

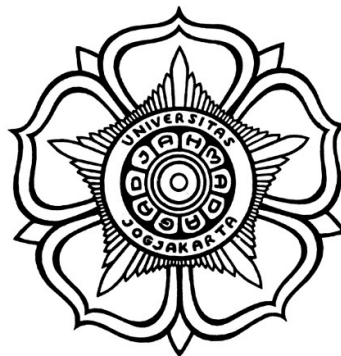
**PENGEMBANGAN METODE PENENTUAN KAPASITAS *HOSTING*  
UNTUK PENETRASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA  
ATAP DI JARINGAN DISTRIBUSI TEGANGAN RENDAH**

**Thesis**

submitted in partial fulfillment of the requirements  
for the degree of Master

Program of Master of Electrical Engineering

Konsentrasi Sistem Tenaga Listrik  
Department of Electrical and Information Engineering



proposed by

**Wijaya Yudha Atmaja**  
**17/419580/PTK/11690**

To

**PROGRAM OF MASTER  
FACULTY OF ENGINEERING  
UNIVERSITAS GADJAH MADA  
YOGYAKARTA**

**2019**

## ABSTRAK

Karena penetrasi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) atap berskala besar dapat memberikan dampak negatif ke jaringan distribusi tegangan rendah, penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap perlu diteliti. Penelitian sebelumnya belum memasukkan model stokastik dari profil beban dan daya keluaran PLTS. Hal ini menyebabkan, representasi ketidakpastian sebagai karakteristik alami penetrasi PLTS belum sepenuhnya tercapai. Pelibatan penetrasi PLTS-PLTS yang terintegrasi dengan baterai juga perlu diteliti. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan penentuan kapasitas hosting pada penetrasi PLTS atap dan baterai dengan menambahkan variabel-variabel ketidakpastian seperti profil beban dan daya keluaran PLTS. Salah satu tantangan dari penelitian ini adalah beban dan waktu komputasi, terutama ketika dilakukan penambahan variabel ketidakpastian. Oleh karena itu, metode stokastik *Markov Chains* diusulkan dalam penelitian ini. Hipotesis penelitian ini adalah metode yang diusulkan dapat meningkatkan tingkat representatif dan akurasi tanpa menambah waktu komputasi, jika dibandingkan dengan metode sebelumnya yaitu *Monte Carlo*.

**Kata kunci**— Dampak negatif, jaringan distribusi, *Markov Chains*, kapasitas *hosting*, penetrasi PLTS atap.

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	ii
DAFTAR ISI .....	iii
BAB I    PENDAHULUAN .....	1
1.1   Latar Belakang .....	1
1.2   Perumusan Masalah .....	4
1.3   Keaslian Penelitian .....	4
1.4   Tujuan Penelitian .....	8
1.5   Manfaat Penelitian.....	8
BAB II   TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI .....	9
2.1   Tinjauan Pustaka .....	9
2.2   Landasan Teori .....	12
2.2.1   Kapasitas <i>Hosting</i> PLTS Atap pada Penetrasi Skala Besar.....	12
2.2.2   Penentuan Kapasitas <i>Hosting</i> Berbasis <i>Monte Carlo</i> .....	12
2.2.3   Konsep <i>Markov Chains</i> .....	14
2.2.3.1   Proses <i>Markov</i> .....	14
2.2.3.2   Probabilitas Transisi Dari Proses <i>Markov</i> .....	14
2.2.3.3 <i>Markov Chains</i> .....	14
2.2.4   Jumlah Proses Acak.....	15
2.2.5   Kerangka Analisis Runtun Waktu .....	15
2.2.6   Studi Akurasi .....	16
2.3   Hipotesis .....	16
BAB III   USULAN METODE.....	17
3.1   Pembentukan Metode Penentuan Kapasitas <i>Hosting</i> PLTS Dengan Proses <i>Markov Chains</i> .....	19
3.1.1   Pembentukan Strategi Penetrasi .....	20
3.1.1.1   Skenario Penetrasi.....	20
3.1.1.2 <i>States</i> dari <i>Markov Chains</i> .....	20
3.1.1.3   Proses Penetrasi.....	20
3.1.1.4   Pelanggan Penetrasi.....	21
3.1.1.5   Ukuran Daya Penetrasi.....	21

3.1.1.6	Level Penetrasi Pelanggan .....	22
3.1.1.7	Level Penetrasi Daya .....	22
3.1.1.8	Lokasi Penetrasi .....	23
3.1.2	Pembentukan <i>Markov Chains</i> .....	23
3.1.2.1	Matriks Probabilitas Transisi .....	23
3.1.2.2	Jumlah Simulasi <i>Markov Chains</i> .....	24
3.1.2.3	Batas Operasi Sistem Distribusi .....	24
3.1.2.4	Kapasitas <i>Hosting</i> PLTS .....	25
3.1.3	Pembentukan Algoritme .....	25
BAB IV	KEMAJUAN PENELITIAN .....	28
BAB V	JADWAL PENELITIAN .....	29
DAFTAR PUSTAKA	.....	30

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Karena semakin tingginya penetrasi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) atap ke jaringan distribusi tenaga listrik [1], perhatian mengenai dampak negatif yang diterima oleh jaringan tenaga listrik juga semakin meningkat. Dalam hal ini, penetrasi PLTS-PLTS atap berpotensi menyebabkan masalah pada kinerja operasi sistem distribusi tenaga listrik, seperti tegangan lebih [2–6], aliran daya balik [2, 7], pelanggaran kapasitas termal konduktor [3, 8], dan lain-lain. Oleh karena itu, usaha untuk menerima penetrasi PLTS-PLTS atap, dengan tetap menjaga agar batas operasi tidak dilanggar, perlu dilakukan. Hal ini merujuk pada konsep kapasitas *hosting* PLTS, yaitu jumlah maksimal dari penetrasi PLTS ke jaringan distribusi sebelum terjadi gangguan operasi pada jaringan tersebut [9]. Oleh sebab itu, penelitian-penelitian mengenai pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS dilakukan untuk meningkatkan akurasi dan tingkat representatif terhadap karakteristik alami dari penetrasi PLTS [10–16]. Peningkatan akurasi ini dimaksudkan agar dapat memenuhi kebutuhan perencanaan, operasi, dan konfigurasi jaringan berbasis pembangkit terdistribusi yang efektif, efisien, ekonomis, dan handal.

Salah satu metode yang dikembangkan dalam penentuan kapasitas *hosting* oleh peneliti-peneliti sebelumnya adalah metode berbasis *deterministic* [10–12]. Penentuan kapasitas *hosting* dengan metode *deterministic* dilakukan dengan memasukkan model PLTS yang sudah ada, tanpa memodelkan karakteristik ketidakpastian dari PLTS tersebut. Simon Heslop dkk menggunakan pendekatan analitis dalam menentukan kapasitas *hosting* pada penyulang tegangan rendah [10]. Selain PLTS dengan faktor daya sebesar satu, penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa metode yang diusulkan dapat digunakan untuk memfasilitasi PLTS-PLTS yang mempunyai faktor daya selain satu. Penelitian pada [11] menggunakan pendekatan yang lain. Penelitian tersebut mendistribusikan PLTS secara iterasi pada penetrasi sebesar 10% sampai 100% dengan kenaikan 10%. Mekanisme pengurangan dampak tegangan lebih juga berhasil disediakan dan dibuktikan pada penelitian tersebut. Selanjutnya, metode *deterministic* yang lain dilakukan dengan

memodelkan PLTS sebagai model  $P-Q$  (daya aktif dan daya reaktif yang konstan) dan  $P-V$  (daya aktif dan tegangan yang konstan) [12]. Penelitian tersebut mampu menunjukkan bahwa konvergensi pada model  $P-V$  lebih cepat daripada model  $P-Q$  sehingga waktu komputasinya lebih cepat.

Untuk memasukkan pertimbangan karakteristik ketidakpastian dalam penentuan kapasitas *hosting* PLTS, beberapa peneliti mengembangkan metode berbasis stokastik [13–15]. Karakteristik ketidakpastian ini perlu dilakukan untuk menghasilkan model penetrasi PLTS yang representatif. Penelitian pada [13] menggunakan indeks *clearness* dalam pemodelan daya keluaran PLTS. Dalam proses penetrasi PLTS, penelitian tersebut membagi jaringan menjadi beberapa kategori berdasarkan kapasitas dalam menerima penetrasi PLTS. Hasilnya, kemampuan jaringan dalam menerima penetrasi PLTS dapat diklasifikasikan dan diinvestigasi. Selanjutnya, penggunaan proses *Monte Carlo* digunakan oleh Marko Kolenc dkk untuk menyimulasikan penetrasi PLTS [14]. Untuk menambah representasi ketidakpastian, penelitian tersebut juga memasukkan konsumsi daya pelanggan dan daya keluaran PLTS sebagai variabel-variabel acak dalam perhitungan kapasitas *hosting* PLTS. Penelitian tersebut mengklaim bahwa kapasitas *hosting* bergantung pada variabel-variabel ketidakpastian seperti lokasi penetrasi dan ukuran daya PLTS. Pendistribusian PLTS skala besar dengan *Monte Carlo* juga dilakukan oleh Bollen dkk [15]. Penelitian tersebut memfokuskan pengamatan pada suatu rentang yang merepresentasikan beban-beban minimum. Kapasitas *hosting* didapat dari hasil evaluasi indeks performa terhadap batasan operasional jaringan distribusi tenaga listrik yang dilakukan studi. Oleh karena itu, indeks performa jaringan memberikan salah satu dampak yang besar pada performa metode penentuan kapasitas *hosting*.

Terkait dengan akurasi metode stokastik *Monte Carlo* dalam penentuan kapasitas *hosting*, penelitian pada [16] menunjukkan bahwa performa estimasi kapasitas *hosting* berbanding lurus dengan jumlah simulasi *Monte Carlo* yang dilakukan. Dengan menerapkan parameter toleransi senilai 0.05%, penelitian tersebut menunjukkan bahwa hasil estimasi kapasitas *hosting* dengan akurasi diatas 99% mampu dicapai dengan mengerjakan minimal 105 simulasi *Monte Carlo*. Dengan 50 level penetrasi dan 105 skenario pendistribusian maka total skenarionya adalah 5250. Penelitian tersebut juga mengusulkan metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS dan kerangka analisis dengan resolusi satu jam. Input dari metode yang diusulkan, penelitian tersebut menggunakan data historis

profil beban dan kurva daya keluaran PLTS tipikal saat cuaca cerah. Berkaitan dengan hal tersebut, waktu komputasinya berpotensi untuk meningkat jika pemodelan kurva beban dan daya keluaran PLTS menggunakan pemodelan berbasis stokastik, serta penggunaan kerangka analisis dengan resolusi yang lebih kecil dari satu jam. Penelitian pada [17] menunjukkan bahwa resolusi 15 menit dari data penyinaran matahari pada PLTS tanpa baterai diperlukan untuk mendapatkan persentase kesalahan dibawah 1%. Didasarkan oleh hal-hal tersebut, untuk meningkatkan akurasi dan memasukkan pertimbangan karakteristik ketidakpastian dari penetrasi PLTS tanpa menambah waktu komputasi, metode stokastik dalam penentuan kapasitas *hosting* PLTS perlu dikembangkan.

