

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1. Latar Belakang**

Kendaraan listrik (*Electric Vehicle*/EV) tidak lagi hanya dipandang sebagai inovasi pada sektor transportasi, tetapi juga sebagai faktor yang semakin memengaruhi kebutuhan energi dan kinerja sistem tenaga listrik (IEA, 2025). Tren global menunjukkan bahwa penjualan EV meningkat dari 10 juta unit pada tahun 2022 menjadi sekitar 17 juta unit pada tahun 2024 dengan kontribusi lebih dari 20% terhadap total penjualan kendaraan baru secara global (IEA, 2023, 2024, 2025). Tren serupa juga terlihat di Provinsi Bali, dimana jumlah mobil listrik meningkat dari 350 unit pada tahun 2023 menjadi 1.932 unit pada tahun 2025, yang menunjukkan semakin berkembangnya adopsi kendaraan listrik pada tingkat regional (BPS Provinsi Bali, 2025). Pertumbuhan penetrasi kendaraan listrik tersebut berimplikasi pada meningkatnya kebutuhan energi untuk pengisian daya, sehingga jaringan distribusi tenaga listrik dituntut untuk mengakomodasi tambahan beban baru yang semakin besar (Muratori, 2018).

Beban pengisian kendaraan listrik memiliki karakteristik operasional yang berbeda dibandingkan beban konvensional pada sistem distribusi, baik dari sisi besaran daya maupun pola waktu pengisian, maupun sifatnya yang *time-dependent* dengan konsentrasi pengisian pada interval waktu tertentu (Muratori, 2018; Hasan *et al.*, 2023). Pengisian daya EV yang cenderung terkonsentrasi pada interval waktu tertentu, khususnya pada periode beban puncak sistem, berpotensi meningkatkan

beban yang terjadi secara bersamaan serta memperbesar arus pada penyulang distribusi (Muratori, 2018; Ihsan *et al.*, 2020). Kondisi tersebut dapat memicu deviasi tegangan serta peningkatan pembebanan jaringan, terutama pada sistem dengan margin operasi terbatas (Paudyal *et al.*, 2021; Karmaker *et al.*, 2024).

Kebutuhan evaluasi dampak penetrasi kendaraan listrik menjadi semakin penting pada sistem distribusi terisolasi yang beroperasi tanpa keterhubungan dengan sistem interkoneksi yang lebih besar. Sistem terisolasi cenderung lebih sensitif terhadap perubahan kondisi operasi karena memiliki kapasitas internal dan fleksibilitas operasi yang lebih terbatas dibandingkan sistem interkoneksi (IRENA, 2025). Selain itu, studi *hosting capacity* menunjukkan bahwa sistem terisolasi (*isolated grid*) lebih rentan mengalami pelanggaran batas operasi jaringan, seperti deviasi tegangan dan pembebanan peralatan, sehingga memerlukan evaluasi yang lebih cermat terhadap kemampuan jaringan dalam mengakomodasi beban tambahan (Lamedica *et al.*, 2019). Dalam konteks integrasi kendaraan listrik, penerapan EV pada sistem distribusi terisolasi yaitu seperti sistem distribusi 20 kV Nusa Penida memerlukan mekanisme pengelolaan dan pengendalian yang mempertimbangkan kondisi operasi sistem (Clairand *et al.*, 2018).

Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa integrasi kendaraan listrik pada sistem distribusi terisolasi memerlukan pemahaman yang jelas mengenai batas kemampuan jaringan dalam mengakomodasi tambahan beban pengisian (Clairand *et al.*, 2018; Lamedica *et al.*, 2019; IRENA, 2025). Informasi tersebut penting untuk mengetahui tingkat penetrasi EV yang masih dapat diakomodasi oleh jaringan tanpa

menyebabkan pelanggaran batas operasi teknis, seperti deviasi tegangan dan pembebanan termal peralatan (Paudyal *et al.*, 2021; Karmaker *et al.*, 2024). Untuk tujuan tersebut, digunakan konsep *Hosting Capacity* (HC), yang didefinisikan sebagai tingkat maksimum penetrasi beban yang masih dapat diterima tanpa menyebabkan pelanggaran batas tegangan dan pembebanan termal (Karmaker *et al.*, 2024). Dalam praktiknya, evaluasi HC dilakukan dengan meningkatkan penetrasi beban secara bertahap dan mengamati respons teknis jaringan hingga parameter operasi melampaui batas yang diizinkan (Fachrizal, 2020; Karmaker *et al.*, 2024).

