

**MARKOV CHAIN MONTE CARLO UNTUK PENENTUAN  
KAPASITAS *HOSTING* STOKASTIK PADA PENETRASI PLTS DAN  
PLTS-BATERAI TERSEBAR**

**Proposal Penelitian Disertasi**

untuk memenuhi sebagian persyaratan  
mencapai derajat Doktor

Program Studi Doktor Teknik Elektro  
Konsentrasi Sistem Tenaga Listrik  
Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi



diajukan oleh

**Wijaya Yudha Atmaja**  
**20/468298/STK/00830**

Kepada

**PROGRAM PASCASARJANA**  
**FAKULTAS TEKNIK**  
**UNIVERSITAS GADJAH MADA**  
**YOGYAKARTA**

**2021**

## HALAMAN PERSETUJUAN

Tim Promotor menyetujui proposal penelitian disertasi:

Nama : Wijaya Yudha Atmaja

NIM : 20/468298/STK/00830

Judul : Markov Chain Monte Carlo untuk Penentuan Kapasitas *Hosting*  
Stokastik pada Penetrasi PLTS dan PLTS-Baterai Tersebar

yang telah diperbaiki sesuai saran dari Tim Penguji Ujian Komprehensif.

Tanda Tangan

Tanggal



Ir. Sarjiya, S.T., M.T., Ph.D., IPU.

Promotor

26/05/2021



Ir. Lesnanto Multa Putranto, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.

Ko-Promotor

27/05/2021

## HALAMAN PERSETUJUAN

Tim Penguji menyetujui proposal penelitian disertasi:

Nama : Wijaya Yudha Atmaja

NIM : 20/468298/STK/00830

Judul : Markov Chain Monte Carlo untuk Penentuan Kapasitas *Hosting*  
Stokastik pada Penetrasi PLTS dan PLTS-Baterai Tersebar

yang telah diperbaiki sesuai saran dari Tim Penguji Ujian Komprehensif.

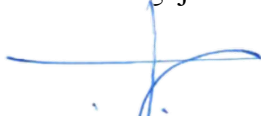
Tanda Tangan

Tanggal

**Ir. Hanung Adi Nugroho, S.T., M.E., Ph.D., IPM.**

.....

Ketua Tim Penguji



**Ir. Sarjiya, S.T., M.T., Ph.D., IPU.**

26/05/2021  
.....

Anggota Tim Penguji



**Ir. Lesnanto Muta Putranto, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.**

27/05/2021  
.....

Anggota Tim Penguji



**Dr. Ir. M. Isnaeni BS, M.T.**

04/06/2021  
.....

Anggota Tim Penguji



**Eka Firmansyah, S.T., M. Eng., Ph.D**

29/5/2021  
.....

Anggota Tim Penguji



**Ir. Fransisco Danang Wijaya, S.T., M.T., D.Eng., IPM.**

06/06/2021  
.....

Anggota Tim Penguji

## ABSTRAK

Pada level tertentu, penetrasi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) tersebar dapat memberikan dampak negatif pada jaringan distribusi tegangan rendah, seperti pelanggaran tegangan lebih, aliran daya balik, dan pelanggaran kapasitas termal konduktor. Sementara itu, dari tahun ke tahun, penetrasi PLTS tersebar tercatat semakin tinggi. Sebagai konsekuensinya, penentuan kapasitas *hosting* stokastik perlu dilakukan, khususnya oleh perencana sistem distribusi dalam menghadapi kenaikan penetrasi PLTS. Agar perencana sistem distribusi tersebut dapat memutuskan langkah strategis yang tepat, dibutuhkan metode penentuan kapasitas *hosting* yang akurat dengan model yang representatif dengan kondisi riil penetrasi. Oleh karena itu, penelitian disertasi ini bertujuan mengembangkan metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik berbasis pendekatan Markov Chain Monte Carlo untuk meningkatkan akurasi dengan model yang representatif terhadap kondisi riil penetrasi PLTS. Dalam hal ini, kapasitas *hosting* stokastik dihitung dengan memperhatikan pelanggaran terhadap batas tegangan lebih. Untuk meningkatkan akurasi metode, penelitian ini mengembangkan pendekatan Markov Chain Monte Carlo dengan *layered hidden Markov model*. Karakteristik solusi dari *layered hidden Markov model* yang mempunyai probabilitas-probabilitas transisi/keluaran digunakan untuk pergerakan dari suatu *state* ke *state* berikutnya. Terkait hal ini, ketidakpastian ukuran daya dan lokasi telah dikembangkan pada penelitian sebelumnya. Sebagai pengembangannya, penelitian disertasi ini menggunakan pertimbangan kategori pelanggan, kategori penetrasi PLTS dan PLTS-baterai, serta kategori daya PLTS dan PLTS-baterai. Untuk mengukur kinerja metode yang diusulkan, sebuah studi kasus dilakukan pada penyulang IEEE 8500-node. Studi perbandingan diterapkan dengan membandingkan pendekatan Markov Chain Monte Carlo dan Monte Carlo. Mean absolute error (MAE) diterapkan untuk mengukur akurasi dari metode yang diusulkan pada studi perbandingan tersebut. Hipotesis dari penelitian ini adalah metode yang diusulkan terbukti dapat meningkatkan akurasi, dibandingkan dengan metode sebelumnya yaitu Monte Carlo.

**Kata kunci**—Markov Chain Monte Carlo, kapasitas *hosting* stokastik, penetrasi PLTS dan PLTS-baterai, akurasi.

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERSETUJUAN.....	ii
ABSTRAK .....	iv
DAFTAR ISI .....	v
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
BAB I    PENDAHULUAN .....	1
1.1    Latar Belakang .....	1
1.2    Perumusan Masalah.....	5
1.3    Tujuan Penelitian .....	6
1.4    Manfaat Penelitian .....	6
BAB II    TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI .....	7
2.1    Tinjauan Pustaka.....	7
2.1.1    Kerangka Analisis Probabilistik untuk Ketidakpastian dan Variabilitas Masukan .....	9
2.1.2    Batasan Level Tegangan Sistem Distribusi Tegangan Rendah .....	11
2.1.3    Pendekatan Stokastik dalam Penentuan Kapasitas <i>Hosting</i> ....	14
2.1.4    Prosedur Penentuan Kapasitas <i>Hosting</i> Stokastik.....	19
2.1.5    Strategi Penetrasi PLTS dan Baterai.....	25
2.1.6    Usulan Solusi dan Keaslian Penelitian.....	29
2.1.6.1    Usulan Solusi .....	29
2.1.6.2    Keaslian Penelitian .....	31
2.2    Landasan Teori.....	36
2.2.1    Kapasitas <i>Hosting</i> PLTS Tersebar pada Penetrasi Skala Besar .....	36
2.2.2    Penentuan Kapasitas <i>Hosting</i> Berbasis Monte Carlo.....	36
2.2.3    Konsep Markov Chain Monte Carlo.....	38
2.2.3.1    Proses Markov.....	39
2.2.3.2    Probabilitas Transisi Dari Proses Markov .....	39

2.2.3.3	Markov Chain Monte Carlo .....	39
2.2.4	Jumlah Proses Acak .....	39
2.2.5	Kerangka Analisis Runtun Waktu.....	40
2.2.6	Studi Akurasi .....	41
2.3	Hipotesis.....	41
BAB III METODE PENELITIAN .....		43
3.1	Pengkajian Pustaka dan Persiapan Data Masukan.....	45
3.2	Perancangan Metode dan Pengerjaan Simulasi .....	48
3.2.1	Kapasitas <i>Hosting</i> Stokastik.....	49
3.2.2	Batas Kinerja Operasi.....	51
3.2.3	Kerangka Analisis Runtun Waktu.....	51
3.2.4	Perancangan Metode Penentuan Kapasitas <i>hosting</i> Stokastik untuk PLTS Tersebar .....	52
3.2.4.1	Perancangan Skenario Penetrasi PLTS Tersebar ....	52
3.2.4.2	Perancangan Markov Chain Monte Carlo .....	54
3.2.4.3	Pembentukan Algoritme .....	58
3.2.5	Pengembangan Metode dengan Pertimbangan PLTS dan PLTS-Baterai Tersebar.....	62
3.2.5.1	Pengembangan Skenario Penetrasi PLTS dan PLTS-Baterai Tersebar .....	63
3.2.5.2	Perancangan Operasi Baterai pada PLTS-Baterai...	65
3.2.5.3	Pengembangan Markov Chain Monte Carlo .....	66
3.2.5.4	Pembentukan Algoritme .....	68
3.3	Proses Analisis Hasil .....	70
3.3.1	Analisis Hasil Kapasitas <i>hosting</i> Stokastik .....	71
3.3.1.1	Pengaruh Penetrasi PLTS dan PLTS-Baterai terhadap Kapasitas <i>hosting</i> Stokastik .....	71
3.3.1.2	Pengaruh Penetrasi PLTS dan PLTS-Baterai terhadap Batas Operasi Sistem Distribusi .....	71
3.3.1.3	Studi Sensitivitas .....	71
3.3.2	Evaluasi Akurasi .....	72

BAB IV	KEMAJUAN PENELITIAN.....	73
4.1	Rancangan Skenario Penetrasi PLTS Tersebar .....	73
4.2	Algoritme.....	77
BAB V	JADWAL PENELITIAN.....	81
DAFTAR PUSTAKA	.....	83

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Peta <i>bibliometric</i> dari topik kapasitas <i>hosting</i> PLTS. ....	7
Gambar 2.2	Rangkaian tipikal PLTS yang terhubung ke jaringan distribusi tenaga listrik.....	11
Gambar 2.3	Diagram fasor. (a) $E_S > E_R$ , (b) $E_R > E_S$ . ....	13
Gambar 2.4	Diagram fasor. (a) Sebelum penetrasi PLTS, (b) Setelah penetrasi PLTS. ....	13
Gambar 2.5	Konsep kapasitas <i>hosting</i> PLTS tersebar. ....	15
Gambar 2.6	Kapasitas <i>hosting</i> stokastik untuk batas operasi tegangan lebih [67].....	16
Gambar 2.7	Skenario penentuan kapasitas <i>hosting</i> PLTS tersebar pada [16]. ....	19
Gambar 2.8	Metode penentuan kapasitas <i>hosting</i> PLTS tersebar pada [15]. ....	20
Gambar 2.9	Metode penentuan kapasitas <i>hosting</i> PLTS tersebar pada [35]. ....	21
Gambar 2.10	Skenario penyebaran PLTS tersebar pada [77]. ....	22
Gambar 2.11	Metode penentuan kapasitas <i>hosting</i> PLTS tersebar pada [31]. ....	23
Gambar 2.12	Metode penentuan kapasitas <i>hosting</i> PLTS tersebar pada [58]. ....	24
Gambar 2.13	Konfigurasi-konfigurasi instalasi PLTS tersebar oleh pelanggan. ....	26
Gambar 2.14	Peta konsep untuk posisi penelitian pada bidang kapasitas <i>hosting</i> stokastik. ....	32
Gambar 2.15	Blok diagram Markov Chain Monte Carlo. ....	38
Gambar 3.1	Diagram alir metodologi penelitian. ....	44
Gambar 3.2	Blok diagram metode penentuan kapasitas <i>hosting</i> stokastik berdasarkan alat yang digunakan. ....	50



Gambar 3.3	Proses perancangan metode penentuan kapasitas <i>hosting</i> stokastik untuk PLTS tersebar. ....	52
Gambar 3.4	Proses perancangan skenario-skenario penetrasi PLTS tersebar. ....	53
Gambar 3.5	Blok diagram hidden Markov model yang diusulkan. ....	55
Gambar 3.6	Diagram alir dari usulan metode mengenai penentuan kapasitas <i>hosting</i> stokastik untuk PLTS tersebar dengan Markov Chain Monte Carlo. ....	59
Gambar 3.7	Diagram alir penentuan kapasitas <i>hosting</i> stokastik untuk PLTS tersebar dengan Monte Carlo. ....	61
Gambar 3.8	Proses pengembangan metode dengan pertimbangan PLTS dan PLTS-baterai tersebar. ....	63
Gambar 3.9	Proses pengembangan skenario-skenario penetrasi PLTS dan PLTS-baterai tersebar.....	64
Gambar 3.10	Blok diagram layered hidden Markov model yang diusulkan.	67
Gambar 3.11	Diagram alir dari usulan metode mengenai penentuan kapasitas <i>hosting</i> stokastik untuk PLTS tersebar dengan Markov Chain Monte Carlo. ....	69
Gambar 3.12	Diagram alir penentuan kapasitas <i>hosting</i> stokastik untuk PLTS tersebar dengan Monte Carlo. ....	70

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan Distribusi Probabilitas Masukan Penetrasi PLTS Tersebar .....	10
Tabel 2.2	Batasan Level Tegangan pada Berbagai Standar .....	14
Tabel 2.3	Perbandingan Pendekatan Stokastik Monte Carlo yang Berkaitan dengan Analisis Runtun Waktu dalam Studi Kapasitas <i>Hosting</i> .....	18
Tabel 2.4	Perbandingan Prosedur Penentuan Kapasitas <i>Hosting</i> Stokastik	25
Tabel 2.5	Perbandingan Strategi Penetrasi PLTS dan Baterai.....	27
Tabel 2.6	Usulan Solusi untuk Rumusan Masalah dari Penelitian Disertasi Ini .....	30
Tabel 3.1	Penelitian yang Dikerjakan Sebelumnya oleh Penulis Terkait Penentuan Kapasitas <i>hosting</i> Stokastik Berbasis Monte Carlo ..	60

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Penetrasi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) tersebar pada jaringan distribusi tenaga listrik yang semakin tinggi [1, 2] mendorong perlunya investasi terhadap dampak negatif yang diterima oleh sistem distribusi tegangan rendah [3–9]. Kenaikan penetrasi tersebut disebabkan oleh harga unit PLTS yang semakin murah, visi untuk mengurangi pembangkit berbahan bakar fosil dan CO<sub>2</sub>, perkembangan teknologi PLTS, serta dukungan dari regulasi pemerintah [10–13]. Pada level tertentu, penetrasi PLTS tersebar berpotensi menyebabkan masalah pada kinerja operasi sistem distribusi tenaga listrik, seperti tegangan lebih [3–7], aliran daya balik [3, 8], pelanggaran kapasitas termal konduktor [4, 9], dan lain-lain. Untuk mencegah terjadinya permasalahan-permasalahan tersebut, penentuan kapasitas *hosting* sistem distribusi dalam menerima penetrasi PLTS tersebar perlu dilakukan. Kapasitas *hosting* PLTS didefinisikan sebagai jumlah daya maksimal dari penetrasi PLTS tersebar yang diintegrasikan pada jaringan distribusi sebelum terjadi masalah atau gangguan operasi pada jaringan tersebut [14].

