuran *kernel* 3x3. Blok residual ini berfungsi untuk mempertahankan informasi penting yang telah diekstraksi melalui mekanisme *skip connections*, yang membantu meningkatkan representasi fitur serta mengatasi masalah *vanishing gradient*. Lapisan kapsul ditambahkan untuk menangkap hubungan spasial yang lebih kompleks antar fitur dalam gambar. Lapisan kapsul terdiri dari 16 kapsul dengan dimensi 8, yang bertujuan untuk mempertahankan informasi spasial penting yang diperlukan dalam rekonstruksi gambar beresolusi tinggi secara akurat.

Untuk mencapai ukuran output 800x800 piksel, *generator* ini menggunakan enam lapisan *upsampling* yang secara bertahap memperbesar dimensi gambar dari 5x5 piksel menjadi 800x800 piksel. Setiap lapisan *upsampling* dilengkapi dengan

konvolusi dan BN untuk meningkatkan kualitas gambar serta menjaga stabilitas *training*. Pada tahap *upsampling* terakhir, digunakan fungsi aktivasi *sigmoid*, yang menghasilkan gambar beresolusi tinggi sesuai dengan gambar asli.



Gambar 3. 2 Ilustrasi Arsitektur MSRGAN
(a) Arsitektur *generator* (b) Arsitektur *discriminator*

Arsitektur *discriminator* pada model ini dirancang untuk melakukan klasifikasi biner, yaitu untuk membedakan apakah gambar yang diberikan merupakan gambar asli atau gambar yang dihasilkan. *Discriminator* dimulai dengan tiga lapisan konvolusi (Conv), yang berfungsi untuk mengurangi ukuran input gambar secara bertahap dan meningkatkan jumlah filter untuk mengekstraksi fitur yang lebih kompleks. Pada lapisan pertama (Conv 1), dimensi gambar dikurangi dari $800 \times 800 \times 3$ menjadi $400 \times 400 \times 64$ menggunakan kernel 4×4 dan stride 2×2 . Pada Conv 2 dan Conv 3, dimensi gambar masing-masing dikurangi menjadi $200 \times 200 \times 128$ dan $100 \times 100 \times 256$. Setiap lapisan Conv diikuti dengan BN untuk menjaga kestabilan selama proses *training* dan mencegah masalah seperti *vanishing gradient*.

Fitur-fitur yang diekstraksi oleh lapisan kapsul dirangkum menggunakan *Global Average Pooling* (GAP), yang menghitung rata-rata setiap fitur pada seluruh area gambar untuk menghasilkan representasi ringkas tanpa kehilangan informasi penting. GAP mempertahankan struktur gambar sekaligus mengurangi dimensi fitur, mempermudah proses klasifikasi. Selanjutnya, lapisan dense dengan aktivasi sigmoid menentukan apakah gambar merupakan asli atau hasil rekonstruksi.

Modifikasi utama dalam arsitektur ini meliputi penggunaan blok residual, lapisan kapsul, serta *perceptual loss function* untuk meningkatkan kualitas gambar yang dihasilkan, yang ditandai dengan simbol *. Spesifikasi teknis lebih rinci mengenai parameter arsitektur, seperti jumlah *filter*, ukuran *kernel*, dan *stride* yang digunakan pada setiap lapisan, dapat dilihat pada Tabel 3.1

Tabel 3. 1 Arsitektur MSRGAN

	<i>Layer</i>	<i>Output shape</i>	<i>Parameter</i>
<i>Preprocessing</i>	<i>Load dataset</i>	(200, 800, 800, 3)	-
	<i>Load test image</i>	(1, 40, 40, 3)	-
<i>Generator</i>	Enc 1 (<i>Conv2D</i>)	(20, 20, 64)	<i>Filters: 64, Kernel: (4, 4), Strides: (2, 2)</i>
	BN	(20, 20, 64)	-
	Enc 2 (<i>Conv2D</i>)	(10, 10, 128)	<i>Filters: 128, Kernel: (4, 4), Strides: (2, 2)</i>
	BN	(10, 10, 128)	-

