

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1. Materi Penelitian

Disertasi ini fokus pada pengembangan model optimalisasi energi dan emisi untuk proyek konstruksi, khususnya infrastruktur jalan. Penelitian ini menggunakan teknik dan metode penelitian yang terstruktur. Metode penelitian merupakan pendekatan yang digunakan untuk memahami objek penelitian dengan baik, sehingga menghasilkan penelitian yang objektif dan menghasilkan pengetahuan yang valid. Melalui pendekatan ilmiah, data yang akurat dapat ditemukan, dibuktikan, dan dikembangkan menjadi pengetahuan yang dapat digunakan untuk memahami, memecahkan, dan mengantisipasi masalah (Sugiyono, 2009). Penelitian merupakan metode yang digunakan untuk menemukan kebenaran, dan juga melibatkan pemikiran kritis. Tujuan khusus penelitian ini adalah membangun model optimalisasi energi dan emisi pada tahap *initial*, *operational* dan *recurring* sampai dengan *decommissioning/end of life* pada proyek konstruksi jalan berdasarkan *project life cycle* (PLC). Untuk menghitung konsumsi energi dan emisi diperlukan untuk membangun metode penelitian mengingat kekhasan utama dari proyek jalan itu sendiri. Penelitian ini akan menghitung energi dan emisi pada pekerjaan jalan dengan menggunakan AHS Bina Marga yang dimodifikasi dan membuat model prediksi IRI untuk mengetahui kapan waktu pemeliharaan atau rehabilitasi kemudian menentukan jenis pekerjaan apa yang akan dilaksanakan saat itu.

3.2. Tempat dan Waktu Penelitian

3.2.1. Tempat Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan di Indonesia yaitu di ruas jalan tol di Pulau Jawa, dimana terdapat beberapa ruas jalan tol yang sudah beroperasi sekian lama serta beberapa proyek yang masih dalam tahap pekerjaan maupun dalam tahap operasi dan pemeliharaan (fungsional), sumber data diperoleh dari Badan Pengatur Jalan Tol (BPJT) dan Badan Usaha Jalan Tol (BUJT) yang mengoperasikan ruas-ruas jalan tol tersebut.

3.2.2. Waktu Penelitian

Proses penelitian akan meliputi serangkaian kegiatan seperti survei, pengumpulan data, penggunaan kuesioner, wawancara, observasi, dan konsultasi. Seluruh proses ini diperkirakan akan berlangsung selama sekitar 12 bulan.

3.3. Desain Penelitian

Penelitian ini melibatkan beberapa tahap yang dapat dikategorikan menjadi tiga bagian utama. Bagian pertama bertujuan untuk menghitung energi, bagian kedua fokus pada pembangunan model prediksi IRI, dan bagian ketiga melibatkan tahap simulasi dan validasi model prediksi. Secara rinci, tahap-tahap tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Tahap Pertama

Tahap pertama dalam penelitian ini adalah tahap pendahuluan. Kegiatan yang dilaksanakan adalah memodifikasi AHS Bina Marga 2018 dengan memasukkan formula perhitungan energi dan emisi di *software* MS Excel menggunakan rumus dari US EPA tahun 2010 dengan Persamaan 3.1, 3.2 dan 3.3 yaitu :

$$\text{Konsumsi bahan bakar (liter)} = \text{BSFC (liter/hp.jam)} \times \text{Tenaga mesin (hp)} \times \text{Faktor beban} \times \text{Jam kerja (jam)} \dots\dots\dots(3.1)$$

$$\text{Jam kerja (jam)} = \frac{\text{Kuantitas pekerjaan}}{\text{produktivitas alat}} = \text{kuantitas pekerjaan} \times \text{koefisien produktivitas} \dots\dots\dots(3.2)$$

$$\text{Energi (MJ)} = \text{Konsumsi bahan bakar (liter)} \times \text{Faktor konversi energi (MJ/liter)} \dots\dots(3.3)$$

Untuk menghitung emisi karbon CO₂ dengan persamaan berikut ini :

$$\text{Emisi karbon (kg)} = \text{Konsumsi bahan bakar (liter)} \times \text{Koefisien emisi karbon (kg/liter)} \dots\dots\dots(3.4)$$

Faktor konversi energi dan emisi yang digunakan mengacu ke koefisien beban lingkungan dari kendaraan non-jalan raya yang dikeluarkan oleh US EPA pada tahun 2014, seperti terdapat pada Tabel 2.2, yaitu : faktor konversi bahan bakar (solar) = 38.30 MJ/l dan koefisien emisi CO₂ = 2.697 CO₂ (kg/l).

2. Tahap Kedua

Tahap kedua dalam penelitian ini adalah melakukan pengumpulan data jalan tol dengan perkerasan lentur dan perkerasan kaku, untuk menghitung energi dan emisi diperlukan daftar kuantitas, gambar rencana, sedangkan untuk prediksi nilai IRI berupa : nilai IRI awal, nilai IRI per tahun, umur jalan, umur jalan ketika direhabilitasi dan volume lalu lintas per golongan per tahun.

3. Tahap Ketiga

- Membangun model prediksi *International Roughness Index (IRI)* dengan *software* MATLAB

Arsitektur ANN untuk masing-masing jenis perkerasan dalam hal ini perkerasan kaku atau perkerasan lentur dibangun dari data yang diperoleh dari BPJT dan BUJT menggunakan parameter : nilai IRI per tahun, umur jalan dan volume lalu lintas per golongan per tahun yang dikonversi menjadi beban lalu lintas pergolongan per tahun menggunakan faktor ekivalen beban. Arsitektur ANN dirancang dari data yang dikumpulkan dan diuji, algoritma ANN yang paling umum digunakan, teknik propagasi umpan balik maju (*feed-forward back propagation*) digunakan untuk simulasi komputer dari model prediksi berbasis ANN yang diusulkan. Jaringan yang dihasilkan melalui teknik ini memiliki kekuatan dan kegunaan yang luar biasa karena kemampuannya untuk mempelajari pola dari contoh. Proses pembelajaran dalam teknik ini dikenal sebagai 'minimisasi kesalahan' (Bayrak, 2008).

- Identifikasi faktor input model ANN
Berdasarkan kajian literatur pada BAB 2 maka parameter input model ANN terdiri dari: umur jalan dan beban lalu lintas per golongan per tahun yang dikonversi dari volume lalu lintas per tahun per golongan dengan menggunakan faktor ekivalen beban VDF 4 dan VDF 5 beban aktual, dan target output berupa nilai IRI per tahun.
- Merumuskan dataset untuk pelatihan dan pengujian Model ANN
Struktur ANN dikembangkan menggunakan strategi coba-coba untuk menentukan jumlah lapisan tersembunyi ANN yang sesuai dan fungsi aktivasi untuk setiap neuron yang memberikan kesalahan paling kecil antara nilai IRI yang diukur dan yang diprediksi. 70% data digunakan untuk melatih jaringan ANN dan sisanya 15% digunakan untuk menguji/melatih jaringan, dan 15% digunakan untuk memvalidasi

jaringan. Penelitian sebelumnya menunjukkan penggunaan 60% hingga 75% data sebagai dataset pelatihan dan sisanya dari dataset sebagai pengujian dan memvalidasi model ANN (Bayrak et al., 2004; Bayrak, 2008; El-Hakim and El-Badawy, 2013).

- Metode pembelajaran model ANN

Metode propagasi umpan balik maju (*feed-forward back propagation*), yang digunakan dalam penelitian ini termasuk dalam kategori pembelajaran terbimbing. Hal ini digunakan dalam metode pembelajaran dengan banyak input dan digunakan untuk mengatasi beragam masalah. Cara ini melibatkan dua tahap: (1) set data input menghasilkan aliran aktivasi ke depan dari lapisan entri, melalui lapisan tersembunyi, dan akhirnya ke lapisan output, yaitu IRI, (2) kesalahan dalam output menghasilkan aliran informasi mundur ke lapisan input dari lapisan output. Selama penyebaran kesalahan, penyesuaian bobot dilakukan, memungkinkan jaringan untuk belajar lebih baik, yang menghasilkan output yang diinginkan dan diharapkan (Ceylan et al., 2005; Hossain et al., 2019; Hossain et al., 2020).