Kapasitas *hosting* adalah pertimbangan utama dalam perencanaan sistem distribusi tenaga listrik untuk menghadapi kenaikan penetrasi PLTS tersebar [15, 16]. Terkait hal itu, akurasi dari penentuan kapasitas *hosting* menjadi perhatian utama. Dari tahun ke tahun, penelitian-penelitian sebelumnya melakukan pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* untuk meningkatkan akurasi terhadap karakteristik natural dari penetrasi PLTS [15–19]. Berkaitan dengan peningkatan akurasi tersebut, tantangan utama dalam penentuan kapasitas *hosting* untuk penetrasi PLTS tersebar adalah pemodelan penetrasi tersebar yang melibatkan karakteristik ketidakpastian dan variabilitas natural dari penetrasi PLTS [15–22].

Dalam mempertimbangkan karakteristik ketidakpastian dan variabilitas penetrasi PLTS tersebut, serta dalam usaha untuk mendapatkan hasil kapasitas

*hosting* yang akurat, dua pendekatan yang paling banyak digunakan adalah pendekatan *deterministic* dan pendekatan stokastik. Pendekatan *deterministic* untuk penentuan kapasitas *hosting* digunakan pada [20–26]. Pada pendekatan ini, kapasitas *hosting* dicari dengan menetapkan nilai-nilai tertentu sebagai variabel-variabel simulasi. Proses penyebaran PLTS pada pendekatan *deterministic* dilakukan dengan menetapkan ukuran daya PLTS dengan suatu nilai tertentu dan lokasi integrasi PLTS pada satu atau beberapa *bus* dalam sistem-sistem distribusi yang digunakan. Oleh sebab itu, pendekatan *deterministic* umumnya digunakan dalam menentukan kapasitas *hosting* pada satu atau beberapa PLTS tersebar yang berukuran daya besar [27, 28]. Penggunaan skenario *worst-case* dan pembulatan nilai-nilai yang ekstrim dilakukan pada pendekatan *deterministic* tersebut [29]. Selain itu, pendekatan ini tidak memasukkan ketidakpastian-ketidakpastian ukuran daya PLTS dan lokasi integrasi PLTS sehingga karakteristik acak dari penetrasi tidak terwakilkan [23, 25]. Oleh karena itu, pendekatan *deterministic* tidak cukup untuk dipakai pada penentuan dan analisis penetrasi PLTS tersebar [30].

Selain pendekatan *deterministic* tersebut, pendekatan lain yang dikembangkan dalam penentuan kapasitas *hosting* PLTS tersebar adalah pendekatan stokastik [17–19]. Dalam pendekatan stokastik, perhitungan kapasitas *hosting* bergantung pada kondisi acak dari persebaran PLTS pada jaringan distribusi [17]. Oleh karena itu, metode-metode yang dikembangkan dengan basis pendekatan stokastik ditandai dengan dipertimbangkannya karakteristik-karakteristik ketidakpastian dan variabilitas sebagai masukan dalam pemodelan penetrasi PLTS tersebar. Dalam hal ini, Monte Carlo adalah metode yang paling banyak digunakan untuk menyimulasikan ketidakpastian dan variabilitas dari penetrasi PLTS tersebar secara stokastik [4, 15, 16, 18, 19, 31–33]. Karakteristik ketidakpastian dari penetrasi PLTS tersebar antara lain ketidakpastian ukuran daya dan lokasi integrasi PLTS tersebar pada jaringan distribusi tegangan rendah [15, 16, 34, 35]. Karakteristik lainnya adalah karakteristik variabilitas. Variabilitas terdapat pada produksi daya keluaran PLTS dan permintaan beban. Ketika diamati dalam kerangka acuan runtun waktu, variabilitas daya keluaran PLTS dan permintaan beban ini berwujud fluktuasi yang bervariasi secara tidak tentu [33, 36]. Dengan penjelasan-penjelasan

tersebut, dapat dipahami bahwa metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik diperlukan untuk mempertimbangkan karakteristik-karakteristik ketidakpastian penetrasi tersebut agar dapat dihasilkan model penetrasi PLTS tersebar yang representatif [15, 32, 33].

Meskipun pendekatan stokastik yang telah dikembangkan penelitian-penelitian sebelumnya telah berhasil merepresentasikan persebaran acak pada *bus-bus* dalam jaringan distribusi, tetapi ketidakpastian lokasi dan ukuran daya PLTS pada sisi sekunder transformator jaringan tegangan rendah (JTR) belum dipertimbangkan. Penggunaan *lumped load* pada sisi sekunder transformator JTR mengabaikan parameter jarak dan impedansi antar rumah pelanggan [35, 37–39]. Konsekuensinya, akurasi berupa representasi riil dari penetrasi PLTS terkait ketidakpastian lokasi dan ukuran daya PLTS belum dapat dihasilkan. Selanjutnya, pelanggan-pelanggan individual tersebut mempunyai karakteristik masing-masing yang dibedakan berdasarkan jenis/kategori pelanggan. Berbagai macam kategori pelanggan, seperti pelanggan rumah tangga, komersial, pendidikan, industri, dan militer, mempunyai karakteristik yang berbeda sehingga kemungkinan masing-masing untuk memasang PLTS juga berbeda-beda. Penelitian-penelitian pada [16, 34] menggunakan kategori pelanggan untuk membedakan antara pelanggan dengan daya PLTS kecil (pelanggan rumah tangga) dan pelanggan dengan daya PLTS besar (pelanggan komersial). Dalam penelitian-penelitian tersebut, probabilitas kemunculan pelanggan dengan PLTS untuk masing-masing kategori tidak dipertimbangkan. Dengan kata lain, probabilitas terdapatnya daya PLTS pelanggan komersial yang sama besarnya atau lebih kecil daripada daya PLTS pelanggan rumah tangga diabaikan. Akibatnya, representasi riil dari penetrasi PLTS tidak dapat dicapai. Sementara itu, penelitian-penelitian tersebut hanya terbatas pada kategori pelanggan rumah tangga dan pelanggan komersial. Kategori pelanggan untuk sektor pendidikan, industri, dan militer tidak dipertimbangkan.

Selain ketidakpastian penetrasi PLTS tersebut, hal lain yang perlu ditingkatkan adalah akurasi metode terkait variabilitas permintaan beban dan daya kelu-

aran PLTS. Untuk mengamati dampak-dampak penetrasi PLTS pada sistem distribusi tegangan rendah, penelitian pada [15] menggunakan resolusi pengamatan per 1 jam. Hal ini menyebabkan variabilitas permintaan beban dan daya keluaran PLTS pada sampel waktu dibawah 1 jam tidak dapat terekam. Selanjutnya, walaupun menggunakan resolusi pengamatan lebih tinggi, yaitu per 15 menit, penelitian pada [31] menggunakan satu kurva permintaan beban dan daya keluaran PLTS. Hal ini tentu mengabaikan variabilitas-variabilitas pada kondisi-kondisi yang lain, misal kurva permintaan beban yang berbeda-beda pada hari yang berbeda atau kurva daya keluaran PLTS yang berbeda-beda pada kondisi awan/musim yang berbeda. Terkait hal tersebut, masalah yang muncul adalah beban komputasi. Meningkatkan resolusi pengamatan menjadi lebih tinggi adalah solusi untuk peningkatan akurasi, tetapi hal itu akan meningkatkan beban komputasi [40].

Permasalahan selanjutnya yang belum terselesaikan pada penelitian-penelitian sebelumnya adalah karakteristik ketidakpastian yang terkait dengan kategori penetrasi. Kategori penetrasi didefinisikan sebagai kategori dari komponen pembangkit yang dipenetrasi, PLTS saja atau PLTS yang terintegrasi dengan baterai (PLTS-baterai). Dalam hal ini, baterai-baterai yang dipasang pada suatu sistem distribusi tenaga listrik yang telah terintegrasi pada PLTS tersebar tersebar terbukti dapat mengurangi dampak negatif penetrasi PLTS tersebar terhadap jaringan distribusi tegangan rendah [41–43]. Strategi-strategi manajemen sistem penyimpan energi telah dirancang untuk mengendalikan operasi baterai-baterai yang dipasang tersebut. Strategi-strategi tersebut diarahkan untuk bisa digunakan baik pada sistem yang terhubung grid maupun yang beroperasi secara *islanded* [43]. Untuk tujuan tersebut, salah satu cara yang dilakukan adalah pendekatan dalam mengoordinasikan baterai yang terintegrasi pada PLTS tersebar dari para pelanggan dengan kendali penanggulangan kenaikan tegangan [41]. Selanjutnya, pengurangan dampak dari perubahan daya keluaran PLTS tersebar yang mendadak dengan mengimplementasikan *discharge* jangka pendek terbukti juga dapat dilakukan [42]. Meskipun penelitian tentang strategi-strategi manajemen sistem penyimpan energi tersebut telah dikerjakan, pertimbangan kemungkinan pelanggan-pelanggan yang mengintegrasikan panel PLTS sekaligus dengan baterai

(PLTS-baterai) pada sistem distribusi belum diteliti. Penelitian sebelumnya hanya memasukkan baterai-baterai secara terpisah setelah simulasi penetrasi PLTS tersebar selesai dilakukan. Salah satu urgensi untuk mempertimbangkan PLTS-baterai dalam perhitungan kapasitas *hosting* tersebut adalah semakin meningkatnya jumlah penetrasi PLTS-baterai. Di Jerman tercatat 40% penetrasi yang terjadi adalah penetrasi PLTS-baterai [44]. Berkaitan dengan penyelesaian permasalahan-permasalahan tersebut, pendekatan Monte Carlo mempunyai beberapa keterbatasan. Monte Carlo mempunyai keterbatasan terkait akurasi dan beban komputasi. Pendekatan Monte Carlo merupakan pendekatan yang paling cepat perkembangannya dan paling banyak dipakai saat ini dalam penentuan kapasitas *hosting* stokastik. Meskipun demikian, Monte Carlo memerlukan jumlah simulasi yang semakin banyak untuk mendapatkan akurasi yang tinggi [15], padahal penambahan jenis karakteristik ketidakpastian juga akan meningkatkan jumlah simulasi Monte Carlo.

## 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang berkaitan dengan kapasitas *hosting* stokastik dalam penelitian disertasi ini dirumuskan sebagai:

1. Kurangnya representasi ketidakpastian lokasi dan ukuran daya PLTS tersebar dari model penetrasi PLTS dalam penentuan kapasitas *hosting* stokastik, serta variabilitas permintaan beban dan iradiasi matahari dalam runtun waktu. Hal ini ditunjukkan melalui penggunaan *lumped load*, tidak dipertimbangkannya kategori pelanggan, dan penyederhanaan kerangka runtun waktu pada penelitian-penelitian sebelumnya.
2. Belum dipertimbangkannya PLTS-baterai dan operasi baterai pada penetrasi PLTS/PLTS-baterai. Hal ini menyebabkan dampak penetrasi yang melibatkan PLTS-baterai belum teridentifikasi.

Masalah-masalah tersebut bersumber pada kebutuhan mengenai peningkatan akurasi dari metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik. Terkait peningkatan akurasi ini, muncul tantangan dari pendekatan sebelumnya, yaitu Monte

Carlo. Dengan jumlah simulasi yang sama, semakin banyaknya jenis variabel penetrasi yang dipertimbangkan dan semakin tingginya resolusi analisis runtun waktu menyebabkan menurunnya akurasi Monte Carlo. Dalam hal ini, metode yang akurat merupakan sesuatu yang penting dalam pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik. Metode yang akurat diperlukan untuk meminimalkan kesalahan pada pengambilan keputusan dalam menghadapi dampak dari kenaikan penetrasi PLTS dan PLTS-baterai.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dideskripsikan, tujuan dari penelitian disertasi ini adalah:

1. Untuk meningkatkan representasi ketidakpastian lokasi dan ukuran daya PLTS tersebar dari model penetrasi PLTS dalam penentuan kapasitas *hosting* stokastik, serta variabilitas permintaan beban dan iradiasi matahari dalam runtun waktu.
2. Untuk memasukkan pertimbangan PLTS-baterai dan operasi baterai pada penetrasi PLTS/PLTS-baterai, serta mengidentifikasi dampaknya pada jaringan distribusi tegangan rendah.

