

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Dalam penyusunan tesis ini, penulis menggunakan beberapa penelitian terdahulu yang relevan sebagai referensi. Beberapa penelitian terdahulu yang relevan dengan pembahasan tesis ini antara lain sebagai berikut :

1. (Denholm et al., 2013), menulis dalam penelitiannya terkait peran energy storage dalam integrasi energi terbarukan, khususnya dalam mengatasi variabilitas dan intermittency. Hasil penelitian menunjukkan bahwa storage sangat efektif dalam meningkatkan fleksibilitas sistem dan mengurangi *curtailment* energi terbarukan.
2. (Luo et al., 2015) dalam penelitiannya memberikan overview perkembangan teknologi penyimpanan energi listrik, termasuk BESS. Dijelaskan berbagai aplikasi seperti *frequency regulation*, *peak shaving*, dan *renewable integration*.
3. (Perez et al., 2018), focus pada penelitiannya adalah mengenai karakteristik variabilitas energi surya dan dampaknya pada sistem tenaga listrik.
4. (Rehman et al., 2019), menulis penelitian terkait teknologi energi surya dan tantangan variabilitas output yang mempengaruhi integrasi ke jaringan sistem tenaga listrik
5. (Al-Humaid et al., 2021), menulis penelitian menggunakan *two-stage stochastic programming* untuk menentukan kapasitas optimal BESS pada sistem *hybrid* (PV+Wind). Hasil penelitian menunjukkan peningkatan reliability dan penurunan biaya operasi.
6. (Yang et al., 2024), penelitian yang ditulisnya membahas tentang pengembangan metode *Stochastic Optimization* untuk menentukan lokasi dan kapasitas optimal BESS pada sistem tenaga listrik dengan kondisi penetrasi tinggi energi terbarukan. Model yang dikembangkan sudah mempertimbangkan variabilitas dan intermittency output dari pembangkit energi terbarukan, pertumbuhan beban serta degradasi kapasitas baterai. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa pendekatan

stokastis mampu meningkatkan efisiensi sistem sekaligus memaksimalkan pemanfaatan energi terbarukan.

7. (Žilka et al., 2024), melakukan penelitian terkait pengembangan metode *Model Predictive Control* (MPC) untuk pengaturan charge-discharge BESS dengan pendekatan stokastik.
8. (Mudakir et al., 2024), dalam penelitiannya menunjukkan bahwa BESS mampu mengurangi intermitensi PLTS dan meningkatkan stabilitas frekuensi serta tegangan sistem tenaga listrik.
9. (Fitria et al., 2025), penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa integrasi BESS dapat melakukan fungsi peak shaving dengan menyimpan energi siang hari dan digunakan pada saat beban puncak. Hasil simulasi menunjukkan penurunan beban puncak signifikan dan peningkatan efisiensi sistem.
10. (Michael-Ahile et al., 2025), melakukan penelitian mengenai pengembangan metode optimasi sizing PV dan BESS berbasis skenario beban.
11. (Xu et al., 2025), menulis paper tentang review komprehensif tentang metode optimasi BESS pada sistem PV.
12. (Gil-González et al., 2023), melakukan penelitian mengenai pengembangan sistem manajemen energi berbasis stokastik dengan pertimbangan *solar energy*, *battery storage* dan *load shifting*.
13. (Suyanto et al., 2023) Membahas pengembangan sistem *smart microgrid* yang mengintegrasikan berbagai sumber energi terbarukan dengan sistem penyimpanan energi dalam suatu jaringan cerdas. Studi tersebut menunjukkan bahwa penerapan *smart grid* dan *microgrid* memungkinkan pengelolaan energi yang lebih fleksibel, optimal, serta mampu meningkatkan keandalan sistem melalui koordinasi antara pembangkit dan penyimpanan energi.
14. (Hair et al., 2019) Dalam penelitiannya menjelaskan bahwa metode *Partial Least Squares Structural Equation Modeling* (PLS-SEM) merupakan pendekatan yang efektif untuk menganalisis hubungan antar variabel laten dalam model yang kompleks, khususnya pada penelitian dengan data yang tidak berdistribusi normal dan jumlah sampel terbatas.