- Fungsi aktivasi model ANN

Hubungan nonlinear antara parameter input dan output dalam jaringan ANN memerlukan fungsi untuk membuat hubungan antara neuron dan menghubungkan bobot untuk memprediksi output. Dalam setiap analisis jaringan saraf, tiga fungsi transfer didefinisikan, yaitu TANSIG (fungsi transfer sigmoidal tangen hiperbolik), LOGSIG (fungsi transfer sigmoidal logaritmik), dan PURELIN (fungsi transfer linier murni) (Hossain et al., 2019; Hossain et al., 2020). Algoritma fungsi aktivasi ditunjukkan dalam Persamaan 3.5, 3.6 dan 3.7 sebagai berikut :

$$\text{TANSIG}(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad \dots\dots\dots(3.5)$$

$$\text{LOGSIG}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad \dots\dots\dots(3.6)$$

$$\text{PURELIN}(x) = x \quad \dots\dots\dots(3.7)$$

di mana, x adalah data input. Tidak ada metode khusus untuk memutuskan fungsi transfer. Oleh karena itu, untuk menghasilkan arsitektur terbaik, semua fungsi transfer diuji dalam jaringan, dan hasilnya dibandingkan dengan menggunakan

Mean Square Error (MSE), Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE) dan nilai R (koefisien korelasi Pearson).

- *Mean Square Error* (MSE) adalah suatu metrik untuk mengukur kesalahan atau deviasi antara nilai prediksi (*predicted value*) dan nilai sebenarnya (*actual value*) pada suatu model prediksi atau regresi. MSE dihitung dengan cara mengambil selisih kuadrat antara nilai prediksi dan nilai sebenarnya, kemudian menjumlahkan seluruh hasil selisih kuadrat tersebut, dan dibagi dengan jumlah data yang dihitung. Cara menghitung MSE ditunjukkan pada Persamaan 3.8 sebagai berikut :

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2. \dots\dots\dots(3.8)$$

Dimana \hat{y}_i adalah nilai IRI yang diprediksi oleh model, y_i adalah nilai IRI target input, n adalah jumlah total observasi. MSE sering digunakan dalam analisis statistik dan *machine learning* untuk mengukur kualitas suatu model prediksi atau regresi. Semakin kecil nilai MSE, semakin baik kualitas model prediksi atau regresi tersebut, karena artinya semakin kecil kesalahan antara nilai prediksi dan nilai sebenarnya (Sharma et al., 2021).

- *Root Mean Square Error* (RMSE) adalah suatu metrik yang serupa dengan Mean Square Error (MSE) untuk mengukur kesalahan atau deviasi antara nilai prediksi (*predicted value*) dan nilai sebenarnya (*actual value*) pada suatu model prediksi atau regresi. Namun, perbedaannya terletak pada cara menghitung nilai kesalahan atau deviasi tersebut. RMSE dihitung dengan cara mengambil akar kuadrat dari nilai MSE. Dalam hal ini, RMSE menghasilkan nilai kesalahan atau deviasi yang sama dengan satuan yang digunakan pada variabel yang diukur. Misalnya, jika variabel yang diukur dalam satuan meter, maka RMSE juga akan dinyatakan dalam satuan meter. Seperti halnya dengan MSE, semakin kecil nilai RMSE, semakin baik kualitas model prediksi atau regresi tersebut, karena artinya semakin kecil kesalahan antara nilai prediksi dan nilai sebenarnya (Jeon et al., 2022). Namun, RMSE lebih mudah dipahami daripada MSE karena menyajikan hasil kesalahan atau deviasi dalam satuan yang sama dengan variabel yang

diukur (Sharma et al., 2021). Fungsi transfer yang menghasilkan RMSE terendah memprediksi nilai IRI terdekat dibandingkan dengan nilai IRI aktual. Persamaan yang digunakan untuk menghitung RMSE ditunjukkan pada Persamaan 3.9 sebagai berikut :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \dots\dots\dots(3.9)$$

Dimana \hat{y}_i adalah nilai IRI yang diprediksi oleh model, y_i adalah nilai IRI target input, n adalah jumlah total observasi. Selain itu, *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) juga dihitung untuk mengevaluasi keakuratan prediksi model ANN. Persamaan yang digunakan untuk menghitung MAPE ditunjukkan pada Persamaan 3.10 sebagai berikut :

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \dots\dots\dots(3.10)$$

Dimana \hat{y}_i adalah nilai IRI yang diprediksi oleh model, y_i adalah nilai IRI target input, n adalah jumlah total observasi, y adalah rata-rata IRI dari nilai yang diukur. Untuk MAPE, skala berikut digunakan untuk memperkirakan akurasi (Hossain et al., 2020a).

- a. Prakiraan yang sangat akurat: $MAPE < 0.1$ (10%)
- b. Prakiraan yang baik: 0.1 (10%) $< MAPE < 0,2$ (20%)
- c. Prakiraan yang masuk akal: 0.2 (20%) $< MAPE < 0,5$ (50%)
- d. Prakiraan tidak akurat: $MAPE > 0.5$ (50%).

- Terdapat korelasi antara nilai R atau r (koefisien korelasi Pearson) dan R^2 (koefisien determinasi). Koefisien korelasi Pearson (R) adalah ukuran statistik yang mengukur kekuatan hubungan linear antara dua variabel (Golnaraghi et al., 2019). Nilai R berkisar antara -1 hingga 1, di mana nilai -1 menunjukkan hubungan negatif yang sempurna antara dua variabel, 0 menunjukkan tidak adanya hubungan, dan 1 menunjukkan hubungan positif

yang sempurna antara dua variabel (Otmani et al., 2020). Koefisien korelasi Pearson R atau r diberikan sebagai:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \dots\dots\dots(3.11)$$

di mana n adalah ukuran sampel; x_i, y_i adalah nilai IRI aktual dan prediksi yang masing-masing diindeks dengan i; \bar{x} = rata-rata IRI aktual; dan \bar{y} = rata-rata nilai IRI prediksi.

- Sementara itu, koefisien determinasi (R^2) adalah ukuran statistik yang mengukur proporsi variasi pada variabel dependen yang dapat dijelaskan oleh variabel independen dalam suatu model regresi. Nilai R^2 berkisar antara 0 hingga 1, di mana nilai 1 menunjukkan bahwa model regresi dapat menjelaskan seluruh variasi dalam data, dan nilai 0 menunjukkan bahwa model regresi tidak dapat menjelaskan variasi sama sekali (Gharieb et al., 2022). Jadi, semakin tinggi nilai R, semakin baik pula performa model ANN Anda dalam memprediksi output, dan semakin tinggi pula nilai R^2 yang dapat dihasilkan. Namun, perlu diingat bahwa nilai R^2 tidak selalu menjadi indikator yang tepat untuk mengukur performa model prediksi ANN, terutama ketika terdapat hubungan nonlinear antara input dan output.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (IRI_{i,act} - IRI_{i,pred})^2}{\sum_{i=1}^n (IRI_{i,act} - \overline{IRI}_{act})^2} \dots\dots\dots(3.12)$$

Dimana \hat{y}_i adalah nilai IRI yang diprediksi oleh model, y_i adalah nilai IRI target input, n adalah jumlah total observasi, \bar{y} adalah rata-rata IRI dari nilai yang diukur.

- Model ANN lapisan tersembunyi dan neuron
Finalisasi jumlah layer dan neuron dalam ANN dilakukan atas dasar *trial and error*, belum ada metode standar untuk menentukan jumlah neuron dan lapisan. Model

terbaik dipilih dengan menganalisis dan membandingkan semua model yang diuji, dengan kombinasi berbagai lapisan, neuron, dan fungsi transfer. Mirip dengan fungsi transfer/aktivasi, jumlah neuron dan lapisan juga memainkan peran utama dalam mengembangkan arsitektur ANN terbaik. Tidak ada prosedur sistematis untuk menentukan jumlah pasti neuron dan jumlah lapisan ANN (Hossain et al., 2019; Hossain et al., 2020). Karena penelitian ini adalah tentang memilih model ANN terbaik dari berbagai kemungkinan, strategi coba-coba digunakan untuk menentukan lapisan tersembunyi, beberapa neuron di setiap lapisan, dan fungsi aktivasi / transfer yang menghasilkan RMSE dan MAPE terendah.

