BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini kendaraan listrik (*Electric Vehicle*/EV) semakin menjadi pilihan terdepan masyarakat Indonesia dalam mendukung keberlanjutan dan capaian *net zero emissions*. Kendaraan listrik dipandang sebagai salah satu solusi ampuh mengurangi emisi karbon yang dihasilkan kendaraan berbahan bakar bensin, yang tentunya berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan.

Perkembangan kendaraan listrik menjadi salah satu bagian penting dalam transformasi sektor transportasi menuju sistem yang lebih rendah emisi. Peningkatan penggunaan kendaraan listrik perlu diikuti dengan pengembangan infrastruktur pengisian yang memadai agar aspek aksesibilitas dan keandalan layanan dapat dipenuhi (I. E. Agency, 2024).

Di Indonesia, pengembangan kendaraan bermotor listrik berbasis baterai didukung melalui Peraturan Presiden Nomor 55 Tahun 2019 yang kemudian diperbarui melalui Peraturan Presiden Nomor 79 Tahun 2023. Kebijakan tersebut menjadi landasan percepatan ekosistem kendaraan listrik, termasuk pengembangan infrastruktur pendukung pengisian energi listrik (Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 79 Tahun 2023 Tentang Perubahan Atas Peraturan Presiden Nomor 55 Tahun 2019 Tentang Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai Untuk Transportasi Jalan, 2023)

Data dari Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2025-2034 yang disusun oleh PT PLN dan dipublikasikan pada laman resmi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) mencatat pertumbuhan jumlah mobil listrik di Indonesia. Kenaikan EV roda 4 ini mencapai 57.9% dalam lima tahun terakhir.

Pada 2020, jumlah EV baik motor listrik, mobil listrik dan bus listrik baru sebanyak 8370 unit, yang kemudian naik menjadi 16.120 unit pada 2021. Tahun berikutnya, jumlah mobil listrik mencapai 36.320 unit, yang terus naik mencapai 84.650 unit pada 2023. Pada data terbaru bulan Agustus 2024, jumlah mobil listrik di Indonesia mencapai 136.720

unit. Pada 2025, jumlah mobil listrik diproyeksikan naik mencapai 215.800 unit, yang kemudian terus tumbuh hingga mencapai 2,88 juta unit pada 2034.

Tabel 1. 1 Pertumbuhan EV di Indonesia Tahun 2020-2025

Tahun	Motor Listrik	Mobil Listrik	Bus Listrik	Total EV	Pertumbuhan (%)	Sumber
2020	6.100	2200	70	8370		Kemenhub, ESDM
2021	11500	4500	120	16120	92.5	Kemenhub, ESDM
2022	25800	10300	220	36320	125.2	Kemenhub, Gaikindo
2023	67000	17300	350	84650	133.0	Kemenhub, ESDM, Gaikindo
2024	105000	31200	520	136720	61.5	Kemenhub, PLN 2024
2025	160000	55000	800	215800	57.9	Outlook Energi 2024, RUPTL 2025–2034

Meski peningkatan ini menunjukkan tren positif, penggunaan kendaraan listrik masih harus terus didorong. Pada 2023, Badan Pusat Statistik (BPS) mencatat terdapat 18,28 juta sepeda motor di Indonesia. Jika dibandingkan, maka populasi mobil listrik masih sangat kecil, hanya sekitar 0,15% saja.

Dalam hal ini, peran pemerintah guna mendorong penggunaan mobil listrik menjadi penting. Infrastruktur penunjang seperti Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) yang belum sepenuhnya tersebar di seluruh wilayah di Indonesia membuat pemakaian kendaraan listrik masih terbatas di wilayah-wilayah tertentu saja (Peraturan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 13 Tahun 2020 Tentang Penyediaan Infrastruktur Pengisian Listrik Untuk Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai, 2020).

Selain itu, waktu pengisian yang cukup lama juga menjadi perhatian. Pengisian daya kendaraan listrik tentu tidak secepat kendaraan berbahan bakar bensin, apalagi jika antrean di SPKLU penuh.

Dukungan lebih dari pemerintah dapat membantu terus mendorong populasi kendaraan listrik di Indonesia, menciptakan jalanan yang bebas asap kendaraan dan aman bagi kesehatan serta lingkungan.