Dalam pencapaiannya, sebuah metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik dengan basis pendekatan Markov Chain Monte Carlo dikembangkan pada penelitian disertasi ini. Ukuran ketercapaian tujuan diamati dari peningkatan akurasi metode yang diusulkan melalui perbandingan dengan metode sebelumnya.

### 1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dapat digunakan oleh perencana dan operator sistem distribusi sebagai salah satu pertimbangan untuk menghadapi dampak negatif dari kenaikan yang tinggi dari penetrasi PLTS dan PLTS-baterai pada jaringan distribusi tegangan rendah. Selain itu, untuk peneliti-peneliti dibidang pembangkitan tersebar, penelitian ini dapat dijadikan sebagai sumber acuan.

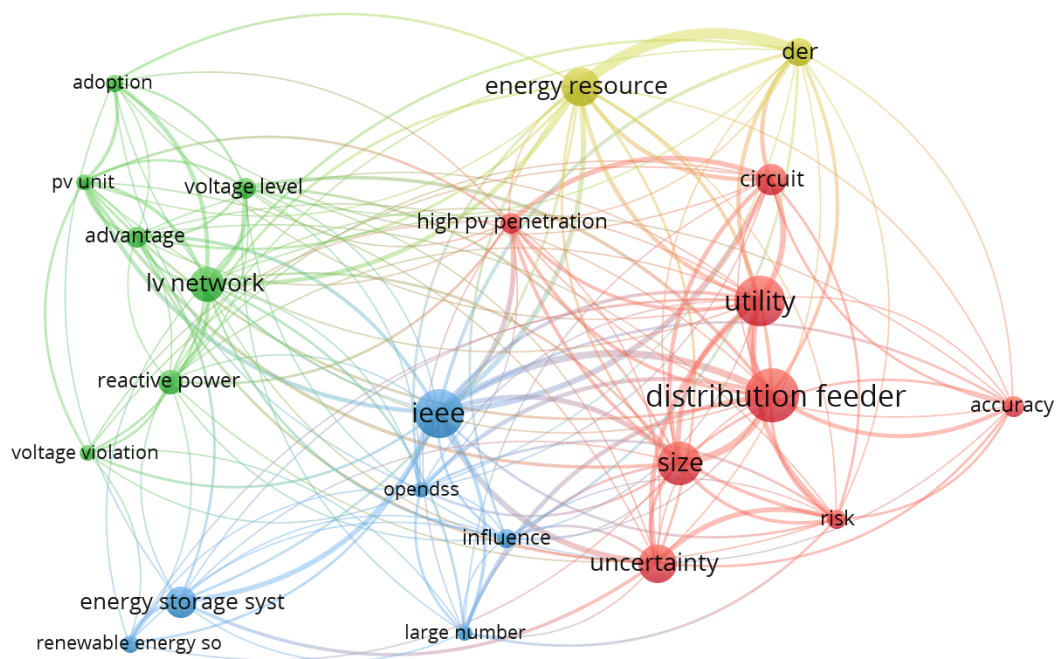


## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Pada bagian ini, suatu kajian terhadap pustaka-pustaka acuan disediakan untuk menunjukkan posisi penelitian-penelitian sebelumnya dalam menyelesaikan permasalahan yang telah dirumuskan melalui pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting*. Untuk tujuan tersebut, sebuah analisis *bibliometric* dilakukan dalam penelitian ini. Hasil dari analisis ini adalah peta *bibliometric* yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Peta *bibliometric* ini dibentuk dari indeks pencarian



Gambar 2.1. Peta *bibliometric* dari topik kapasitas *hosting* PLTS.

kapasitas *hosting* PLTS. Sumber-sumber acuan yang diambil adalah abstrak dari artikel-artikel jurnal yang terindeks Scopus dari tahun 2015-2021. Artikel-artikel tersebut kemudian dihubungkan berdasarkan frasa-frasa kunci. Setiap frasa kunci yang dimunculkan dalam peta *bibliometric* tersebut adalah frasa kunci yang memiliki minimal 10 garis korelasi antar artikel jurnal. Peta *bibliometric* tersebut memperlihatkan arah penelitian terkait kapasitas *hosting*. Peta *bibliometric* ini

penting untuk dijadikan pedoman agar kebaruan/keaslian penelitian yang diusulkan pada penelitian disertasi ini berada pada jalur dan arah penelitian-penelitian sebelumnya dengan tetap memegang komponen-komponen pokok dari topik pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting*.

Dari peta *bibliometric* pada Gambar 2.1 tersebut, beberapa hal yang dapat dipahami, antara lain:

1. Penetrasi PLTS yang banyak diteliti adalah penetrasi skala besar yang tersebar pada jaringan distribusi tegangan rendah.
2. Kaitannya dengan risiko yang diterima penyulang dan karakteristik ketidakpastian penetrasi, akurasi menjadi tujuan utama dari pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting*.
3. Studi kasus umumnya menggunakan *feeder test* dari IEEE dengan program perhitungan aliran daya berupa OpenDSS.
4. Dampak pada sistem distribusi yang paling banyak dipertimbangkan adalah pelanggaran terhadap regulasi tegangan, khususnya tegangan lebih.

Keempat hasil analisis *bibliometric* tersebut merupakan hal-hal yang diperhatikan dalam menyusun usulan solusi. Artinya, usulan solusi yang dirancang bukanlah usulan solusi yang tidak berdasar, melainkan usulan solusi yang merupakan pengembangan dari penelitian-penelitian sebelumnya. Analisis dari peta *bibliometric* tersebut mendasari penjelasan mengenai usulan solusi, keaslian, dan posisi dari penelitian disertasi ini. Usulan solusi merupakan hasil langsung dari kajian pustaka acuan. Proses berupa kajian pustaka acuan diperlukan untuk menunjukkan keaslian atau kebaruan dari solusi yang diusulkan tersebut. Dalam hal ini, keaslian dari penelitian haruslah merupakan keaslian yang memberikan kontribusi. Seperti penjelasan sebelumnya, kontribusi yang dimaksud adalah pengembangan dan peningkatan solusi dari penelitian-penelitian sebelumnya. Untuk tujuan tersebut, penjelasan mengenai posisi penelitian disertasi ini diantara penelitian-penelitian sebelumnya perlu untuk ditunjukkan. Pada bagian selanjutnya, komponen-komponen pokok dari peta *bibliometric* tersebut dijelaskan secara rinci sebagai bentuk dari proses kajian pustaka acuan.

### 2.1.1 Kerangka Analisis Probabilistik untuk Ketidakpastian dan Variabilitas Masukan

Analisis probalistik merupakan analisis yang masukannya berupa variabel-variabel acak yang mempunyai *probability density function* (PDF) [45]. Tantangan paling besar dalam analisis probabilistik adalah penghitungan dampak dari variabel-variabel masukan yang bersifat acak terhadap variabel keluaran yang diamati. Pada kasus kapasitas *hosting*, variabel-variabel masukannya adalah ketidakpastian dan variabilitas penetrasi PLTS tersebar, sedangkan variabel keluarannya adalah kapasitas *hosting* yang direpresentasikan oleh level penetrasi PLTS tersebar terhadap indeks-indeks performa operasi sistem distribusi tenaga listrik. Penghitungan dampak masukan terhadap keluaran tersebut menentukan kualitas analisis probabilistik dari kapasitas *hosting*.

Untuk mendapatkan hasil analisis probabilistik yang diinginkan, proses memodelkan variabel-variabel ketidakpastian dan variabilitas masukan memegang peranan yang penting [46]. Untuk alasan tersebut, distribusi-distribusi probabilitas masukan digunakan sebagai bentuk dari pemodelan variabel ketidakpastian dan variabilitas masukan tersebut. Dalam hal ini, pemilihan jenis distribusi-distribusi probabilitas tersebut dilakukan berdasarkan karakteristik-karakteristik dari variabel-variabel ketidakpastian/variabilitas dan skenario yang digunakan. Distribusi-distribusi probabilitas masukan untuk penetrasi PLTS tersebar ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Dari Tabel 2.1 tampak bahwa berbagai model distribusi probabilitas masukan dapat digunakan untuk merepresentasikan lokasi PLTS, ukuran daya PLTS, daya keluaran PLTS, permintaan beban, dan inverter PLTS. Lokasi PLTS pada jaringan distribusi dan ukuran daya PLTS yang dihubungkan ke jaringan digolongkan sebagai variabel ketidakpastian karena sifatnya yang acak alami [15, 31, 35, 47, 48]. Ukuran daya PLTS yang dipasang oleh setiap pelanggan ditentukan oleh pelanggan sendiri sehingga *utility* melihatnya sebagai karakteristik yang acak dan tidak pasti besarnya [15, 35, 47, 48]. Selanjutnya, daya keluaran PLTS, baik daya aktif maupun daya reaktif mempunyai karakteristik variabilitas [15, 35, 49, 50]. Daya

Tabel 2.1. Perbandingan Distribusi Probabilitas Masukan Penetrasi PLTS Tersebar

Karakteristik	Model Distribusi Penelitian Sebelumnya
Lokasi integrasi PLTS	Distribusi uniform [47, 48], distribusi normal [15, 31, 35]
Ukuran daya PLTS	Distribusi uniform [48], distribusi normal [15, 35, 47]
Daya keluaran PLTS	Dihitung dari data historis iradiasi matahari [15, 35, 49], autoregressive moving average (ARMA) [50]
Permintaan beban	Dirancang dari data historis permintaan beban [15, 31, 35]
Ukuran dan lokasi baterai	Distribusi normal (PLTS disebar terpisah dengan baterai) [51], <i>Deterministic</i> [52, 53]

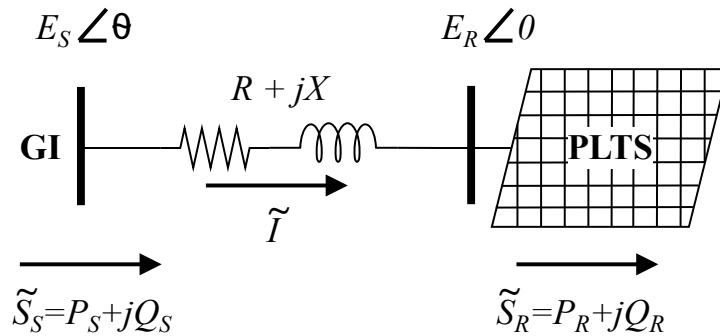
keluaran PLTS ini dihitung dari iradiasi matahari yang juga bersifat berubah-ubah sepanjang waktu. Iradiasi matahari mempunyai sifat variabilitas karena perubahan dari pergerakan awan, cuaca, iklim, dan ketidaktepatan pengukuran.

Selain dari sistem PLTS-nya, variabilitas juga terdapat pada sistem distribusi tenaga listrik, yaitu permintaan beban [15, 31, 35]. Permintaan beban ini berfluktuasi dan bervariasi sepanjang waktu setiap harinya. Sementara itu, untuk karakteristik ukuran dan lokasi baterai tersebar, peneliti pada [51] menggunakan distribusi normal untuk mendistribusikan PLTS tersebar dan baterai. Meskipun demikian, PLTS tersebar didistribusikan terpisah dengan baterai. Artinya, baterai difungsikan untuk pencegahan gangguan, bukan kriteria karakteristik yang melekat dengan PLTS tersebar dalam penentuan kapasitas *hosting*. Dengan kata lain, penentuan kapasitas *hosting* hanya melibatkan karakteristik ketidakpastian dari PLTS tersebar, sedangkan baterai didistribusikan setelah kapasitas *hosting* dihitung. Selanjutnya, peneliti pada [52, 53] menggunakan pendekatan *deterministic* dalam penentuan ukuran dan lokasi PLTS-baterai tersebar sehingga penelitian-penelitian tersebut tidak membuat model distribusi peubah-peubah acak.

### 2.1.2 Batasan Level Tegangan Sistem Distribusi Tegangan Rendah

Batasan level tegangan sistem distribusi tegangan rendah adalah salah satu batas operasi yang cukup sering digunakan untuk penentuan kapasitas *hosting* stokastik [6, 15, 16, 19, 31, 34, 35, 50, 54–58]. Batasan ini disebutkan sebagai batasan paling restriktif diantara batas yang lain di sistem distribusi tegangan rendah. Dalam menyuplai daya kepada pelanggan-pelanggan yang bersifat pasif, jaringan tenaga listrik konvensional mempunyai desain aliran menurun dari sistem pembangkit, kemudian menuju sistem transmisi dan berlanjut ke sistem distribusi. Dalam hal ini, fokus dari penyedia layanan daya listrik adalah fenomena penurunan tegangan pada penyulang-penyulang. Akan tetapi, kondisi ini berubah ketika terjadi integrasi PLTS tersebar skala besar pada sistem distribusi. Beberapa pelanggan-pelanggan yang awalnya bersifat pasif tersebut berubah menjadi pelanggan-pelanggan yang bersifat aktif, yaitu kaitannya dengan pengaliran daya. Injeksi arus dari pelanggan-pelanggan aktif ini mengubah arah aliran daya konvensional dan profil tegangan pada sistem distribusi. Skenario paling buruk adalah ketika total daya yang dibangkitkan PLTS-PLTS tersebar tersebut melebihi total kebutuhan beban dan rugi-rugi saluran. Pada kondisi tersebut, aliran daya balik dapat terjadi dan menyebabkan kenaikan tegangan yang melebihi batas-batas yang diijinkan oleh penyulang.