	<i>Layer</i>	<i>Output shape</i>	<i>Parameter</i>
	Enc 3 (<i>Conv2D</i>)	(5, 5, 256)	<i>Filters: 256, Kernel: (4, 4), Strides: (2, 2)</i>
	BN	(5, 5, 256)	-
	DRB 1	(5, 5, 256)	<i>Filters: 256, Kernel: (3, 3), Stride: (1, 1)</i>
	DRB 2	(5, 5, 256)	<i>Filters: 256, Kernel: (3, 3), Stride: (1, 1)</i>
	DRB 3	(5, 5, 256)	<i>Filters: 256, Kernel: (3, 3), Stride: (1, 1)</i>
	<i>Capsule Layer</i>	(5, 5, 512)	Jumlah Kapsul: 16, Dimensi Kapsul: 8
	<i>Up Sampling 1</i>	(10, 10, 512)	<i>Size: (2, 2)</i>
	Conv 1	(10, 10, 512)	<i>Filters: 512, Kernel: (3, 3)</i>
	BN	(10, 10, 512)	-
	<i>Up Sampling 2</i>	(20, 20, 256)	<i>Size: (2, 2)</i>
	Conv 2	(20, 20, 256)	<i>Filters: 256, Kernel: (3, 3)</i>
	BN	(20, 20, 256)	-
	<i>Up Sampling 3</i>	(40, 40, 128)	<i>Size: (2, 2)</i>
	Conv 3	(40, 40, 128)	<i>Filters: 128, Kernel: (3, 3)</i>
	BN	(40, 40, 128)	-
	<i>Up Sampling 4</i>	(80, 80, 64)	<i>Size: (2, 2)</i>
	Conv 4	(80, 80, 64)	<i>Filters: 64, Kernel: (3, 3)</i>
	BN	(80, 80, 64)	-
	<i>Up Sampling 5</i>	(160, 160, 32)	<i>Size: (2, 2)</i>
	Conv 5	(160, 160, 32)	<i>Filters: 32, Kernel: (3, 3)</i>
	BN	(160, 160, 32)	-
	<i>Up Sampling 6</i>	(800, 800, 3)	<i>Size: (5, 5)</i>
	Conv 6	(800, 800, 3)	<i>Filters: 3, Kernel: (3, 3)</i> <i>Activation: 'sigmoid'</i>
<i>Discriminator</i>	Conv 1	(400, 400, 64)	<i>Filters: 64, Kernel: (4, 4), Strides: (2, 2)</i>
	BN	(400, 400, 64)	-
	Conv 2	(200, 200, 128)	<i>Filters: 128, Kernel: (4, 4), Strides: (2, 2)</i>
	BN	(200, 200, 128)	-
	Conv 3	(100, 100, 256)	<i>Filters: 256, Kernel: (4, 4), Strides: (2, 2)</i>
	BN	(100, 100, 256)	-
	<i>Capsule Layer</i>	(100, 100, 512)	Jumlah Kapsul: 10, Dimensi Kapsul: 6

<i>Layer</i>	<i>Output shape</i>	<i>Parameter</i>
GAP 2D	(512)	-
Dense	(1)	Units: 1, Activation: 'sigmoid'

1.3.6 Modifikasi Model MSRGAN

Berbagai modifikasi pada MSRGAN dilakukan untuk mengeksplorasi dampak variasi arsitektur dan *perceptual loss function* terhadap kualitas gambar. Modifikasi ini mencakup perubahan jumlah dan dimensi kapsul pada *generator* dan *discriminator*, implementasi arsitektur residual dan non-residual, serta variasi *perceptual loss function*. Tujuan utama dari modifikasi ini adalah untuk memaksimalkan representasi fitur dan meningkatkan akurasi dalam menghasilkan gambar beresolusi tinggi. Pada Tabel 3.2 menyajikan rangkuman perubahan yang diterapkan pada setiap variasi modifikasi MSRGAN.

