

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 *Charging Station (Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum)*

Charging Station atau Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) adalah sarana infrastuktur pendukung pengisian energi listrik untuk Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (KBLBB) yang diperuntukan untuk tempat umum. *Charging Station* ini juga merupakan infrastruktur vital dalam mendukung mobilitas kendaraan listrik di Indonesia (Nissa, n.d.). Seperti pada gambar 2.1 kendaraan yang sedang melakukan pengisian baterai mobil listrik di SPKLU.



Gambar 2. 1 Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik

Sumber: (Wahyudi et al., 2024)

2.1.1 Kategori Stasiun Pengisian Mobil Listrik

Berdasarkan kategori stasiun pengisian mobil listrik dibagi menjadi tiga kategori dasar yaitu stasiun pengisian rumahan, stasiun pengisian komersial, dan stasiun pengisian umum.

a. Stasiun Pengisian Rumahan

Komponen stasiun pengisian mobil listrik dipasang serta dilakukan dirumah, tipe 1 ini hanya mendukung stasiun pengisian daya AC 1 fasa dengan tegangan 120 V dan arus 32 A. tipe ini dikenal juga dengan “J1772

Connector” jenis SPKLU yang memakai *plug socket* ini adalah kategori perumahan.

b. Stasiun Pengisian Komersial

Peralatan pengisian baterai mobil listrik di pasang sekaligus dilakukan ketika parkir, seperti pada mal, kantor dan lingkungan Pendidikan, stasiun dengan kategori komersial ini bias berbayar maupun gratis. Tipe ini mendukung pengisian baterai mobil seperti yang dijabarkan pada IEC 61851-1 dengan tegangan 240 V dan arus 20-63 A, tipe ini dikenal sebagai “*mennekes connector*”.

c. Stasiun Pengisian Umum

Komponen stasiun pengisian mobil listrik ditaruh di tempat umum layaknya stasiun pengisian BBM umum (SPBU), jenis pengisian mobil listrik ini umumnya berbayar. Tipe ini biasanya berada di tegangan 480 Vdc dan arus 125 A.

2.1.2 Jenis-jenis Teknologi Charging Station

Teknologi sistem pengisian ulang pada SPKLU terbagi menjadi beberapa jenis yang secara rinci ditujukan pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Perbandingan perangkat pengisian Kendaraan Listrik

	<i>Slow Charger</i>	<i>Medium Charger</i>	<i>Fast Charger</i>	<i>Ultrafast Charger</i>
Lokasi	Pribadi/Rumah	Instalasi Khusus (Gedung kantor)	Umum, tempat parkir/istirahat (SPKLU)	SPKLU

	<i>Slow Charger</i>	<i>Medium Charger</i>	<i>Fast Charger</i>	<i>Ultrafast Charger</i>
Arus keluaran maksimum (A)	16 AC	63 AC	100 AC atau 250 DC	300 AC atau 500 DC
Daya keluaran	$\leq 3,7\text{ kW}$	$\leq 22\text{ kW}$	$\leq 50\text{ kW}$	$\leq 150\text{ kW}$
Waktu pengisian	8 jam	4 jam	30 menit	15 menit

1. Pengisian lambat (*Slow Charging*)

Teknologi pengisian ulang listrik dengan daya keluaran kurang lebih 3,7 kW, arus (AC) keluaran maksimum 16 Ampere, dengan konektor *plug in* tipe 1 dan 2 (IEC 62196-2), serta waktu yang diperlukan untuk pengisian penuh kendaraan sekitar 8 jam.

2. Pengisian menengah (*Mediuml Charging*)

Teknologi pengisian ulang listrik dengan daya kurang lebih 22 kW, arus (AC) keluaran maksimum 63 Ampere, dengan konektor *plug-in* tipe 2 (IEC 62196-2), serta waktu yang diperlukan untuk pengisian penuh kendaraan sekitar 4 jam.

3. Pengisian cepat (*Fast Charging*)

Teknologi pengisian ulang listrik dengan daya kurang lebih 50 kW, arus keluaran maksimum 100 (AC)/250 (DC) Ampere, dengan konektor *plug-in* tipe CCS (*Combined Charging Type*) dan CHAdemo (IEC 62196-3), serta waktu yang diperlukan untuk pengisian penuh kendaraan sekitar 30 menit.

4. Pengisian sangat cepat (*Ultrafast Charging*)

Teknologi pengisian ulang listrik dengan daya kurang lebih 150 kW, arus keluaran maksimum 300 (AC)/500 (DC) Ampere, dengan konektor *plug-in* tipe CCS (*Combined Charging Type*) dan CHAdeMO (IEC 62196-3), serta waktu yang diperlukan untuk pengisian penuh kendaraan sekitar 15 menit.

2.1.3 Tipe Charger

SPKLU juga menyediakan beberapa tipe *plug socket* yang biasa disesuaikan dengan kebutuhan kendaraan listrik. Terdapat tiga tipe konektor pengisian daya pada kendaraan listrik yang ada di Indonesia sesuai dengan SNI yang dikeluarkan BSN (Badan Standar Nasional), yaitu SNI 62196-2, SNI 62196-2 dan SNI 62196-3 seperti pada gambar 2.2



Gambar 2. 2 Tipe *plug socket-outlets* SPKLU

Sumber: (Wahyudi et al., 2024)

1. Type 2 AC Charging

Type 2 AC Charging adalah tipe konektor *plug socket* mobil listrik dengan arus bolak-balik. Konektor ini memiliki ciri khas dengan adanya penanda berwarna merah dengan tujuh lubang pada bagian permukaannya dan menjadi salah satu jenis konektor yang banyak digunakan di negara-negara Eropa.

2. DC Charging CHAdeMO

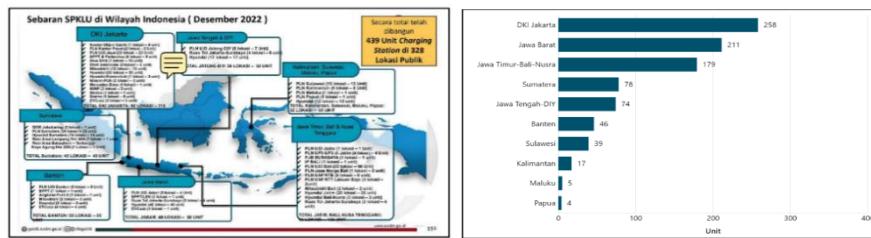
DC Charging CHAdeMO adalah tipe *plug socket* mobil listrik dengan tipe arus searah. *Plug socket* ini menggunakan konektor dengan konfigurasi tipe AA *series* dan ditandai warna hijau pada bagian selubungnya. Pada bagian ujungnya, DC Charging CHAdeMO memiliki 4 lubang untuk mengisi daya listrik ke mobil. Tipe *plug socket* ini pada umumnya banyak digunakan oleh mobil listrik keluaran pabrikan Jepang dan Amerika Serikat.