Pengembangan SPKLU memiliki keterkaitan dengan perkembangan sistem ketenagalistrikan nasional dan strategi PT PLN (Persero) dalam mendukung ekosistem kendaraan listrik. Data statistik PLN dapat digunakan sebagai salah satu sumber untuk

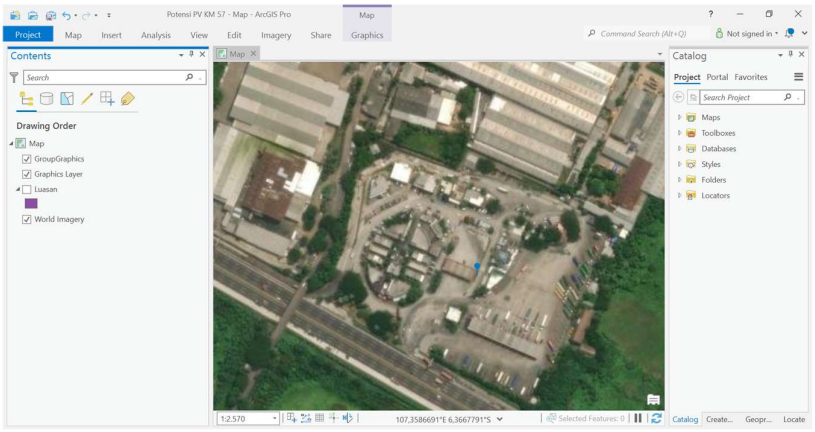
memberikan gambaran perkembangan sistem ketenagalistrikan dan infrastruktur pendukung pada periode penelitian ((Persero), 2024, 2025)

Ruas Jalan Tol Jakarta–Cikampek dan Jalan Tol Cikopo–Palimanan (Cipali) merupakan koridor lalu lintas nasional yang sangat penting dan menjadi lokasi strategis untuk penyediaan EV *Charging Station* (SPKLU). Pembangunan SPKLU membutuhkan suplai daya yang besar dan stabil, terutama untuk jenis *fast charging* dan *ultra-fast charging*. Kondisi ini berpotensi menambah beban puncak pada jaringan PLN dan meningkatkan biaya operasional energi listrik *Rest Area*.

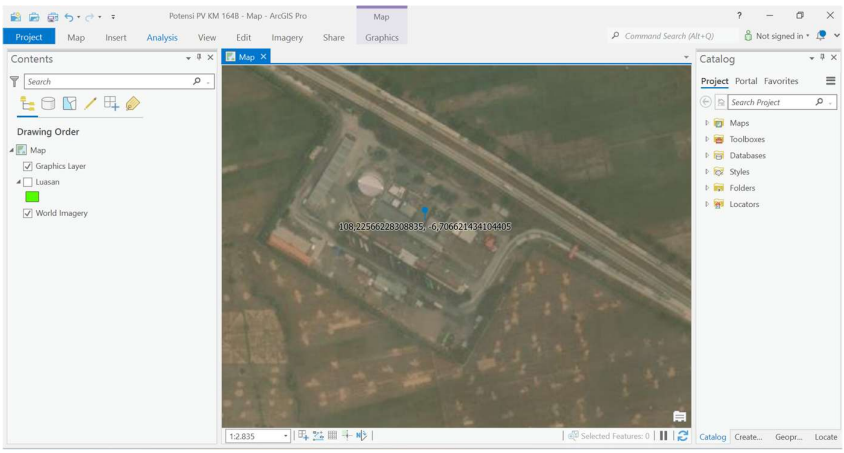
Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *on-grid* menjadi salah satu solusi untuk mengurangi beban energi SPKLU melalui suplai energi bersih pada siang hari. Sistem PLTS *on-grid* memungkinkan sinkronisasi dengan jaringan PLN tanpa perlu beroperasi sebagai sistem *off-grid*. Namun, karakteristik beban SPKLU yang fluktuatif—sering mengalami lonjakan konsumsi daya saat beberapa EV melakukan pengisian secara bersamaan sehingga membutuhkan sistem pendukung energi tambahan. Oleh karena itu, integrasi *Battery Energy Storage System* (BESS) diperlukan sebagai backup dan *peak shaving* untuk menjaga keandalan suplai energi dan mengurangi tekanan pada trafo distribusi (I. R. E. Agency, 2024).