Untuk menjelaskan fenomena kenaikan tegangan, Gambar 2.2 diilustrasikan. Gambar tersebut mengilustrasikan suatu sumber tenaga listrik yang diwakili



Gambar 2.2. Rangkaian tipikal PLTS yang terhubung ke jaringan distribusi tenaga listrik.

oleh gardu induk (GI) pada satu sisi. Selanjutnya, pada sisi satunya terdapat suatu sumber lain, yaitu PLTS. Berdasarkan gambar tersebut, daya yang mengalir pada sisi PLTS adalah

$$\tilde{S}_P = P_P + jQ_P = \tilde{E}_R \tilde{I}^* = \tilde{E}_R \left\{ \frac{\tilde{E}_S - \tilde{E}_R}{R + jX} \right\}^* = E_R \left\{ \frac{E_S \cos \theta + E_R \sin \theta - E_R}{R + jX} \right\}^*, \quad (2-1)$$

sehingga

$$P_P = \frac{E_S E_R}{R + jX} \sin \theta \text{ dan } P_S = \frac{E_S E_R}{R + jX} \sin \theta, \quad (2-2)$$

serta

$$Q_P = \frac{E_S E_R \cos \theta - E_R^2}{R + jX} \text{ dan } Q_S = \frac{E_S^2 - E_S E_R \cos \theta}{R + jX}. \quad (2-3)$$

Untuk memperlihatkan kondisi kenaikan tegangan di sisi PLTS, sebuah asumsi berupa nilai nol pada  $\theta$  diterapkan ( $\theta = 0$ ). Dengan kondisi tersebut, Persamaan (2-2) dan (2-3) menjadi

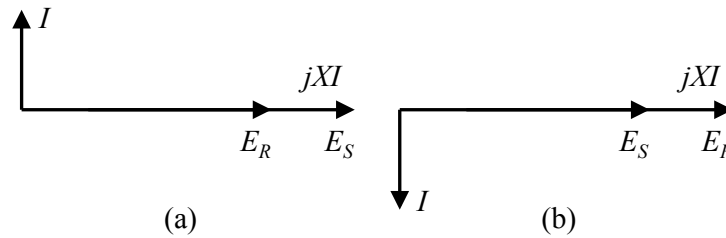
$$P_R = P_S = 0, \quad (2-4)$$

serta

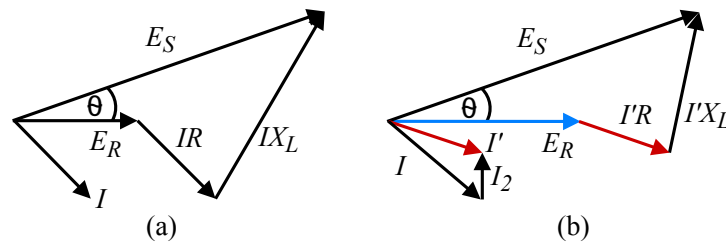
$$Q_P = \frac{E_R(E_S - E_R)}{R + jX} \text{ dan } Q_S = \frac{E_S(E_S - E_R)}{R + jX}. \quad (2-5)$$

Pada Persamaan (2-4) teramati bahwa kondisi  $\theta = 0$  menyebabkan daya aktif di sisi GI dan PLTS bernilai sama dengan nol. Akan tetapi, terdapat aliran daya reaktif. Hal ini ditunjukkan oleh Persamaan (2-5). Pada kedua persamaan tersebut dapat dipahami bahwa kondisi  $E_R > E_S$  akan menyebabkan aliran daya dari sisi PLTS ke sisi GI. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3, kondisi  $E_R > E_S$  disebabkan oleh mengalirnya arus *leading* melalui reaktans induktif pada saluran. Arus *leading* ini muncul disebabkan oleh kendali daya reaktif pada jaringan distribusi tenaga listrik, seperti penelitian yang dikerjakan pada [35]. Pada penelitian tersebut ditunjukkan bahwa terdapat empat *capacitor bank* yang diletakkan pada empat bus beban yang berbeda. Hal ini menyebabkan penurunan tegangan pada titik-titik beban menjadi terkoreksi dan mendekati nilai 1 p.u.

Diagram fasor untuk kondisi sebelum dan sesudah penetrasi PLTS ditunjukkan pada Gambar 2.4. Gambar 2.4 (a) menunjukkan kondisi sebelum penetrasi PLTS. Ini adalah karakteristik jaringan distribusi tenaga rendah dengan banyaknya beban-beban induktif. Teramati bahwa tegangan di sisi PLTS ( $E_R$ ) lebih rendah daripada tegangan di sisi GI ( $E_S$ ). Hal ini terjadi karena drop tegangan pada saluran diantara kedua sisi tersebut. Selanjutnya, Gambar 2.4 (b) memperlihatkan kondisi setelah penetrasi PLTS. Dalam hal ini, terjadi peningkatan tegangan di sisi PLTS ( $E_R$ ) [59, 60] yang disebabkan oleh penurunan nilai dari drop tegangan dari  $I(R + jX_L)$  menjadi  $I'(R + jX_L)$ . Seperti teramati pada Gambar 2.4 (b) tersebut, kondisi ini terjadi karena adanya arus kapasitif  $I_2$  (perubahan tap pada *capacitor bank* dan konfigurasi faktor daya pada inverter PLTS) [35]. Selain itu, sesuai hukum Kirchhoff, aliran arus dari PLTS ke beban menyebabkan aliran arus yang melewati  $R + jX_L$  menurun, sehingga drop tegangannya menurun [60].



Gambar 2.3. Diagram fasor. (a)  $E_S > E_R$ , (b)  $E_R > E_S$ .



Gambar 2.4. Diagram fasor. (a) Sebelum penetrasi PLTS, (b) Setelah penetrasi PLTS.

Kenaikan tegangan yang telah dijelaskan tersebut perlu untuk diukur. Pengukuran kenaikan ditujukan untuk menghindari pelanggaran batas tegangan. Batasan-batasan level tegangan pada sistem-sistem tenaga listrik diperlihatkan pada Tabel 2.2. Ditunjukkan pada tabel itu bahwa Standar EN 50160 mengatur batas

Tabel 2.2. Batasan Level Tegangan pada Berbagai Standar

Standar	Batasan Level Tegangan
EN 50160 ( <i>Voltage characteristics of electricity supplied by public systems</i> ) [61]	Tegangan rendah: $\pm 10\%$ (0.9 pu sampai dengan 1.1 pu), rata-rata RMS 10 menit
ANSI Standard C84.1 ( <i>Electric power systems and equipment—voltage ratings (60 Hz)</i> ) [62]	Rentang A: $\pm 5\%$ (0.95 pu sampai dengan 1.05 pu) Rentang B: 91.7% untuk tegangan minimum (0.917 pu) dan 105.8% untuk tegangan maksimum (1.058 pu)
IEC 60038 ( <i>Voltage standard</i> ) [63]	Tegangan rendah: $\pm 10\%$ untuk tegangan nominal 230/400 V

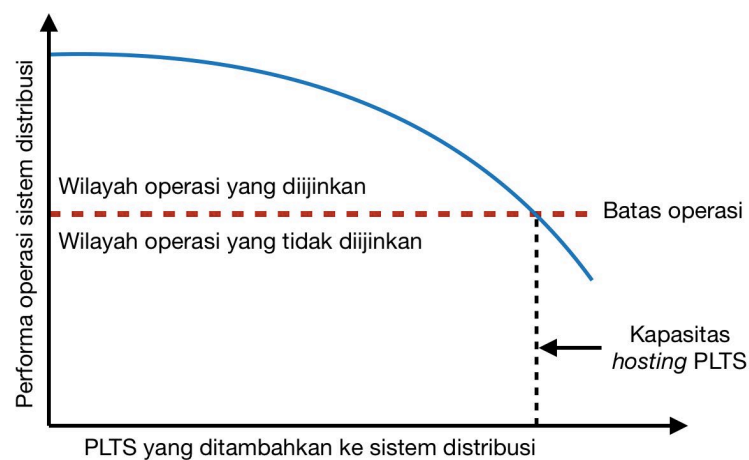
tegangan pada rentang 0.9 pu sampai dengan 1.1 pu dengan rata-rata nilai RMS yang terjadi selama 10 menit [61]. Durasi dalam definisi tersebut dimaksudkan untuk membedakan kenaikan tegangan dengan perubahan cepat pada tegangan atau tegangan *dip*. Selanjutnya, Standar ANSI C84.1 menjelaskan dua jenis rentang dalam mengatur batasan level tegangan, yaitu rentang A dan rentang B [62]. Dalam hal ini, rentang A adalah rentang tegangan optimal, yaitu 0.95 pu sampai dengan 1.05 pu. Rentang B adalah rentang tegangan yang diterima, tetapi tidak optimal, yaitu 0.91 pu sampai dengan 1.058 pu. Pada IEC 60038, rentang yang diijinkan adalah 0.9 pu sampai dengan 1.1 pu untuk tegangan nominal 230/400 V pada sistem 50 Hz [63]. Meskipun demikian, batasan level tegangan yang tertuang pada *grid code* juga berbeda-beda untuk negara yang berbeda, misalnya -6.1%/ +10.0% di Australia, -8.3%/ +4.2% di Canada,  $\pm 10\%$  di Jerman,  $\pm 6\%$  di Jepang,  $\pm 5.9\%$  di Korea, -6.0%/ +10.0% di U.K., dan  $\pm 5$  di U.S. [64].

### 2.1.3 Pendekatan Stokastik dalam Penentuan Kapasitas *Hosting*

Sebelum pendeskripsian pendekatan stokastik, konsep kapasitas *hosting* perlu dijelaskan. Konsep mengenai kapasitas *hosting* pertama kali dicetuskan tahun 2004. Selanjutnya, pada tahun 2005, M. H. J. Bollen dan M. Häger membatasi dampak kenaikan penetrasi energi baru terbarukan sebagai batasan-batasan teknis



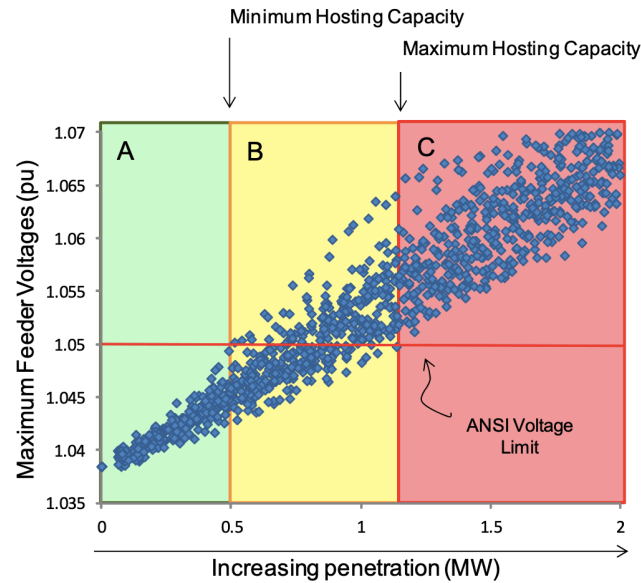
terhadap operator sistem tenaga listrik dan pelanggan [65]. Kapasitas *hosting* didefinisikan sebagai penetrasi energi baru terbarukan ketika sistem tenaga listrik beroperasi dengan baik. Penghitungan kapasitas *hosting* didasarkan pada indeks-indeks performa operasi sistem tenaga listrik yang bervariasi sehingga kapasitas *hosting* bukan merupakan satu nilai ukuran yang diwakili dengan satu hasil. Pada tahun 2011, M. H. J. Bollen dan F. Hasan mendefinisikan kapasitas *hosting* sebagai jumlah maksimum dari unit-unit pembangkitan tersebar yang dapat diintegrasikan pada sistem tenaga listrik ketika performa operasi sistem menjadi tidak diijinkan untuk terjadi jika berada diatas jumlah penetrasi ini [14]. Untuk kasus penetrasi PLTS tersebar, ilustrasi mengenai definisi kapasitas *hosting* tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.5. Dalam gambar tersebut ditunjukkan bahwa penetrasi PLTS tersebar menyebabkan penurunan performa operasi sistem distribusi tegangan rendah, dan kapasitas *hosting* adalah batas maksimal penetrasi sebelum penurunan operasi sistem distribusi tersebut menyentuh batas operasi yang diijinkan.



Gambar 2.5. Konsep kapasitas *hosting* PLTS tersebar.

Berkaitan dengan pendekatan stokastik dalam penetrasi PLTS tersebar skala besar, Electric Power Research Institute (EPRI) dan Sandia National Laboratories (SNL) menyatakan bahwa ketidakpastian didalam menentukan kapasitas *hosting* semakin meningkat karena ketidaktahuan mengenai lokasi integrasi PLTS, keberagaman ukuran daya PLTS, variabilitas alami dari daya keluaran PLTS karena perubahan-perubahan cuaca, fluktuasi kebutuhan beban, dan lain-lain [66]. Hal

ini menyebabkan perlunya pendekatan stokastik dalam pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* untuk penetrasi PLTS tersebar [16, 67]. Berdasarkan pemahaman tersebut, kapasitas *hosting* dihasilkan bukan sebagai satu nilai tunggal. Gambar 2.6 memperlihatkan nilai-nilai kapasitas *hosting* stokastik untuk batas operasi tegangan lebih.