15. (Sarstedt et al., 2020) Mengemukakan bahwa PLS-SEM banyak digunakan dalam berbagai bidang penelitian untuk menguji hubungan sebab-akibat antar variabel serta mengevaluasi model struktural secara simultan, sehingga memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap sistem yang diteliti.
16. (Ali et al., 2026) Menunjukkan bahwa penggunaan PLS-SEM dapat digunakan untuk menganalisis hubungan antar variabel dalam sistem yang kompleks, termasuk dalam konteks manajemen energi dan sistem berbasis teknologi, dengan hasil yang mampu menjelaskan pengaruh langsung maupun tidak langsung antar variabel.

Secara umum, penelitian-penelitian sebelumnya di atas menunjukkan bahwa integrasi BESS sangat penting dalam sistem dengan penetrasi energi terbarukan tinggi. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih menggunakan pendekatan deterministik atau data agregat, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan variabilitas dari PLTS. Oleh karena itu, penelitian ini akan mengisi gap tersebut dengan menggunakan pendekatan stokastik berbasis data real output dari PLTS Kubu. Selain itu, penelitian ini juga dilengkapi dengan pendekatan *Partial Least Squares Structural Equation Modeling* (PLS-SEM) untuk menganalisis hubungan antar variabel utama dalam sistem, sehingga memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tidak hanya dari sisi optimasi, tetapi juga dari sisi keterkaitan antar variabel yang mempengaruhi kinerja sistem.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Karakteristik Teknis PLTS dan Variabilitas Output

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan pembangkit berbasis energi terbarukan yang memanfaatkan radiasi matahari sebagai sumber energi utama. Karakteristik utama PLTS adalah sifatnya yang intermiten dan variabel, dimana output daya sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca, radiasi matahari, temperatur, serta faktor lingkungan lainnya (Febriansyah et al., 2024; Liu et al., 2018; Rehman et al., 2020)

Variabilitas output PLTS dapat diklasifikasikan menjadi variabilitas jangka pendek (*intra-hour variability*) dan jangka panjang (*seasonal variability*). Variabilitas jangka pendek umumnya disebabkan oleh pergerakan awan (*cloud passing effect*), sedangkan

variabilitas jangka panjang dipengaruhi oleh perubahan musim dan sudut matahari (Ferrer et al., 2016).

Dalam konteks sistem kelistrikan, variabilitas ini dapat menyebabkan fluktuasi daya yang berdampak pada kestabilan frekuensi dan tegangan sistem. Oleh karena itu, diperlukan teknologi fleksibilitas seperti BESS untuk mengatasi intermitensi tersebut (Papayiannis et al., 2020).

2.2.2 Prinsip Kerja dan Fungsi BESS dalam Sistem Kelistrikan

Battery Energy Storage System (BESS) merupakan sistem penyimpanan energi yang menggunakan baterai sebagai media utama untuk menyimpan energi listrik dan mengembalikannya ke sistem saat dibutuhkan. Prinsip kerja BESS melibatkan proses *charge* (pengisian energi) dan *discharge* (pelepasan energi) yang dikontrol melalui sistem manajemen energi (EMS) (Li & Wang, 2019; Reihani et al., 2016).

Dalam sistem kelistrikan modern, BESS memiliki berbagai fungsi penting, antara lain:

1. *Energy Shifting* (Time Shifting)
2. *Peak Shaving*
3. *Frequency Regulation*
4. *Voltage Support*
5. *Renewable Integration Support*

BESS memiliki karakteristik respon cepat (*Fast Response*), sehingga sangat efektif dalam menjaga stabilitas sistem, terutama pada sistem dengan penetrasi energi terbarukan yang tinggi (Tsany et al., 2020).

2.2.3 Konsep *Energy Shifting* dan *Peak Shaving*

Energy Shifting adalah proses pemindahan energi dari periode surplus (umumnya siang hari pada PLTS) ke periode defisit (malam hari) menggunakan media penyimpanan energi seperti BESS (Abdelrazek & Kamalasadan, 2016).

Peak shaving merupakan strategi untuk mengurangi beban puncak dengan cara menyuplai energi dari BESS pada saat beban tinggi, sehingga dapat mengurangi kebutuhan pembangkit *peaker* yang umumnya berbahan bakar mahal (Pramono et al., 2025).