3. DC Charging Combo Type CCS2

DC Charging Combo Type CCS2 adalah tipe konektor *plug socket* mobil listrik dengan kombinasi arus bolak balik dan searah. Adaptor tipe ini dirancang menggunakan arus DC dengan konektor CCS dan ditandai dengan adanya selubung warna biru pada bagian atasnya. Selain itu, tipe *plug socket* ini juga dikategorikan sebagai *plug socket fast charging* yang banyak diaplikasikan pada mobil-mobil keluaran Eropa.

2.2 Penyebaran Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik di Indonesia

Perkembangan sebaran SPKLU di wilayah Indonesia semakin meningkat setiap tahunnya. Data dari Ditjen Ketenagalistrikan ESDM menunjukkan bahwa pada periode Desember 2022, total telah dibangun 439 unit SPKLU, yang meningkat menjadi 1.081 unit SPKLU pada akhir tahun 2023 berdasarkan data yang diperoleh pada laman resmi PT PLN (Persero) (Wahyudi et al., 2024).



Gambar 2. 3 Penyebaran SPKLU di Indonesia tahun 2022 dan 2023

Sumber: (Wahyudi et al., 2024)

2.3 Kualitas Daya Listrik

Kualitas daya listrik berperan sebagai parameter penting dalam sistem tenaga listrik yang menggambarkan tingkat kestabilan serta kehandalan pasokan listrik yang disediakan oleh utilitas dan diterima oleh konsumen. Menurut *International Electrotechnical Commission* (IEC) mendefinisikan bahwa kualitas daya listrik sebagai keseluruhan parameter kelistrikan yang menggambarkan kondisi suplai daya listrik dalam keadaan normal, utamanya yang berhubungan terhadap kontinuitas layanan serta karakteristik tegangan seperti besarnya tegangan, frekuensi, dan bentuk gelombang. *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) juga mendefinisikan bahwa kualitas daya listrik sebagai konsep terkait penyediaan dan sistem pentanahan daya listrik bagi perangkat yang sensitif, untuk menjamin perangkat dapat beroperasi dengan baik sesuai kebutuhan (Nugroho et al., 2025).

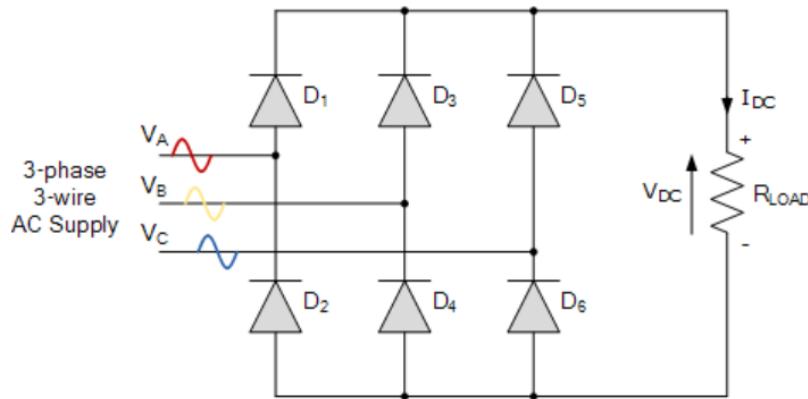
2.4 Manajemen beban listrik

Manajemen beban listrik adalah pengendalian penggunaan energi listrik dengan mengurangi atau mengoptimalkan jumlah pemakaian energi listrik dan tingkat penggunaan energi listrik. Dalam sistem tenaga listrik, faktor beban adalah item yang harus dikendalikan atau di kelola oleh sistem manajemen energi. Manajemen energi adalah suatu program yang direncanakan dan dilaksanakan

secara sistematis untuk memanfaatkan energi secara efektif dan efisien dengan melakukan perencanaan, pencatatan, pengawasan, dan evaluasi secara kontinu tanpa mengurangi kualitas produksi (Butarbutar et al., 2018).

2.5 Rectifier Tiga Fasa

Rectifier atau penyearah gelombang merupakan bagian dari catu daya yang dapat mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC. Penyearah tiga fasa merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah tegangan sumber masukan arus bolak-balik (tegangan AC 3 fasa) dalam bentuk sinusoidal menjadi tegangan luaran searah yang dapat dikendalikan. Rangkaian penyearah tiga fasa dapat digunakan untuk memberi daya pada kalangan industri seperti pengisian baterai kendaraan listrik yang memerlukan kebutuhan daya besar (Wulandari et al., 2023).



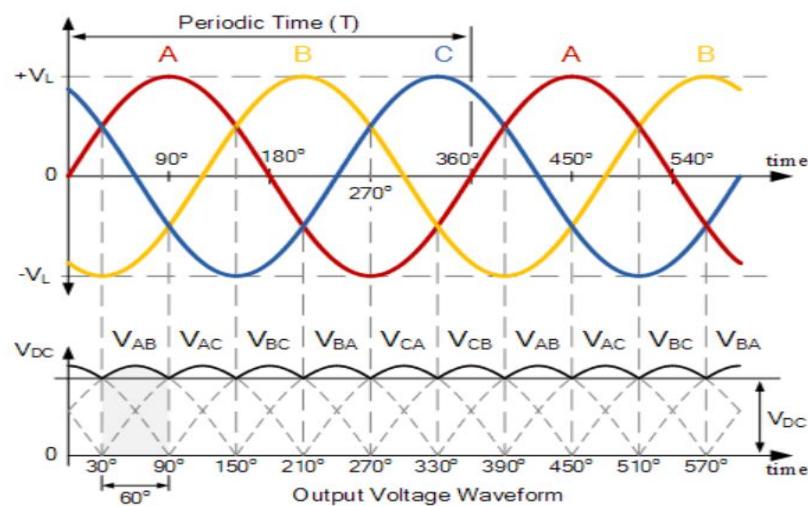
Gambar 2. 4 Rectifier tiga fasa gelombang penuh