Gambar 2.6. Kapasitas *hosting* stokastik untuk batas operasi tegangan lebih [67].

Dalam penentuan kapasitas *hosting* stokastik, Gambar 2.6 membagi penetrasi-penetrasi PLTS menjadi tiga bagian. Bagian A yang berwarna hijau menandakan bahwa performa operasi sistem tenaga listrik dapat diterima untuk semua penetrasi pada area ini. Artinya, tidak terdapat pelanggaran batas operasi tegangan lebih pada bagian A ini. Bagian B yang berwarna kuning menunjukkan bahwa sebagian penetrasi pada area ini tidak menyebabkan pelanggaran batas operasi tegangan lebih, sedangkan sebagian lagi mengalami pelanggaran. Hal ini disebabkan oleh perbedaan lokasi integrasi dan ukuran PLTS tersebar. Bagian C yang berwarna merah memperlihatkan bahwa semua penetrasi pada area ini menyebabkan terjadinya pelanggaran batas operasi tegangan lebih. Berkaitan dengan area-area tersebut, batas antara bagian A dan bagian B disebut sebagai kapasitas *hosting* minimum, sedangkan batas antara bagian B dan bagian C disebut sebagai kapasitas *hosting* maksimum. Dalam hal ini, kapasitas *hosting* stokastik yang

dicari adalah kapasitas *hosting* minimum, kemudian peningkatan kapasitas *hosting* stokastik berada diantara batas kapasitas *hosting* minimum dan kapasitas *hosting* maksimum atau bagian B.

Pendekatan stokastik telah banyak digunakan dalam penentuan kapasitas *hosting* [15, 19, 31, 35, 57, 58]. Pendekatan stokastik untuk penentuan kapasitas *hosting* yang paling banyak dikembangkan sampai saat ini adalah Monte Carlo. Monte Carlo didefinisikan sebagai algoritme iteratif yang menghasilkan variabel-variabel yang dapat dinyatakan dalam PDF dengan cara mengerjakan proses berulang kali menggunakan sampel variabel-variabel acak yang didapat dari masukan yang juga berupa PDF. Karena pendekatan Monte Carlo ini membutuhkan jumlah proses pengerjaan yang sangat banyak, beban komputasinya sangat tinggi.

Pendekatan Monte Carlo terdiri atas tiga tipe, *non-sequential Monte Carlo*, *sequential Monte Carlo*, dan *pseudo-sequential Monte Carlo*. *Non-sequential Monte Carlo* adalah pendekatan yang berdasarkan asumsi bahwa sistem dapat direpresentasikan melalui kombinasi keadaan-keadaan dari setiap komponen dari sistem tersebut [68]. Pada tipe ini, variabel-variabel masukan dipilih secara acak untuk setiap iterasi sebagai masukan, kemudian proses iterasinya dikerjakan untuk mendapatkan keluaran yang diinginkan. Proses iterasinya dihentikan ketika kriteria untuk menghentikan iterasi terpenuhi. Umumnya kriteria untuk menghentikan iterasi tersebut didasarkan pada ukuran statistik berupa rata-rata atau variansi dari variabel-variabel keluarannya. Pendekatan ini tidak berdasarkan kronologi variabel-variabel masukan sehingga mengurangi kompleksitas yang diperlukan dalam mengerjakan metode ini [69]. Pendekatan Monte Carlo yang mempertimbangkan kronologi dalam mengambil sampel variabel-variabel masukan disebut sebagai *sequential Monte Carlo* [70]. Pada pendekatan ini, strategi urutan waktu digunakan untuk mengambil sampel-sampel dari variabel-variabel ketidakpastian dari masukan. Meskipun demikian, *sequential Monte Carlo* membutuhkan beban komputasi yang tinggi [71]. Selanjutnya, *pseudo-sequential Monte Carlo* adalah pendekatan hibrida dari *non-sequential Monte Carlo* dan *sequential Monte Carlo* [72]. Pada pendekatan ini, *non-sequential Monte Carlo* diaplikasikan untuk meng-

ambil sampel dari keadaan-keadaan sistem, kemudian *sequential Monte Carlo* digunakan untuk mengerjakan simulasi dengan atribut-atribut tertentu. Oleh karena itu, pendekatan ini lebih cepat dan lebih ringan dari sisi komputasinya dibandingkan dengan *sequential Monte Carlo* [73].

Seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2.3, pendekatan *non-sequential* diaplikasikan oleh M. Deakin pada [55, 57, 74]. Penelitian-penelitian tersebut tidak

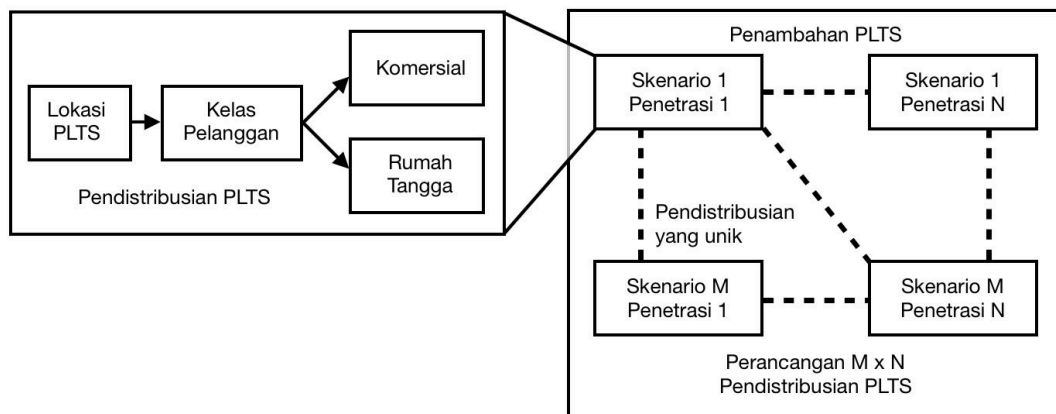
Tabel 2.3. Perbandingan Pendekatan Stokastik Monte Carlo yang Berkaitan dengan Analisis Runtun Waktu dalam Studi Kapasitas *Hosting*

Referensi	Pendekatan Stokastik Monte Carlo
J. D. Watson (2016) [74]	Non-Sequential
A. Arshad (2017) [55]	Non-Sequential
A. Dubey (2017) [15]	Pseudo-Sequential
F. Ding (2017) [35]	Pseudo-Sequential
M. H. Bollen (2017) [19]	Pseudo-Sequential
R. Torquato (2018) [31]	Pseudo-Sequential
M. Deakin (2019) [57]	Non-Sequential
P. P. Vergara (2020) [58]	Pseudo-Sequential
E. Quiles (2020) [75]	Pseudo-Sequential

menggunakan analisis runtun waktu sehingga simulasinya tidak bersifat *chronological*. Sementara itu, penelitian pada [55] menggunakan skenario kondisi terburuk untuk menggantikan kerangka runtun waktu. Untuk penelitian-penelitian pada [57, 74], variabel-variabel ketidakpastian diwakilkan oleh suatu nilai tertentu dalam simulasi-simulasinya. Selanjutnya, penelitian-penelitian pada [15, 19, 31, 35, 58, 75] menggunakan *pseudo-sequential Monte Carlo*. Pada penelitian-penelitian tersebut, pemilihan pelanggan yang memasang PLTS dilakukan secara *non-sequential*, sedangkan perhitungan aliran daya dilakukan secara *sequential* pada setiap rentang waktu tertentu.

### 2.1.4 Prosedur Penentuan Kapasitas *Hosting* Stokastik

Berbagai metode penentuan kapasitas *hosting* untuk penetrasi PLTS tersebar skala besar telah banyak dikerjakan oleh penelitian-penelitian sebelumnya. Dari tahun ke tahun, setiap penelitian dikerjakan untuk mengembangkan metode agar akurasi dapat ditingkatkan. Pada tahun 2012, EPRI merancang skenario penetrasi acak untuk PLTS tersebar [16, 76]. Penelitian tersebut membagi kelas pelanggan menjadi dua kategori, yaitu komersial dan rumah tangga. Kategori rumah tangga terdiri atas pelanggan-pelanggan yang melakukan pemasangan PLTS tersebar sampai 10 kW, sedangkan kategori komersial ditujukan untuk pemasangan PLTS diatas 10 kW. Pada setiap proses penyebaran PLTS dikerjakan skenario yang unik dan berbeda.  $M$  skenario penetrasi dirancang dengan  $N$  penetrasi untuk setiap skenario sehingga total ada  $(M \times N)$  skenario. Ilustrasi mengenai metode tersebut



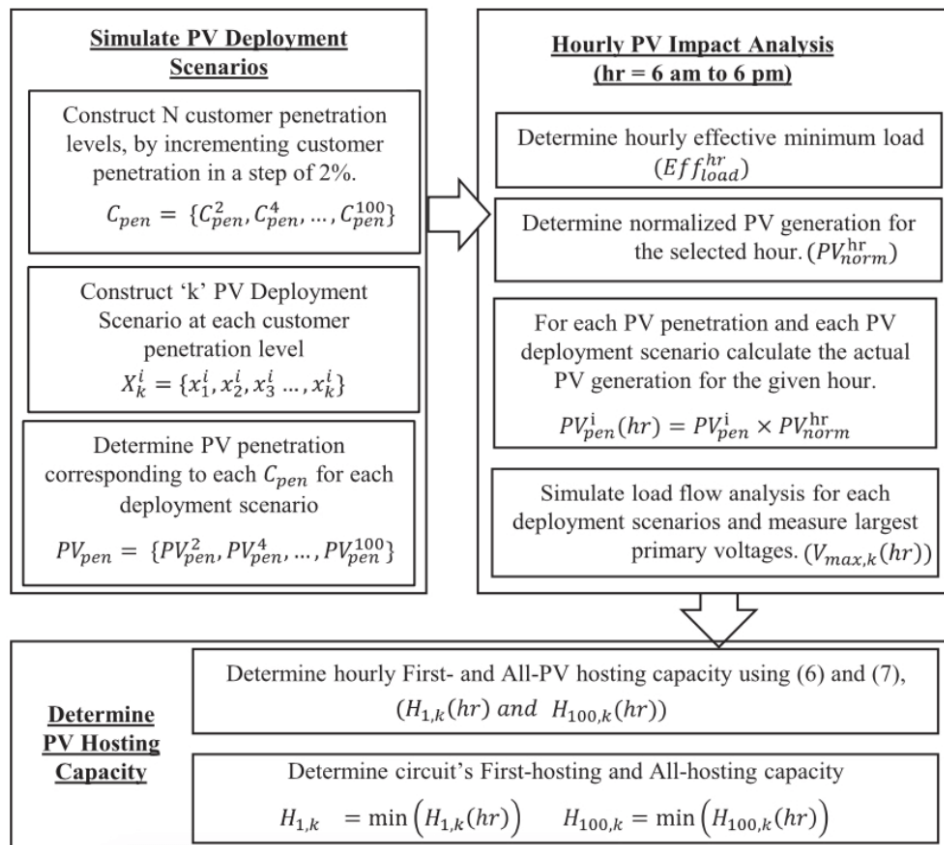
Gambar 2.7. Skenario penentuan kapasitas *hosting* PLTS tersebar pada [16].

ditunjukkan pada Gambar 2.7 [16]. Perancangan skenario seperti itu dimaksudkan untuk merepresentasikan penetrasi PLTS tersebar yang mempunyai karakteristik natural yang acak.

Anamika Dubey dkk melakukan investigasi dan analisis mengenai dampak penetrasi PLTS tersebar pada jaringan distribusi tegangan rendah [34] pada tahun 2015. Penelitian tersebut juga menggunakan perancangan skenario seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7. Anamika Dubey dkk menunjukkan bahwa dampak penetrasi PLTS bervariasi untuk penetrasi pelanggan yang sama. Hasil tersebut dise-

babkan oleh perbedaan lokasi integrasi dan ukuran daya PLTS. Penelitian itu 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 tersebar terhadap sumber penyulang. Dalam penelitian itu 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 tersebar skala besar berbasis Monte Carlo dengan menyediakan formula matematika dan kerangka analisis runtun waktu [15]. Metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS tersebar yang diusulkan pada penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.8 [15]. Dalam penelitian tersebut, 100 simulasi Monte

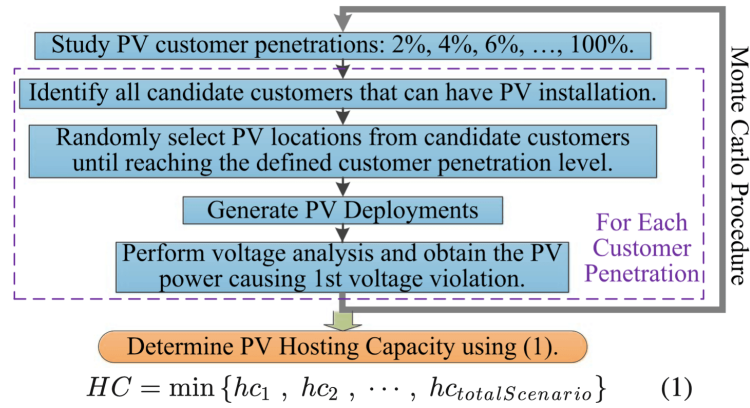


Gambar 2.8. Metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS tersebar pada [15].