Satu hal lain yang perlu diperhatikan dalam usaha untuk meningkatkan tingkat representatif dari pemodelan penetrasi PLTS yang terintegrasi dengan baterai. Manajemen dari sistem penyimpanan baterai yang terintegrasi pada PLTS terdistribusi terbukti dapat mengurangi dampak negatif tegangan lebih [18–20]. Ghassem Mokhtari mengusulkan pendekatan untuk mengoordinasikan baterai yang terintegrasi pada PLTS dari para pelanggan dan kendali penanggulangan kenaikan tegangan [18]. Dengan mengasumsikan bahwa semua pelanggan mempunyai profil beban dan daya keluaran PLTS yang sama, penelitian tersebut menyediakan algoritme kendali terpusat dan kendali lokal. Penelitian pada [19] memodelkan baterai yang terintegrasi dengan PLTS untuk mengonsumsi kelebihan daya keluaran PLTS saat siang hari dan menggunakannya saat terjadi beban puncak pada malam hari. Penelitian tersebut berhasil mengurangi dampak dari perubahan daya keluaran PLTS yang mendadak dengan mengimplementasikan *discharge* jangka pendek. Pada tahun 2019, penelitian pada [20] menyediakan strategi manajemen untuk PLTS yang terintegrasi dengan baterai, baik untuk sistem yang terhubung dengan grid maupun untuk sistem yang beroperasi secara *islanded*.

Meskipun demikian, belum ada model penentuan kapasitas *hosting* yang melibatkan PLTS yang terintegrasi dengan baterai. Model penentuan kapasitas *hosting* yang akurat dan representatif akan mampu memberikan manfaat bagi perencana dan operator sistem distribusi tenaga listrik dalam menghadapi meningkatnya penetrasi PLTS, termasuk PLTS yang terintegrasi dengan baterai. Salah satu yang mendorong urgensi ini adalah semakin meningkatnya jumlah penetrasi PLTS yang terintegrasi dengan baterai. Di Jerman, pada beberapa tahun terakhir, tercatat 40% penetrasi PLTS yang terintegrasi dengan baterai [21].

## 1.2 Perumusan Masalah

Metode pendistribusian PLTS atap skala besar berbasis proses *Monte Carlo* telah terbukti mampu mempertimbangkan ketidakpastian profil beban, daya keluaran PLTS, pelanggan yang melakukan penyambungan PLTS, lokasi penetrasi, dan ukuran PLTS secara terpisah. Meskipun demikian, penelitian yang memasukkan variabel-variabel ketidakpastian secara bersamaan dalam suatu metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS perlu untuk diteliti. Hal ini berkaitan dengan usaha untuk menyediakan model pendistribusian yang representatif. Salah satu kendalanya, pelibatan variabel-variabel ketidakpastian secara bersamaan akan meningkatkan kompleksitas perhitungan dan waktu komputasi.

Selanjutnya, penelitian-penelitian sebelumnya telah berhasil menunjukkan bahwa pemasangan baterai terdistribusi pada jaringan tenaga listrik mampu mengurangi dampak penetrasi PLTS skala besar. Meskipun demikian, model penetrasi PLTS-PLTS atap yang terintegrasi dengan baterai belum disediakan. Karena baterai telah terbukti dapat meningkatkan kompleksitas aliran daya dalam jaringan tenaga listrik, pelibatan baterai yang terintegrasi pada PLTS dalam penentuan kapasitas *hosting* perlu diteliti. Dalam hal ini, tantangan yang dihadapi juga berkaitan dengan penyediaan metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS yang representatif dan akurat tetapi tidak menaikkan waktu komputasi.

## 1.3 Keaslian Penelitian

Penjelasan mengenai keaslian penelitian dijelaskan melalui perbandingan dari penelitian-penelitian sebelumnya dengan penelitian yang diusulkan. Poin-poin penting yang didapat dalam perbandingan tersebut dirangkum dalam Tabel 1.1.

Pada tahun 2017, Anamika Dubey dan Surya Santoso mengusulkan metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap skala besar dengan menggunakan proses stokastik *Monte Carlo* melalui pendekatan pola sebaran [16], tanpa mempertimbangkan penetrasi PLTS yang terintegrasi dengan baterai. Skenario penempatan lokasi integrasi dan penentuan ukuran daya PLTS atap sebanyak 100 dirancang dan disimulasikan. Proses integrasi PLTS atap ke jaringan distribusi tegangan rendah dilakukan dengan 50 level penetrasi pelanggan untuk setiap skenario. Perpindahan dari setiap level ke level pelanggan berikutnya menggunakan kenaikan sebesar 2%. Penentuan ukuran PLTS atap yang dipenetrasi dilakukan dengan mengambil sampel data historis dari *California Distributed*



Tabel 1.1. Perbandingan Penelitian-Penelitian yang Berkaitan Dengan Topik Penelitian yang Diusulkan

<i><b>Referensi</b></i>	<i><b>Metode Penetrasi</b></i>	<i><b>Model Stokastik Keluaran PLTS</b></i>	<i><b>Model Stokastik Profil Beban</b></i>	<i><b>Lokasi Penetrasi PLTS Acak</b></i>	<i><b>Ukuran Daya PLTS Acak</b></i>	<i><b>PLTS dan Baterai</b></i>	<i><b>Kendali Proses Penetrasi</b></i>	<i><b>Analisis Runtun Waktu</b></i>	<i><b>Melihat Semua kemungkinan</b></i>
A.Dubey (2017) [16]	Stokastik	Tidak	Tidak	Iya	Iya	Tidak	Tidak	Iya	Iya
F.Ding (2017) [22]	Stokastik	Tidak	Tidak	Iya	Iya	Tidak	Tidak	Iya	Iya
M.H.Bollen (2017) [15]	Stokastik	Iya	Tidak	Iya	Iya	Tidak	Tidak	Iya	Iya
R.Torquato (2018) [23]	Stokastik	Tidak	Tidak	Iya	Tidak	Tidak	Tidak	Iya	Iya
M.Deakin (2019) [24]	Stokastik	Tidak	Tidak	Iya	Iya	Tidak	Iya	Iya	Tidak
S.Wang (2020) [25]	Stokastik	Tidak	Tidak	Iya	Iya	Tidak	Tidak	Iya	Iya
P.P.Vergara (2020) [26]	Stokastik	Iya	Iya	Iya	Tidak	Tidak	Tidak	Iya	Iya
M.Al-Saffar (2020) [27]	Stokastik	Tidak	Tidak	Iya	Iya	Iya	Tidak	Iya	Iya
Penelitian ini	Stokastik	Iya	Iya	Iya	Iya	Iya	Iya	Iya	Tidak

*Generation Statistics*. Dalam penelitian tersebut digunakan sebuah penyulang riil yang dilayani oleh transformator-transformator 24 MVA. Data historis profil beban dan kurva daya keluaran PLTS tipikal saat cuaca cerah digunakan sebagai input dari metode yang diusulkan. Penelitian tersebut mengusulkan kerangka analisis waktu dengan rentang waktu pengamatan tujuh jam dan resolusi waktu pengamatan satu jam.

Fei Ding dan Barry Mather juga menggunakan metode stokastik *Monte Carlo* melalui pendekatan pola sebaran seperti pada [16], dengan menerapkan 100 skenario penetrasi dan 50 level penetrasi pelanggan [22] yang mempertimbangkan lokasi penetrasi dan ukuran PLTS yang acak. Penelitian tersebut juga menggunakan data historis penetrasi PLTS atop dari *California Distributed Generation Statistics* pada proses penentuan ukuran daya PLTS atop. Pelanggan-pelanggan yang menyambungkan PLTS yang terintegrasi dengan baterai tidak dipertimbangkan. Meskipun demikian, penelitian tersebut mengusulkan metode peningkatan kapasitas *hosting* dengan manajemen sistem distribusi aktif melalui skenario penyerapan daya reaktif oleh PLTS dan optimasi *tap* transformator. Selanjutnya, penelitian tersebut menggunakan 17 penyulang riil sebagai sistem distribusi yang diteliti. Dalam proses analisisnya, peneliti tersebut menggunakan analisis runtun waktu dengan rentang waktu pengamatan empat jam dari pukul 10.00 sampai pukul 14.00. Untuk profil beban dan daya keluaran PLTS, peneliti tersebut menggunakan data historis.

Dengan menggunakan metode stokastik *Monte Carlo*, Bollen dkk [15] mengusulkan metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS tanpa mempertimbangkan PLTS yang terintegrasi dengan baterai. Penelitian tersebut melakukan analisis pada runtun waktu tertentu yang merepresentasikan konsumsi beban-beban minimum. Selanjutnya, penelitian tersebut melakukan estimasi terkait model stokastik keluaran PLTS pada rentang tersebut dengan resolusi 10 menit. Kapasitas *hosting* didapat dari hasil evaluasi indeks performa batasan operasional jaringan distribusi tenaga listrik yang dilakukan studi tanpa kendali dalam proses penetrasi.

Selanjutnya, Ricardo Torquato dkk melakukan penelitian mengenai penentuan kapasitas *hosting* PLTS atop tanpa baterai yang dilakukan dengan metode stokastik *Monte Carlo* melalui pendekatan level penetrasi [23]. Dalam hal ini, simulasi dilakukan dengan variasi level penetrasi pelanggan dari 20% sampai 100%. Untuk setiap penambahan level penetrasi pelanggan, besar kenaikan yang dilakukan adalah 20%. Kurva profil beban dan

daya keluaran PLTS didapat dari data pengukuran oleh peneliti tersebut. Proses penentuan lokasi penetrasi PLTS atap dilakukan secara acak dan berulang dengan kenaikan ukuran daya PLTS sebesar 1 kWp untuk setiap level penetrasi pelanggan. Pada setiap level penambahan ukuran daya PLTS atap tersebut, dikerjakan 500 skenario penempatan lokasi di sepanjang penyulang. Penelitian tersebut menggunakan penyulang riil dari jaringan distribusi tegangan rendah di Brazil. Dalam analisisnya digunakan rentang waktu pengamatan dua jam dari pukul 11.00 sampai 13.00 dengan resolusi waktu pengamatan 15 menit.