Sumber: (*Electronics Tutorial*)

Pada gambar 2.4 merupakan rangkaian rectifier tiga fasa, dimana fasa merah-kuning-biru (VA – VB – VC) dan fasa merah (VA) dimulai dari sudut 0° , setiap fasa terhubung antara sepasang dioda. Dioda yang berada diatas dari pasangan penghantar memberi daya pada sisi positif (+) beban, sementara dioda yang

dibawah memberi daya pada sisi negatif (-). Kondisi ini menyebabkan 6 pulsa tegangan output dalam satu siklus (360°). Dioda D1, D3, D2 dan D4 membentuk jaringan penyearah jembatan antara fasa A dan B, demikian pula dioda D3, D5, D4 dan D6 membentuk jaringan penyearah jarngn antara fasa B dan C dan D5, D1, D6 dan D2 membentuk penyearah jarngn antara fasa C dan A. Dioda D1, D3, dan D5 mengalirkan arus ke rel positif. Dioda yang memiliki tegangan lebih positif pada terminal anodanya akan mengalirkan arus. Maka dioda D2, D4, dan D6 mengalirkan arus ke negatif.

Penyearah gelombang penuh tiga fasa menggunakan 6 buah dioda yang masing-masing dioda nya menghantarkan arus berdasarkan urutan konduksinya dan tiap sudut untuk konduksinya adalah 60° dalam satu siklus. Urutan konduksi untuk dioda adalah $D_1 - D_2, D_2 - D_3, D_3 - D_4, D_4 - D_5, D_5 - D_6$, dan $D_6 - D_1$. Pasangan dioda yang dihubungkan di antara pasangan jalur sumber memiliki tegangan line ke line $\sqrt{3}$ kali tegangan fasa sumber tegangan tiga fasa yang terhubung Y (amirullah, n.d.).



Gambar 2. 5 Gelombang konduksi rectifier tiga fasa gelombang penuh

Sumber: (*Electronics Tutorial*)

Jadi nilai DC rata-rata dari bentuk gelombang tegangan keluaran dari penyebarluas penuh 3 fasa adalah sebagai berikut:

$$V_{dc} = \frac{3}{2\pi} \int_0^{\pi/3} \sqrt{2}V_m \sin \omega t d(\omega t) \quad (2.1)$$

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{2}V_m}{2\pi} \cdot \int_0^{\pi/3} \sqrt{2}V_m \sin \omega t d(\omega t) \quad (2.2)$$

Substitusi hasil turunan

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{2}V_m}{2\pi} \cdot \frac{1}{2} = \frac{3\sqrt{2}}{4\pi} V_m \cdot 2 \quad (2.3)$$

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_m \quad (2.4)$$

$$V_{dc} = 1,35 \cdot V_m \quad (2.5)$$

Dengan V_m adalah tegangan fasa puncak.

Berdasarkan persamaan 1 jika diketahui beban, maka diperoleh arus rata-rata:

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} \quad (2.6)$$

Sedangkan tegangan keluaran rms adalah:

$$V_{rms} = \left[\frac{2}{2\pi/6} \int_0^{\pi/6} 3V_m^2 \cos \omega t d(\omega t) \right]^{1/2} \quad (2.7)$$

$$V_{rms} = \left(\frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi} \right)^{1/2} V_m \quad (2.8)$$

$$V_{rms} = 1,6554 V_m \quad (2.9)$$

Berdasarkan persamaan 3, maka diperoleh arus rms:

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} \quad (2.10)$$

Dan nilai efisiensinya:

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{rms}} \quad (2.11)$$

$$= \frac{V_{dc}I_{dc}}{V_{rms}I_{rms}} \quad (2.12)$$

Dimana

V_{dc} = Tegangan keluaran rata-rata DC (Volt)

V_m = Tegangan fasa puncak (Volt)

V_{rms} = Tegangan efektif AC (Volt)

I_{dc} = Arus keluaran rata-rata DC (Ampere)

I_{rms} = Arus efektif AC (Ampere)

R = Resistansi beban (Ohm)

P_{dc} = Daya rata-rata DC (Watt)

P_{rms} = Daya efektif AC (Watt)

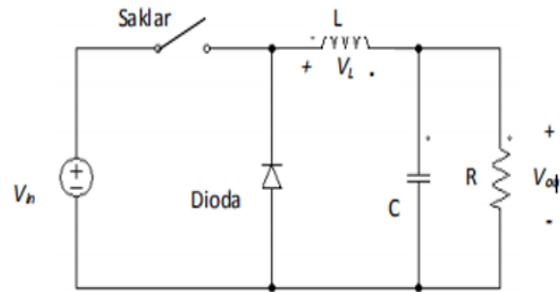
η = Efisiensi penyearah (%)

2.6 Converter DC-DC

Konverter DC-DC merupakan sebuah rangkaian yang bisa mengubah tegangan DC ke level tegangan yang berbeda. Dengan menggunakan konveter DC-DC ini, maka tegangan masukan akan dinaikkan atau diturunkan sesuai dengan kebutuhan. Peraturan tegangan dapat dilakukan dengan mengatur nilai *duty cycle* (rasio waktu on/off) pada saklarnya (Andika Yudi, 2021).

2.6.1 Buck Konverter

Konverter jenis ini merupakan konverter DC-DC yang bias menghasilkan tegangan keluaran yang lebih rendah dibandingkan dengan masukanya ($V_0 < V_{in}$) dengan mengatur *duty cycle* nya. Dilihat dari gambar merupakan rangkaian *buck* konverter.



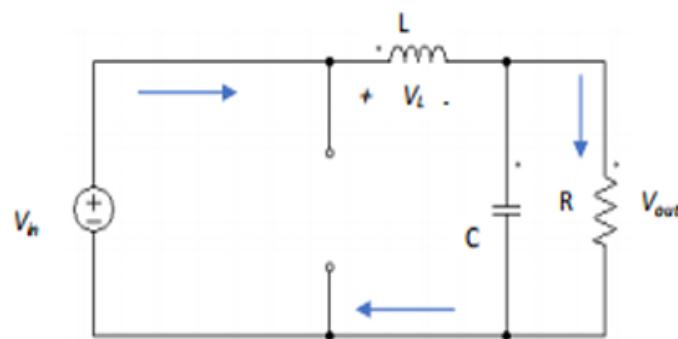
Gambar 2. 6 Rangkaian buck converter

sumber: (Andika Yudi, 2021).