Tabel 3. 2 Detail Modifikasi Model MSRGAN

Model Modifikasi	Deskripsi Modifikasi Model	
Modifikasi 1	<i>Generator</i>	Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
Modifikasi 2	<i>Generator</i>	Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
Modifikasi 3	<i>Generator</i>	Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
Modifikasi 4	<i>Generator</i>	Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti InceptionV3
Modifikasi 5	<i>Generator</i>	Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti MobileNet
Modifikasi 6	<i>Generator</i>	Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti EfficientNet
Modifikasi 7	<i>Generator</i>	Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Xception
Modifikasi 8	<i>Generator</i>	Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Vision Transformers
Modifikasi 9	<i>Generator</i>	Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti InceptionV3
Modifikasi 10	<i>Generator</i>	Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti MobileNet
Modifikasi 11	<i>Generator</i>	Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti EfficientNet
Modifikasi 12	<i>Generator</i>	Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Xception
Modifikasi 13	<i>Generator</i>	Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Vision Transformers

Model Modifikasi	Deskripsi Modifikasi Model	
Modifikasi 14	<i>Generator</i>	Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti InceptionV3
Modifikasi 15	<i>Generator</i>	Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti MobileNet
Modifikasi 16	<i>Generator</i>	Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti EfficientNet
Modifikasi 17	<i>Generator</i>	Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Xception
Modifikasi 18	<i>Generator</i>	Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Vision Transformers
Modifikasi 19	<i>Generator</i>	Blok residual diganti U-Net
		Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
Modifikasi 20	<i>Generator</i>	Blok residual diganti U-Net
	<i>Perceptual Loss</i>	Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
		VGG19 diganti InceptionV3
Modifikasi 21	<i>Generator</i>	Blok residual diganti U-Net
	<i>Perceptual Loss</i>	Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
		VGG19 diganti MobileNet
Modifikasi 22	<i>Generator</i>	Blok residual diganti U-Net
	<i>Perceptual Loss</i>	Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
		VGG19 diganti EfficientNet
Modifikasi 23	<i>Generator</i>	Blok residual diganti U-Net
	<i>Perceptual Loss</i>	Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
		VGG19 diganti Xception
Modifikasi 24	<i>Generator</i>	Blok residual diganti U-Net
	<i>Perceptual Loss</i>	Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
		VGG19 diganti Vision Transformer
Modifikasi 25	<i>Generator</i>	Blok residual diganti <i>attention mechanism</i>
		Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
Modifikasi 26	<i>Generator</i>	Blok residual diganti <i>attention mechanism</i>
	<i>Perceptual Loss</i>	Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
		VGG19 diganti InceptionV3
Modifikasi 27	<i>Generator</i>	Blok residual diganti <i>attention mechanism</i>
	<i>Perceptual Loss</i>	Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
		VGG19 diganti MobileNet
Modifikasi 28	<i>Generator</i>	Blok residual diganti <i>attention mechanism</i>
	<i>Perceptual Loss</i>	Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
		VGG19 diganti EfficientNet

Model Modifikasi	Deskripsi Modifikasi Model	
Modifikasi 29	<i>Generator</i>	Blok residual diganti <i>attention mechanism</i> Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Xception
Modifikasi 30	<i>Generator</i>	Blok residual diganti <i>attention mechanism</i> Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Vision Transformer
Modifikasi 31	<i>Generator</i>	Blok residual diganti FNCs Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
Modifikasi 32	<i>Generator</i>	Blok residual diganti FNCs Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti InceptionV3
Modifikasi 33	<i>Generator</i>	Blok residual diganti FNCs Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti MobileNet
Modifikasi 34	<i>Generator</i>	Blok residual diganti FNCs Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti EfficientNet
Modifikasi 35	<i>Generator</i>	Blok residual diganti FNCs Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Xception
Modifikasi 36	<i>Generator</i>	Blok residual diganti FNCs Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Vision Transformer
Modifikasi 37	<i>Generator</i>	Blok residual diganti U-Net Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
Modifikasi 38	<i>Generator</i>	Blok residual diganti U-Net Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti InceptionV3
Modifikasi 39	<i>Generator</i>	Blok residual diganti U-Net Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti MobileNet
Modifikasi 40	<i>Generator</i>	Blok residual diganti U-Net Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti EfficientNet
Modifikasi 41	<i>Generator</i>	Blok residual diganti U-Net Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Xception
Modifikasi 42	<i>Generator</i>	Blok residual diganti U-Net Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Vision Transformer