BESS pada sistem *on-grid* bukan hanya berfungsi sebagai penyimpanan energi cadangan, tetapi juga dapat digunakan untuk menyerap surplus PLTS pada siang hari, yang kemudian digunakan untuk menopang SPKLU saat beban meningkat. Dengan demikian, konfigurasi PLTS *on-grid* yang dilengkapi baterai cadangan (*hybrid on-grid + backup storage*) menjadi solusi teknis yang efisien untuk mendukung SPKLU di *Rest Area*.

Indonesia memiliki potensi energi matahari yang cukup tinggi, khususnya di wilayah Jawa Barat dan Jawa bagian utara tempat *Rest Area* KM 57 dan KM 164 B berada. Analisis spasial menggunakan ArcGIS diperlukan untuk menilai kesesuaian lokasi pemasangan panel surya, luas area yang tersedia, potensi bayangan, serta estimasi energi berdasarkan radiasi *Global Horizontal Irradiance* (GHI) dari Global Solar Atlas. Melalui kombinasi analisis spasial dan perhitungan teknis energi, penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan rancangan pemanfaatan PLTS *on-grid* dan BESS sebagai solusi pendukung energi SPKLU yang berkelanjutan, efisien, dan andal.



Gambar 1. 1 *Rest Area* KM 57
Sumber: ArcGIS Pro



Gambar 1. 2 *Rest Area* KM 164 B
Sumber: ArcGIS Pro

Penelitian ini dilaksanakan pada dua lokasi *Rest Area* jalan tol strategis di Pulau Jawa, yaitu *Rest Area* KM 57 pada ruas Tol Jakarta–Cikampek dan *Rest Area* KM 164 B pada ruas Tol Cikopo–Palimanan (Cipali). Pemilihan kedua lokasi tersebut didasarkan pada perannya sebagai simpul penting mobilitas kendaraan jarak menengah dan jarak jauh, serta tingginya potensi aktivitas pengisian kendaraan listrik seiring dengan meningkatnya penetrasi kendaraan listrik di Indonesia. *Rest Area* pada koridor tol utama tidak hanya berfungsi sebagai fasilitas pendukung perjalanan, tetapi juga berpotensi menjadi pusat layanan pengisian daya kendaraan listrik dengan kebutuhan energi yang relatif besar dan bersifat fluktuatif.

Secara geografis, kedua lokasi penelitian berada pada wilayah dengan karakteristik iklim tropis yang memiliki intensitas radiasi matahari yang relatif tinggi dan stabil sepanjang tahun. Kondisi tersebut memberikan peluang yang signifikan untuk pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai sumber energi terbarukan pendukung operasional stasiun pengisian kendaraan listrik (*EV Charging Station*). Selain itu, ketersediaan area fisik berupa atap bangunan, kanopi parkir, dan lahan terbuka di lingkungan *Rest Area* memungkinkan dilakukannya analisis potensi luasan pemasangan modul surya secara spasial.

Dalam penelitian ini, penentuan dan analisis lokasi dilakukan dengan pendekatan spasial menggunakan perangkat lunak ArcGIS untuk memastikan ketepatan batas area kajian serta akurasi data geografis yang digunakan. Analisis spasial tersebut menjadi dasar dalam mengidentifikasi area potensial pemasangan PLTS serta karakteristik topografi lokasi, yang selanjutnya digunakan sebagai input dalam perhitungan teknis dan evaluasi kelayakan sistem PLTS *on-grid* dengan dukungan *Battery Energy Storage System* (BESS). Informasi rinci mengenai koordinat geografis, karakteristik lokasi, dan deskripsi umum area penelitian disajikan pada tabel lokasi penelitian berikut.

Tabel 1. 2 Deskripsi Lokasi Penelitian

Parameter	**KM 57**	**KM 164 B**
Koordinat	-6.367912, 107.361212	-6.706621, 108.225662
Jenis *Rest Area*	TIPE A	TIPE A
Jumlah SPKLU	1	1

Selain perbedaan karakteristik teknis SPKLU, kedua lokasi memiliki karakteristik aktivitas komersial dan fasilitas *rest area* yang berbeda. Rest Area KM 57 merupakan rest area Tipe A pada koridor Jakarta–Cikampek yang memiliki beragam fasilitas dan tenant makanan, minuman, minimarket, SPBU, SPKLU, serta fasilitas pendukung lainnya. Pada periode puncak perjalanan, lokasi ini menunjukkan intensitas aktivitas pengguna yang tinggi. Sementara itu, Rest Area KM 164 B merupakan rest area Tipe A pada koridor Cipali arah Jakarta dengan fasilitas restoran, makanan tradisional, kedai kopi, minimarket, outlet fashion/oleh-oleh, SPBU, SPKLU, ATM, dan fasilitas ibadah. Perbedaan karakteristik aktivitas, tenant, fasilitas, dan pola perjalanan tersebut berpotensi membentuk pola singgah dan kebutuhan pengisian kendaraan listrik yang berbeda pada masing-masing lokasi.