Kedua konsep ini sangat penting dalam meningkatkan efisiensi operasi sistem dan menurunkan biaya pembangkitan, terutama pada sistem dengan ketergantungan tinggi terhadap pembangkit BBM seperti pada subsistem Bali.

2.2.4 Optimasi Kapasitas BESS Dalam Sistem Berbasis EBT

Penentuan kapasitas optimal BESS merupakan salah satu permasalahan kompleks yang melibatkan aspek teknis, ekonomi dan operasional. Berbagai metode telah digunakan dalam penelitian sebelumnya, seperti *deterministic optimization*, *stochastic optimization* dan *heuristic methods* (Jia et al., 2023).

Pendekatan *stochastic optimization* menjadi relevan dalam sistem berbasis energi terbarukan karena mampu mempertimbangkan ketidakpastian output pembangkit seperti PLTS. Metode ini biasanya menggunakan skenario probabilistik untuk mempresentasikan variabilitas sumber energi (Zheng et al., 2025).

Dalam penelitian ini, pendekatan *Quantile-Based Scenario Method* digunakan untuk membangun skenario output PLTS yang representatif, kemudian diintegrasikan dalam model optimasi untuk menentukan kapasitas dan durasi BESS yang optimal.

Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa pendekatan stochastic menghasilkan kapasitas BESS yang lebih robust dibanding pendekatan deterministik pada sistem PV-BESS (Zizzo et al., 2026).

2.2.4.1 Perhitungan Energi Keluaran PLTS

Energi listrik yang dihasilkan PLTS dalam suatu periode diperoleh dengan mengintegrasikan daya terhadap waktu. Untuk data diskrit dengan interval waktu yang tetap, energi total dapat dihitung melalui penjumlahan daya pada setiap interval waktu dikalikan dengan durasi interval tersebut. Secara matematis, energi total dinyatakan sebagai:

$$E_{\text{Harian}} = \sum_{t=1}^T P_{\text{PLTS}}(t) \quad (2.1)$$

Keterangan:

- E_{PLTS} : energi total keluaran PLTS (MWh);
- $P_{\text{PLTS},t}$: daya keluaran PLTS pada interval ke- t (MW);
- Δt : durasi setiap interval data (jam);

- T : jumlah interval waktu.

2.2.4.2 Pembentukan Skenario Berbasis Quantile

Kemudian dilakukan pemilihan *percentile* (quantile berbasis %), dengan skenario P10, P50 dan P90 dimana P10 itu menggambarkan kondisi low generation atau saat output PLTS Kubu berada pada tingkat rendah akibat faktor cuaca seperti mendung atau hujan. Skenario P50 menggambarkan kondisi normal atau median, yang mencerminkan kondisi operasi harian yang paling sering terjadi. Sedangkan skenario P90 menggambarkan kondisi high generation, yaitu saat radiasi matahari tinggi dan output PLTS maksimum. Persamaan skenario quantile ini sebagai berikut :

$$Q_x = \text{Percentile}(E_{\text{total harian}}, \text{Skenario } X) \quad (2.2)$$

Dimana :

- Skenario X : 10% atau 50% atau 90%

Langkah selanjutnya adalah menentukan hari representatif yang paling menggambarkan kondisi skenario *Quantile* P10, P50 dan P90 tersebut, dengan persamaan sebagai berikut :

$$\text{Pilih hari dimana } |E_{\text{hari}} - Q_x| \rightarrow \text{Minimum} \quad (2.3)$$

Dimana :

- Cari 1 hari yang paling mendekati P10 = skenario low
- Cari 1 hari yang paling mendekati P50 = skenario normal
- Cari 1 hari yang paling mendekati P90 = skenario high

Setelah diperoleh hari representatif untuk masing-masing skenario P10, P50 dan P90, maka dilakukan perhitungan probabilitas skenario berbasis jumlah hari aktual, sebagai berikut :

$$P_s = \frac{N_s}{N} \quad (2.4)$$

Dimana :

- P_s = Probabilitas skenario ke s
- N_s = Jumlah hari aktual yang masuk skenario s
- N = total seluruh hari pengamatan