Model Modifikasi		Deskripsi Modifikasi Model
Modifikasi 43	<i>Generator</i>	Blok residual diganti <i>attention mechanism</i> Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
Modifikasi 44	<i>Generator</i>	Blok residual diganti <i>attention mechanism</i> Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti InceptionV3
Modifikasi 45	<i>Generator</i>	Blok residual diganti <i>attention mechanism</i> Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti MobileNet
Modifikasi 46	<i>Generator</i>	Blok residual diganti <i>attention mechanism</i> Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti EfficientNet
Modifikasi 47	<i>Generator</i>	Blok residual diganti <i>attention mechanism</i> Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Xception
Modifikasi 48	<i>Generator</i>	Blok residual diganti <i>attention mechanism</i> Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Vision Transformer
Modifikasi 49	<i>Generator</i>	Blok residual diganti FNCs Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
Modifikasi 50	<i>Generator</i>	Blok residual diganti FNCs Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti InceptionV3
Modifikasi 51	<i>Generator</i>	Blok residual diganti FNCs Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti MobileNet
Modifikasi 52	<i>Generator</i>	Blok residual diganti FNCs Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti EfficientNet
Modifikasi 53	<i>Generator</i>	Blok residual diganti FNCs Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Xception
Modifikasi 54	<i>Generator</i>	Blok residual diganti FNCs Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Vision Transformer
Modifikasi 55	<i>Generator</i>	Blok residual diganti U-Net Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32

Model Modifikasi	Deskripsi Modifikasi Model	
Modifikasi 56	<i>Generator</i>	Blok residual diganti U-Net Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti InceptionV3
Modifikasi 57	<i>Generator</i>	Blok residual diganti U-Net Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti MobileNet
Modifikasi 58	<i>Generator</i>	Blok residual diganti U-Net Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti EfficientNet
Modifikasi 59	<i>Generator</i>	Blok residual diganti U-Net Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Xception
Modifikasi 60	<i>Generator</i>	Blok residual diganti U-Net Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Vision Transformer
Modifikasi 61	<i>Generator</i>	Blok residual diganti <i>attention mechanism</i> Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti InceptionV3
Modifikasi 62	<i>Generator</i>	Blok residual diganti <i>attention mechanism</i> Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti MobileNet
Modifikasi 63	<i>Generator</i>	Blok residual diganti <i>attention mechanism</i> Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti EfficientNet
Modifikasi 64	<i>Generator</i>	Blok residual diganti <i>attention mechanism</i> Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Xception
Modifikasi 65	<i>Generator</i>	Blok residual diganti <i>attention mechanism</i> Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Vision Transformer
Modifikasi 66	<i>Generator</i>	Blok residual diganti <i>attention mechanism</i> Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti FNCs
Modifikasi 67	<i>Generator</i>	Blok residual diganti FNCs Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti FNCs
Modifikasi 68	<i>Generator</i>	Blok residual diganti FNCs Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti FNCs

Model Modifikasi	Deskripsi Modifikasi Model	
Modifikasi 69	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti InceptionV3
	<i>Generator</i>	Blok residual diganti FNCs Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
Modifikasi 70	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti MobileNet
	<i>Generator</i>	Blok residual diganti FNCs Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
Modifikasi 71	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti EfficientNet
	<i>Generator</i>	Blok residual diganti FNCs Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
Modifikasi 72	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Xception
	<i>Generator</i>	Blok residual diganti FNCs Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32
Modifikasi 73	<i>Perceptual Loss</i>	VGG19 diganti Vision Transformer
	<i>Generator</i>	Jumlah kapsul: 32, dimensi kapsul: 16 Menggabungkan VGG19, InceptionV3, MobileNet, EfficientNet, Xception, dan Vision Transformer
Modifikasi 74	<i>Perceptual Loss</i>	Jumlah kapsul: 64, dimensi kapsul: 16 Menggabungkan VGG19, InceptionV3, MobileNet, EfficientNet, Xception, dan Vision Transformer
	<i>Generator</i>	Jumlah kapsul: 128, dimensi kapsul: 32 Menggabungkan VGG19, InceptionV3, MobileNet, EfficientNet, Xception, dan Vision Transformer

Sebanyak 75 modifikasi pada MSRGAN dilakukan untuk mengeksplorasi berbagai kombinasi arsitektur dan parameter guna memperoleh konfigurasi yang paling optimal dalam meningkatkan resolusi gambar pada jaringan LoRa. Eksplorasi ini mencakup variasi jumlah dan dimensi kapsul, perbandingan antara arsitektur residual dan non-residual, serta penerapan berbagai jenis *perceptual loss function*.