Tabel 1. 3 Karakteristik Aktivitas Rest Area KM 57 dan KM 164B

No.	Karakteristik	Rest Area KM57	Rest Area KM 164B	Relevansi terhadap Penelitian
1	Karakter rest area	Tipe A dengan fasilitas lengkap	Tipe A dengan fasilitas lengkap	Keduanya merupakan rest area utama yang representatif untuk penelitian SPKLU.
2	Karakter koridor perjalanan	Tol Jakarta–Cikampek arah Cikampek	Tol Cikopo–Palimanan arah Jakarta	Memberikan karakter perjalanan dan pola singgah yang berbeda.
3	Indikasi intensitas aktivitas	Relatif tinggi, terutama pada periode puncak perjalanan	Aktif sebagai rest area Tipe A	Berpotensi memengaruhi utilisasi SPKLU dan kebutuhan energi.
4	Karakter tenant	Beragam tenant makanan, minuman, minimarket, dan UMKM	Makanan tradisional, restoran, kedai kopi, minimarket, serta oleh-oleh/fashion	Keragaman tenant dapat meningkatkan aktivitas pengguna selama berhenti.
5	Keragaman kuliner	Tinggi; tersedia food court dan berbagai pilihan makanan/minuman	Beragam; tersedia restoran, makanan tradisional, kedai kopi, dan food court	Aktivitas kuliner dapat meningkatkan potensi waktu singgah pengguna.
6	Tenant nonkuliner	Minimarket, ATM, dan fasilitas perjalanan lainnya	Minimarket, ATM, outlet oleh-oleh/fashion, dan fasilitas perjalanan	Menambah fungsi rest area selain makan dan beristirahat.
7	Aktivitas SPKLU	Terdapat aktivitas pengisian kendaraan listrik; intensitas dapat meningkat pada periode perjalanan tertentu	Tersedia fasilitas SPKLU bagi pengguna kendaraan listrik pada koridor Cipali	Menunjukkan adanya kebutuhan layanan charging pada kedua lokasi.
8	Potensi waktu singgah (dwell time)	Potensial cukup tinggi karena makan, ibadah, istirahat, dan pengisian energi	Potensial cukup tinggi karena makan, belanja, ibadah, istirahat, dan pengisian energi	Dwell time berpotensi mendukung proses pengisian kendaraan listrik.
9	Karakter aktivitas pengguna	Transit, makan, ibadah, istirahat, pengisian BBM/EV,	Transit jarak jauh, makan, belanja, ibadah,	SPKLU menjadi bagian dari

		dan aktivitas komersial	istirahat, dan pengisian energi	ekosistem aktivitas rest area.	
10	Implikasi awal penelitian	Aktivitas dan fasilitas yang beragam berpotensi membentuk pola charging tertentu	Karakter tenant, fasilitas, dan perjalanan berpotensi membentuk profil charging yang berbeda	Menjadi dasar komparasi kedua lokasi dalam penelitian.	

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana potensi energi surya dan ketersediaan area yang dapat dimanfaatkan untuk pengembangan PLTS dalam mendukung kebutuhan energi SPKLU di *Rest Area* KM 57 Jalan Tol Jakarta–Cikampek dan *Rest Area* KM 164 B Jalan Tol Cikopo–Palimanan?
2. Berapa kebutuhan energi SPKLU dan kapasitas PLTS *on-grid* yang sesuai untuk mendukung operasional SPKLU berdasarkan karakteristik kebutuhan energi dan potensi energi surya pada *Rest Area* KM 57 dan KM 164 B dengan mempertimbangkan variasi *safety factor* modul?
3. Berapa kapasitas *Battery Energy Storage System* (BESS) yang sesuai untuk mendukung fungsi *backup* dan *peak shaving* pada sistem SPKLU di *Rest Area* KM 57 dan KM 164 B?
4. Bagaimana kontribusi energi PLTS dan BESS dalam mendukung kebutuhan energi SPKLU serta mengurangi konsumsi energi listrik yang bersumber dari jaringan PLN pada *Rest Area* KM 57 dan KM 164 B dengan konfigurasi sistem *zero export*?
5. Bagaimana kelayakan teknis dan ekonomi penerapan PLTS *on-grid* dan PLTS terintegrasi BESS dalam mendukung operasional SPKLU di *Rest Area* KM 57 dan KM 164 B serta variasi *safety factor* terhdapa CAPEX, *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *Payback Period*, dan *Levelized Cost of Energy* (LCOE)?