Matthew Deakin dkk mengembangkan metode stokastik *Monte Carlo* dalam penentuan kapasitas *hosting* PLTS. Dalam hal ini, penelitian tersebut menentukan kapasitas *hosting* PLTS menggunakan pendekatan *fixed-power* dan *fixed-voltage*. Hasilnya menunjukkan bahwa pendekatan *fixed-voltage* lebih efisien dan membutuhkan waktu komputasi lebih cepat. Peneliti tersebut menggunakan pembatasan proses penetrasi pada pendekatan *fixed-voltage* sehingga tidak semua kemungkinan diamati. Pengamatan hanya dapat dilakukan untuk kasus tertentu terkait dengan tegangan.

Pada tahun 2020, penentuan kapasitas *hosting* PLTS diusulkan dengan basis proses stokastik *Monte Carlo* oleh Pedro P. Vergara dkk [26]. Penelitian tersebut menggunakan data profil beban dan daya keluaran PLTS dari data yang didapat oleh peneliti. Lokasi penetrasi dan ukuran PLTS diacak sampai 100% penetrasi, kemudian analisis aliran daya berbasis runtun waktu selama satu tahun dikerjakan untuk mengamati dampak terhadap indeks performa operasi yang dipertimbangkan.

Mohammed Al-Safar dkk menggunakan metode stokastik *Monte Carlo* dalam penetrasi PLTS terdistribusi. Dalam hal ini, peneliti tersebut fokus pada komunikasi kendali antar baterai pada lokasi lokasi PLTS yang dipenetrasikan. Penelitian tersebut menggunakan 100 skenario dengan mengacak lokasi integrasi dan ukuran PLTS. Prosedur tersebut diulangi sampai 100% penetrasi dengan kenaikan 10%. Pada penelitian tersebut, metode peningkatan kapasitas *hosting* diusulkan dengan komunikasi kendali antar baterai.

Pada penelitian ini, metode stokastik *Markov Chains* diusulkan dalam pendistribusian PLTS atap. Dalam hal ini, PLTS atap yang terintegrasi dengan baterai juga diperhitungkan. Dengan menggunakan matriks probabilitas, integrasi PLTS selanjutnya dikendalikan dengan menggunakan informasi dari integrasi PLTS terakhir [28,29]. Matriks prob-

abilitas dibentuk dari *California Distributed Generation Statistics* [30]. Karena pengendalian tersebut, berbeda dengan metode stokastik *Monte Carlo*, *Markov Chains* tidak melihat semua kemungkinan penetrasi. Dalam hal ini, penetrasi ke- $p$ , bergantung pada penetrasi ke- $(p - 1)$ . Oleh karena itu, evaluasi dari akurasi metode perlu dilakukan. Studi akurasi dilakukan berdasarkan probabilitas setiap proses penetrasi dalam merasakan batas pelanggaran regulasi operasi [16]. Selanjutnya, estimasi dengan *Markov Chains* dilakukan untuk mengestimasi profil beban [31] dan daya keluaran PLTS [32]. Dalam hal ini, jeda waktunya menggunakan resolusi sebesar 15 menit [17]. Untuk mekanisme penetrasi menggunakan pendekatan pola sebaran dengan cara mengerjakan  $n$  skenario penetrasi dan  $p$  level penetrasi [16, 22]. Setiap skenario penetrasi, lokasi integrasi dan ukuran daya PLTS diacak. Akan tetapi, satu pelanggan dipilih untuk setiap iterasi dalam proses penetrasi [33–35]. Selain tegangan lebih [16, 22, 23], faktor daya penyulang juga dipertimbangkan sebagai batas operasional dalam menetapkan kapasitas *hosting* [33–35]. Penelitian-penelitian pada [33–35] adalah penelitian-penelitian yang telah dikerjakan sebelumnya oleh pengusul penelitian ini. Untuk analisis aliran daya, penelitian ini menggunakan analisis aliran daya berdasarkan kerangka kerja runtun waktu [15, 16, 22–27]. Dalam memodelkan kendali baterai, *state of charge (SOC)* untuk setiap baterai dipertimbangkan [27].

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan penentuan kapasitas *hosting* pada penetrasi PLTS atap dengan baterai dengan menambahkan variabel-variabel ketidakpastian seperti profil beban dan daya keluaran PLTS.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dapat dijadikan sebagai sumber acuan dalam bidang pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap. Penelitian ini juga dapat digunakan oleh perencana dan operator sistem distribusi sebagai salah satu pertimbangan untuk menghadapi dampak negatif dari kenaikan yang tinggi dari penetrasi PLTS atap ke jaringan distribusi tegangan rendah.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

*Electric Power Research Institute (EPRI)* menyediakan skenario penetrasi acak untuk PLTS terdistribusi pada tahun 2012 [36]. Penelitian tersebut membagi kelas pelanggan menjadi dua kategori, yaitu komersial dan rumah tangga. Kategori rumah tangga terdiri atas pelanggan-pelanggan yang melakukan pemasangan PLTS atap sampai 10 kW, sedangkan kategori komersial ditujukan untuk pemasangan PLTS diatas 10 kW. Pada setiap proses pendistribusian PLTS atap dikerjakan skenario yang unik dan berbeda.  $M$  skenario penetrasi dirancang dengan  $N$  penetrasi untuk setiap skenario sehingga total ada  $(M \times N)$  skenario. Perancangan skenario seperti itu dimaksudkan untuk merepresentasikan penetrasi PLTS atap yang mempunyai karakteristik natural yang acak.

Anamika Dubey dkk melakukan investigasi dan analisis mengenai dampak penetrasi PLTS atap pada jaringan distribusi tegangan rendah [37] pada tahun 2015. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa dampak penetrasi PLTS bervariasi untuk penetrasi pelanggan yang sama. Hasil tersebut disebabkan oleh perbedaan lokasi integrasi dan ukuran daya PLTS. Penelitian tersebut juga melakukan studi sensitivitas dan menunjukkan bahwa penetrasi pada titik terjauh dari penyulang memberikan dampak paling besar terhadap tegangan lebih. Oleh karena itu, nilai kapasitas *hosting* PLTS akan semakin kecil seiring dengan semakin jauhnya lokasi penetrasi PLTS atap terhadap sumber penyulang. Dalam penelitian tersebut juga ditunjukkan bahwa peningkatan nilai beban minimum akan meningkatkan nilai kapasitas *hosting* PLTS. Selanjutnya, pada tahun 2017, Anamika Dubey dkk mengembangkan metode penentuan kapasitas PLTS atap skala besar berbasis *Monte Carlo* dengan menyediakan formula matematika dan kerangka analisis runtun waktu [16]. Dalam penelitian tersebut, 100 simulasi *Monte Carlo* dirancang dengan 50 level penetrasi pelanggan untuk setiap skenario dan kenaikan sebesar 2% untuk setiap perpindahan level penetrasi. Untuk menentukan kapasitas *hosting* PLTS atap, penelitian tersebut mengusulkan dua formula matematika, yaitu  $H_{1,k}$  dan  $H_{100,k}$ .  $H_{1,k}$  adalah kapasitas *hosting* pertama, yaitu minimal terdapat satu skenario dari sejumlah skenario yang mendeteksi adanya pelanggaran batas tegangan lebih.  $H_{100,k}$  didefinisikan sebagai pene-

trasi PLTS terkecil ketika semua skenario yang dikerjakan telah mendeteksi pelanggaran batas tegangan lebih.

Fei Ding dan Barry Mather [22] juga menggunakan pendekatan pola sebaran seperti pada [16] dengan menerapkan 100 skenario penetrasi dan 50 level penetrasi pelanggan. Rentang waktu pengamatan empat jam dari pukul 10.00 sampai pukul 14.00 digunakan oleh peneliti tersebut. Penelitian tersebut menggunakan 17 penyulang riil sebagai sistem distribusi yang diteliti. Dengan batas operasi tegangan lebih, terdapat 13 penyulang yang mengalami pelanggaran. Hal tersebut mengartikan bahwa terdapat 4 penyulang yang tidak mengalami pelanggaran tegangan lebih.

B. Bletterie mengerjakan penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap dengan empat skenario [38], yaitu pendistribusian PLTS atap secara merata sepanjang penyulang, pendistribusian meningkat dari sumber penyulang ke ujung penyulang, pendistribusian menurun dari sumber penyulang ke ujung penyulang, dan pendistribusian di sekitar ujung penyulang. Hasilnya menunjukkan bahwa skenario pendistribusian menurun dari sumber penyulang ke ujung penyulang memberikan nilai kapasitas *hosting* paling besar, sedangkan pendistribusian di sekitar ujung penyulang memberikan nilai kapasitas *hosting* paling kecil.

Bollen dkk [15] mengusulkan metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS dengan analisis pada runtun waktu tertentu yang merepresentasikan konsumsi beban-beban minimum. Pada penelitian tersebut, kapasitas *hosting* didapat dari hasil evaluasi indeks performa batasan operasional jaringan distribusi tenaga listrik. Penelitian tersebut menggunakan batasan operasional berupa arus lebih, variasi nilai tegangan yang cepat, ketidakseimbangan tegangan, *harmonics*, dan *supraharmonics*.

Ricardo Torquato dkk melakukan penelitian mengenai penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap dilakukan dengan pendekatan level penetrasi [23]. Metode yang diusulkan pada penelitian tersebut dilakukan dengan variasi level penetrasi pelanggan dari 20% sampai 100% dengan besar kenaikan 20%. Proses penetrasi PLTS atap dilakukan secara acak dan berulang dengan kenaikan ukuran daya PLTS sebesar 1 kW untuk setiap level penetrasi pelanggan. 500 skenario penempatan lokasi dikerjakan pada setiap level penambahan ukuran daya PLTS atap dengan rentang waktu pengamatan dua jam dari pukul 11.00 sampai 13.00, serta jeda waktu pengamatan 15 menit. Penelitian tersebut menun-

jukkan bahwa kapasitas *hosting* PLTS atap dapat diamati dari persentase level penetrasi pelanggan. Semakin besar level penetrasi pelanggan maka kapasitas *hosting* PLTS atap semakin besar dan persentase terjadinya pelanggaran tegangan lebih juga semakin besar.

Matthew Deakin dkk mengusulkan cara untuk mempersingkat waktu dan beban komputasi dari metode stokastik *Monte Carlo* dalam penentuan kapasitas *hosting* PLTS. Untuk tujuan tersebut, kapasitas *hosting* PLTS ditentukan dengan menggunakan pendekatan *fixed-power* dan *fixed-voltage*. Hasilnya menunjukkan bahwa pendekatan *fixed-voltage* lebih efisien dan membutuhkan waktu komputasi lebih cepat. Dalam hal ini, dapat dipahami jika peneliti tersebut menggunakan pembatasan proses penetrasi pada pendekatan *fixed-voltage* sehingga tidak semua kemungkinan diamati. Penelitian tersebut menggunakan 1000 simulasi *Monte Carlo*.