Rangkaian konverter ini terdapat dua kondisi yaitu ketika saklar dalam keadaan on dan saat saklar dalam keadaan off. Berikut penjelasan dari kedua kondisi saklar tersebut.

a. Saat saklar kondisi On

Kondisi ini disebut dengan periode pengisian arus induktor dan dioda dalam keadaan *reserve bias*. *Reserve bias* merupakan cara system proteksi untuk menghindari kesalahan trip dengan tetap sebagai *backup* proteksi. Seperti pada gambar berikut ini.



Gambar 2. 7 Rangkaian buck converter mode on

sumber: (Andika, 2021)

Sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$V_{in} = V_L + V_{out} \quad (2.13)$$

$$V_{in} = L \frac{di}{dt} + V_{out} \quad (2.14)$$

$$V_{in} = L \frac{\Delta i_{L(on)}}{t_{on}} + V_{out} \quad (2.15)$$

$$V_{in} = L \frac{\Delta i_{L(on)}}{DT} + V_{out} \quad (2.16)$$

$$\Delta i_{L(on)} = \frac{(V_{in} - V_{out})DT}{L} \quad (2.17)$$

Dimana:

V_{in} = Tegangan input (Volt)

V_L = Tegangan inductor (Volt)

V_{out} = Tegangan keluaran (Volt)

L = Induktor (Henry)

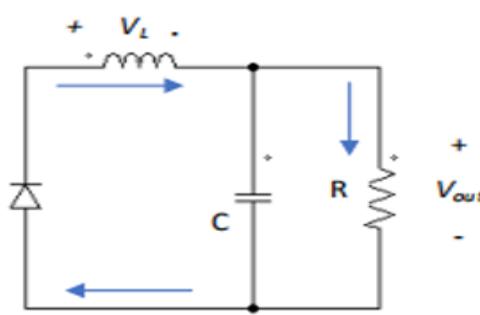
Δi_L = Riak arus (Ampere)

D = Duty cycle

T = Waktu konduksi saklar (Sekon)

b. Saat saklar kondisi Off

Pada saat kondisi on ini biasanya disebut dengan periode pengosongan arus induktor dan dioda dalam keadaan *forward bias* yang merupakan kondisi dimana tegangan luar pada sebuah diode disusun sedemikian rupa sehingga memungkinkan arus listrik mengalir melaluinya. Arus mengalir dari induktor ke beban kemudian dilanjutkan ke dioda dan kembali ke induktor. Arus yang mengalir adalah arus induktor saja dan induktor murni (tidak ada resistansi) maka arus tersebut akan membentuk kurva linear menurun. Sehingga ($V_0 < V_{in}$) dengan menggunakan buck konverter. Seperti dilihat pada gambar sebagai berikut



Gambar 2. 8 Rangkaian *buck converter* mode off

sumber: (Andika, 2021)

Sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$-V_{in} = V_L \quad (2.18)$$

$$-V_{in} = L \frac{di}{dt} \quad (2.19)$$

$$-V_{in} = L \frac{\Delta_{iL(off)}}{t_{off}} \quad (2.20)$$

$$-V_{in} = L \frac{\Delta_{iL(off)}}{(1-D)T} \quad (2.21)$$

$$-\Delta_{iL(off)} = \frac{V_{out}(1-D)T}{L} \quad (2.22)$$

Pada kondisi *steady state* atau keadaan tunak adalah saat kondisi sistem telah mencapai nilai konstan, total perubahan arus pada induktor harus sama dengan nol, sehingga,

$$\Delta_{iL}(On) + \Delta_{iL}(Off) = 0 \quad (2.23)$$

Dengan memasukan persamaan saat kondisi saklar on dan saat kondisi saklar off ke persamaan *steady state* maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\frac{(V_{in}-V_{out})DT}{L} - \frac{V_{out}(1-D)T}{L} = 0 \quad (2.24)$$

$$V_{in}D - V_{out}D - V_{out} + V_{out}D = 0 \quad (2.25)$$

$$V_{out} = V_{in}D \quad (2.26)$$

Komponen induktor pada rangkaian *buck* berfungsi sebagai filter arus yang dapat mengurangi riak arus. Komponen induktor dapat ditentukan sebagai berikut:

$$L = -\frac{V_{out}(1-D)}{\Delta i_L f_s} \quad (2.27)$$

f_s = Frekuensi switching (Hz)

Komponen kapasitor pada *buck converter* berfungsi sebagai filter tegangan yang mampu mengurangi riak tegangan. Penentuan komponen kapasitor dapat diperoleh sebagai berikut

$$C = -\frac{(1-D)}{8.L\left(\frac{\Delta V_0}{V_{out}}\right).f_s^2} \quad (2.28)$$

Dimana:

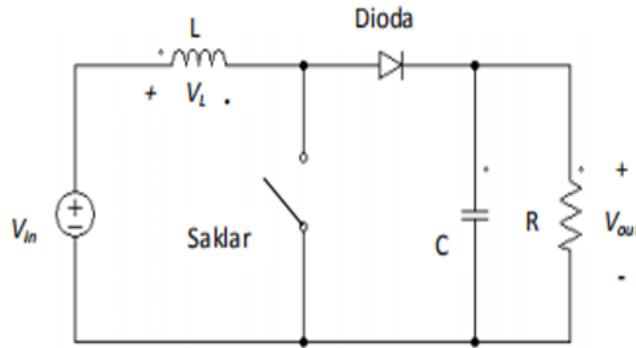
ΔV_0 = Riak tegangan

C = Kapasitansi (C)

L = Induktansi (H)

2.6.2 Boost Konverter

Konverter tipe ini merupakan jenis DC-DC konverter yang dapat menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi dari pada tegangan masukan ($V_0 = V_{in}$) dengan mengatur *duty cycle*. Terlihat pada gambar berikut ini yang merupakan rangkaian *boost converter*.