4. Tahap Keempat

Tahap keempat dalam penelitian ini adalah tahap untuk melakukan analisis data dan melakukan perhitungan energi dan emisi dengan batasan sistem *cradle to cradle*, yang dilakukan dengan cara menghitung *initial embodied energy and emission, operational & recurring embodied energy and emission* hingga *decommissioning energy and emission*, menggunakan AHS Bina Marga yang telah dimodifikasi dan model prediksi IRI yang telah dihasilkan dari tahap ketiga.

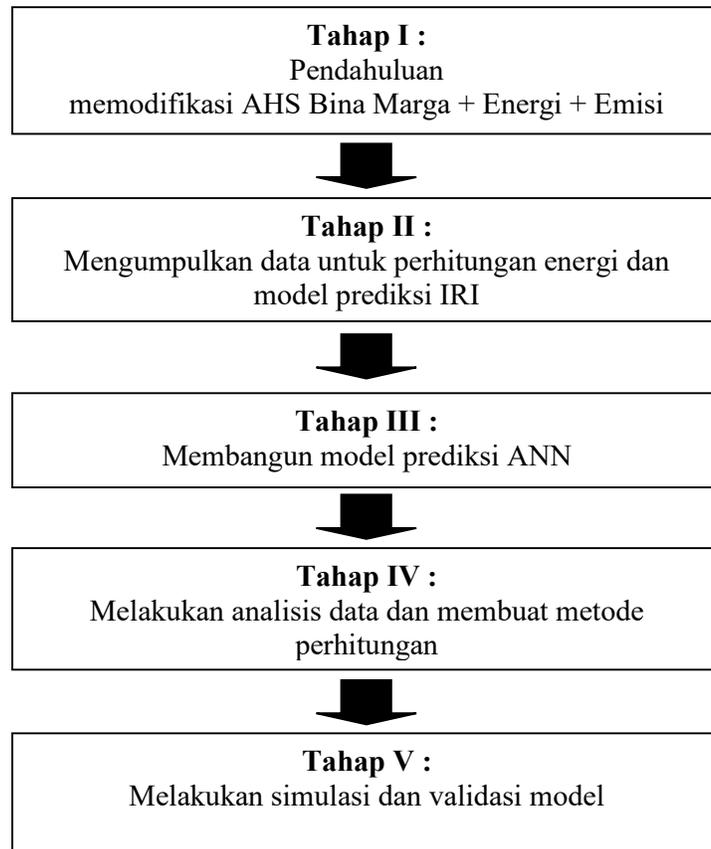
5. Tahap Kelima

Tahap kelima dalam penelitian ini adalah tahap simulasi dan validasi model. Kegiatan-kegiatan yang dilakukan pada tahap ini, yaitu:

- i. mempersiapkan model dan data pendukung;
- ii. melakukan input jenis pekerjaan dan kuantitas pada *file* AHS Bina Marga yang telah dimodifikasi untuk menghitung energi hingga didapatkan energi secara total yang memenuhi batasan sistem *cradle to cradle*;
- iii. melakukan validasi terhadap model dan simulasi yang telah dihasilkan;

Untuk memastikan kemampuan generalisasi yang baik dari model ANN yang terlatih, setelah setiap jaringan dikembangkan menggunakan dataset pelatihan dan divalidasi, kemudian dilakukan simulasi terhadap jaringan tersebut diuji menggunakan dataset simulasi, dataset validasi tidak sama dengan yang digunakan untuk melatih jaringan saraf.

Output tahap ini adalah final model, simulasi model perhitungan energi pada proyek konstruksi jalan di Indonesia. Tahapan-tahapan dalam penelitian ini disusun dalam bentuk bagan alir yang ada pada Gambar 3.1. berikut ini.



Gambar 3.1 Tahapan Penelitian

3.4. Populasi dan Sampel

3.4.1. Populasi

Akdon and Riduwan (2013) mengemukakan bahwa populasi merujuk pada objek atau subjek yang berada dalam suatu wilayah dan memenuhi syarat-syarat tertentu terkait dengan masalah penelitian Sekaran (2011) menjelaskan bahwa populasi merujuk pada keseluruhan kelompok, aktivitas, atau hal menarik yang ingin diselidiki oleh peneliti Sukmadinata (2009) mendefinisikan populasi sebagai kelompok besar dan wilayah yang menjadi cakupan penelitian. Dalam konteks penelitian, populasi meliputi semua yang

akan dijadikan subjek atau objek penelitian yang diinginkan oleh peneliti. Sementara itu, Akdon and Riduwan (2013) juga menyatakan bahwa populasi adalah keseluruhan dari karakteristik atau unit pengukuran yang menjadi objek penelitian, atau populasi dapat berupa objek atau subjek yang berada dalam suatu wilayah dan memenuhi syarat-syarat tertentu terkait dengan masalah penelitian. Populasi mencakup totalitas nilai yang mungkin, hasil penghitungan atau pengukuran, baik kuantitatif maupun kualitatif, terkait dengan karakteristik tertentu dari semua anggota kumpulan yang ingin dipelajari sifat-sifatnya (Ismiyati, 2011). Dengan demikian, populasi merujuk pada kelompok subjek atau objek dalam skala besar yang terdapat dalam suatu wilayah, dengan pengukuran baik kualitatif maupun kuantitatif yang terkait dengan penelitian. Populasi dalam penelitian ini adalah jalan tol yang berada di Indonesia yang dikelola oleh BPJT, dengan jumlah total 54 ruas yang tersebar di berbagai pulau di Indonesia seperti dapat dilihat pada Lampiran 4. Jalan tol di Indonesia sebagian besar berada di Pulau Jawa dan Sumatra; dengan sebagian ruas berada di Pulau Bali, Kalimantan, dan Sulawesi. Hingga awal tahun 2022, BPJT menyatakan sepanjang lebih dari 2.499,06 km jalan tol telah beroperasi di Indonesia. Sebagian jalan tol di Indonesia paralel dengan jalan-jalan nasional (non-tol) yang oleh Kementerian PUPR RI dimasukkan sebagai bagian dari Jaringan Jalan Asia. Populasi tersebut memiliki jumlah terbanyak di Pulau Jawa, di mana jalan tol tersebut memiliki variasi dalam tahap operasional, dari yang telah beroperasi lama, yang baru beroperasi, hingga yang sedang dalam tahap pembangunan. Namun, secara umum memiliki karakteristik lingkungan yang seragam.

3.4.2. Sampel

Sampel adalah bagian dari populasi yang mempunyai ciri-ciri atau keadaan tertentu yang akan diteliti (Akdon and Riduwan, 2013; Sekaran, 2011). Sukmadinata (2009) mengartikan sampel sebagai kelompok kecil yang secara nyata kita teliti dan tarik kesimpulan daripadanya. Akdon and Riduwan (2013) menyatakan bahwa sampel penelitian adalah sebagian dari populasi yang diambil sebagai sumber data dan dapat mewakili seluruh populasi dengan karakteristik tertentu. Selain itu Supriharyono (2017) menyatakan bahwa untuk mendapatkan sampel yang dapat mewakili subjek penelitian diperlukan suatu teknik khusus atau yang sering disebut teknik pengambilan sampel. Sampling adalah sebagian yang diambil dari populasi yang akan dipelajari sifat-

sifatnya dari populasi yang akan diteliti (Ismiyati, 2011). Berdasarkan peluang setiap anggota sampel untuk bisa terpilih sebagai anggota sampel, dipilih *non probability sampling*, yaitu teknik sampling yang tidak memberikan kesempatan pada setiap anggota populasi untuk menjadi sampel. Penelitian ini menggunakan teknik *purposive sampling* atau dikenal juga dengan sampling pertimbangan ialah teknik sampling yang digunakan peneliti, jika peneliti mempunyai pertimbangan-pertimbangan tertentu di dalam pengambilan sampelnya atau penentuan sampel untuk tujuan tertentu. Sampel pada penelitian ini adalah ruas jalan Tol di Pulau Jawa yaitu tol Merak sampai dengan Banyuwangi yang berjumlah 30 ruas yang terdiri dari 12 ruas perkerasan lentur dan 18 ruas perkerasan kaku, adapun daftar ruas jalan tol tersebut dapat dilihat di Lampiran 5. Jalan Tol Trans-Jawa adalah sistem jalan tol yang menghubungkan berbagai kota di Pulau Jawa, Indonesia. Pada tanggal 20 Desember 2018, Jakarta dan Surabaya secara resmi terhubung melalui jalan tol ini. Jalan tol ini membentang dari Pelabuhan Merak, Cilegon, di Provinsi Banten hingga Pelabuhan Ketapang, Banyuwangi, di Provinsi Jawa Timur. Dengan panjang sekitar 1.167 kilometer, jaringan tol ini menghubungkan dua kota terbesar di Indonesia, yaitu Jakarta dan Surabaya. Jalan tol ini juga merupakan bagian dari Asian Highway 2 (AH2), yang merupakan jaringan jalan Asia yang menghubungkan Benua Asia dari Denpasar, Bali, Indonesia hingga Khosravi, Iran.