Penentuan kapasitas *hosting* PLTS yang diusulkan oleh Pedro P. Vergara dkk [26] menggunakan data profil beban dan daya keluaran PLTS dari data yang didapat oleh peneliti. Penentuan lokasi integrasi PLTS dilakukan secara acak sampai semua pelanggan memasang PLTS. Setiap proses penetrasi, aliran daya yang berbasis runtun waktu dikerjakan. Kapasitas *hosting* ditentukan berdasarkan pelanggaran terhadap batas operasi. Batas-batas operasi ini direpresentasikan dalam nilai tegangan dan indeks pembebanan.

Mohammed Al-Safar dkk menyediakan metode untuk kendali antar sistem baterai pada PLTS terdistribusi. Untuk tujuan tersebut, penetrasi PLTS terdistribusi skala besar dilakukan dalam penelitian tersebut. Penelitian tersebut mengerjakan 100 skenario acak yang terdiri dari lokasi integrasi dan ukuran PLTS. Prosedur tersebut diulangi untuk setiap kenaikan level presentasi 10%. Proses dihentikan ketika 100% level penetrasi sudah tercapai. Untuk kendali baterainya, penelitian tersebut menggunakan *state of charge control (CSOCC)*, yaitu kombinasi dari *Monte-Carlo tree search based reinforcement learning (MCTS-RL)* dan kendali *SOC* menggunakan *Method Predictive Control (MPC)*. Dalam hal ini, baterai-baterai tersebut dikendalikan untuk mengurangi tegangan lebih pada suatu daerah menggunakan *MCTS-RL* berdasarkan kapasitas masing-masing baterai. Hasilnya, metode yang diusulkan pada penelitian tersebut dapat mengurangi dampak negatif tegangan lebih.

Estimasi profil beban telah diteliti pada [31]. Dalam proses estimasinya, penelitian tersebut menggunakan metode stokastik *Markov Chains*. Prosedurnya dimulai

dengan membuat model dari aktivitas pelanggan. Model ini kemudian di konversi kedalam pemakaian listrik. Selanjutnya, pemakaian-pemakaian listrik ini digunakan untuk membuat model profil beban.

Terkait dengan estimasi daya keluaran PLTS, penelitian pada [32] menggunakan metode stokastik *Markov Chains* untuk memodelkan pembangkitan daya PLTS. Penelitian tersebut menggunakan kluster-kluster dengan mempertimbangkan musim-musim dan faktor *time of day*. Selain itu, penelitian tersebut juga memberikan faktor pembebanan pada data historis. Peneliti tersebut mengklaim bahwa metode yang diusulkan berhasil mengurangi kesalahan-kesalahan prediksi pembangkitan daya PLTS.

## 2.2 Landasan Teori

Pada penelitian ini, pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS, dengan mempertimbangkan baterai terintegrasi, berbasis *Markov Chains* diusulkan. Untuk melandasi hal tersebut, beberapa teori yang telah disediakan oleh penelitian-penelitian sebelumnya dipresentasikan.

### 2.2.1 Kapasitas *Hosting* PLTS Atap pada Penetrasi Skala Besar

Kapasitas *hosting* PLTS atap adalah jumlah maksimum PLTS atap yang dapat dipenetrasikan pada sistem distribusi tenaga listrik tanpa pelanggaran batas operasi pada sistem distribusi tersebut. Penentuan kapasitas *hosting* PLTS diperlukan untuk mencegah dampak negatif yang muncul ketika sistem distribusi menghadapi kenaikan penetrasi PLTS atap yang tinggi.

### 2.2.2 Penentuan Kapasitas *Hosting* Berbasis *Monte Carlo*

Metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap telah diteliti oleh beberapa peneliti pada beberapa tahun terakhir [16, 22, 23]. Berdasarkan [16], metode ini terdiri atas tiga prosedur, yaitu pendistribusian PLTS atap, analisis dampak PLTS atap per jam, dan penentuan kapasitas *hosting* PLTS pertama.

Dalam pendistribusian PLTS atap, skenario-skenario perlu dirancang terlebih dahulu. Skenario-skenario tersebut antara lain level penetrasi pelanggan dan level penetrasi PLTS atap. Level penetrasi pelanggan ( $C_{pen}^k$ ) adalah jumlah pelanggan yang mempunyai PLTS atap yang terintegrasi ke jaringan distribusi [16]. Level penetrasi



pelanggan ke- $k$  mewakili pelanggan dengan PLTS atap sebesar  $k\%$ . Dengan nilai kenaikan sebesar 2%, sampai 100%. Formula matematikanya adalah

$$C_{pen} = \{C_{pen}^2, C_{pen}^4, \dots, C_{pen}^{100}\}. \quad (2-1)$$

Skenario selanjutnya yang perlu untuk dirancang adalah level penetrasi PLTS atap ( $PV_{pen}^k$ ). Level penetrasi PLTS atap didefinisikan sebagai total pembangkitan PLTS atap yang terintegrasi ke jaringan distribusi sesuai dengan level penetrasi pelanggan ( $C_{pen}^k$ ) ke- $k$  [16]. Hal ini didefinisikan sebagai

$$PV_{pen} = \{PV_{pen}^2, PV_{pen}^4, \dots, PV_{pen}^{100}\}. \quad (2-2)$$

Dengan mempertimbangkan formula-formula tersebut, pada setiap level penetrasi pelanggan ( $C_{pen}^k$ ), sejumlah skenario pendistribusian PLTS atap ( $m$ ) dapat dirancang [16], yaitu

$$X^k = \{x_1^k, x_2^k, \dots, x_m^k, \dots, x_u^k\}. \quad (2-3)$$

Selanjutnya, untuk menjalankan analisis per jam, suatu kerangka analisis perlu untuk dirancang [16]. Dalam hal ini, dua langkah perlu dijalankan. Pertama adalah penentuan beban minimum efektif ( $Eff_{load}^{hr}$ ). Kedua adalah penentuan pembangkitan PLTS atap untuk setiap skenario pendistribusian yang dideskripsikan sebagai

$$PV_{pen}^k(hr) = PV_{pen}^k \times PV_{norm}^{hr} \quad (2-4)$$

Peneliti pada [16] membuat definisi penentuan kapasitas *hosting* PLTS pertama. Kapasitas *hosting* PLTS pertama adalah kapasitas *hosting* PLTS ketika terdapat satu pelanggaran batas operasi [16]. Dalam penentuan kapasitas *hosting* PLTS pertama tersebut, sebelumnya perlu dilakukan analisis aliran daya. Analisis aliran daya ini digunakan sebagai acuan penentuan kapasitas *hosting* PLTS pertama dengan mempertimbangkan tegangan lebih sebagai batas operasi. Selanjutnya kapasitas *hosting* PLTS pertama ( $H_{1,m}$ ) dihitung dengan [16]

$$H_{1,m} = \min_{i \in S} \left\{ PV_{pen}^k \mid P(V_{max,m}^k(hr) > 1.05) \geq \frac{1}{m} \right\} \quad (2-5)$$

### 2.2.3 Konsep *Markov Chains*

Terdapat dua jenis pendekatan *Markov Chains*, yaitu *continuous-time Markov Chains* dan *discrete-time Markov Chains*. Dalam hal ini, *continuous-time Markov Chains* mempunyai kemungkinan keluaran yang bersifat kontinyu, sedangkan *discrete-time Markov Chains* mempunyai kemungkinan keluaran yang tertentu atau dapat diukur. Selanjutnya, jika himpunan dari suatu *discrete-time Markov Chains* mempunyai batas nilai, maka *Markov Chains* tersebut disebut *finite Markov Chains*. Dengan menggunakan pemahaman tersebut, penelitian ini menggunakan pendekatan *finite Markov Chains*. Meskipun demikian, untuk mempermudah, penelitian ini cukup menggunakan istilah *Markov Chains*.

#### 2.2.3.1 Proses *Markov*

Dalam proses *Markov*, untuk semua nilai  $q$ , nilai saat ini bergantung pada keluaran nilai sebelumnya [39]. Definisi proses *Markov* dilakukan dengan mengasumsikan bahwa  $\{f_k \mid k \in [1, 2, \dots, w]\}$  adalah himpunan dari fungsi-fungsi keluaran dari sebuah proses stokastik,  $s_j$  adalah nilai dari  $f_k$  jika keluaran pada proses stokastik ke- $k$  adalah  $s_j$ , and  $s_i$  adalah nilai dari  $f_{k-1}$  jika keluaran pada proses stokastik ke- $(k-1)$  adalah  $s_i$ . Selanjutnya, proses *Markov* didefinisikan sebagai

$$Pr[f_k = s_j \mid (f_{k-1} = s_i) \wedge q] = Pr[f_k = s_j \mid f_{k-1} = s_i] \quad (2-6)$$

#### 2.2.3.2 Probabilitas Transisi Dari Proses *Markov*

Probabilitas transisi dari proses *Markov* adalah probabilitas dari suatu *state* jika sudah ada *state* sebelumnya [39]. Probabilitas transisi ke- $n$  dari proses *Markov*  $p_{ij}(n)$  adalah

$$p_{ij}(n) = Pr[f_n = s_j \mid f_{n-1} = s_i] \quad (2-7)$$

#### 2.2.3.3 *Markov Chains*

Dengan mengasumsikan bahwa  $\mathbf{P}$  adalah matriks dengan anggota-anggota  $p_{ij}$  tanpa memperhitungkan  $n$  maka *Markov Chains* didefinisikan sebagai proses *Markov* yang mempunyai matriks transisi  $\mathbf{P}$  [39].