Jumlah kapsul yang divariasikan serta dimensi kapsul pada *generator* bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana representasi spasial mempengaruhi kualitas rekonstruksi gambar. Selain itu, model dibandingkan antara arsitektur residual dengan pendekatan non-residual seperti U-Net, *attention mechanism*, dan

FCNs, untuk menentukan metode yang paling efektif dalam mempertahankan struktur dan detail gambar.

Eksplorasi *perceptual loss function* dilakukan dengan menguji model *pretrained* seperti VGG19, InceptionV3, MobileNet, EfficientNet, Xception, dan Vision Transformer, baik secara individu maupun dalam kombinasi. Dengan mengombinasikan berbagai aspek ini, penelitian ini membandingkan MSRGAN dengan 75 variasi modifikasinya menggunakan metrik evaluasi PSNR dan SSIM. Tujuan penelitian ini adalah menemukan konfigurasi optimal yang dapat menghasilkan gambar berkualitas tinggi dalam keterbatasan *data rate* jaringan LoRa pada kendaraan listrik otonom.

1.3.7 Metode Pengujian

Pengujian model MSRGAN dirancang untuk mengevaluasi performanya dalam meningkatkan resolusi gambar yang dikirim melalui jaringan LoRa. Proses ini dimulai dari tahap input hingga menghasilkan output beresolusi tinggi dengan kualitas optimal, melalui beberapa tahapan utama sebagai berikut:

1. Praproses Data

Dataset uji awalnya memiliki resolusi 800×800 piksel. Sebelum digunakan sebagai input model, gambar-gambar ini diubah ukurannya menjadi 40×40 piksel untuk menyesuaikan dengan resolusi input yang digunakan oleh model MSRGAN. Selain itu, dilakukan normalisasi agar nilai piksel berada dalam rentang yang sesuai untuk pemrosesan model.

2. Input

Proses dimulai dengan memasukkan gambar beresolusi rendah, yaitu gambar dengan ukuran 40×40 piksel, sebagai input. Gambar ini mensimulasikan kondisi gambar dengan kualitas rendah yang diterima melalui jaringan LoRa.

3. Fase *Training*

Pada fase ini model dilatih menggunakan dataset gambar beresolusi tinggi yang telah melalui praproses. *Generator* bertugas meningkatkan resolusi gambar dari 40×40 piksel menjadi 800×800 piksel, sementara *discriminator* bertugas membedakan antara gambar asli dan gambar hasil rekonstruksi.

4. Fase *Testing*

Setelah proses *training* selesai, model diuji menggunakan data uji beresolusi 40x40 piksel. Gambar ini diproses oleh *generator* yang telah dilatih untuk meningkatkan resolusi menjadi 800x800 piksel. Pada tahap ini, output gambar yang berukuran 800x800 piksel akan dievaluasi dengan PSNR dan SSIM.

5. Output

Hasil akhir berupa gambar beresolusi tinggi yaitu 800x800 piksel.

1.3.8 Analisis Komparatif Hasil Pengujian

Setelah implementasi model MSRGAN untuk peningkatan resolusi gambar, tahap berikutnya adalah analisis komparatif untuk mengevaluasi kinerja model menggunakan PSNR dan SSIM. Kedua metrik ini dipilih karena memastikan bahwa gambar hasil rekonstruksi tidak hanya memiliki resolusi tinggi tetapi juga mempertahankan kualitas visual yang baik.

PSNR mengukur seberapa baik model meminimalkan *noise* dan distorsi, dengan nilai yang lebih tinggi menunjukkan kualitas gambar yang lebih baik. Meskipun efektif dalam menilai perbedaan piksel, PSNR tidak selalu mencerminkan persepsi visual manusia. Sementara itu, SSIM menilai kesamaan struktur dan tekstur dengan mempertimbangkan luminansi, kontras, dan struktur, sehingga lebih sesuai dengan cara manusia menilai kualitas gambar.

Dengan menggabungkan PSNR dan SSIM, analisis ini memberikan evaluasi yang lebih komprehensif, membantu mengidentifikasi konfigurasi model terbaik dalam menghasilkan gambar beresolusi tinggi dengan kualitas optimal