3.5. Teknik Pengumpulan Data

Penelitian ini dilakukan dengan menerapkan metode survei dan wawancara. Metode survei merupakan pendekatan penelitian yang menggunakan kuesioner sebagai instrumen untuk mengumpulkan data. Dalam penelitian ini, data yang diperlukan meliputi:

a. Data Primer

Data primer didapatkan dengan menggunakan alat berupa daftar isian. Adapun cara pengumpulan data primer adalah dengan:

1) Mengumpulkan data secara langsung (survei)

Daftar isian ini berupa parameter yang berpengaruh terhadap nilai *International Roughness Index* (IRI) yang didapatkan dari BPJT dan BUJT.

2) Wawancara

Wawancara terstruktur dan mendalam dengan Pejabat BUJT untuk memperkuat temuan dari survei dan memperoleh data yang mungkin tidak dapat diperoleh melalui metode lainnya.

b. Data Sekunder

Data sekunder diperoleh dari berbagai sumber seperti jurnal, prosiding, laporan penelitian, dan data terkait lainnya yang berkaitan dengan energi dalam konteks pekerjaan perkerasan jalan.

3.6. Metode Pengolahan Data dan Analisis Perhitungan Energi dan Emisi

Penelitian ini dimulai dengan studi pustaka dan tinjauan literatur yang terkait dengan optimalisasi energi dan emisi dalam *Project Life Cycle* (PLC) proyek infrastruktur. Tujuan tinjauan pustaka ini adalah mengkaji sumber teori dari hasil penelitian, buku, panduan, dan standar yang ada baik di Indonesia maupun di negara lain, sehingga didapatkan faktor-faktor apa saja yang berpengaruh terhadap energi dan emisi pada proyek konstruksi jalan. Berdasarkan tinjauan literatur tersebut, dirancanglah metode perhitungan energi dan emisi yang akan diterapkan dalam penelitian ini, seperti yang terlihat dalam Gambar 3.2. berikut:

1. Mengumpulkan data berupa dokumen desain jalan perkerasan lentur dan perkerasan kaku (RAB/kuantitas pekerjaan dan gambar)
2. Mendapatkan koefisien produktivitas alat dan jumlah bahan per satuan pekerjaan, dengan menggunakan AHS Bina Marga dan Spesifikasi Umum 2018 Versi 5.0 (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2018) untuk itu AHS perlu dimodifikasi supaya bisa menghitung besaran energi dari konsumsi bahan bakar dan emisi yang dihasilkan.
3. Menghitung konsumsi bahan bakar setiap fase dengan rumus US EPA 2010 (US EPA, 2010; Zhang, 2015), dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Konsumsi bahan bakar (liter)} = \text{BSFC (liter/hp.jam)} \times \text{Tenaga mesin (hp)} \times \text{Faktor beban} \times \text{Jam kerja (jam)} \dots \dots \dots (3.14)$$

$$\text{Jam kerja (jam)} = \frac{\text{Kuantitas pekerjaan}}{\text{produktivitas alat}} = \text{kuantitas pekerjaan} \times \text{koefisien produktivitas} \dots \dots \dots (3.15)$$

$$\text{Energi (MJ)} = \text{Konsumsi bahan bakar (liter)} \times \text{Faktor konversi energi (MJ/liter)} \dots\dots\dots(3.16)$$

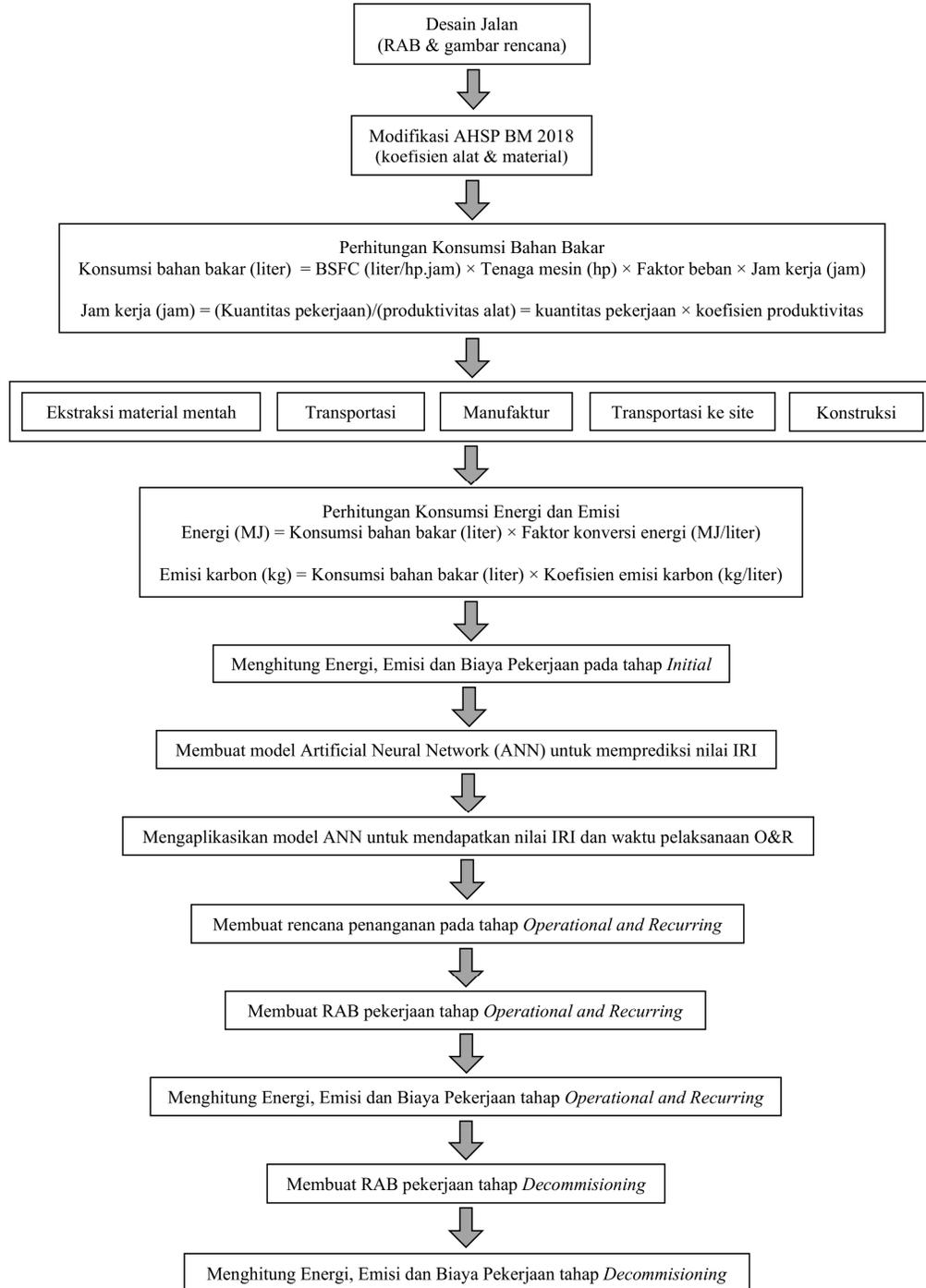
Untuk menghitung emisi karbon CO₂ dengan persamaan berikut ini :

$$\text{Emisi karbon (kgCO}_2\text{)} = \text{Konsumsi bahan bakar (liter)} \times \text{Koefisien emisi karbon (kgCO}_2\text{/liter)} \dots\dots\dots(3.17)$$