### 2.2.4 Jumlah Proses Acak

Penentuan jumlah proses acak, yaitu metode *multistage non-finite population* (MNP), dipersentasikan oleh peneliti pada [40]. Dengan  $Z$  sebagai variabel acak normal,  $\alpha$  sebagai level signifikan,  $\sigma$  sebagai standar deviasi, dan  $E$  sebagai ukuran presisi yang diinginkan, jumlah sampel proses acak  $u$  dihitung melalui

$$u = \sqrt{\frac{\frac{u_3}{0.01} - \frac{u_3}{0.99}}{2}}, \quad (2-8)$$

dengan  $u_3$  adalah nilai perkiraan  $u$  pada tahap ketiga yang didefinisikan sebagai

$$u_3 = \sqrt{\frac{u_2 - u_1}{2}}, \quad (2-9)$$

adan  $u_1$  serta  $u_2$  secara berurutan adalah perkiraan  $u$  pada tahap pertama dan kedua yang dideskripsikan sebagai

$$u_1 = \frac{Z_{(1-\alpha)}\sigma}{E} \text{ dan } u_2 = \frac{Z_{(1-\alpha)}^2\sigma^2}{E^2}. \quad (2-10)$$

### 2.2.5 Kerangka Analisis Runtun Waktu

Kerangka analisis runtun waktu diklasifikasikan menjadi dua jenis runtun waktu, yaitu runtun waktu nilai tunggal dan runtun waktu interval. Kerangka analisis runtun waktu nilai tunggal merupakan kerangka analisis runtun waktu yang mempunyai satu nilai untuk setiap titik waktunya. Sementara itu, kerangka analisis runtun waktu interval mempunyai lebih dari satu nilai untuk setiap titik waktunya. Hal ini membuat runtun waktu jenis ini mampu menyajikan interval data untuk setiap titik datanya.

Perbedaan antara kerangka analisis runtun waktu nilai tunggal dan runtun waktu interval terletak pada jumlah titik data yang disediakan untuk setiap titik waktu. Pada kerangka analisis runtun waktu interval, titik-titik data umumnya disediakan dalam bentuk sebaran distribusi. Kerangka analisis runtun waktu interval diperkenalkan oleh Javier Arroyo pada [41]. Selanjutnya, lima tahun setelah itu, oleh peneliti yang sama, disediakan contoh aplikasinya yang dipresentasikan pada [42].

### 2.2.6 Studi Akurasi

Akurasi dalam penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap dapat ditentukan dengan cara mencari probabilitas metode untuk merasakan pelanggaran [16]. Hal ini diformulasikan sebagai

$$Acc_k^\epsilon(H_1) = \max_{0 \leq p \leq 100} \left\{ p \mid 0 < Pr(V_{max,k} \mid h_{1,k}^p > 1.05) \leq \epsilon \right\} \quad (2-11)$$

Selanjutnya, agar resiko penetrasi PLTS atap skala besar dapat diukur, penghitungan resiko pelanggaran (RV) perlu dilakukan [23]. Hal ini dapat digunakan oleh perencana sistem distribusi dan pengatur regulasi untuk menentukan langkah-langkah strategis dalam menghadapi dampak penetrasi PLTS skala besar dan mencegah pelanggaran batas operasi yang terjadi. Untuk menghitung resiko pelanggaran (RV) tersebut, digunakan persentasi sistem distribusi tanpa pelanggaran (SV). Formula matematika yang digunakan adalah

$$RV (\%) = 100 - SV (\%) \quad (2-12)$$

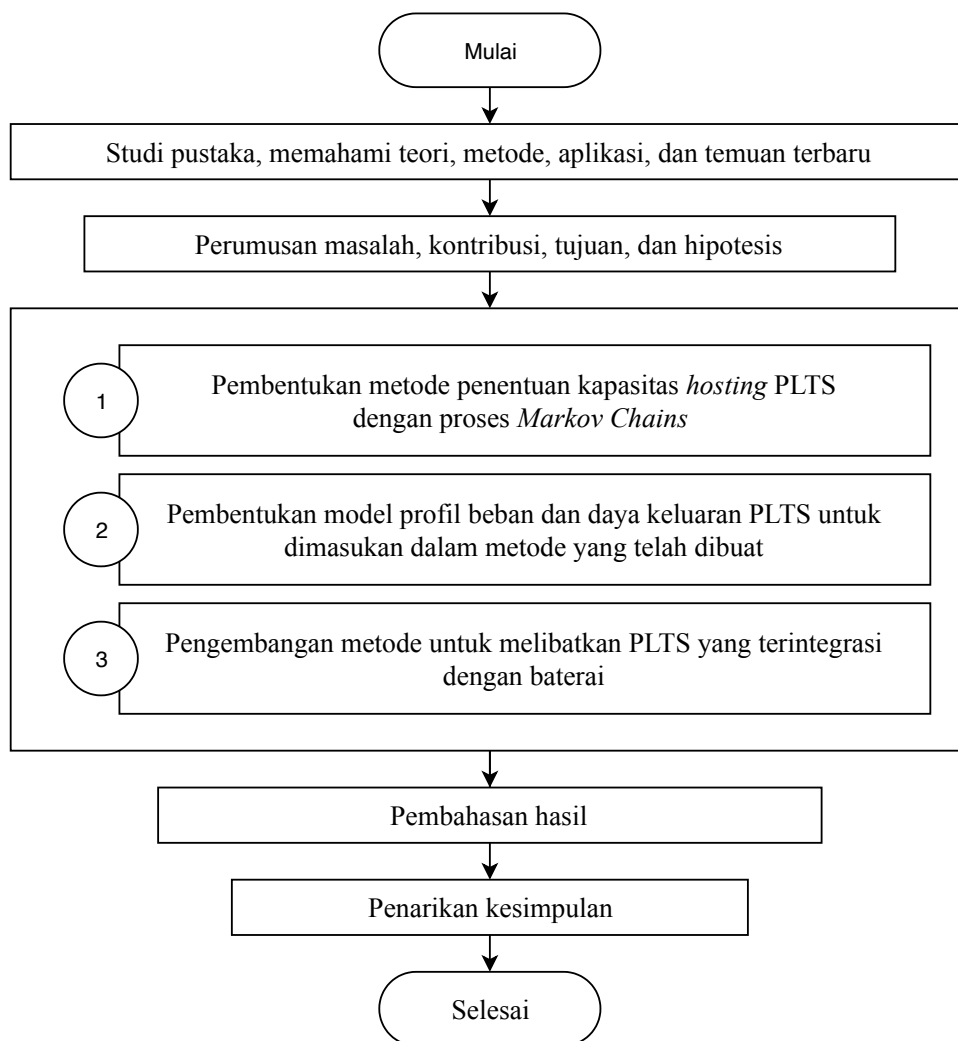
### 2.3 Hipotesis

Pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS dan baterai dengan menambahkan variabel-variabel ketidakpastian seperti profil beban dan daya keluaran PLTS dapat meningkatkan tingkat representatif dan akurasi tanpa menambah waktu komputasi, jika dibandingkan dengan metode sebelumnya yaitu *Monte Carlo*.

### BAB III

## USULAN METODE

Dalam penelitian ini, metode penentuan kapasitas *hosting* pada penetrasi skala besar dari PLTS atap dengan baterai dikembangkan. Hal tersebut dicapai dengan menambahkan variabel-variabel ketidakpastian seperti profil beban dan daya keluaran PLTS. Untuk mencapai tujuan tersebut, usulan metode penelitian dijelaskan pada bab ini. Ilustrasi ddiagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.1. Penelitian ini dimulai dengan



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian.

melakukan studi pustaka. Studi pustaka dilakukan untuk hal-hal yang berkaitan dengan pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS. Dalam studi pustaka tersebut, teori, metode, aplikasi, dan temuan baru dipelajari. Langkah selanjutnya adalah perumu-

san masalah, pengidentifikasian kontribusi, penetapan tujuan, dan penetapan hipotesis.

Setelah itu, bagian penting dalam penelitian ini dilakukan. Bagian ini dibagi menjadi tiga tahap. Pada setiap tahapan ini, terjadi proses pembentukan metode, implementasi, uji validitas, pembahasan, dan kesimpulan. Kesimpulan dari satu tahapan digunakan pada tahapan selanjutnya. Tahapan-tahapan penelitian ini dibentuk untuk memudahkan peneliti dalam melakukan penelitian dan menguji metode. Satu hal yang cukup penting, dengan membagi menjadi tahapan-tahapan tersebut maka proses penelitian dapat diukur dengan jelas. Mekanisme pengukurannya adalah dengan menghasilkan minimal satu publikasi ilmiah untuk setiap tahapan.

Tahap pertama adalah pembentukan metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS dengan pendekatan *Markov Chains*. Pada tahap ini, PLTS yang terintegrasi dengan baterai belum dimasukkan. Proses memasukkan model stokastik profil beban dan daya keluaran PLTS juga belum dikerjakan. Hal itu dilakukan karena fokus dari tahap ini adalah metode stokastik *Markov Chains* dalam penentuan kapasitas *hosting* PLTS. Dalam tahap ini, sebagai proses validasi, metode yang dibentuk akan diuji dengan sistem tenaga listrik riil atau *test feeder*. Terakhir, target luaran dari tahap ini adalah artikel penelitian. Pada akhir tahap ini, laporan akhir penelitian sudah mulai dikerjakan.

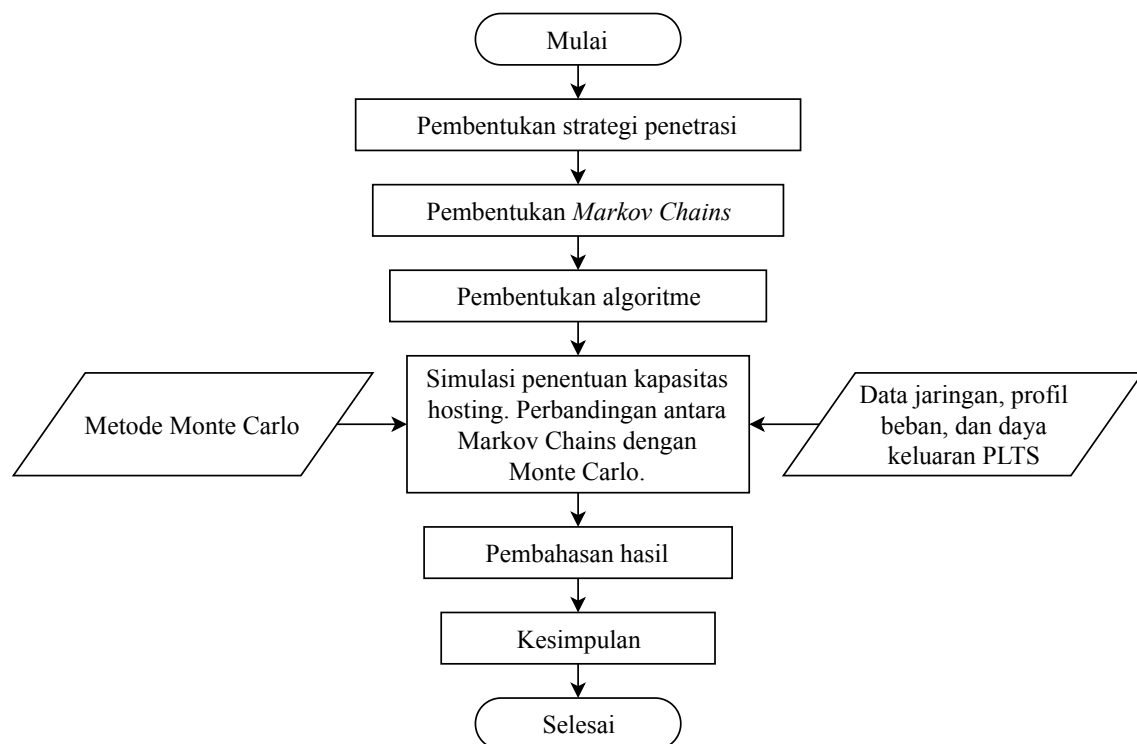
Tahap kedua adalah pembentukan profil beban dan daya keluaran PLTS. Tujuan dari tahap ini adalah untuk menambahkan variabel ketidakpastian. Selain itu, tahap ini juga sebagai proses untuk memperbaiki dan meningkatkan hasil-hasil yang didapatkan dari tahap pertama. Tantangan lainnya yang ada pada tahap ini adalah potensi meningkatnya beban dan waktu komputasi. Oleh karena itu, walaupun metode pemodelan profil beban dan daya keluaran PLTS, beberapa pengembangan perlu dilakukan berkaitan dengan usaha untuk beban dan waktu komputasi. Keluaran berupa artikel penelitian juga ditargetkan pada tahap kedua ini.