Carlo dirancang dengan 50 level penetrasi pelanggan untuk setiap skenario dan

kenaikan sebesar 2% untuk setiap perpindahan level penetrasi. Untuk menentukan kapasitas *hosting* PLTS tersebar, 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 penetrasi PLTS terkecil ketika semua skenario yang dikerjakan telah mendeteksi pelanggaran batas tegangan lebih.

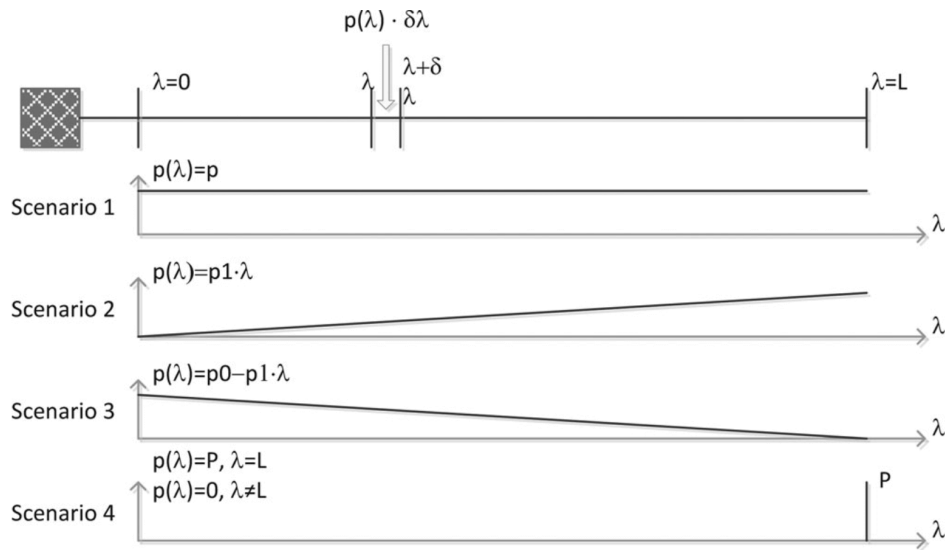
Fei Ding dan Barry Mather [35] juga menggunakan pendekatan pola sebaran seperti pada [15] dengan menerapkan 100 skenario penetrasi dan 50 level penetrasi pelanggan, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.9. Rentang waktu penga-



Gambar 2.9. Metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS tersebar pada [35].

matan 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 walaupun 100% pelanggan telah menyambungkan PLTS ke jaringan distribusi.

B. Bletterie mengerjakan penentuan kapasitas *hosting* PLTS tersebar dengan empat skenario [77] yang ditunjukkan pada Gambar 2.10, yaitu penyebaran PLTS secara merata sepanjang penyulang, penyebaran meningkat dari sumber penyulang ke ujung penyulang, penyebaran menurun dari sumber penyulang ke ujung penyulang, dan penyebaran di sekitar ujung penyulang. Hasilnya menunjukkan bahwa



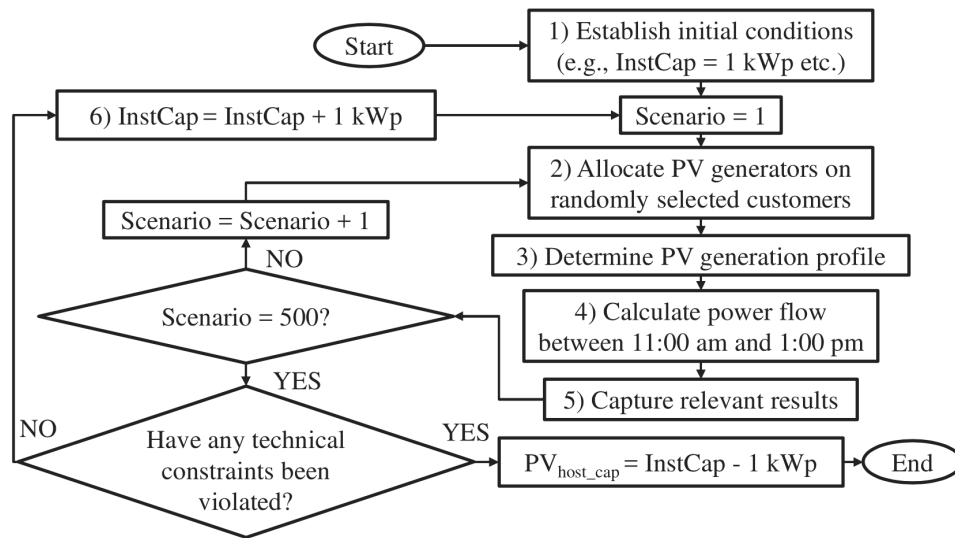
Gambar 2.10. Skenario penyebaran PLTS tersebar pada [77].

skenario penyebaran menurun dari sumber penyulang ke ujung penyulang memberikan nilai kapasitas *hosting* paling besar, sedangkan penyebaran di sekitar ujung penyulang memberikan nilai kapasitas *hosting* paling kecil.

Bollen dkk [19] 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 tersebar dilakukan dengan pendekatan level penetrasi [31]. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11, metode yang diusulkan pada penelitian tersebut dilakukan dengan variasi level penetrasi pelanggan dari 20% sampai 100% dengan besar kenaikan 20%. Proses penetrasi PLTS tersebar 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 tersebar dengan rentang waktu pengamatan dua



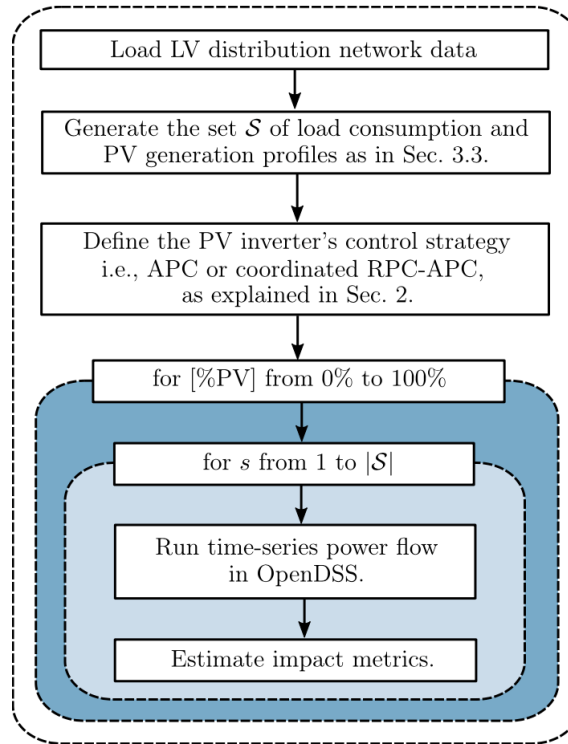


Gambar 2.11. Metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS tersebar pada [31].

jam dari pukul 11.00 sampai 13.00, serta jeda waktu pengamatan 15 menit. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa kapasitas *hosting* PLTS tersebar dapat diamati dari persentase level penetrasi pelanggan. Semakin besar level penetrasi pelanggan maka kapasitas *hosting* PLTS tersebar 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 [58] menggunakan data profil beban dan daya keluaran PLTS dari data yang didapat oleh peneliti. Ilustrasi metode yang diusulkan, ditunjukkan pada Gambar 2.12 [58]. Penentuan lokasi integrasi PLTS dilakukan secara acak sampai semua pelanggan



Gambar 2.12. Metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS tersebar pada [58].

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.

Perbandingan prosedur penentuan kapasitas *hosting* stokastik diperlihatkan pada Tabel 2.4. Pada tabel tersebut, terdapat lima kriteria yang diamati, yaitu pemilihan acak untuk lokasi integrasi PLTS tersebar, pemilihan acak untuk ukuran daya PLTS tersebar, pertimbangan PLTS-baterai dalam model, kendali proses penetrasi, dan analisis runtun waktu. Teramati bahwa semua penelitian sebelumnya mengacak lokasi integrasi PLTS tersebar pada jaringan distribusi [15, 16, 19, 31, 34, 35, 57, 58]. Selanjutnya, peneliti-peneliti pada [15, 16, 34, 35] mengambil sampel acak ukuran daya PLTS dari data historis yang dibentuk dalam PDF. Sementara itu, peneliti-peneliti pada [19, 31, 57, 58] menggunakan suatu angka tertentu seba-

Tabel 2.4. Perbandingan Prosedur Penentuan Kapasitas *Hosting* Stokastik

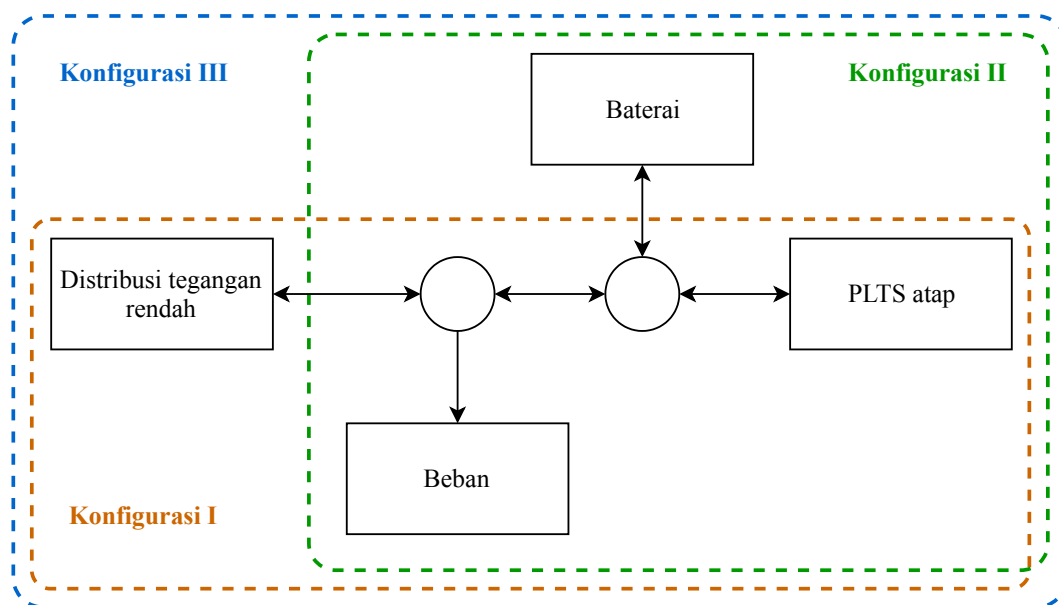
Referensi	Lokasi PLTS Acak	Ukuran Daya PLTS Acak	PLTS-Baterai	Kendali Proses Penetrasi	Analisis Runtun Waktu
EPRI (2012) [16]	Ya	Ya	-	-	Ya
A. Dubey (2015) [34]	Ya	Ya	-	-	Ya
A. Dubey (2017) [15]	Ya	Ya	-	-	Ya
F. Ding (2017) [35]	Ya	Ya	-	-	Ya
M. H. Bollen (2017) [19]	Ya	-	-	-	Ya
R. Torquato (2018) [31]	Ya	-	-	-	Ya
M. Deakin (2019) [57]	Ya	-	-	Ya	-
P. P. Vergara (2020) [58]	Ya	-	-	-	Ya

gai ukuran daya PLTS tersebar. Untuk PLTS-baterai tersebar, belum ada penelitian sebelumnya yang mempertimbangkan PLTS yang terintegrasi dengan baterai untuk dijadikan kandidat untuk dihubungkan ke jaringan distribusi tegangan rendah. Berkaitan dengan simulasi Monte Carlo yang digunakan, dari delapan penelitian-penelitian sebelumnya tersebut, hanya M. Deakin yang menggunakan kendali dalam proses penetrasi PLTS tersebar [57]. Sebaliknya, hanya M. Deakin yang tidak menggunakan analisis runtun waktu [57].

### 2.1.5 Strategi Penetrasi PLTS dan Baterai

Pada awalnya terdapat dua konfigurasi dari instalasi PLTS tersebar. Konfigurasi pertama adalah instalasi PLTS tersebar tanpa baterai yang terhubung pada sistem distribusi tenaga listrik, sedangkan konfigurasi kedua adalah instalasi PLTS tersebar dengan baterai yang tidak terhubung ke sistem distribusi tenaga listrik. Dalam hal ini, PLTS tersebar yang terhubung ke sistem distribusi tersebut dapat berpotensi menurunkan performa operasi sistem distribusi tersebut. Sebaliknya, keberadaan PLTS tersebar yang tidak terhubung ke sistem distribusi tidak mengganggu performa sistem distribusi tersebut. Meskipun begitu, penelitian-penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa PLTS-PLTS tersebar yang diintegrasikan pada

jaringan distribusi tegangan rendah semakin meningkat [1, 2]. Kondisi ini menunjukkan bahwa terdapat kebutuhan mengenai keberadaan baterai pada sisi pelanggan [78, 79]. Selanjutnya, kebutuhan tersebut mendorong terciptanya konfigurasi instalasi PLTS tersebar yang ketiga, yaitu instalasi PLTS-baterai yang terhubung pada sistem distribusi tenaga listrik. Ketiga konfigurasi tersebut diilustrasikan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13. Konfigurasi-konfigurasi instalasi PLTS tersebar oleh pelanggan.