4. Mengelompokkan koefisien tersebut sesuai dengan pembagian fase dalam *system boundary: Cradle to Site (Initial Embodied Energy and Emmission)*. Dari tahap ekstraksi bahan mentah – transportasi – manufaktur – transportasi – konstruksi)
5. Menghitung konsumsi energi dan emisi yang dihasilkan pada setiap fase, dengan cara mengkonversi konsumsi bahan bakar (diesel) menjadi konsumsi energi dengan menggunakan *equivalent energy contents* = 38.71 MJ/liter (Thenoux et al., 2007) atau *energy conversion factor* = 38.30 MJ/liter, dan koefisien emisi CO₂ = 2.697 (kg CO₂/liter) (Chong and Wang, 2017; U.S. Environmental Protection Agency, 2014). Sedangkan khusus untuk material yang didapatkan dari produk industri manufaktur yang bukan diambil dari *quarry* (misalkan : aspal cair (bitumen), semen, besi, aditif dan lain-lain) yang tidak ada analisisnya di AHS, akan diambil dari data inventori material yang dikeluarkan oleh Bath University (Hammond and Jones, 2011; G. P. Hammond and Jones, 2008; G. Hammond and Jones, 2008) atau dari sumber-sumber lainnya.
6. Menghitung energi dan emisi total dari semua uraian pekerjaan, selanjutnya menjadi *initial embodied energy and emmission* pekerjaan jalan.
7. *Operasional energy and emmission* pada saat penggunaan jalan dianggap hampir sama karena baik untuk perkerasan lentur dan kaku jenis dan besaran operasional energi dan emisi tidak signifikan dipengaruhi oleh jenis perkerasan (Chen et al., 2021; Stripple, 2001), sehingga tidak diperhitungkan.
8. Untuk perhitungan pada tahap (siklus) *maintenance* dipakai metode prediksi kondisi perkerasan berdasarkan tingkat kerusakan (*index*) dan sehingga diketahui kapan terjadinya, kemudian akan ditentukan jenis perawatan/pekerjaan yang nantinya akan dilaksanakan, dengan mengacu kepada standar pelayanan minimum jalan (Kementerian Pekerjaan Umum, 2005; PUPR, 2014) dan mengacu kepada manual desain perkerasan jalan (Kementerian PUPR Dirjen Bina Marga, 2017).

Maka untuk itu diperlukan indikator salah satunya berupa nilai *International Roughness Index* (IRI). Secara praktek nilai IRI didapatkan dari alat NAASRA kemudian dikonversi menjadi nilai IRI (Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat, 2014), dengan catatan jalan sudah digunakan dalam jangka waktu tertentu. Karena tidak memungkinkan menggunakan alat NAASRA pada jalan yang belum dibangun (yang baru direncanakan) maka dipakai cara prediksi. Untuk memprediksi atau menghitung nilai IRI memerlukan beberapa parameter/faktor seperti, nilai IRI awal, usia jalan ketika dihitung, volume (beban) lalu lintas, parameter struktur perkerasan, faktor lingkungan dan lain-lain (Qian et al., 2018; Hossain et al., 2019; Hossain and Leela Sai Praveen Gopiseti, 2020; Pérez-Acebo et al., 2020).

9. Mendapatkan data yang terkait dengan pemeliharaan terhadap jalan yang sudah ada berupa nilai IRI awal, nilai IRI ketika di-*maintenance*, usia jalan ketika di-*maintenance*, volume (beban) lalu lintas, struktur perkerasan dan lain-lain. Sumber data sebagai contoh : data pemeliharaan jalan tol dari BPJT dan BUJT. Pemeliharaan dimaksud mengacu kepada pengertian dari prosedur pemeliharaan jalan standar Bina Marga (Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2016).
10. Membangun model prediksi IRI dengan menggunakan *Artificial Neural Network* (ANN). Dengan input parameter antara lain: umur jalan, volume lalu lintas per golongan per tahun yang sudah dikonversi ke beban lalu lintas dengan menggunakan VDF 4 dan VDF 5 beban aktual dan output berupa nilai IRI prediksi.
11. Mengaplikasikan model ANN untuk memprediksi IRI kemudian menentukan jenis penanganan sesuai nilai prediksi IRI dengan tetap mengacu kepada manual desain perkerasan jalan tahun 2017.
12. Menghitung kuantitas setiap jenis pekerjaan kemudian dimasukkan ke AHS Bina Marga yang telah dimodifikasi untuk menghitung energi dan emisi.
13. Menghitung energi dan emisi pada saat pemeliharaan (*recurrent energy and emission*) yang diperlukan dengan metode sebelumnya yang dipakai untuk menghitung *initial embodied energy and emission*.
14. Menentukan alternatif penanganan pada tahap *end of life* yaitu : *recycle*, *reuse* dan *demolition*, kemudian menentukan jenis pekerjaan yang akan dilaksanakan



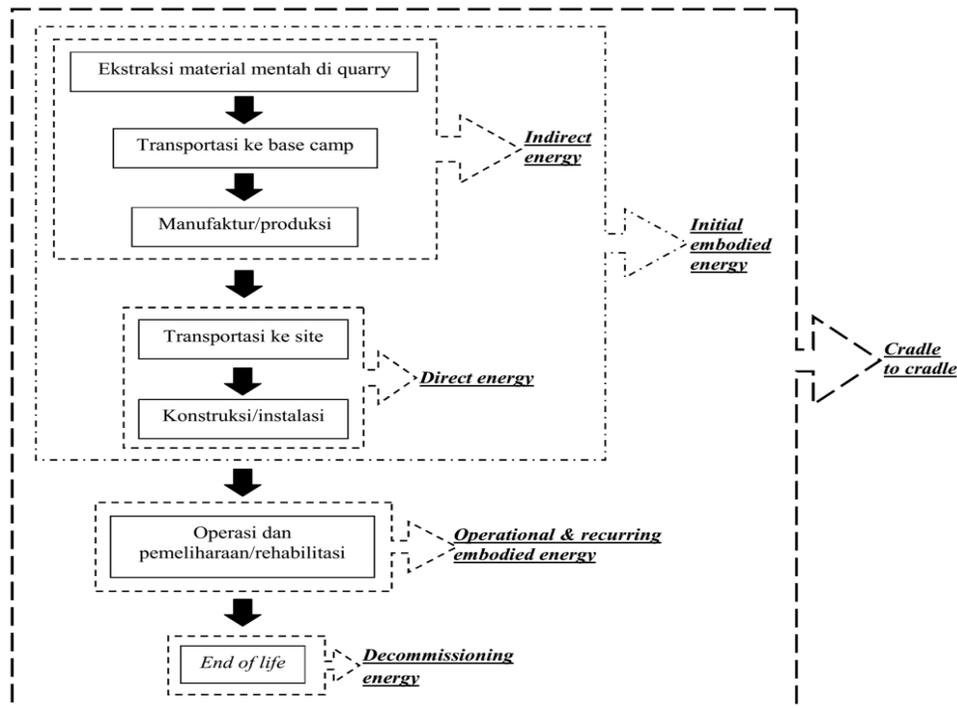
Gambar 3. 2 Diagram Alir Metode Perhitungan Energi, Emisi dan Biaya

15. Menghitung kuantitas setiap jenis pekerjaan pada tahap *end of life*, kemudian dimasukkan ke AHS Bina Marga yang telah dimodifikasi untuk menghitung energi dan emisi.

16. Menghitung energi dan emisi pada saat *end of life* yang diperlukan dengan metode sebelumnya yang dipakai untuk menghitung *initial embodied energy and emission*.
17. Selanjutnya membandingkan besaran energi dan emisi per kilometer jalan antara perkerasan lentur dan perkerasan kaku.

3.7. Batasan Sistem

Batasan sistem yang digunakan pada penelitian ini mengacu kepada batasan sistem yang dipakai oleh Zeng and Chini (2017), yaitu *cradle to cradle* dengan memperhitungkan *initial embodied energy* (yang terdiri dari *indirect energy* dan *direct energy*), *operational and recurring energy* sampai dengan *decommissioning energy (recycle)*. Adapun tahap yang ditinjau adalah tahap ekstraksi material mentah di *quarry*, transportasi ke *base camp*, manufaktur/produksi di *base camp* atau *workshop*, transportasi ke site/lokasi pekerjaan, tahap konstruksi, tahap operasi dan pemeliharaan/rehabilitasi dan *end of life*, batasan sistem ini menjadi dasar untuk memasukan (modifikasi) perhitungan energi dan emisi ke dalam AHS Bina Marga tahun 2018, seperti dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut ini.