Tahap ketiga adalah pengembangan metode dari tahap kedua dengan melibatkan penetrasi PLTS yang terintegrasi dengan baterai. Metode kendali baterai juga diteliti pada tahap ini. Pada tahap terakhir ini, target luaran berupa artikel penelitian juga ditetapkan.

Selanjutnya adalah pembahasan hasil. Sebelum pembahasan hasil, pada bagian ini juga dilakukan proses evaluasi dan penyempurnaan dari tahap sebelumnya. Setelah itu, penarikan kesimpulan dilakukan dan laporan akhir penelitian diselesaikan.

### 3.1 Pembentukan Metode Penentuan Kapasitas *Hosting* PLTS Dengan Proses *Markov Chains*

Diagram alir pembentukan metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS dengan proses *Markov Chains* ditunjukkan pada Gambar 3.2. Langkah pertama adalah pembentukan strategi penetrasi. Pada langkah ini dibentuk skenario penetrasi, *states* dari *Markov Chains*, proses penetrasi, pelanggan penetrasi, ukuran daya penetrasi, level penetrasi pelanggan, level penetrasi daya, dan lokasi penetrasi.



Gambar 3.2. Diagram alir pembentukan metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS dengan proses *Markov Chains*.

Langkah kedua adalah pembentukan *Markov Chains*. Pada langkah ini, matriks probabilitas transisi, jumlah simulasi *Markov Chains*, dan formula perhitungan kapasitas *hosting* PLTS dirancang. Langkah ketiga adalah pembentukan algoritme. Algoritme ini berguna untuk pembuatan program simulasi.

Langkah selanjutnya adalah simulasi penentuan kapasitas *hosting*. Berkaitan dengan hal tersebut, data jaringan distribusi tenaga listrik, profil beban, dan daya keluaran PLTS diambil. Dua simulasi dikerjakan pada langkah ini, yaitu simulasi dengan *Markov Chains* dan simulasi dengan *Monte Carlo*. Dalam hal ini, metode *Monte Carlo* yang

digunakan adalah metode *Monte Carlo* yang sudah dikerjakan pada penelitian sebelumnya [?, 33, 34]. Setelah itu, hasil-hasil yang didapat dibahas dan dilakukan penarikan kesimpulan.

### 3.1.1 Pembentukan Strategi Penetrasi

Pembentukan strategi penetrasi dilakukan dengan mempertimbangkan variabel ketidakpastian seperti lokasi penetrasi dan ukuran daya PLTS. Profil beban dan ukuran daya PLTS didapat dari data riil.

#### 3.1.1.1 Skenario Penetrasi

Skenario penetrasi  $A^m$  adalah skenario ke- $m$  dalam mempenetrasi PLTS ke jaringan distribusi tenaga listrik. Skenario penetrasi  $A^m$  dirumuskan dalam himpunan  $A$ , yaitu

$$A = \{A^1, A^2, \dots, A^m, \dots, A^u\}. \quad (3-1)$$

Dalam penelitian ini, jumlah semua skenario penetrasi  $u$  juga merepresentasikan jumlah simulasi *Markov Chains*.

#### 3.1.1.2 States dari Markov Chains

Pada penelitian ini, *states* dari *Markov Chains* merepresentasikan kluster yang mungkin dari pelanggan, yaitu

$$Y = \{y|y \text{ adalah kluster dari pelanggan}\}. \quad (3-2)$$

Dalam hal ini, *state*  $y_i$  adalah *state* sebelumnya dari  $y_i$ . Keduanya merupakan nilai keluaran dari  $y$ .

#### 3.1.1.3 Proses Penetrasi

Skenario penetrasi ke- $m$  terdiri atas sejumlah PLTS dengan ukuran daya dan lokasi penetrasi yang berbeda-beda. Untuk setiap skenario penetrasi, proses melakukan penetrasi ke- $\{j, k\}$  yang merepresentasikan ukuran daya dan lokasi penetrasi disebut sebagai



proses penetrasi  $a_{j,k}^m$ . Hal ini dirumuskan sebagai

$$A^m = \{a_{j,1}^m, a_{j,2}^m, \dots, a_{j,k}^m, \dots, a_{j,w}^m\}. \quad (3-3)$$

Dengan skenario penetrasi sebanyak  $u$  dan proses penetrasi sebanyak  $w$  maka dihasilkan total kombinasi acak dari ukuran daya dan lokasi penetrasi sebanyak  $u \cdot w$ .

#### 3.1.1.4 Pelanggan Penetrasi

Dalam penelitian ini, pelanggan penetrasi  $c_{j,k}^m$  didefinisikan sebagai pelanggan saat ini yang dipilih secara acak untuk mengintegrasikan PLTS ke jaringan distribusi tenaga listrik. Pelanggan penetrasi dipilih untuk proses penetrasi ke- $\{m, j, k\}$ . Hal ini didefinisikan sebagai

$$C_j^m = \{c_{j,1}^m, c_{j,2}^m, \dots, c_{j,k}^m, \dots, c_{j,w}^m\}. \quad (3-4)$$

Untuk setiap proses penetrasi ke- $k$ , dipilih satu pelanggan penetrasi  $c_{j,k}^m$ . Oleh karena itu, jika simulasi *Markov Chains* sebanyak  $u$  dikerjakan maka terdapat skenario penetrasi sebanyak  $u$  untuk setiap pelanggan penetrasi. Hal ini dirumuskan sebagai

$$C_j^k = \{c_{j,1}^k, c_{j,2}^k, \dots, c_{j,m}^k, \dots, c_{j,u}^k\}. \quad (3-5)$$

#### 3.1.1.5 Ukuran Daya Penetrasi

Ukuran daya penetrasi PLTS  $x_{j,k}^m$  ditentukan secara bersamaan. Untuk pelanggan yang hanya mengintegrasikan PLTS, ukuran daya yang digunakan hanya PLTS. Pada pelanggan yang mengintegrasikan PLTS dan baterai, baik PLTS maupun baterai ditentukan ukuran daya masing-masing. Ukuran daya penetrasi  $x_{j,k}^m$  didasarkan pada skenario ke- $m$ , kluster ke- $j$ , dan proses penetrasi ke- $k$ . Dengan kata lain, ukuran daya penetrasi  $x_{j,k}^m$  adalah ukuran daya dari PLTS untuk pelanggan penetrasi  $c_{j,k}^m$ . Ukuran daya penetrasi dipilih dari data historis  $D$  melalui proses *Markov Chains*. Ukuran daya penetrasi  $x_{j,k}^m$  dirumuskan dalam himpunan ukuran daya penetrasi  $X_j^m$  sebagai

$$X_j^m = \{x_{j,1}^m, x_{j,2}^m, \dots, x_{j,k}^m, \dots, x_{j,w}^m\}, \quad (3-6)$$

dan dapat dirumuskan sebagai

$$X_j^k = \{x_{j,1}^k, x_{j,2}^k, \dots, x_{j,m}^k, \dots, x_{j,u}^k\}. \quad (3-7)$$

### 3.1.1.6 Level Penetrasi Pelanggan

Untuk setiap skenario penetrasi, level penetrasi pelanggan  $cp_k^m$  adalah jumlah total dari pelanggan-pelanggan penetrasi dari awal simulasi sampai proses penetrasi ke- $k$ . Secara matematis, level penetrasi pelanggan  $cp_k^m$  didefinisikan sebagai

$$cp_k^m = k, \quad (3-8)$$

dan untuk semua penetrasi,

$$cp_w^m = w, \quad (3-9)$$

kemudian, himpunan level penetrasi pelanggan  $CP^m$  dirumuskan sebagai

$$CP^m = \{cp_1^m, cp_2^m, \dots, cp_k^m, \dots, cp_w^m\}. \quad (3-10)$$

### 3.1.1.7 Level Penetrasi Daya

Jumlah total ukuran daya yang telah dipenetrasikan ke jaringan distribusi tenaga listrik ke- $\{m, k\}$  didefinisikan sebagai level penetrasi daya  $xp_k^m$ . Level penetrasi daya  $xp_k^m$  didefinisikan sebagai

$$xp_k^m = \sum_{j=1}^k x_{j,k}^m, \quad (3-11)$$

jika telah tercapai 100% penetrasi maka

$$xp_w^m = \sum_{k=1}^w x_{j,k}^m, \quad (3-12)$$

kemudian, himpunan level penetrasi daya  $XP^m$  dirumuskan sebagai

$$XP^m = \{xp_1^m, xp_2^m, \dots, xp_k^m, \dots, xp_w^m\}. \quad (3-13)$$

### 3.1.1.8 Lokasi Penetrasi

Lokasi penetrasi  $l_{j,k}^m$  didasarkan pada lokasi pelanggan penetrasi  $c_{j,k}^m$  yang dipilih. Oleh karena itu, lokasi penetrasi  $l_{j,k}^m$  dirumuskan sebagai

$$l_{j,k}^m = \text{location}(c_{j,k}^m), \quad (3-14)$$

dan himpunan lokasi penetrasi  $l_{j,k}^m$  dapat didefinisikan sebagai

$$L_j^m = \{l_{j,1}^m, l_{j,2}^m, \dots, l_{j,k}^m, \dots, l_{j,w}^m\}. \quad (3-15)$$

### 3.1.2 Pembentukan *Markov Chains*

Pembentukan metode *Markov Chains* untuk penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap dilakukan dengan mendefinsikan matriks probabilitas transisi, jumlah simulasi *Markov Chains*, dan kapasitas *hosting* PLTS.