Dan syarat utama untuk probabilitas ketiga skenario quantile tersebut harus memenuhi :

$$P_{10} + P_{50} + P_{90} = 1 \quad (2.5)$$

2.2.4.3 Model State of Charge BESS

State of Charge (SOC) menggambarkan jumlah energi yang tersimpan dalam BESS pada interval waktu. Perubahan SOC dipengaruhi oleh proses charging (pengisian) dan discharging (pelepasan muatan) yang mempertimbangkan efisiensi sistem BESS. Energi yang masuk ke baterai dikalikan dengan efisiensi *charging*, sedangkan energi yang keluar dari baterai memperhitungkan rugi-rugi dengan membagi terhadap efisiensi *discharging*. Dengan persamaan sebagai berikut :

$$SOC_t = SOC_{t-1} + \eta_c \cdot P_{charge,t} \cdot \Delta t - \frac{P_{discharge,t}}{\eta_d} \cdot \Delta t \quad (2.6)$$

Dimana

- SOC_t : Jumlah energi yang tersimpan di baterai saat waktu t (MWh)
- SOC_{t-1} : Energi baterai pada waktu sebelumnya
- η_c : Efisiensi charging baterai
- $P_{charge,t}$: Daya charging pada waktu t (MW)
- Δt : Durasi waktu
- η_d : Efisiensi discharge baterai
- $P_{discharge,t}$: Daya yang dikeluarkan pada waktu t (MW)

Agar pemodelan BESS ini masuk akal secara operasional, maka harus ditetapkan batasan-batasan operasional BESS antara lain :

Batas Daya BESS

$$0 \leq P_{charge,t} \leq P_{BESS} \quad (2.7)$$

$$0 \leq P_{discharge,t} \leq P_{BESS} \quad (2.8)$$

Batas Energi BESS

$$SOC_{max} = E_{BESS} \quad (2.9)$$

$$SOC_{min} = \alpha \cdot E_{BESS} \quad (2.10)$$

Dimana :

α : minimum SOC, asumsi perhitungan = 10%

2.2.4.4 Pembentukan Baseline BBM Subsistem Bali

Baseline BBM digunakan untuk merepresentasikan kondisi operasi pembangkit BBM pada subsistem Bali tanpa beroperasinya BESS. Nilai *baseline* ini menjadi acuan utama dalam menghitung besarnya potensi penghematan biaya operasi setelah integrasi BESS, khususnya dalam konteks substitusi energi berbasis pembangkit BBM.

Secara umum, *baseline* BBM dihitung berdasarkan profil kebutuhan daya sistem yang harus dipenuhi oleh pembangkit konvensional, khususnya pada periode waktu tertentu (misalnya jam beban puncak atau periode malam hari ketika PLTS tidak beroperasi). Dalam model ini, *baseline* BBM pada waktu ke- t dinyatakan sebagai :

$$P_{baseline,t} = P_{load,t} - P_{PLTS,t} \quad (2.11)$$

Dimana

- $P_{baseline,t}$ = Daya pembangkit BBM pada kondisi tanpa BESS
- $P_{load,t}$ = Total kebutuhan beban sistem pada waktu ke- t
- $P_{PLTS,t}$ = Kontribusi daya dari PLTS pada waktu ke- t

Nilai *baseline* BBM ini diambil dari data realisasi Log Sheet UP2B Bali pada hari-hari representatif skenario P10, P50 dan P90 yang telah dihitung sebelumnya.

Daya pembangkit BBM setelah integrasi BESS dihitung sebagai selisih antara daya *baseline* dengan kontribusi *discharge* BESS, serta ditambah kebutuhan daya untuk proses *charging*. *Discharging* BESS akan menurunkan kebutuhan pembangkit BBM, sedang proses *charging* berpotensi meningkatkan kebutuhan sistem. Model BBM *baseline* ini digambarkan dengan persamaan sebagai berikut

$$P_{BBM,t} = P_{baseline,t} - P_{discharge,t} + P_{charge,t} \quad (2.12)$$

Dimana :