Berbagai penelitian telah menggunakan pendekatan *Hosting Capacity* untuk mengevaluasi integrasi kendaraan listrik pada jaringan distribusi. Namun, nilai *Hosting Capacity* tidak bersifat universal dan sangat dipengaruhi oleh karakteristik jaringan, profil beban, lokasi penetrasi EV, serta batas operasi yang digunakan dalam evaluasi (Paudyal *et al.*, 2021; Hasan *et al.*, 2023; Shubhy *et al.*, 2024). Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada jaringan distribusi perkotaan atau sistem yang terhubung dengan interkoneksi yang lebih besar. Kajian pada sistem distribusi terisolasi masih relatif terbatas, padahal sistem semacam ini memiliki keterbatasan kapasitas dan fleksibilitas operasi yang dapat menghasilkan respons jaringan yang berbeda terhadap penetrasi kendaraan listrik. Dalam konteks Indonesia, sistem distribusi 20 kV Nusa Penida merupakan salah satu contoh sistem distribusi terisolasi yang memiliki karakteristik tersebut. Selain itu, evaluasi yang mempertimbangkan variasi temporal beban pengisian kendaraan listrik untuk mengidentifikasi interval waktu operasi jaringan yang paling kritis

serta menentukan batas penetrasi EV yang masih dapat diakomodasi tanpa melanggar batas operasi teknis masih belum banyak dilaporkan pada sistem distribusi terisolasi.

## 1.2. Rumusan Masalah

Perumusan permasalahan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana dampak teknis integrasi beban pengisian kendaraan listrik tanpa koordinasi terhadap profil tegangan dan pembebanan peralatan sistem distribusi 20 kV yang beroperasi secara terisolasi?
2. Pada interval waktu berapa kondisi operasi jaringan distribusi 20 kV menjadi paling kritis akibat variasi temporal beban pengisian kendaraan listrik tanpa koordinasi?
3. Berapa besar EV *hosting capacity* maksimum yang dapat diakomodasi oleh sistem distribusi 20 kV yang beroperasi secara terisolasi berdasarkan batas tegangan dan pembebanan peralatan melalui simulasi *quasi-dynamic*?

## 1.3. Tujuan Penelitian

Sejalan dengan rumusan masalah tersebut, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis dampak teknis integrasi beban pengisian kendaraan listrik tanpa koordinasi terhadap profil tegangan dan pembebanan peralatan sistem distribusi 20 kV yang beroperasi secara terisolasi berdasarkan hasil simulasi *quasi-dynamic*.

2. Mengidentifikasi interval waktu paling kritis pada jaringan distribusi 20 kV akibat variasi temporal beban pengisian kendaraan listrik tanpa koordinasi berdasarkan hasil simulasi *quasi-dynamic*.
3. Menentukan tingkat penetrasi maksimum kendaraan listrik yang dapat diintegrasikan ke dalam jaringan distribusi 20 kV yang beroperasi secara terisolasi dengan mengevaluasi respon tegangan dan pembebanan peralatan berdasarkan simulasi *quasi-dynamic*.

#### **1.4. Manfaat Penelitian**

1. Memberikan referensi ilmiah mengenai analisis EV *Hosting Capacity* pada sistem distribusi 20 kV yang beroperasi secara terisolasi menggunakan pendekatan *Quasi-Dynamic Simulation* (QDS).
2. Menyediakan informasi mengenai kemampuan teknis sistem distribusi 20 kV Nusa Penida dalam mengakomodasi penetrasi kendaraan listrik berdasarkan batas tegangan dan pembebanan peralatan.
3. Menjadi masukan bagi PT PLN (Persero) dalam perencanaan integrasi kendaraan listrik, pengelolaan beban, serta pengembangan infrastruktur kelistrikan pada sistem distribusi terisolasi.

#### **1.5. Batasan Penelitian**

1. Objek penelitian dibatasi pada sistem distribusi tegangan menengah 20 kV terisolasi di Nusa Penida yang dimodelkan berdasarkan data jaringan dan profil beban tahun 2025, tanpa mempertimbangkan interkoneksi dengan sistem kelistrikan lain.

2. Analisis difokuskan pada dampak integrasi beban EV terhadap profil tegangan dan pembebanan peralatan jaringan distribusi, tanpa membahas aspek ekonomi, keandalan lanjutan, kualitas daya, maupun stabilitas sistem tenaga listrik.
3. Evaluasi tegangan mengacu pada *Grid Code* Jawa-Madura-Bali (Jamali) Tahun 2007, dengan batas tegangan operasi sistem sebesar +5% untuk kenaikan tegangan dan -10% untuk penurunan tegangan terhadap tegangan nominal pada sisi 20 kV.
4. Batas pembebanan jaringan ditentukan berdasarkan kapasitas termal peralatan, dengan batas maksimum sebesar 100% dari kapasitas nominal sebagai representasi batas teknis sistem.
5. Pemodelan beban EV dilakukan menggunakan strategi pengisian tanpa koordinasi (*uncoordinated charging*) sebagai pendekatan *worst-case*, dengan representasi kendaraan *Battery Electric Vehicle* (BEV) kategori mobil penumpang berdasarkan model kendaraan yang digunakan dalam penelitian, serta dianalisis menggunakan simulasi *quasi-dynamic* (QDS) dengan horizon waktu 24 jam.
6. Sebaran beban EV dimodelkan menggunakan dua skenario distribusi beban yang tidak mempertimbangkan sebaran spasial berbasis fungsi bangunan atau aktivitas sosial ekonomi.
7. Penelitian ini tidak membahas strategi mitigasi, optimasi pengisian kendaraan listrik, maupun penguatan infrastruktur jaringan, dan dibatasi pada evaluasi batas teknis kemampuan jaringan distribusi dalam mengakomodasi penetrasi kendaraan listrik.