#### 3.1.2.1 Matriks Probabilitas Transisi

Data historis penetrasi-penetrasi PLTS diperlukan untuk membentuk matriks probabilitas transisi. Berkaitan dengan hal tersebut, penelitian ini menggunakan data historis penetrasi-penetrasi PLTS dari *California Distributed Generation Statistics* [30]. Data tersebut dihimpun dalam himpunan  $D$ . Pembentukan matriks probabilitas transisi diawali dengan menghitung probabilitas-probabilitas transisi untuk semua *state* dalam himpunan  $D$ . Selanjutnya, nilai-nilai probabilitas transisi yang didapat dimasukkan sebagai anggota-anggota matriks probabilitas transisi.

Prosedur untuk membentuk matriks probabilitas transisi dijelaskan pada Algoritme ???. Untuk menghitung probabilitas transisi, Persamaan (2-7) dikembangkan menjadi

$$p_{ij} = Pr[a_{j,k}^m = y_j \mid a_{j,k-1}^m = y_i]. \quad (3-16)$$

Dengan mengaplikasikan Persamaan (3-16) untuk semua data penetrasi pada himpunan  $D$ , jumlah nilai probabilitas transisi sebanyak  $r \cdot r$  diperoleh. Kemudian, dengan mengasumsikan bahwa  $\mathbf{P}$  adalah matriks persegi ( $r \times r$ ), matriks probabilitas transisi  $\mathbf{P}$

dirumuskan sebagai

$$\mathbf{P} = \begin{matrix} & \begin{matrix} y_j & y_j & \dots & y_j \end{matrix} \\ \begin{matrix} y_i \\ y_i \\ y_i \\ \vdots \\ y_i \end{matrix} & \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1r} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2r} \\ p_{r1} & p_{r2} & \dots & p_{rr} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

### 3.1.2.2 Jumlah Simulasi *Markov Chains*

Perhitungan jumlah simulasi *Markov Chains* menggunakan Persamaan (2-8).

### 3.1.2.3 Batas Operasi Sistem Distribusi

Karena kapasitas *hosting* PLTS atap ditentukan berdasarkan pelanggaran terhadap batas operasi sistem, batas-batas operasi sistem tenaga listrik yang digunakan perlu untuk dijelaskan. Karena penelitian ini menggunakan salah satu penyulang di Indonesia maka batas operasi sistem distribusi yang digunakan juga mengacu pada regulasi yang diterapkan di Indonesia.

1. **Aliran Daya Balik** Pada Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia No. 49 Tahun 2018 tentang Penggunaan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap, daya yang diintegrasikan ke jaringan distribusi tidak diperbolehkan untuk melebihi daya maksimum yang terpasang pada rumah terkait [43]. Sebagai konsekuensinya, peraturan ini tidak menghendaki terjadinya aliran daya balik dari penyulang ke jaringan dengan kelas tegangan lebih tinggi. Batas aliran daya balik ini dideskripsikan sebagai

$$\sum_{k=1}^w xp_k^m \leq P_{source} - \sum_{d=1}^{n \text{ losses}} P_{losses_d}, \quad (3-17)$$

$$\sum_{k=1}^w xp_k^m \leq Q_{source} - \sum_{d=1}^{n \text{ losses}} Q_{losses_d}. \quad (3-18)$$

2. **Tegangan Lebih** Mengacu kepada regulasi yang mengatur mengenai batas tegangan lebih di Indonesia [44], tegangan-tegangan *bus* tidak diperbolehkan untuk

mempunyai nilai diatas 1,05 pu. Dalam penelitian ini, batas tersebut dijadikan acuan untuk menentukan ada atau tidak adanya pelanggaran batas tegangan lebih ketika PLTS-PLTS atap diintegrasikan ke sistem distribusi tegangan rendah. Dengan  $v_b$  yang didefinisikan sebagai tegangan pada *bus* ke- $b$ , formula matematika dari batas tegangan lebih tersebut adalah

$$v_b \leq 1,05. \quad (3-19)$$

3. **Faktor Daya Operasi Penyulang** Berkaitan dengan faktor daya yang terukur di sumber penyulang, faktor daya dengan nilai kurang dari 0,85 tidak diperbolehkan untuk terjadi [44]. Penetrasi PLTS-PLTS atap ditetapkan telah melanggar batas operasi jika PLTS-PLTS atap yang diintegrasikan ke sistem tenaga listrik tersebut menyebabkan terukurnya nilai faktor daya operasi penyulang dibawah 0,85. Kondisi ini dirumuskan sebagai

$$PF_{feeder} \geq 0,85. \quad (3-20)$$

#### 3.1.2.4 Kapasitas *Hosting* PLTS

Untuk setiap simulasi *Markov Chains*, kapasitas *hosting* PLTS dihitung. Dengan  $Pr[T^m = t_k^m]$  adalah probabilitas terjadinya pelanggaran pada skenario penetrasi ke- $m$  dan proses penetrasi ke- $k$ , perhitungan kapasitas *hosting* PLTS dilakukan dengan

$$h^m = \min \left\{ xp_{k-1}^m \mid Pr[T^m = t_k^m] \geq \frac{1}{w} \wedge k \neq 1 \right\}. \quad (3-21)$$

Selanjutnya, untuk semua simulasi *Markov Chain*, kapasitas *hosting* minimum  $h_{min}$  dihitung dengan

$$h_{min} = \min \{h^1, h^2, \dots, h^m, \dots, h^u\}. \quad (3-22)$$

#### 3.1.3 Pembentukan Algoritme

Pembentukan algoritme untuk penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap dilakukan dengan menggunakan formula-formula yang telah dibentuk, yaitu Persamaan (3-1) sampai Persamaan (3-22). Algoritme penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap dengan

pendekatan *Markov Chain* ditunjukkan dalam Algoritme 1.

---

**Algorithm 1** Penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap dengan Markov Chain Dasar
 

---

```

1: function PERFORMMARKOVCHAINS
2:   OBTAINLOADCURVE
3:   OBTAINPHOTOVOLTAICOUTPUT
4:   Construct a code of the distribution grid under study
5:   Define the operational limits concerned
6:   Initialize  $m$  :  $m = 1$ 
7:   Initialize  $k$  :  $k = 1$ 
8:   Obtain  $a_k^m$ 
9:   MAKESETPHOTOVOLTAICALLOCATION
10:  Initialize  $y_j$ 
11:  Obtain  $c_{j,k}^m$ ,  $x_{j,k}^m$ , and  $l_{j,k}^m$ 
12:  MAKESETCUSTOMERWITHPHOTOVOLTAIC
13:  MAKESETPHOTOVOLTAICSIZE
14:  while  $m$  in  $cp_k^m \neq u$  do
15:    CALCULATECP
16:    CALCULATEXP
17:    if  $m \geq 2$  then
18:      Update  $a_k^m$ 
19:    end if
20:    while  $k$  in  $cp_k^m \neq w$  do
21:      if  $k \geq 2$  then
22:         $y_i \leftarrow y_j$ 
23:        PERFORMPHOTOVOLTAICALLOCATION
24:        Update  $c_{j,k}^m$ ,  $x_{j,k}^m$ , and  $l_{j,k}^m$ 
25:      end if
26:      Penetrate rooftop photovoltaic using  $c_{j,k}^m$ ,  $x_{j,k}^m$ , and  $l_{j,k}^m$ 
27:      Run power flow in time-series
28:      Evaluate the results using the operational limits
29:      if  $Pr[T^m = t_k^m] = \frac{1}{w}$  is True then
30:        Determine  $xp_{k-1}^m$  as rooftop photovoltaic hosting capacity
31:      end if
32:      Update  $k$  :  $k = k + 1$ 
33:    end while
34:    Calculate  $h_{min} = \min\{h^1, h^2, \dots, h^m, \dots, h^u\}$ 
35:    Update  $m$  :  $m = m + 1$ 
36:  end while
37:  return  $A^m$ ,  $C_j^m$ ,  $X_j^m$ ,  $CP^m$ ,  $XP^m$ ,  $L_j^m$ , and  $h_{min}$ 
38:  Record the desired results
39: end function

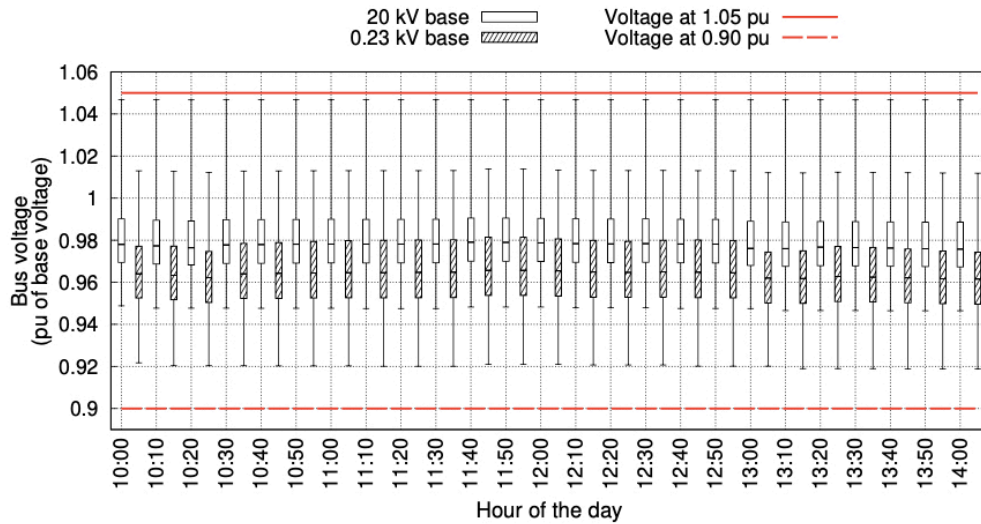
```

---

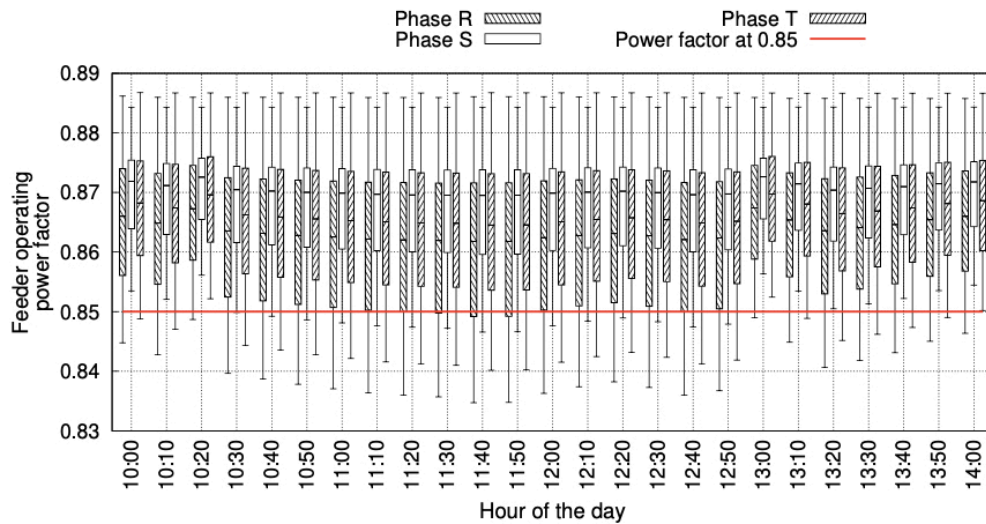
## BAB IV

### KEMAJUAN PENELITIAN

Pada bab ini disediakan hasil-hasil penelitian yang sudah didapatkan ketika proposal ini disusun.