- $P_{BBM,t}$ = Daya pembangkit BBM pada waktu ke-t setelah ada BESS
- $P_{baseline,t}$ = Daya pembangkit BBM pada kondisi awal (tanpa BESS)
- $P_{discharge,t}$ = Daya yang dikeluarkan oleh BESS ke sistem
- $P_{charge,t}$ = Daya yang digunakan untuk mengisi BESS

2.2.4.5 Fungsi Tujuan (Objective Function)

Fungsi tujuan / *Objective Function* dalam model ini adalah memaksimalkan penghematan biaya operasi pembangkit BBM melalui pemanfaatan BESS. Penghematan dilakukan dengan perhitungan selisih antara biaya *baseline* pembangkit BBM tanpa BESS dan biaya operasi setelah integrasi BESS, dikurangi biaya investasi BESS, dengan persamaan sebagai berikut :

$$Max Z = \sum_s P_s \left(\sum_t C_{BBM} \cdot (P_{baseline,t} - P_{BBM,t,s}) \right) - C_{BESS} \quad (2.13)$$

Dimana :

- $Max Z$ = Nilai *Objective* (*Total net saving* maksimum)
- C_{BESS} = Biaya tahunan BESS (CAPEX*CRF)
- C_{BBM} = Biaya pembangkit BBM
- P_s = Probabilitas skenario ke-S
- $P_{baseline,t}$ = Daya BBM tanpa BESS (MW)
- $P_{BBM,t,s}$ = Daya BBM setelah operasi BESS (MW)

2.2.4.6 Biaya BESS (Annualized) dan Capital Recovery Factor

Biaya investasi BESS dalam penelitian ini dinyatakan dalam bentuk biaya tahunan (*annualized cost*) menggunakan pendekatan *Capital Recovery Factor* (CRF). Hal ini bertujuan untuk mengkonversi biaya investasi awal menjadi biaya ekuivalen per tahun, sehingga dapat dibandingkan secara langsung dengan biaya operasional pembangkit BBM. Secara matematis, biaya BESS dinyatakan sebagai :

$$C_{BESS} = CRF(C_P \cdot P_{BESS} + C_E \cdot E_{BESS}) \quad (2.14)$$

Dimana :

- C_{BESS} = Biaya tahunan BESS
- CRF = Faktor konversi investasi menjadi biaya tahunan
- C_P = Kapasitas daya BESS
- P_{BESS} = Biaya investasi berbasis energi
- E_{BESS} = Kapasitas energi BESS

Capital Recovery Factor (CRF) digunakan untuk mengkonversi biaya investasi awal menjadi biaya tahunan yang ekuivalen selama umur proyek. Dengan menggunakan CRF, biaya investasi BESS dapat dibandingkan secara langsung dengan biaya operasional tahunan sistem, seperti biaya pembangkit BBM. Secara matematis, CRF dinyatakan sebagai:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2.15)$$

Dimana :

- I = suku bunga
- n = umur proyek

Nilai CRF mencerminkan besarnya porsi pembayaran tahunan yang diperlukan untuk menutup investasi awal dengan mempertimbangkan faktor bunga selama periode investasi.

2.2.4.7 Metode Stochastic Optimization dan Weighted Average Solution

Pendekatan *stochastic optimization* digunakan untuk mengakomodasi ketidakpastian output PLTS dengan mempertimbangkan beberapa skenario yang merepresentasikan kondisi pembangkitan yang berbeda, yaitu rendah, normal, dan tinggi. Setiap skenario diberikan bobot probabilitas sesuai kemungkinan terjadinya, sehingga hasil optimasi tidak hanya bergantung pada satu kondisi tertentu, tetapi mencerminkan kondisi sistem secara keseluruhan. Secara matematis, fungsi objektif dinyatakan sebagai nilai ekspektasi dari seluruh skenario, yaitu:

$$Z = \sum_{s \in S} P_s \cdot Z_s \quad (2.16)$$

Dimana :

- S = P10, P50, P90
- P_s = Probabilitas Skenario

Dengan pendekatan ini, solusi yang diperoleh bersifat lebih *robust* terhadap variasi dan ketidakpastian output PLTS.