Meskipun demikian, penelitian-penelitian sebelumnya belum mempertimbangkan PLTS yang terintegrasi dengan baterai (PLTS-baterai) dalam model penetrasinya. Secara detail, perbandingan konfigurasi serta kendali sistem PLTS dan baterai tersebar ditunjukkan pada Tabel 2.5. Pada tabel tersebut teramati bahwa Bo Lu dan M. Shahidehpour membagi operasi PLTS dan baterai tersebar menjadi tiga kondisi [82]. Kondisi pertama adalah kondisi pengisian baterai. Ketika permintaan beban sedang turun, maka PLTS tersebar dan atau sistem distribusi akan melakukan pengisian baterai. Kondisi kedua adalah kondisi diam baterai. Pada kondisi ini, PLTS tersebar menyuplai beban secara langsung pada durasi waktu tertentu ketika daya keluaran PLTS tinggi dan permintaan beban tinggi. Kondisi ketiga adalah kondisi pengosongan baterai. Baik PLTS tersebar maupun baterai menyuplai beban puncak pada durasi waktu tertentu saat siang hari. Selanjutnya, baterai menyuplai

Tabel 2.5. Perbandingan Strategi Penetrasi PLTS dan Baterai

Referensi	Konfigurasi PLTS Tersebar	Konfigurasi PLTS dan Baterai	Pengendalian Baterai
N. Jayasekara (2016) [80]	Tersebar secara <i>deterministic</i> .	Terpisah. Baterai terpusat.	Optimasi untuk meminimalkan biaya distribusi dan siklus baterai.
S. Hashemi (2018) [52]	Tersebar secara <i>deterministic</i> .	Terpisah. Baterai tersebar.	Pengendalian terpusat.
P. H. Divshali (2019) [81]	Tersebar secara <i>deterministic</i> .	Terpisah. Baterai terpusat.	Kendali kuadratik.
M. Al-Saffar (2020) [51]	Tersebar secara stokastik.	Terpisah. Baterai tersebar.	<i>Reinforcement learning</i> .

beban puncak pada malam hari ketika tidak ada daya keluaran PLTS. Ketiga kondisi tersebut terjadi ketika cuaca mendukung PV dalam mendapatkan iradiasi matahari yang cukup untuk membangkitkan daya listrik. Pada saat mendung, hanya baterai yang akan bekerja pada sistem PLTS dan baterai tersebar karena tidak ada daya yang dibangkitkan oleh PLTS tersebar.

N. Jayasekara dkk mengembangkan strategi integrasi sistem baterai yang optimal pada jaringan distribusi untuk meningkatkan kapasitas *hosting* [80]. Terkait peningkatan kapasitas *hosting*, penelitian itu mempertimbangkan dua hal, yaitu biaya sistem distribusi, serta biaya siklus baterai. Selanjutnya, sistem baterai pada penelitian tersebut dianalisis dari sisi aturan tegangan, pengurangan rugi-rugi daya, dan *peak shaving*. Hasilnya memperlihatkan bahwa metode yang diusulkan dapat menginvestigasi *peak shaving*, aturan tegangan, dan pengurangan rugi-rugi daya untuk meningkatkan efisiensi sistem.

S. Hashemi dan J. Østergaard mengusulkan suatu kendali efisien sistem baterai untuk meningkatkan kapasitas *hosting* PLTS [52]. Tujuan dari kendali tersebut adalah untuk mencegah tegangan lebih pada kondisi PLTS tersebar yang tinggi pada jaringan distribusi. Penelitian tersebut mengusulkan metode untuk

menentukan titik-titik operasi dinamis dari sistem baterai. Melalui metode tersebut, dampak dari penyerapan daya reaktif oleh inverter PLTS dimodelkan seperti konsumsi beban. Untuk menghitung kapasitas *hosting* PLTS, sebuah penyulang dengan 52 pelanggan dan 23 bus digunakan dalam simulasi. Simulasi menggunakan 50, 75, dan 100% penetrasi PLTS. Dalam hal ini, ukuran daya PLTS yang dipasang oleh semua pelanggan menggunakan satu nilai tetap yang sama. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem baterai 5 kWh dapat menghasilkan kenaikan kapasitas *hosting* sebesar 75%.

P. H. Divshali dan L. Söder merancang metode peningkatan kapasitas *hosting* dengan cara mengoptimalkan pemilihan baterai dan konverter menggunakan kendali kuadratik dari sistem baterai terpusat [81]. Sistem baterai terpusat tersebut dapat mengurangi arus balik dan mengatur tegangan dengan menyerap kelebihan daya ketika produksi daya keluaran PLTS lebih tinggi dari permintaan-permintaan beban. Sistem baterai tersebut juga dapat mengendalikan daya reaktif. Dalam penelitian tersebut, kapasitas *hosting* ditentukan dengan batas operasi arus dan tegangan. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode yang diusulkan dapat mengendalikan dan memperbaiki profil tegangan.

Mohammed Al-Saffar dkk mengembangkan metode untuk kendali antar sistem baterai pada PLTS tersebar [51]. Untuk tujuan tersebut, penetrasi PLTS tersebar 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.

### 2.1.6 Usulan Solusi dan Keaslian Penelitian

Salah satu hasil dari kajian pustaka yang telah dideskripsikan adalah usulan solusi spesifik terhadap permasalahan spesifik yang telah dirumuskan. Selain usulan solusi, pada bagian ini juga dijelaskan mengenai keaslian penelitian. Keaslian penelitian dideskripsikan untuk menunjukkan kebaruan usulan solusi dan posisinya diantara penelitian-penelitian sebelumnya.

#### 2.1.6.1 Usulan Solusi

Usulan-usulan solusi untuk rumusan masalah dari penelitian disertasi ini ditunjukkan pada Tabel 2.6. Solusi-solusi pada tabel tersebut diusulkan berdasarkan permasalahan-permasalahan spesifik dari masing-masing poin rumusan masalah. Terkait pemodelan penetrasi dan simulasi stokastik untuk ketidakpastian penetrasi, penelitian disertasi ini mengusulkan pendekatan Markov Chain Monte Carlo.

Alasan pengembangan Markov Chain Monte Carlo yang diusulkan pada penelitian disertasi ini dapat dijelaskan melalui analisis terhadap performa pendekatan sebelumnya dalam memodelkan penetrasi secara stokastik, yaitu Monte Carlo. Seperti yang telah dijelaskan secara rinci pada subbab sebelumnya pada bab ini, pendekatan Monte Carlo telah berhasil menyimulasikan bermacam-macam kemungkinan penetrasi [15,16,19,31,34,35,57,58]. Dalam implementasinya, lokasi penetrasi dan ukuran daya PLTS yang mempunyai karakteristik tidak tentu membutuhkan jumlah simulasi yang banyak. Dalam hal ini, dari sisi mekanisme simulasi proses acak yang dimilikinya, Monte Carlo menyediakan solusi dalam mengestimasi beragam kemungkinan terkait ketidakpastian lokasi penetrasi dan ukuran daya PLTS tersebut. Meskipun demikian, Monte Carlo tidak menyediakan mekanisme dalam pergerakan *states*—nya. Seperti yang telah dijelaskan, pergerakan *states* diperlukan untuk membedakan pola untuk masing-masing kategori, antara lain kategori pelanggan, kategori daya penetrasi, dan kategori jenis PLTS/PLTS-baterai. Pada Monte Carlo, setiap kategori dengan daya PLTS yang sama akan diasumsikan mempunyai perilaku penetrasi yang sama, padahal terdapat perbedaan peri-

Tabel 2.6. Usulan Solusi untuk Rumusan Masalah dari Penelitian Disertasi Ini

No	Rumusan Masalah	Permasalahan Spesifik	Usulan Solusi
1	Kurangnya representasi ketidakpastian lokasi dan ukuran daya PLTS tersebar dari model penetrasi PLTS dalam penentuan kapasitas <i>hosting</i> stokastik, serta variabilitas permintaan beban dan iradiasi matahari dalam runtun waktu.	<p>Kurangnya representasi ketidakpastian penetrasi yang disebabkan karena penggunaan <i>lumped load</i>.</p> <p>Tidak diperhitungkannya probabilitas kemunculan jenis/kategori pelanggaran.</p> <p>Kurangnya representasi dari kriteria variabilitas karena kerangka runtun waktu yang disederhanakan.</p> <p>Semakin tingginya beban komputasi karena semakin tingginya resolusi pengamatan.</p>	<p>Perancangan model untuk beban bar secara individual.</p> <p>Perancangan <i>hidden Markov model</i>.</p> <p>Perancangan kerangka runtun waktu dengan resolusi 1 menit untuk variasi selama satu tahun.</p> <p>Perancangan matriks probabilitas untuk perpindahan <i>states</i>.</p>
2	Tidak dipertimbangkannya PLTS-baterai dan operasi baterai pada penetrasi PLTS/PLTS-baterai.	<p>Tidak dipertimbangkannya probabilitas kemunculan pelanggaran dengan PLTS-baterai.</p> <p>Perlunya identifikasi dampak dari peningkatan penetrasi PLTS-baterai pada jaringan distribusi.</p>	<p>Perancangan <i>layered hidden Markov model</i> dengan probabilitas pelanggan dengan PLTS dan PLTS-baterai.</p> <p>Studi sensitivitas untuk variabel/parameter penetrasi dan sistem distribusi.</p>



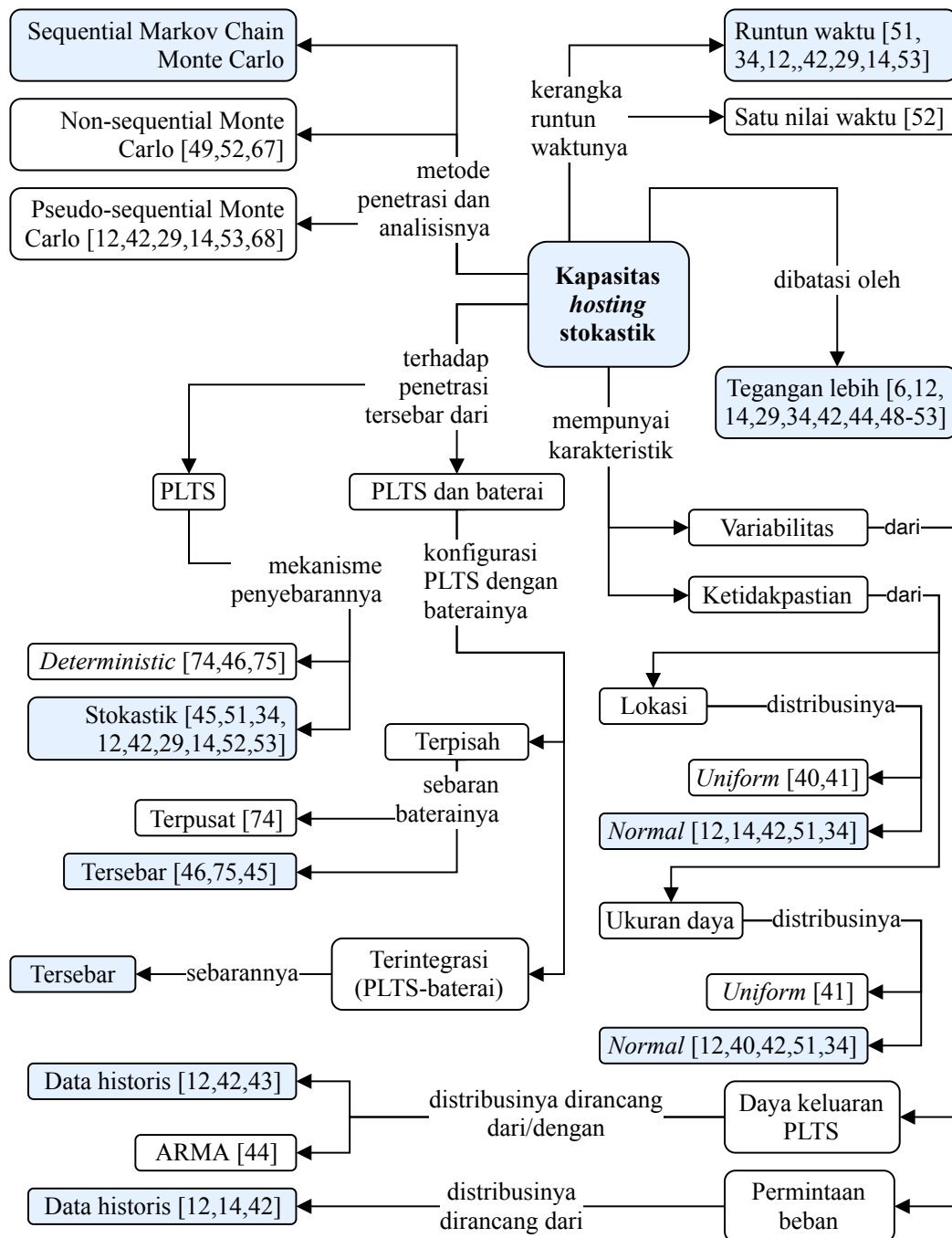
laku di antara kategori-kategori tersebut. Sebagai contoh, pelanggan rumah tangga dengan daya PLTS 10 kW mempunyai perbedaan probabilitas dalam memasang PLTS dibandingkan dengan pelanggan bisnis dengan daya PLTS 10 kW.