Gambar 3. 3 Batasan Sistem Perhitungan Energi dan Emisi

3.8. *Trial and Error Model IRI Perkerasan Lentur dan Perkerasan Kaku*

Setelah data volume lalu lintas dikonversi ke beban lalu lintas maka dilakukan tahap pembuatan model dengan menggunakan *software* MATLAB. Pembagian data untuk keperluan pelatihan, validasi dan pengujian, semuanya dilakukan secara otomatis oleh *software* MATLAB, dengan konfigurasi 70% data untuk pelatihan, 15% data untuk validasi dan 15% data untuk pengujian seperti yang dilakukan oleh Alatoon and Al-Suleiman, (2021); Ghariieb et al., (2022). Pada saat pelatihan, ANN melakukan algoritma pembelajaran untuk mencapai kecocokan terbaik sesuai dengan data yang dimasukkan. Validasi digunakan oleh ANN untuk menghindari *overfitting* model dan untuk menilai dalam menemukan bobot terbaik untuk model (Ling et al., 2017). Sedangkan set pengujian digunakan untuk memeriksa akurasi model dan menemukan kesenjangan antara output yang telah ditentukan sebelumnya dari model dan nilai sebenarnya (Alatoon and Al-Suleiman, 2021). Untuk langkah *trial and error* dilakukan dengan cara sebagai berikut:

a) Tahap I:

1. Input data = 2 node: Σ ESA per tahun dan umur jalan
2. Target data = 1 node : IRI per tahun
3. Network type : Feed-forward backprop
Training function : Trainlm
Adaption learning function : Learngdm
Performance function : MSE
4. Number of layers = 2 (1 hidden layer)
5. Number of neurons layer 1 = mulai dari 2 (sama dengan jumlah input data), kemudian 3; 4; 5; 6; dst
6. Transfer function layer 1 = logsig; purelin; tansig
7. Transfer fuction layer 2 = logsig; purelin; tansig
8. Train network
9. Train results network 1: Output dan errors
10. Nilai R network 1 =
11. Kembali ke no. 7 dengan transfer function layer 2 = purelin
12. Train results network 2: Output dan errors
13. Nilai R network 2 =

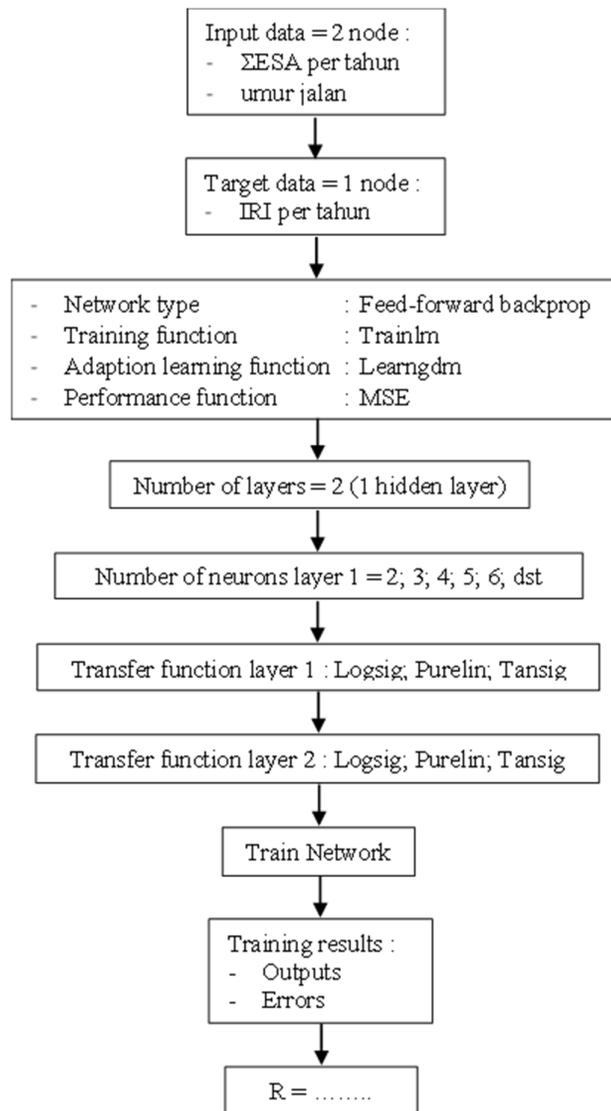
14. Kembali ke nomor 7 dengan transfer function layer 2= tansig
15. Train results network 3: Output dan errors
16. Nilai R network 3 =
17. Kembali ke no. 6 dengan transfer function layer 1 = purelin
18. Selanjutnya ke nomor 7 dan 16
19. Kembali ke nomor 6 dengan transfer function layer 1 = tansig
20. Selanjutnya ke nomor 7 dan 16 sehingga memenuhi kombinasi transfer function seperti pada Tabel 4.21 sebagai berikut:

Tabel 3. 1 Kombinasi Transfer Function Tahap I

Number of neurons layer 1	Network	TF layer 1	TF layer 2
2	Network 1	logsig	logsig
2	Network 2	logsig	purelin
2	Network 3	logsig	tansig
2	Network 4	purelin	logsig
2	Network 5	purelin	purelin
2	Network 6	purelin	tansig
2	Network 7	tansig	logsig
2	Network 8	tansig	purelin
2	Network 9	tansig	tansig

21. Kembali ke nomor 5, number of neurons layer 1 = 3; 4; 5; dan 6
22. Selanjutnya ke nomor 6 dan seterusnya, diulang sampai didapatkan nilai R tertinggi
23. Jika nilai R tertinggi masih < dari 0,7 maka dilanjutkan ke tahap II

Adapun diagram alir secara umum untuk trial and error tahap ke-1 dapat dilihat pada Gambar 4.3 sebagai berikut.



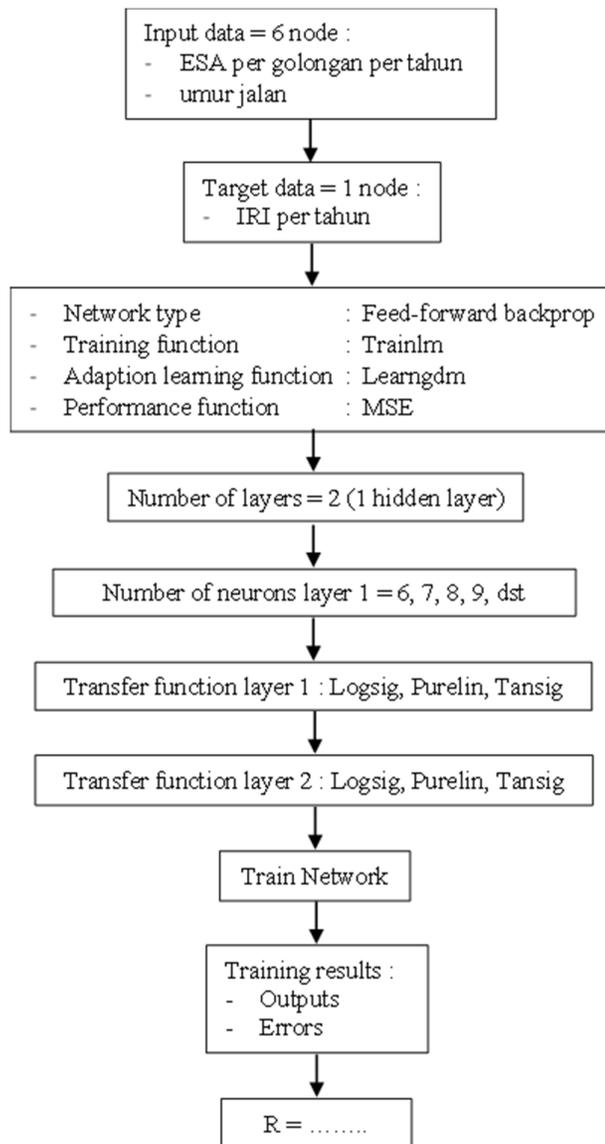
Gambar 3. 4 Diagram Alir Trial And Error Tahap I

b) Tahap II:

1. Input data = 6 node : ESA per golongan per tahun dan umur jalan
2. Target data = 1 node : IRI per tahun
3. Network type : Feed-forward backprop
 Training function : Trainlm
 Adaption learning function : Learngdm
 Performance function : MSE
4. Number of layers = 2 (1 hidden layer)

5. Number of neurons layer 1 = mulai dari 6 (sama dengan jumlah input data), kemudian 7; 8; 9; dst.
6. Transfer function layer 1 = logsig
7. Transfer fuction layer 2 = logsig
8. Train network
9. Train results network 1: Output dan errors
10. Nilai R network 1 =
11. Kembali ke langkah nomor 7 dengan transfer function layer 2 = purelin
12. Train results network 2: Output dan errors
13. Nilai R network 2 =
14. Kembali ke langkah nomor 7 dengan transfer function layer 2= tansig
15. Train results network 3: Output dan errors
16. Nilai R network 3 =
17. Kembali ke langkah nomor 6 dengan transfer function layer 1 = purelin
18. Selanjutnya ke langkah nomor 7 dan 16
19. Kembali ke langkah nomor 6 dengan transfer function layer 1 = tansig
20. Selanjutnya ke nomor 7 dan 16 sehingga memenuhi kombinasi transfer function seperti pada Tabel 4.20.
21. Kembali ke langkah nomor 5, number of neurons layer 1 = 7; 8; 9; dst.
22. Selanjutnya ke langkah nomor 6 dan seterusnya, diulang sampai didapatkan nilai R tertinggi
23. Kombinasi network (model) dengan nilai R tertinggi selanjutnya dipakai untuk masuk ke tahap III (number of neurons layer 1; transfer function layer 1; transfer fuction layer 2 = tetap/tidak berubah)

Adapun diagram alir secara umum untuk *trial and error* tahap II dapat dilihat pada Gambar 3.4 sebagai berikut.



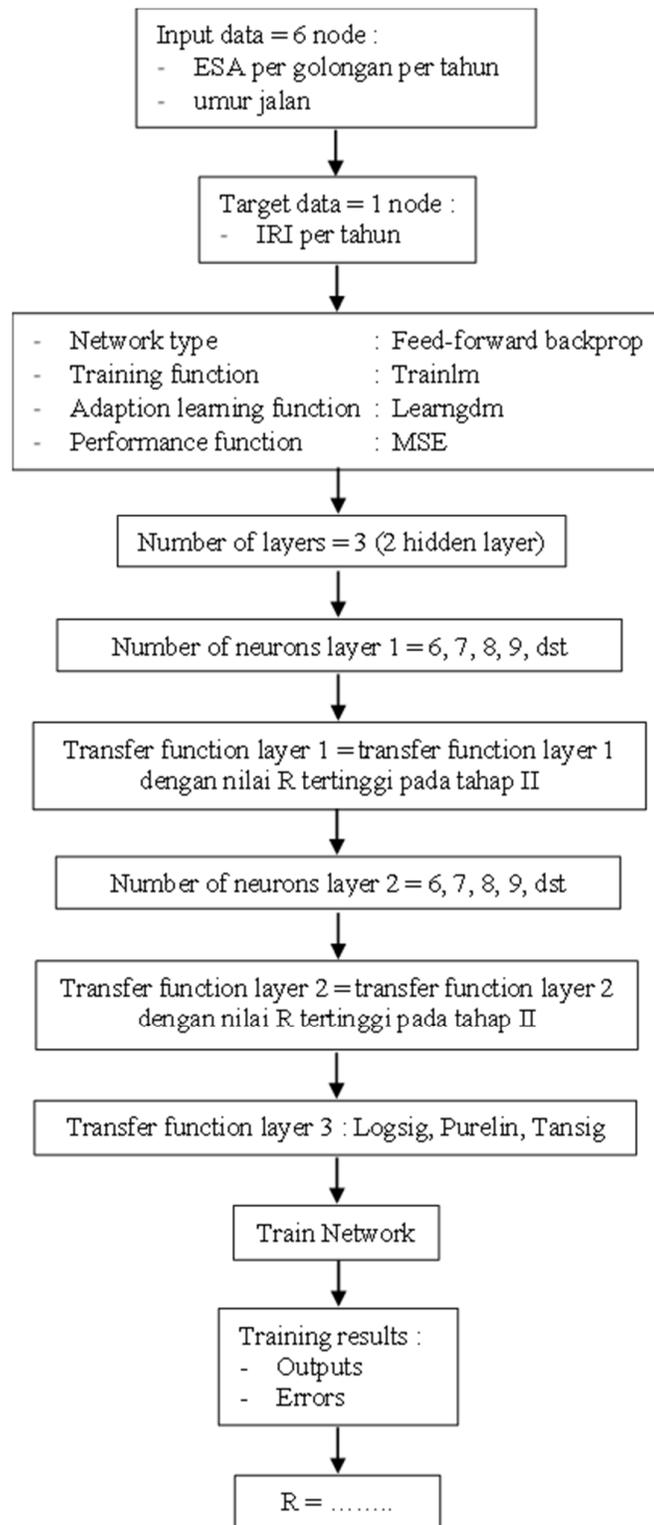
Gambar 3.5 Diagram Alir Trial And Error Tahap II

c) Tahap III:

1. Input data = 6 node : ESA per golongan per tahun dan umur jalan
2. Target data = 1 node : IRI per tahun
3. Network type : Feed-forward backprop
 Training function : Trainlm
 Adaption learning function : Learngdm
 Performance function : MSE
4. Number of layers = 3 (2 hidden layer)

5. Number of neurons layer 1 = number of neuron layer 1 dengan nilai R tertinggi pada tahap II
6. Transfer function layer 1 = transfer function layer 1 dengan nilai R tertinggi pada tahap II
7. Number of neurons layer 2 = 1; 2; 3; 4; dst.
8. Transfer fuction layer 2 = transfer function layer 2 dengan nilai R tertinggi pada tahap II
9. Transfer fuction layer 3 = logsig
10. Train network
11. Train results network 1: Output dan errors
12. Nilai R network 1 =
13. Kembali ke langkah nomor 9 dengan transfer function layer 3 = purelin
14. Train results network 2: Output dan errors
15. Nilai R network 2 =
16. Kembali ke langkah nomor 9 dengan transfer function layer 3= tansig
17. Train results network 3: Output dan errors
18. Nilai R network 3 =
19. Kembali ke langkah nomor 7, number of neurons layer 1 = 2; 3; 4; dst.
20. Selanjutnya ke langkah nomor 6 dan seterusnya, diulang sampai didapatkan nilai $R >$ dari R tertinggi tahap II

Adapun diagram alir secara umum untuk *trial and error* tahap III dapat dilihat pada Gambar 3.5 sebagai berikut.



Gambar 3. 6 Diagram Alir Trial And Error Tahap III

3.9. Membangun Model ANN untuk Memprediksi Nilai IRI

3.9.1. Input Node

a. Beban lalu lintas

Data yang dikumpulkan berupa volume lalu lintas per golongan per tahun, adapun penggolongan kendaraan di jalan tol, berdasarkan Keputusan Menteri Pekerjaan Umum nomor: 370/KPTS/M/2007, tanggal 31 Agustus 2007, seperti dapat dilihat pada Tabel 4.18 sebagai berikut.