Setelah proses optimasi dilakukan untuk masing-masing skenario, diperoleh nilai variabel keputusan yang berbeda-beda sesuai dengan kondisi pembangkitan yang direpresentasikan oleh setiap skenario. Untuk mendapatkan solusi akhir yang mewakili kondisi sistem secara keseluruhan, digunakan pendekatan *weighted average solution*, yaitu dengan menghitung rata-rata berbobot berdasarkan probabilitas masing-masing skenario. Secara matematis dinyatakan sebagai :

$$X_{optimal} = \sum_s P_s \cdot X_s \quad (2.17)$$

Dimana :

- X_s = Nilai variabel keputusan pada skenario ke-s,
- p_s = Probabilitas dari skenario tersebut.

Dengan pendekatan ini, solusi akhir yang diperoleh mencerminkan nilai ekspektasi dari seluruh kemungkinan kondisi sistem, sehingga lebih representatif dibandingkan hanya menggunakan satu skenario tertentu.

2.2.5 Kerangka Konseptual Penelitian dan Hubungan Antar Variabel

Kerangka konseptual penelitian ini menggambarkan hubungan sistematis antara variabilitas output Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), penentuan kapasitas optimal *Battery Energy Storage System* (BESS), serta dampaknya terhadap operasi sistem kelistrikan Bali, khususnya dalam mengurangi ketergantungan terhadap pembangkit berbahan bakar minyak (BBM).

Variabilitas output PLTS merupakan variabel input utama yang bersifat tidak pasti (*uncertain*) dan dipengaruhi oleh faktor cuaca, intensitas radiasi matahari, serta kondisi

lingkungan. Karakteristik ini menyebabkan ketidaksesuaian antara profil pembangkitan dan profil beban, terutama pada periode beban puncak malam hari, sehingga menimbulkan kebutuhan akan sistem penyimpanan energi sebagai solusi penyeimbang.

Kapasitas dan durasi BESS dalam penelitian ini berperan sebagai *decision variables* yang ditentukan melalui pendekatan *stochastic optimization*. Pendekatan ini mempertimbangkan berbagai skenario probabilistik (misalnya P10, P50, dan P90) yang merepresentasikan kondisi rendah, normal, dan tinggi dari output PLTS, sehingga menghasilkan keputusan kapasitas BESS yang lebih *robust* terhadap ketidakpastian sistem.

Penggunaan BESS memungkinkan dilakukannya mekanisme *Energy Shifting*, yaitu menyimpan energi berlebih pada saat produksi PLTS tinggi (siang hari) dan melepaskannya kembali pada saat beban puncak (malam hari). Dengan demikian, operasi pembangkit BBM yang umumnya digunakan sebagai pembangkit peaker dapat dikurangi baik dari sisi frekuensi operasi maupun energi yang dibangkitkan.

Lebih lanjut, pengurangan operasi pembangkit BBM akan berdampak langsung terhadap peningkatan efisiensi sistem, baik dari sisi biaya operasi (penurunan fuel cost) maupun dari sisi lingkungan (penurunan emisi). Selain itu, keberadaan BESS juga meningkatkan fleksibilitas sistem kelistrikan, khususnya dalam merespon fluktuasi daya akibat penetrasi energi terbarukan yang tinggi, serta meningkatkan keandalan operasi sistem secara keseluruhan.

Hubungan antar variabel dalam penelitian ini menunjukkan bahwa semakin optimal kapasitas dan durasi BESS yang ditentukan, maka semakin besar kemampuan sistem dalam melakukan *Energy Shifting*. Hal ini pada akhirnya akan mengurangi ketergantungan terhadap pembangkit BBM, meningkatkan efisiensi operasional sistem, serta mendukung integrasi energi terbarukan yang lebih tinggi dalam sistem kelistrikan Bali.

Kerangka konseptual ini juga menegaskan bahwa optimasi kapasitas BESS tidak hanya bergantung pada besarnya energi yang disimpan, tetapi juga pada karakteristik variabilitas PLTS serta pola beban sistem. Oleh karena itu, pendekatan berbasis skenario dengan metode *quantile-based scenario* digunakan untuk merepresentasikan kondisi operasional yang realistis. Hasil optimasi kemudian dievaluasi menggunakan nilai

ekspektasi berbobot (*weighted average*) berdasarkan probabilitas masing-masing skenario, sehingga menghasilkan keputusan kapasitas BESS yang optimal secara teknis dan ekonomis.