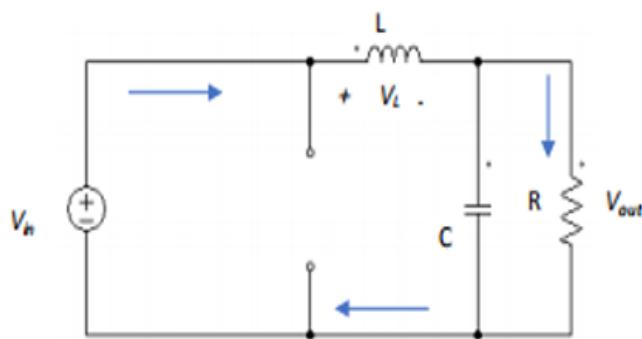
Gambar 2. 9 Rangkaian *boost converter*

sumber: (Andika, 2021)

Sama halnya dengan *buck converter*, *boost converter* juga mempunyai dua kondisi yaitu kondisi saklar saat on dan kondisi saklar saat off. Berikut penjelasan dua kondisi tersebut

a. Saklar dalam kondisi On

Kondisi ini biasanya disebut juga dengan periode pengisian arus induktor dan dioda dalam keadaan *reserve bias*. Seperti pada gambar yang merupakan rangkaian *boost converter* saat saklar dalam kondisi on.

Gambar 2. 10 Rangkaian *boost converter* mode on

sumber: (Andika, 2021)

Induktor akan terhubung secara langsung dengan sumber atau V_{in} dan akan mengalami proses pengisian (*charging*). Sehingga akan diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$V_{in} = V_L \quad (2.29)$$

$$V_{in} = L \frac{di}{dt} \quad (2.30)$$

$$V_{in} = L \frac{\Delta_{iL(on)}}{t_{on}} \quad (2.31)$$

$$V_{in} = L \frac{\Delta_{iL(on)}}{DT} \quad (2.32)$$

$$\Delta_{iL(on)} = \frac{V_{in}DT}{L} \quad (2.33)$$

Dimana:

V_{in} = Tegangan input (Volt)

V_L = Tegangan inductor (Volt)

V_{out} = Tegangan keluaran (Volt)

L = Induktor (Henry)

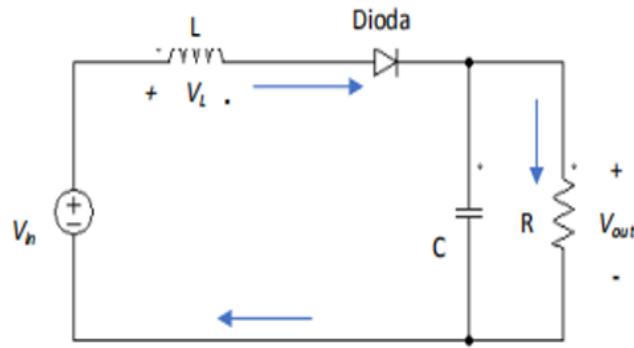
Δ_{iL} = Riak arus (Ampere)

D = Duty cycle

T = Waktu konduksi saklar (Sekon)

b. Saklar dalam kondisi Off

Kondisi ini biasanya disebut dengan periode pengosongan arus induktor. Induktor disini berfungsi sebagai sumber arus dan tegangan V_{in} . Sedangkan resistor berfungsi sebagai beban yang di suplai oleh dua buah sumber tegangan yaitu V_{in} dan V_L seperti pada gambar berikut ini.

Gambar 2. 11 Rangkaian *boost converter* mode off

sumber: (Andika, 2021)

Maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$V_{in} = V_L + V_{out} \quad (2.34)$$

$$V_{in} = L \frac{di}{dt} + V_{out} \quad (2.35)$$

$$V_{in} = L \frac{\Delta i_{L(off)}}{t_{off}} + V_{out} \quad (2.36)$$

$$V_{in} = L \frac{\Delta i_{L(off)}}{(1-D)T} + V_{out} \quad (2.37)$$

$$\Delta i_{L(off)} = \frac{(V_{in} - V_{out})(1-D)T}{L} \quad (2.38)$$

Pada kondisi *steady state*, total perubahan arus pada induktor harus sama dengan nol. Sehingga,

$$\Delta i_L(On) + \Delta i_L(Off) = 0 \quad (2.39)$$

Dengan memasukan persamaan kondisi saklar keadaan on dan keadaan off ke persamaan *steady state* maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\frac{V_{in}DT}{L} - \frac{V_{in} - V_{out}(1-D)T}{L} = 0 \quad (2.40)$$

$$V_{in}(D + 1 - D) - V_{out}(1 - D) = 0 \quad (2.41)$$

Maka didapatkan rumus *boost converter* sebagai berikut:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (2.42)$$

Arus outputnya

$$I_{out} = I_{in}(1 - D) \quad (2.43)$$

Komponen induktor dapat ditentukan sebagai berikut:

$$L = -\frac{V_{in} \cdot D}{\Delta i_L f_s} \quad (2.44)$$

Penentuan komponen kapasitor dapat diperoleh sebagai berikut:

$$C = -\frac{D}{R \left(\frac{\Delta V_0}{V_{out}} \right) \cdot f_s} \quad (2.45)$$

Dimana:

V_{in} = Tegangan input (Volt)

V_L = Tegangan inductor (Volt)

V_{out} = Tegangan keluaran (Volt)

I_{out} = Arus output (A)

I_{in} = Arus input (A)

L = Induktor (Henry)

C = Kapsitor (Henry)

Δi_L = Riak arus (Ampere)

D = Duty cycle

T = Waktu konduksi sakla (s)

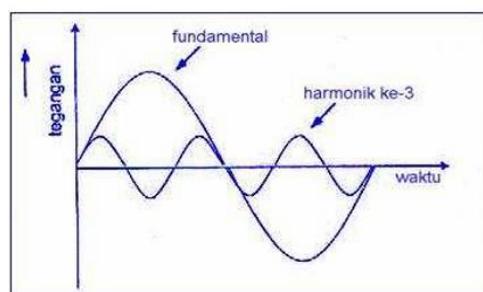
2.7 Harmonisa

Harmonisa adalah distorsi periodik gelombang sinus tegangan, arus atau daya dengan bentuk gelombang yang frekuensinya merupakan kelipatan di luar bilangan

satu terhadap frekuensi fundamental (frekuensi 50 Hz atau 60 Hz). Semakin banyak gelombang harmonis yang ikut pada gelombang fundamentalnya, maka gelombang akan semakin mendekati gelombang persegi atau gelombang akan berbentuk nonsinusoidal. Gelombang harmonic ini akan berkombinasi dengan gelombang aslinya, sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan penjumlahan antara gelombang murni dengan gelombang harmoniknya (Panjaitan, 2015).