Tabel 3. 2 Golongan Jenis Kendaraan Bermotor pada Jalan Tol yang sudah Beroperasi

Golongan	Jenis Kendaraan
Golongan I	Sedan, Jip, Pick Up/Truk Kecil dan Bus
Golongan II	Truk dengan 2 (dua) gandar
Golongan III	Truk dengan 3 (tiga) gandar
Golongan IV	Truk dengan 4 (empat) gandar
Golongan V	Truk dengan 5 (lima) gandar atau lebih

Sumber : (Kementerian PUPR Dirjen Bina Marga, 2017)

Selanjutnya volume lalu lintas dikonversi menjadi beban lalu lintas ke beban standar atau *equivalent standard axle* (ESA) dengan menggunakan Faktor Ekuivalen Beban (*Vehicle Damage Factor*), dengan rumus sebagai berikut:

$$ESA_{I-V} = VL_{I-V} \times VDF \times DD \times DL \dots \dots \dots (3.18)$$

Dimana :

ESA_{I-V} = beban lalu lintas per golongan per tahun

VL_{I-V} = volume lalu lintas per golongan per tahun

VDF = Faktor Ekuivalen Beban (*Vehicle Damage Factor*) tiap jenis kendaraan, seperti dalam Tabel 3.3

DD = faktor distribusi arah, untuk jalan dua arah umumnya diambil 0.50

DL = faktor distribusi lajur, seperti dalam Tabel 3.4

Tabel 3. 3 Faktor Ekivalen Beban (*Vehicle Damage Factor*) Tiap Jenis Golongan Kendaraan di Pulau Jawa

Golongan	Beban Normal		Beban Aktual	
	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4
Golongan I	1.0	1.0	1.0	1.0
Golongan II	5.1	4.0	9.2	5.3
Golongan III	6.4	4.7	14.4	8.2
Golongan IV	9.7	7.4	19.8	11.0
Golongan V	10.2	7.6	33.0	17.7

Sumber : (Kementerian PUPR Dirjen Bina Marga, 2017)

Beban normal dan beban aktual pada desain perkerasan jalan adalah dua jenis beban yang harus diperhitungkan dalam perencanaan konstruksi struktur perkerasan jalan (Kementerian PUPR Dirjen Bina Marga, 2017), berikut adalah penjelasan mengenai kedua jenis beban tersebut:

- a. Beban Normal: disebut juga beban terkendali adalah beban yang dihitung berdasarkan standar beban kendaraan yang telah ditetapkan oleh pemerintah. Beban normal ini digunakan sebagai acuan dalam perencanaan konstruksi struktur perkerasan jalan.
- b. Beban Aktual: disebut juga beban yang sebenarnya diterima oleh perkerasan jalan dari kendaraan yang melintas di atasnya. Beban aktual ini dapat bervariasi tergantung pada berat kendaraan, jumlah roda, dan kondisi jalan, untuk penelitian ini menggunakan VDF 4 dan VDF 5 beban aktual. Adapun alasan digunakan beban aktual adalah karena diasumsikan beban aktual berlangsung hingga tahun 2020, dan setelah itu diasumsikan beban berlebih terkendali dengan beban sumbu nominal 12 ton (Kementerian PUPR Dirjen Bina Marga, 2017).

Tabel 3. 4 Faktor Distribusi Lajur

Jumlah lajur setiap arah	Kendaraan niaga pada lajur desain (% terhadap populasi kendaraan niaga)
1	100
2	80
3	60
4	50

Sumber : (Kementerian PUPR Dirjen Bina Marga, 2017)

b. Umur jalan

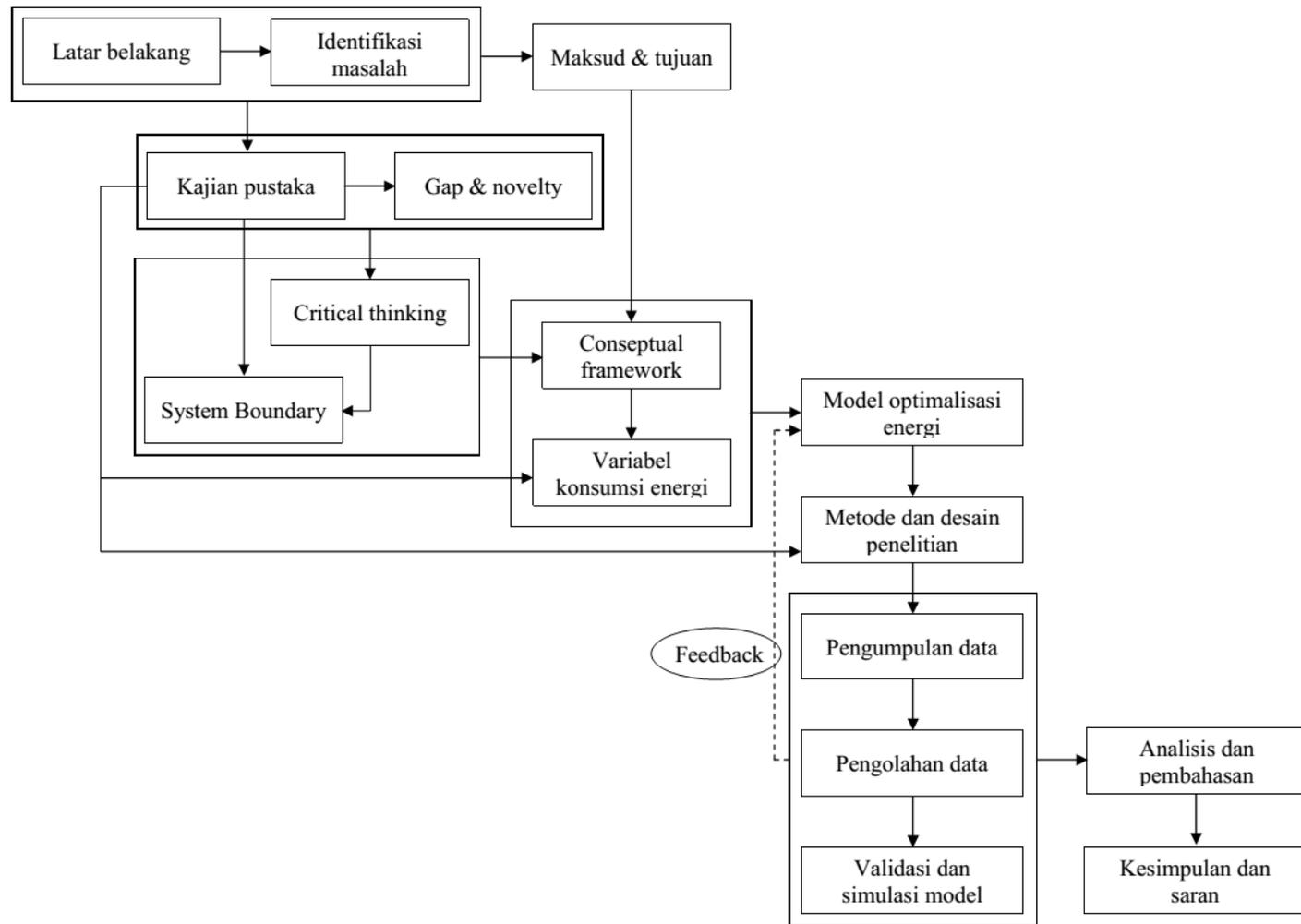
Umur jalan yang dimaksud adalah umur jalan sejak pertama kali jalan tol beroperasi sampai dengan tahun 2021 seperti dapat dilihat pada Lampiran 5 dimana volume lalu lintas per golongan dikelompokkan berdasarkan umur jalan, seperti dapat dilihat pada Lampiran 6 dan Lampiran 7

3.9.2. *Target Node*

Target node yang menjadi *output* model ini hanya ada satu berupa data nilai IRI per tahun sejak jalan tol beroperasi dan atau mulai dari tahun 2007, untuk setiap jalan tol menurut jenis perkerasannya, seperti dapat dilihat pada Lampiran 8 dan Lampiran 9.

3.10. Alur Penelitian

Penelitian ini dimulai dari latar belakang masalah energi dan emisi yang disebabkan oleh industri konstruksi di beberapa negara di dunia, kemudian secara khusus yang juga terjadi di Indonesia yang berkaitan dengan pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan. Berdasarkan latar belakang ini maka diidentifikasi masalah yang menjadi pokok maksud dan tujuan penelitian. Untuk mencari celah (*gap*) dan kebaruan ilmu (*novelty*) maka dilakukan tinjauan/kajian literatur, yang kemudian digunakan juga sebagai pijakan untuk merumuskan *critical thinking* dan menentukan *system boundary* penelitian. *Conceptual framework* dibangun berdasarkan, kajian pustaka, *gap* dan *novelty*, *critical thinking* serta *system boundary* sehingga penelitian ini menghasilkan kerangka yang jelas untuk menjawab maksud dan tujuan penelitian. Selanjutnya dibangun metode dan penelitian untuk membuat model optimalisasi energi dengan terlebih dulu mendefinisikan variabel, kemudian mengumpulkan data, mengolah data dan memvalidasi model, hasilnya dijadikan *feedback* untuk mendapatkan model yang akurat. Tahap selanjutnya adalah menganalisis data kemudian melakukan pembahasan sehingga pada akhirnya dapat ditarik kesimpulan dan saran, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.7 berikut ini.



Gambar 3. 7 Diagram Alur Penelitian