2.2.6 Konsep PLS-SEM dan SmartPLS

Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) merupakan metode analisis statistik berbasis komponen yang digunakan untuk menguji hubungan kausal antar variabel laten dalam suatu model yang kompleks (Adi et al., 2023). Metode ini memungkinkan peneliti untuk menganalisis pengaruh langsung maupun tidak langsung antar variabel secara simultan, sehingga sangat cocok digunakan pada sistem dengan banyak variabel yang saling berinteraksi (Adi et al., 2023). PLS-SEM banyak digunakan pada penelitian yang bersifat prediktif dan eksploratif, terutama ketika data yang digunakan tidak berdistribusi normal serta memiliki jumlah sampel yang terbatas (Adi et al., 2023).

PLS-SEM merupakan metode berbasis varian yang mampu menganalisis model kompleks dengan banyak variabel laten dan indikator, serta tidak mensyaratkan distribusi data normal (Hair et al., 2019). Metode ini terdiri dari dua komponen utama, yaitu model pengukuran (*outer model*) dan model struktural (*inner model*). *Outer model* digunakan untuk mengukur hubungan antara variabel laten dengan indikatornya, sedangkan *inner model* digunakan untuk menguji hubungan antar variabel laten dalam suatu sistem (Sarstedt et al., 2020).

Dalam implementasinya, analisis PLS-SEM banyak dilakukan menggunakan perangkat lunak SmartPLS, yang merupakan tools berbasis *graphical user interface* yang memudahkan proses pemodelan, estimasi, dan evaluasi model. SmartPLS memungkinkan peneliti untuk mengolah model yang kompleks secara lebih fleksibel dan efisien dibandingkan metode statistik konvensional.

Dalam konteks penelitian ini, pendekatan PLS-SEM digunakan untuk melengkapi analisis optimasi, khususnya dalam memahami hubungan antara variabilitas output PLTS, kapasitas dan kinerja BESS, efektivitas *Energy Shifting*, serta dampaknya terhadap reduksi operasi pembangkit BBM. Dengan demikian, penggunaan PLS-SEM

memberikan nilai tambah dalam menjelaskan keterkaitan antar variabel yang tidak dapat diperoleh hanya melalui pendekatan optimasi matematis.

Model pengukuran digunakan untuk mengevaluasi validitas dan reliabilitas konstruk. Secara umum, hubungan antara variabel laten dan indikatornya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$x_i = \lambda_i \xi + \epsilon_i \quad (2.18)$$

$$y_i = \lambda_i \eta + \epsilon_i \quad (2.19)$$

Dimana:

- x_i, y_i = indikator
- ξ, η = variabel laten
- λ_i = loading factor
- ϵ_i = error

Evaluasi outer model dilakukan melalui uji:

- *Convergent validity* (*loading factor* > 0,7)
- *Average Variance Extracted* (AVE > 0,5)
- *Composite Reliability* (CR > 0,7)

Model struktural digunakan untuk menganalisis hubungan antar variabel laten. Secara matematis, hubungan antar variabel dapat dinyatakan sebagai:

$$\eta = \beta \eta + \Gamma \zeta \quad (2.20)$$

Dimana:

- β = koefisien hubungan antar variabel laten endogen
- Γ = pengaruh variabel eksogen
- ζ = error model

Evaluasi inner model dilakukan dengan melihat:

- *Path coefficient* (β)
- Nilai R^2 (koefisien determinasi)

- Signifikansi (*bootstrapping*, $t\text{-statistic} > 1,96$)

Dalam penelitian ini, hubungan antar variabel dimodelkan sebagai berikut:

- Variabilities' PLTS $\rightarrow$ Kapasitas BESS
- Kapasitas BESS $\rightarrow$ *Energy Shifting*
- *Energy Shifting* $\rightarrow$ Reduksi BBM

Model ini digunakan untuk memahami bagaimana variabilitas output PLTS mempengaruhi kebutuhan kapasitas BESS dan bagaimana implementasi BESS berdampak terhadap pengurangan operasi pembangkit BBM dalam sistem kelistrikan Bali.