Pengaruh harmonis dalam sistem pengisian daya EV merupakan pertimbangan yang signifikan karena efek potensialnya terhadap kualitas daya dan stabilitas jaringan listrik secara keseluruhan. Peningkatan distorsi dari arus dan tegangan harmonik dapat mengakibatkan peralatan listrik lainnya menjadi terlalu panas. Pengisian daya EV berpotensi menghasilkan harmonis dengan frekuensi yang tidak diinginkan serta bentuk gelombang sinusoidal bervariasi pada umumnya (Pratama Rizky, 2025).

Gambar 2.13 dan gambar 2.14 merupakan salah satu contoh menunjukkan gelombang dasar dan gelombang harmonic ke-3.

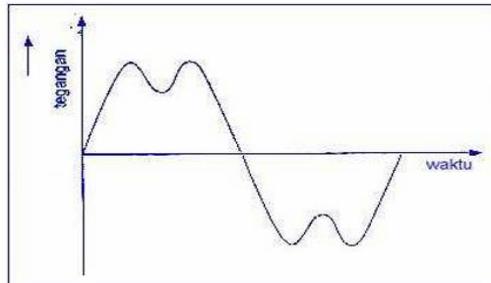


Gambar 2. 12 Bentuk gelombang tegangan dasar dan harmonik ke-3

sumber: (Panjaitan, 2015)

Bentuk distorsi gelombang akan lebih kompleks lagi bila semua gelombang harmonik yang terjadi di jumlahkan dengan gelombang frekuensi dasar. Besarnya

amplitude harmonic biasanya hanya beberapa persen dari amplitude gelombang dasar (Panjaitan, 2015).



Gambar 2. 13 Bentuk gelombang tegangan yang terdistorsi harmonik
sumber: (Panjaitan, 2015)

2.7.1 Individu Harmonik Distortion (IHD)

Individu Harmonik Distortion (IHD) merupakan rasio tegangan atau arus antara nilai RMS harmonik dengan nilai RMS dasar.

$$IHD_h = \frac{\sqrt{M_h^2}}{M_1^2} \quad (2.46)$$

Dimana:

IHD_h = IHD orde harmonic ke-h ($h=2,3,4,5,\dots$)

M_h = Nilai RMS arus atau tegangan harmonic ke-h

M_1 = Nilai RMS arus atau tegangan dasar (fundamental)

Berdasarkan IEEE standard 519-2014 batas IHD yang direkomendasikan bagi pelanggan yang terhubung dengan sistem tegangan berkisar 120 V sampai 69 kV disesuaikan dengan *short circuit ratio* (rasio hubung singkat).

Tabel 2. 2 Standar IHD yang digunakan berdasarkan Standard IEEE

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order^b						
I_{SC}/I_L	$2 \leq h < 11^a$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20 ^c	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

2.7.2 Total Harmonik Distortion (THD)

Total Harmonik Distortion (THD) merupakan rasio nilai RMS dari komponen harmonika dengan nilai RMS dari komponen dasar yang dinyatakan dalam bentuk persen(%). Nilai THD dijadikan Batasan tegangan atau arus harmonic yang masih dapat ditoleransi dalam suatu system tenaga listrik. dengan parameter ini, dapat diketahui apakah distorsi yang terjadi akan berbeda pada tingkat yang dapat diterima atau pada tingkat yang merugikan.

Nilai ini dapat diperhitungkan untuk tegangan maupun arus.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\max} M_h^2}}{M_1} \quad (2.47)$$

atau

$$THD = (IHD_2^2 + IHD_3^2 + IHD_4^2 + \dots)^{\frac{1}{2}} \quad (2.48)$$

Dimana:

THD = Total Harmonic Distortion

M_h = Nilai RMS arus atau tegangan harmonic ke-h

M_1 = Nilai RMS arus atau tegangan dasar (fundamental)

Berdasarkan IEEE standard 519-2014 tentang nilai batas maksimum distorsi haromonisa tegangan pada sistem dapat dilihat pada tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Standar THD yang digunakan berdasarkan Standard IEEE

Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%) $h \leq 50$	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 ^a

2.8 *Electrical Vehicle (EV)*

Electrical Vehicle merupakan jenis kendaraan yang menggunakan motor listrik sebagai sumber tenaga utama dan ditenagai oleh baterai. EV dinilai lebih ramah lingkungan karena tidak mengeluarkan emisi gas buang seperti halnya kendaraan bahan bakar fosil. Kendaraan listrik tidak hanya dianggap sebagai alternatif yang lebih bersih, tetapi juga sebagai bagian dari upaya global untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan (Dutta & Bauman, 2024).

2.8.1 Jenis-jenis kendaraan listrik

Pada saat ini, EV dibedakan menjadi lima jenis sesuai dengan teknologi mesinnya yaitu:

1. Kendaraan Listrik Baterai (BEV)

Kendaraan yang digerakkan oleh tenaga listrik menggunakan paket baterai yang besar, BEV dapat menempuh jarak mencapai 160-250 km dan menempuh jarak sejauh 500 km hanya dengan sekali pegasian daya.

2. Kendaraan Listrik Hibrida *Plug-in* (PHEV)

Kendaraan yang didorong oleh mesin konvensional yang mudah terbakar dan mesin listrik yang diisi oleh eksternal yang dapat dicolokkan sumber listrik, dapat menyimpan listrik yang cukup untuk mengurangi konsumsi bahan bakar secara signifikan. PHEV menyediakan baterai 12 kWh yang memungkinkan berkendara menempuh jarak sejauh 50 km hanya dengan mesin listrik.

3. Kendaraan Listrik Hibrida (HEV)

Kendaraan didorong oleh kombinasi mesin konvensional dan mesin listrik, bedanya dengan PHEV adalah bahwa HEV tidak dapat dicolokkan ke jaringan sumber listrik. baterai yang memberikan energi ke mesin listrik yang diisi oleh daya dihasilkan oleh mesin pembakaran kendaraan dan baterai juga dapat diisi oleh energi kinetic yang dihasilkan yaitu saat penggereman, mengubah energi kinetik menjadi energi listrik. Menyediakan baterai 1,3 kWh dan dapat menempuh jarak sejauh 25 km.