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian potensi PTLS on-grid untuk pemanfaatan SPKLU pada *Rest Area* KM 57 dan KM 164 B menggunakan analisa spasial ArcGIS yaitu:

1. Menganalisis potensi energi surya dan ketersediaan area yang dapat dimanfaatkan untuk pengembangan PLTS dalam mendukung kebutuhan energi SPKLU di *Rest Area* KM 57 dan KM 164 B.
2. Menganalisis kebutuhan energi SPKLU serta menentukan kapasitas PLTS on-grid yang sesuai berdasarkan kebutuhan energi dan potensi energi surya pada *Rest Area* KM 57 dan KM 164 B dan menganalisis *safety factor* 1,1; 1,2; dan 1,5.
3. Menentukan kapasitas BESS yang sesuai untuk mendukung fungsi *backup* kurang lebih 1 jam dan *peak shaving* pada sistem SPKLU di *Rest Area* KM 57 dan KM 164 B.
4. Menganalisis kontribusi energi PLTS dan BESS dalam mendukung kebutuhan energi SPKLU serta mengurangi konsumsi energi listrik yang bersumber dari jaringan PLN pada *Rest Area* KM 57 dan KM 164 B dengan konfigurasi sistem *zero export*.
5. Menganalisis kelayakan teknis dan ekonomi penerapan PLTS on-grid dan PLTS terintegrasi BESS dalam mendukung operasional SPKLU di *Rest Area* KM 57 dan KM 164 B serta pengaruh variasi *safety factor* berdasarkan indikator NPV, IRR, *Payback Period*, dan LCOE.

1.4 Manfaat

Manfaat yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Manfaat Akademik menjadi referensi ilmiah tentang integrasi PLTS *on-grid* dengan infrastruktur EV serta memperkaya kajian sosio-teknis penggunaan SIG (Sistem Informasi Geografis) untuk perencanaan energi terbarukan.
2. Manfaat Praktis memberikan gambaran teknis kepada pengelola *Rest Area*, operator SPKLU, Jasa Marga, dan PLN mengenai pemanfaatan PLTS untuk efisiensi energi dan menyediakan basis perhitungan kapasitas PLTS yang tepat secara teknis.
3. Manfaat Lingkungan Mengurangi emisi karbon dari konsumsi listrik SPKLU serta Mendukung target penurunan emisi gas rumah kaca nasional dan NZE 2060.

1.5 Ruang Lingkup Masalah

Ruang lingkup masalah dalam penelitian ini difokuskan pada batasan-batasan permasalahan terkait pemanfaatan PLTS *on-grid* dan sistem penyimpanan energi baterai

(BESS) untuk mendukung operasi SPKLU di *Rest Area* KM 57 dan KM 164 B. Ruang lingkup masalah tersebut meliputi:

1. Analisis potensi energi surya dilakukan berdasarkan data Global Solar Atlas (GSA) dan pengolahan spasial menggunakan ArcGIS untuk menentukan nilai radiasi matahari dan area yang layak dipasang PLTS.
2. Penentuan area potensial PLTS terbatas pada:
   a. Atap bangunan *Rest Area*
   b. Kanopi parkir
   c. Area terbuka yang memungkinkan pemasangan panel surya
3. Perhitungan kapasitas PLTS dibatasi pada kapasitas yang dapat dipasang di area efektif, termasuk perhitungan performa energi (kWh/hari) berdasarkan nilai GHI dan *performance ratio*.
4. Sistem pembangkit yang dikaji adalah PLTS *on-grid*, yaitu sistem yang tetap terkoneksi dengan jaringan PLN dan tidak dirancang untuk bekerja secara mandiri penuh (*off-grid*).
5. BESS dianalisis sebagai sistem pendukung, meliputi:
   a. *Backup* ketika pasokan PLN terganggu
   b. *Peak shaving* untuk mengurangi lonjakan beban SPKLU
   c. Tidak dibahas sebagai sumber utama (*primary power supply*)
6. Simulasi energi difokuskan pada:
   a. Integrasi PLTS–BESS–jaringan PLN
   b. Distribusi energi siang dan malam hari
   c. Profil *State of Charge* (SOC) baterai
7. Analisis ekonomi terbatas pada:
   a. CAPEX dan OPEX
   b. Penghematan energi dari PLTS
   c. Nilai keekonomian (NPV, IRR, Payback Period)
   d. Tidak mencakup studi sensitivitas multi skenario secara mendalam
8. Analisis sistem kelistrikan PLN tidak mencakup studi proteksi, harmonisa, ataupun kajian *power quality detail*.