Gambar 4.1. Tegangan *bus* dalam runtun waktu interval.



Gambar 4.2. Faktor daya penyulang dalam runtun waktu interval.



**BAB V**  
**JADWAL PENELITIAN**

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Energy Agency Photovoltaics Power Systems, “2020 Snapshot of Global PV Markets,” International Energy Agency, Tech. Rep., 2020.
- [2] M. Hasheminamin, V. G. Agelidis, V. Salehi, R. Teodorescu, and B. Hredzak, “Index-Based Assessment of Voltage Rise and Reverse Power Flow Phenomena in a Distribution Feeder under High PV Penetration,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 5, no. 4, pp. 1158–1168, 2015.
- [3] M. J. Reno, K. Coogan, J. Seuss, and R. J. Broderick, “Novel Methods to Determine Feeder Locational PV Hosting Capacity and PV Impact Signatures,” Sandia National Laboratories, Tech. Rep. July, 2016.
- [4] F. Olivier, P. Aristidou, D. Ernst, and T. Van Cutsem, “Active Management of Low-Voltage Networks for Mitigating Overvoltages Due to Photovoltaic Units,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 926–936, 2016.
- [5] D. Santos-Martin and S. Lemon, “Simplified Modeling of Low Voltage Distribution Networks for PV Voltage Impact Studies,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 4, pp. 1924–1931, 2016.
- [6] A. Y. Elrarrayah, M. Z. Wanik, and A. Bouselham, “Simplified Approach to Analyze Voltage Rise in LV Systems With PV Installations Using Equivalent Power Systems Diagrams,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 4, pp. 2140–2149, 2017.
- [7] H. Mortazavi, H. Mehrjerdi, M. Saad, S. Lefebvre, D. Asber, and L. Lenoir, “A Monitoring Technique for Reversed Power Flow Detection with High PV Penetration Level,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 5, pp. 2221–2232, 2015.
- [8] M. Andresen, G. Buticchi, and M. Liserre, “Thermal Stress Analysis and MPPT Optimization of Photovoltaic Systems,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 8, pp. 4889–4898, 2016.
- [9] M. Bollen and F. Hassan, *Integration of Distributed Generation in the Power System*. John Wiley & Sons, 2011.
- [10] S. Heslop, I. MacGill, and J. Fletcher, “Maximum PV Generation Estimation Method for Residential Low Voltage Feeders,” *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 7, pp. 58–69, 2016.
- [11] R. Luthander, D. Lingfors, and J. Widén, “Large-Scale Integration of Photovoltaic Power in A Distribution Grid Using Power Curtailment and Energy Storage,” *Solar Energy*, vol. 155, pp. 1319–1325, 2017.
- [12] M. Emmanuel and R. Rayudu, “The Impact of Single-Phase Grid-Connected Distributed Photovoltaic Systems on the Distribution Network Using P-Q and P-V

- Models,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 91, pp. 20–33, 2017.
- [13] S. Breker, A. Claudi, and B. Sick, “Capacity of Low-Voltage Grids for Distributed Generation: Classification by Means of Stochastic Simulations,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 2, pp. 689–700, 2015.
  - [14] M. Kolenc, I. Papič, and B. Blažič, “Assessment of Maximum Distributed Generation Penetration Levels in Low Voltage Networks Using a Probabilistic Approach,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 64, pp. 505–515, 2015.
  - [15] M. H. Bollen and S. K. Rönnerberg, “Hosting Capacity of the Power Grid for Renewable Electricity Production and New Large Consumption Equipment,” *Energies*, vol. 10, no. 9, 2017.
  - [16] A. Dubey and S. Santoso, “On Estimation and Sensitivity Analysis of Distribution Circuit’s Photovoltaic Hosting Capacity,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 2779–2789, 2017.
  - [17] T. Beck, H. Kondziella, G. Huard, and T. Bruckner, “Assessing the Influence of the Temporal Resolution of Electrical Load and PV Generation Profiles on Self-Consumption and Sizing of PV-Battery Systems,” *Applied Energy*, vol. 173, pp. 331–342, 2016.
  - [18] G. Mokhtari, A. Ghosh, G. Nourbakhsh, and G. Ledwich, “Smart Robust Resources Control in LV Network to Deal with Voltage Rise Issue,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 1043–1050, 2013.
  - [19] M. J. Alam, K. M. Muttaqi, and D. Sutanto, “Mitigation of Rooftop Solar PV Impacts and Evening Peak Support by Managing Available Capacity of Distributed Energy Storage Systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 3874–3884, 2013.
  - [20] V. T. Tran, K. M. Muttaqi, and D. Sutanto, “A Robust Power Management Strategy with Multi-Mode Control Features for an Integrated PV and Energy Storage System to Take the Advantage of ToU Electricity Pricing,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 2, pp. 2110–2120, 2019.
  - [21] . International Renewable Energy Agency, “Behind-The-Meter Batteries,” International Renewable Energy Agency, Tech. Rep., 2019.
  - [22] F. Ding and B. Mather, “On Distributed PV Hosting Capacity Estimation, Sensitivity Study, and Improvement,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 3, pp. 1010–1020, 2017.
  - [23] R. Torquato, D. Salles, C. O. Pereira, P. C. M. Meira, and W. Freitas, “A Comprehensive Assessment of PV Hosting Capacity on Low-Voltage Distribution Systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 2, pp. 1002–1012, 2018.

- [24] M. Deakin, C. Crozier, D. Apostolopoulou, T. Morstyn, and M. McCulloch, "Stochastic Hosting Capacity in LV Distribution Networks," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2019.
- [25] S. Wang, Y. Dong, L. Wu, and B. Yan, "Interval Overvoltage Risk Based PV Hosting Capacity Evaluation Considering PV and Load Uncertainties," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 3, pp. 2709–2721, 2020.
- [26] P. P. Vergara, M. Salazar, T. T. Mai, P. H. Nguyen, and H. Slootweg, "A Comprehensive Assessment of PV Inverters Operating with Droop Control for Overvoltage Mitigation in LV Distribution Networks," *Renewable Energy*, vol. 159, pp. 172–183, 2020.
- [27] M. Al-Saffar and P. Musilek, "Reinforcement Learning-Based Distributed BESS Management for Mitigating Overvoltage Issues in Systems With High PV Penetration," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 4, pp. 2980–2994, 2020.
- [28] O. Häggström, *Finite Markov Chains and Algorithmic Applications*. Cambridge University Press, 2002.
- [29] W.-K. Ching and M. K. Ng, *Markov Chains: Models, Algorithms and Applications*. Springer Science + Business Media, Inc, 2006.
- [30] California Solar Initiative, "California Distributed Generation Statistics." [Online]. Available: <http://www.californiasolarstatistics.org>
- [31] A. J. Collin, G. Tsagarakis, S. Member, and A. E. Kiprakis, "Development of Low-Voltage Load Models for the Residential Load Sector," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 5, pp. 2180–2188, 2014.
- [32] R. H. M. Zargar and M. H. Yaghmaee Moghaddam, "Development of a Markov-Chain-Based Solar Generation Model for Smart Microgrid Energy Management System," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 11, no. 2, pp. 736–745, 2020.
- [33] W. Y. Atmaja, Sarjiya, L. M. Putranto, and S. Santoso, "Rooftop Photovoltaic Hosting Capacity Assessment: A Case Study of Rural Distribution Grids in Yogyakarta, Indonesia," in *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, vol. 2019-July. IEEE, jul 2019, pp. 448–453. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8988810>
- [34] W. Y. Atmaja, Sarjiya, L. M. Putranto, and E. Y. Pramono, "Hosting Capacity Improvement Using Reactive Power Control Strategy of Rooftop PV Inverters," in *Proceedings of 2019 the 7th International Conference on Smart Energy Grid Engineering, SEGE 2019*. IEEE, 2019, pp. 213–217. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8859888>
- [35] W. Y. Atmaja, Sarjiya, and L. M. Putranto, "Evaluation of rooftop photovoltaic allocation strategies of hosting capacity analysis in low-voltage grid," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2255, no. 1, p. 020022, 2020. [Online]. Available: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0013574>

- [36] Electric Power Research Institute (EPRI), “Stochastic Analysis to Determine Feeder Hosting Capacity for Distributed Solar PV,” Electric Power Research Institute, Tech. Rep., 2012.
- [37] A. Dubey, S. Santoso, and A. Maitra, “Understanding Photovoltaic Hosting Capacity of Distribution Circuits,” in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2015.
- [38] B. Bletterie, S. Kadam, R. Bolgarny, and A. Zegers, “Voltage Control with PV Inverters in Low Voltage Networks-In Depth Analysis of Different Concepts and Parameterization Criteria,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 177–185, 2017.
- [39] D. Revuz, *Markov Chains*. Elsevier, 1984.
- [40] P. Louangrath, “Sample Size Determination for Non-Finite Population,” in *International Conference on Discrete Mathematics and Applied Sciences*, 2014, pp. 1–24.
- [41] J. Arroyo and C. Mate, “Introducing Interval Time Series: Accuracy Measures,” in *COMPSTAT Proceedings in Computational Statistics*, 2006, pp. 1–8.
- [42] J. Arroyo, R. Espínola, and C. Maté, “Different Approaches to Forecast Interval Time Series: A Comparison in Finance,” *Computational Economics*, vol. 37, no. 2, pp. 169–191, 2011.
- [43] Minister of Energy and Mineral Resources of the Republic of Indonesia, “Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia No. 49 Tahun 2018 tentang Penggunaan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap oleh Konsumen PT Perusahaan Listrik Negara (Persero),” pp. 1–18, 2018.
- [44] Minister of Energy and Mineral Resources of the Republic of Indonesia, “Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia No. 03 Tahun 2007 tentang Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Jawa-Madura-Bali,” pp. 1–135, 2007.