4. Kendaraan Listrik Fuel Cell (FCEV)

Kendaraan ini dilengkapi dengan mesin listrik yang menggunakan campuran hidrogen dan oksigen terkompresi yang diperoleh dari udara. Hyundai Nexo FCEV adalah contoh dari jenis kendaraan ini, yang dapat menempuh jarak 650 km tanpa mengisi bahan bakar.

5. Kendaraan Listrik Jarak Jauh (ER-EV)

Sama hal nya dengan BEV kendaraan ini dilengkapi dengan pembakaran tambahan mesin, yang mengisi baterai kendaraan jika diperlukan hanya saja tidak seperti PHEV dan HEV hanya digunakan untuk pengisian

daya, sehingga tidak dihubungkan dengan roda kendaraan. Memiliki baterai 42,2 kWh yang dapat menempuh jarak sejauh 260 km (Sudjoko, 2021).

2.9 Baterai Untuk Kendaraan Listrik

Baterai adalah sebuah sel listrik dimana didalamnya berlangsung proses elektrokimia yang *reversible* (dapat berkebalikan) dengan efisiennya yang tinggi. Baterai EV memiliki karakteristik sel yang seimbang, yang disebut sel seimbang adalah baterai mengalami reaksi kimia ion lithium bergerak dari elektroda anoda ke elektroda katoda saat proses pelepasan listrik sebaliknya saat proses pengisian daya ion bergerak kearah yang berlawanan (Jeon et al., 2021).

2.9.1 Baterai berdasarkan pada proses yang terjadi

1. *Primary Battery*

Baterai yang hanya dapat digunakan hanya sekali saja, material elektrodanya tidak dapat berkebalikan arah ketika dilepaskan.

2. *Secondary Battery*

Baterai yang dapat digunakan dan diisi beberapa kali, proses kimia yang terjadi di dalam baterai ada *reversible*.

Jenis-jenis baterai sekunder antara lain:

a) Baterai *ion lithium (Li-ion)*

Baterai ini paling banyak digunakan pada kendaraan listrik modern karena kepadatan energi tinggi, umur pakai panjang, dan bobot ringan.

b) Baterai *Lithium Polymer (Li-Po)*

Variasi dari Li-ion, dengan elektrolit dalam bentuk polimer gel umumnya lebih ringan dan bisa dibuat dalam berbagai bentuk

c) Baterai *Lead Acid (Accu)*

Teknologi tertua, menggunakan elektrolit asam sulfat dan plat timbal, masih digunakan karena murah dan mudah didaur ulang.

d) Baterai *Nickle-Metal Hydride (Ni-MH)*

Pengembangan dari Ni-Cd, menggunakan paduan logam sebagai anoda dan nikel oksida sebagai katoda dan lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan baterai *Li-ion*.

2.9.2 Perhitungan waktu pengisian baterai EV

Waktu pengisian baterai kendaraan listrik adalah durasi yang dibutuhkan untuk mengisi baterai dari kapasitas tertentu (misalnya 20%) hingga penuh (100%) atau hingga batas tertentu yang ditentukan sistem. Durasi ini sangat bergantung pada kapasitas baterai (Ah atau kWh) dan daya pengisian (Watt atau Ampere) yang diberikan.

Untuk menentukan waktu pengisian digunakan persamaan sebagai berikut:

Durasi *Charging* (jam)

$$t = \frac{(Ah)}{I(A)} \quad (2.49)$$

Dimana:

t : Durasi Charging (jam)

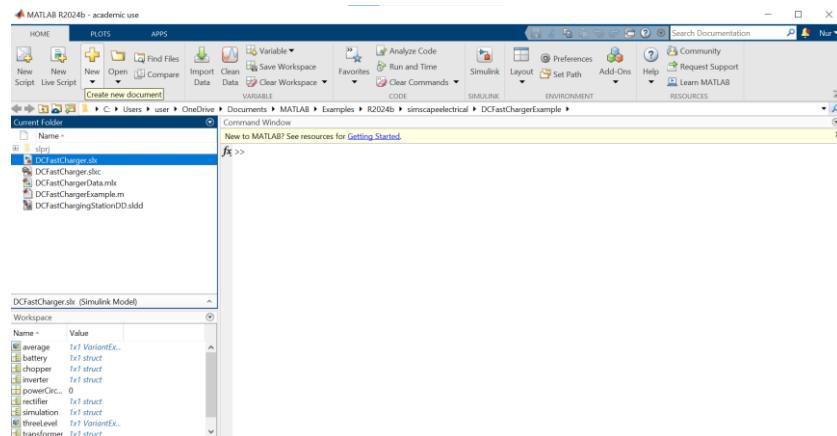
I : Arus (A)

Ah : Kapasitas Baterai

2.10 Matlab/Simulink (*Matrix Laboratory*)

Simulink merupakan *Graphical Extension* dari Matlab yang dapat digunakan untuk memodelkan dan mensimulasikan sebuah sistem. Dimana, dalam Simulink sistem digambarkan sebagai sebuah *block diagram*, bisa berupa fungsi transfer, penjumlahah (*sum*) serta didalam *library* simulink terdapat pula *virtual input* dan *output device* seperti *function generator* dan *scope*. Data dari berbagai block dikirim ke block lainnya dihubungkan dengan garis (Pradhana et al., 2025).

Tools yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan Matlab/Simulink R2024b adalah pemrograman yang dapat membuat model dan melakukan proses simulasi. Dalam pemodelan ini dapat dimulai dengan membuat subsistem blok, memasukkan parameter yang telah dihitung, dan kemudian menjalankan proses simulasi. Dengan antarmuka yang ramah pengguna dan menarik secara grafis yang digunakan untuk pemrograman dan pemodelan simulasi. Hubungan antar indikator apakah sudah sesuai dengan sistem secara nyata, melakukan verifikasi terhadap model yang dibuat apakah telah bebas dari error dan melakukan validasi pada pemodelan yang telah dibuat dengan system yang sebenarnya(Sevo Erlangga et al., 2024).