Dengan ruang lingkup masalah tersebut, penelitian diarahkan secara spesifik untuk membahas relevansi teknis dan ekonomis pemanfaatan PLTS *on-grid* dan BESS sebagai pendukung energi SPKLU di dua *Rest Area* jalan tol.

1.6 Kebaharuan

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi analisis spasial, sumber daya surya, karakteristik kebutuhan SPKLU, *demand-based sizing* PLTS, analisis *sensitivitas safety factor* jumlah modul, BESS untuk *backup* dan *peak shaving*, skema *zero export*, serta evaluasi teknis-ekonomi pada dua *rest area* dengan karakteristik beban yang berbeda. Berbeda dengan pendekatan yang hanya memaksimalkan pemanfaatan area, penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan jumlah modul perlu dibatasi oleh kebutuhan energi dan kemampuan sistem menyerap produksi karena *oversizing* pada sistem *zero export* dapat meningkatkan *curtailment* dan menurunkan kelayakan ekonomi:

1. *Safety factor* tidak ditetapkan secara arbitrer, tetapi diuji pada rasio 1,1; 1,2; dan 1,5.
2. Pemilihan konfigurasi mempertimbangkan *trade-off* antara *design margin*, CAPEX, surplus energi, dan indikator ekonomi.
3. KM57 dan KM 164 B dibandingkan sebagai dua lokasi dengan perbedaan area, PVOUT, *connected load*, kebutuhan energi, dan *rating charger*.
4. BESS diposisikan secara eksplisit untuk *backup* dan *peak shaving*, sehingga nilai teknisnya dibedakan dari nilai finansial berbasis penghematan energi.

Tabel 1. 4 Kebaharuan Penelitian

Elemen	Penelitian Terdahulu	Penelitian Ini
Metode GIS	QGIS, perhitungan manual	ArcGIS Pro, Zonal Statistics
Model Energi	PLTS sederhana	PLTS + BESS terintegrasi
Lokasi	Skala kota / negara	*Rest Area* Trans Jawa
Output	Estimasi kasar	Model kWh eksak + ekonomi

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tesis ini memiliki 5 (lima) Bab disusun sebagai berikut:

BAB I: Pendahuluan

Membahas latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, ruang lingkup dan batasan, kebaharuan penelitian, serta sistematika penulisan.

BAB II Tinjauan Pustaka

Merupakan ulasan terhadap beberapa penelitian yang relevan dengan penelitian yang dilakukan oleh penulis yaitu tentang Analisis Pemanfaatan PLTS *On-Grid* dengan *Backup Battery Energy Storage System* (BESS) untuk Mendukung Operasional *EV Charging Station* Di *Rest Area* Jalan Tol KM 57 Dan KM 164 B Hal tersebut meliputi landasan teori yang relevan, temuan dan bahan penelitian sebelumnya yang diperoleh dari berbagai referensi.sebelumnya yang diperoleh dari berbagai referensi.

BAB III Metodologi Penelitian

Merupakan bagian yang menjelaskan tentang metode penelitian yang digunakan, prosedur dalam penelitian, diagram alir penelitian yang dilakukan, serta penjelasan dari masing-masing diagram alir dari penelitian.

BAB IV Hasil dan Pembahasan

Merupakan penjelasan tentang hasil analisis spasial, teknis, dan ekonomi serta pembahasan Analisis Pemanfaatan PLTS *on-Grid* dengan *Backup Battery Energy Storage System* (BESS) untuk Mendukung Operasional *EV Charging Station* di *Rest Area* Jalan Tol KM 57 dan KM 164 B

BAB V Penutup

Merupakan kesimpulan dan saran dari hasil penelitian ini.