Gambar 2. 14 Aplikasi Simulink R2024b

2.11 Penelitian Terkait

Berdasarkan studi tentang sistem optimisasi pada pengisian daya kendaraan listrik roda dua maupun roda empat dengan mempertimbangkan beban Gedung sudah ada banyak dilakukan penelitiannya. Berikut beberapa penelitian yang signifikan dapat dilihat pada table 2.4.

Tabel 2. 4 Penelitian terkait

No	Judul Artikel/Jurnal	Penulis Artikel/jurnal	Isi Artikel/Jurnal
1	Perancangan Simulasi Pada Sistem Pemaksimalan Pengisian Daya Untuk Kendaraan Elektrik Roda Dua (Nasrullah et al., 2024)	Muhammad Azka Nasrullah, Stevanus Primanggani, Trias Andromeda dan Munawar Agus Riyadi	Penelitian ini membahas tentang pemaksimalan daya pengisian kendaraan listrik roda dua dengan beban peralatan rumah tangga yang berada pada beban puncak sehingga pengisian daya kendaraan listrik harus disesuaikan untuk mencegah tripping. Untuk mencegah tripping saat konsumsi beban listrik rumah tangga naik, konsumsi listrik rumah tangga dipertahankan di bawah 1300 W sehingga daya puncak mencapai 1283 W untuk menjaga stabilitas sistem kelistrikan rumah tangga selama proses pengisian daya kendaraan listrik.

2	Otomatisasi Sistem Pengisian Baterai Pada Sistem Tenaga Surya	Yuli Prasetyo, Budi Triyono, R. Jasa Kusumo H., Aditya Pradana P.	Penelitian ini membahas tentang rancang bangun sistem pengisian baterai otomatis dari sumber panel surya. Teknik yang diusulkan dapat mengontrol tegangan yang diterapkan pada konverter DC - DC. Pada saat lampu indikator sistem pengisian dalam keadaan mati, maka proses charging akan otomatis berhenti ketika tegangan baterai telah tercapai yaitu 12 Vdc. Jika lampu indikator masih menyala maka proses pengisian akan terus berlanjut hingga didapatkan nilai tegangan sesuai set point yaitu 12 Vdc.
3	Optimalisasi Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida (PLTH) On-Grid di Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) Berbasis Aplikasi Homer	Syarif Hidayat, Fadliondi	Penelitian ini membahas tentang mengoptimalkan sistem energi terbarukan yang belum terpasang pada SPKLU, serta agar dapat memberikan rekomendasi kepada lembaga terkait dalam pemanfaatan energi terbarukan pada SPKLU dengan mempertimbangkan

			analisis teknis, ekonomis dan lingkungan.
4	Development of Fast Battery Charger 72 Volt For Use In Electric Motorcycle Charging Station (Pengembangan Pengisi Daya Baterai Cepat 72 Volt Untuk Penggunaan Di Stasiun Pengisian Sepeda Motor Listrik)	Yusuf Margowadi, Bayu Samodra, Maulana Dwi Nur Dawam, Riko Ardiana Nugraha	Penelitian ini membahas tentang charger yang dikembangkan oleh penulis pada skenario tanpa beban; beban load simulator 1 Ampere, 2 Ampere, 7 Ampere; dan pengisian baterai. Untuk ujicoba pengisian baterai kondisi 0-100% charger mampu menghasilkan arus pengisian maksimum 10A, dengan tegangan 60 Volt naik secara gradual, dan durasi pengisian 3,1 Jam atau lebih cepat 1 jam dibandingkan charger 5A bawaan pabrik atau produk umum yang ada di pasaran.
5	Charging Strategy Effect on Peak Load Increase Due to Electric Vehicle Penetration (Dampak Strategi Pengisian Daya terhadap Peningkatan Beban Puncak Akibat	Boy Ihsan, Deny Hamdani, Nanang Hariyanto	Penelitian ini membahas mengenai simulasi perhitungan kenaikan beban harian akibat penetrasi kendaraan listrik ke sistem kelistrikan Jawa-Bali dengan tiga skenario pengisian daya, dapat ditinjau bahwa semakin besar penetrasi kendaraan

	Penetrasi Kendaraan Listrik)		listrik ke sistem, semakin besar kenaikan beban harian sistem. Selain itu, jika masalah losses, ketidakstabilan, dan pembebanan saluran diabaikan, kondisi sistem kelistrikan Jawa-Bali saat ini hanya sanggup menyediakan daya untuk beban harian ditambah dengan penetrasi kendaraan listrik sebesar 20%.
	Optimizing urban energy flows: Integrative vehicle-to-building strategies and renewable energy management	Jian Hern Yeoh, Kai-Yun Lo, I-Yun Lisa Hsieh	Penelitian ini menyajikan penilaian pemodelan optimasi yang komprehensif. Penulis mengeksplorasi interaksi kompleks antara tren mobilitas dan infrastruktur energi, dengan fokus pada sektor bangunan—konsumen energi utama dan penghasil karbon yang signifikan. Hasil analisis ini menyoroti tantangan dan peluang yang muncul dari meningkatnya permintaan pengisian daya kendaraan listrik dan kebutuhan untuk menstabilkan jaringan, dengan menekankan potensi

		<p>teknologi V2X (Vehicle-to-everything), khususnya V2B (Vehicle-to-Building). Dengan menggunakan kampus NTU sebagai studi kasus, penulis mengeksplorasi berbagai strategi manajemen energi. Strategi ini menggarisbawahi peran transformatif sistem PV surya, V2B, dan ESS, yang menunjukkan kemampuan adaptasi model terhadap fluktuasi permintaan energi musiman dan pembangkitan PV. Temuan penulis mengungkapkan kemampuan model untuk secara efektif meminimalkan pemborosan energi dan menyeimbangkan biaya, permintaan, dan emisi (Yeoh et al., 2025).</p>
--	--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Dilihat pada table 2.4 terdapat beberapa perbedaan dengan penelitian ini diantaranya tempat penelitian, jenis kendaraan listriknya dan bisa juga dibilang penggabungan dari penelitian-penelitian tersebut menjadi tolak ukur dalam perancangan pada sistem *charging station* ini, dimulai dari mengkaji regulasi sistem

charging station yang akan di rancang, daya dan beban gedung yang akan di simulasikan pada sistem *charging station* tersebut secara aman dan efisien.