Berkaitan dengan hal tersebut, Markov Chain Monte Carlo dipilih karena karakteristik solusinya yang dapat melakukan perpindahan dengan probabilitas *states*—nya. Matriks probabilitas transisi yang dimiliki oleh Markov Chain Monte Carlo menggerakkan *states* berdasarkan pola-pola unik yang dimiliki oleh masing-masing kategori, baik kategori pelanggan, kategori daya penetrasi, maupun kategori jenis PLTS/PLTS-baterai. Selanjutnya, pengembangan dari model Markov sederhana juga dilakukan, yaitu dikembangkan menjadi hidden Markov model dan layered hidden Markov model. Hidden Markov model dirancang untuk mengerjakan perpindahan *states* yang salah satu sisinya merupakan *hidden states*, sedangkan layered hidden Markov model dirancang untuk mengatasi *states* pada tingkatan yang lebih tinggi. Sebagai tambahan, dalam penelitian disertasi ini, model beban yang tersebar secara individual, kerangka runtun waktu, dan studi sensitivitas diusulkan sebagai solusi tambahan untuk meningkatkan akurasi dari pendekatan Markov Chain Monte Carlo yang dikembangkan.

#### **2.1.6.2 Keaslian Penelitian**

Untuk menunjukkan posisi penelitian disertasi ini dibandingkan penelitian-penelitian sebelumnya dan untuk menggarisbawahi keaslian penelitian yang diusulkan, Gambar 2.14 disediakan. Gambar tersebut menunjukkan posisi penelitian disertasi ini terhadap penelitian-penelitian sebelumnya secara umum. Dalam hal ini, metode yang dirancang pada penelitian ini merupakan pengembangan penelitian-penelitian sebelumnya dan usulan solusi dari permasalahan terkait kapasitas *hosting* stokastik.

Penelitian-penelitian sebelumnya mempunyai berbagai macam cara dalam memodelkan karakteristik-karakteristik ketidakpastian dan variabilitas penetrasi. Untuk lokasi penetrasinya, distribusi uniform digunakan pada penelitian-penelitian [47, 48], sedangkan distribusi normal digunakan pada penelitian-penelitian [15,



Gambar 2.14. Peta konsep untuk posisi penelitian pada bidang kapasitas *hosting* stokastik.

16, 31, 34, 35]. Untuk ukuran dayanya, peneliti pada [48] menggunakan distribusi uniform, sedangkan peneliti-peneliti pada [15, 16, 34, 35, 47] menggunakan distribusi normal. Selanjutnya, penelitian-penelitian [15, 35, 49] menggunakan daya keluaran PLTS yang didapat dari data historis, sedangkan penelitian [50]

menggunakan ARMA untuk menghitung daya keluaran PLTS. Untuk permintaan beban, penelitian-penelitian [15, 31, 35] menggunakan data historis. Pada penelitian disertasi ini, distribusi dari lokasi integrasi dan ukuran daya PLTS menggunakan distribusi normal, sedangkan daya keluaran PLTS dan permintaan beban dihitung dari data historis. Berbeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya, distribusi-distribusi yang dirancang mempertimbangkan kriteria baterai. Selain itu, karena penelitian disertasi ini menggunakan Markov Chain Monte Carlo, maka data-data historis yang digunakan tersebut direpresentasikan menjadi probabilitas-probabilitas, baik probabilitas transisi maupun probabilitas keluaran.

Terkait dengan kerangka analisisnya, penelitian-penelitian [15, 16, 19, 31, 34, 35, 58] menggunakan analisis runtun waktu, sedangkan penelitian [57] menggunakan satu nilai waktu untuk pengamatan dampak penetrasinya. Dalam hal ini, karena ketidakpastian-ketidakpastian penetrasi dan fluktuasi daya keluaran PLTS serta permintaan-permintaan beban, analisis dampak penetrasi dari waktu ke waktu perlu dilakukan. Oleh karena itu, penelitian disertasi ini menggunakan analisis runtun waktu. Meskipun demikian, selaras dengan temuan pada [40], bahwa akurasi akan menurun jika resolusi pengamatannya lebih rendah, maka penelitian disertasi ini menggunakan resolusi pengamatan per satu menit. Dengan resolusi pengamatan yang lebih tinggi dibanding penelitian-penelitian sebelumnya, dampak penetrasi pada batas tegangan lebih tersebut diharapkan dapat diamati dengan akurasi yang lebih tinggi. Selanjutnya, karena kapasitas *hosting* stokastik ditentukan sebagai level penetrasi daya maksimum sebelum terjadi pelanggaran batas operasi sistem distribusi, maka batas operasi tersebut harus didefinisikan. Seperti penelitian-penelitian [6, 15, 16, 19, 31, 34, 35, 50, 54–58], penelitian disertasi ini menggunakan tegangan lebih sebagai batas operasi sistem distribusi yang diamati.

Untuk metode penetrasi dan analisis aliran dayanya, penelitian-penelitian [55, 57, 74] menggunakan non-sequential Monte Carlo. Dalam hal ini, baik proses penetrasi maupun perhitungan aliran dayanya dilakukan secara tidak *chronological*. Peneliti-peneliti pada [15, 19, 31, 35, 58, 75] juga melakukan proses penetrasi secara tidak *chronological*, tetapi perhitungan aliran dayanya dilakukan secara *chro-*

*nological*. Hal ini menyebabkan penelitian-penelitian yang menggunakan Monte Carlo tersebut digolongkan sebagai pseudo-sequential Monte Carlo. Untuk penelitian disertasi ini, sequential Markov Chain Monte Carlo diterapkan. Proses penetrasinya dilakukan dengan probabilitas-probabilitas yang dibentuk dari data historis penetrasi yang diurutkan berdasarkan waktu integrasinya ke jaringan distribusi. Aliran dayanya juga menggunakan kerangka runtun waktu.

Pada penelitian disertasi ini, pelanggan dipilih secara acak menggunakan proses Markov sehingga ukuran daya PLTS tersebar bervariasi secara acak. Untuk lokasi integrasi PLTS tersebar juga tersebar secara acak karena mengikuti lokasi dari pelanggan yang telah dipilih acak. Selanjutnya, untuk merepresentasikan pelanggan-pelanggan yang mengintegrasikan PLTS-baterai pada jaringan distribusi tegangan rendah, penelitian disertasi ini mempertimbangkan karakteristik-karakteristik ketidakpastian PLTS-baterai tersebar seperti yang sudah dideskripsikan sebelumnya. Terkait metodenya, matriks probabilitas transisi pada proses markov menjadi kendali dalam melakukan proses penetrasi PLTS tersebar pada jaringan distribusi. Dari sisi analisisnya, kerangka analisis runtun waktu digunakan dalam penelitian disertasi ini untuk menganalisis dampak penetrasi pada setiap rentang waktu tertentu.

Dari sisi penetrasinya, terdapat kategori PLTS dan PLTS-baterai tersebar. Untuk penetrasi PLTS, mekanisme penyebarannya dapat dilakukan secara *deterministic* [52, 80, 81] maupun secara stokastik [15, 16, 19, 31, 34, 35, 57, 58]. Untuk penetrasi PLTS-baterai, baterainya bisa dipasang terpusat di jaringan distribusi [80] maupun tersebar [51, 52, 81]. Pada penelitian-penelitian tersebut, baterai dipasang terpisah dengan PLTS. Pada penelitian ini, penetrasi yang dipertimbangkan adalah penetrasi PLTS dan PLTS-baterai tersebar. Meskipun demikian, berbeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya, PLTS-tersebar yang dipertimbangkan bukan baterai yang terpisah dengan PLTS, melainkan baterai yang terintegrasi dengan PLTS.

Penelitian disertasi ini memilih untuk melakukan pengembangan penentuan kapasitas *hosting* stokastik dengan menggunakan Markov Chain Monte Carlo

karena karakteristik permasalahan pada penelitian disertasi ini mempunyai kesamaan dengan karakteristik solusi dari model Markov. Hal ini ditunjukkan pada penelitian [83]. Terkait hal tersebut, penelitian disertasi ini mempunyai karakteristik permasalahan yang mirip dengan penelitian pada [83]. Penelitian tersebut mempelajari pola distribusi acak dari *cache* pada jaringan informasi. Pola ini kemudian digunakan untuk mengestimasi penyebaran *cache*. Penelitian tersebut diperlukan untuk menghadapi kenaikan permintaan konten-konten video dan media-media yang membutuhkan *bandwidth* yang besar. Dengan akurasi estimasi sistem *cache* yang tinggi, penelitian tersebut bertujuan untuk meningkatkan kecepatan dari kinerja jaringan informasi dan mengatasi keterbatasan-keterbatasan dalam jaringan tersebut. Meskipun demikian, beberapa permasalahan dalam implementasi mendorong untuk dilakukannya pengembangan terhadap model Markov yang diterapkan pada penelitian disertasi ini. Permasalahan implementasi tersebut antara lain *canonical forms of proposal distribution*, *blocking*, *updating order*, jumlah *chains*, nilai-nilai perkiraan pertama, *determining burn-in*, *determining stopping time*, dan analisis keluaran [84]. Selain itu, menurut penelitian pada [85], permasalahan implementasi juga bisa terjadi karena masalah *local-trap* dan *intractable integral*. Permasalahan-permasalahan implementasi tersebut yang menjadikan sulitnya implementasi Markov Chain Monte Carlo dalam suatu kasus. Suatu model Markov harus dikembangkan dengan berdasar pada perilaku permasalahan yang dihadapi [84, 85]. Pada penelitian ini, pendekatan hidden Markov model dikembangkan untuk mempertimbangkan kategori pelanggan dan kategori daya pelanggan. Selanjutnya, layered hidden Markov model dikembangkan untuk menambahkan pertimbangan kategori PLTS/PLTS-baterai.

Meskipun demikian, penelitian disertasi ini mempunyai beberapa batasan penelitian. Karena penelitian disertasi ini mengidentifikasi dampak dari penetrasi PLTS/PLTS-baterai pada jaringan distribusi tegangan rendah, penelitian disertasi ini hanya mengamati dampak penetrasi pada kinerja operasi sistem distribusi tegangan rendah. Selanjutnya, gangguan pada sistem distribusi tegangan rendah yang diamati hanya dibatasi untuk gangguan yang muncul karena penetrasi PLTS/PLTS-baterai. Sebagai objek yang dipenetrasi, penelitian ini mengambil

objek PLTS dan PLTS-baterai. Baterai yang dimaksud adalah baterai yang dipasang oleh pelanggan dan tidak termasuk baterai kendaraan listrik. Oleh karena itu, stasiun pengisian kendaraan listrik juga tidak termasuk lingkup dari penelitian disertasi ini. Dari sisi wilayah analisisnya, analisis yang dilakukan adalah analisis pada kondisi *steady state*. Karena wilayah analisisnya adalah kondisi *steady state*, keberadaan pengendalian-pengendalian seperti virtual synchronous generator (VSC) yang umumnya digunakan pada studi sistem dinamis dan kestabilan tidak dipertimbangkan dalam penelitian disertasi ini.

## 2.2 Landasan Teori

Pada penelitian disertasi ini, pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik berbasis Markov Chain Monte Carlo diusulkan. Untuk melandasi hal tersebut, beberapa teori yang telah disediakan oleh penelitian-penelitian sebelumnya dipresentasikan.

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

Kapasitas *hosting* PLTS tersebar adalah jumlah maksimum PLTS tersebar yang dapat dipenetrasi 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 tersebar yang tinggi.

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

Metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS tersebar telah diteliti oleh beberapa peneliti pada beberapa tahun terakhir [15, 31, 35]. Berdasarkan [15], metode ini terdiri atas tiga prosedur, yaitu penyebaran PLTS, analisis dampak PLTS tersebar per jam, dan penentuan kapasitas *hosting* PLTS pertama.

Dalam penyebaran PLTS, skenario-skenario perlu dirancang terlebih dahulu. Skenario-skenario tersebut antara lain level penetrasi pelanggan dan level penetrasi PLTS tersebar. Level penetrasi pelanggan ( $C_{pen}^k$ ) adalah jumlah pelanggan yang mempunyai PLTS tersebar yang terintegrasi ke jaringan distribusi [15]. Level

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

$$C_{pen} = \{C_{pen}^2, C_{pen}^4, \dots, C_{pen}^{100}\}. \quad (2-6)$$

Skenario selanjutnya yang perlu untuk dirancang adalah level penetrasi PLTS tersebar ( $PV_{pen}^k$ ). Level penetrasi PLTS tersebar didefinisikan sebagai total pembangkitan PLTS tersebar yang terintegrasi ke jaringan distribusi sesuai dengan level penetrasi pelanggan ( $C_{pen}^k$ ) ke- $k$  [15]. Hal ini didefinisikan sebagai

$$PV_{pen} = \{PV_{pen}^2, PV_{pen}^4, \dots, PV_{pen}^{100}\}. \quad (2-7)$$

Dengan mempertimbangkan formula-formula tersebut, pada setiap level penetrasi pelanggan ( $C_{pen}^k$ ), sejumlah skenario penyebaran PLTS ( $m$ ) dapat dirancang [15], yaitu

$$X^k = \{x_1^k, x_2^k, \dots, x_m^k, \dots, x_u^k\}. \quad (2-8)$$

Selanjutnya, untuk menjalankan analisis per jam, suatu kerangka analisis perlu untuk dirancang [15]. Dalam hal ini, dua langkah perlu dijalankan. Pertama adalah penentuan beban minimum efektif ( $Eff_{load}^{hr}$ ). Kedua adalah penentuan pembangkitan PLTS tersebar untuk setiap skenario penyebaran yang dideskripsikan sebagai

$$PV_{pen}^k(hr) = PV_{pen}^k \times PV_{norm}^{hr} \quad (2-9)$$

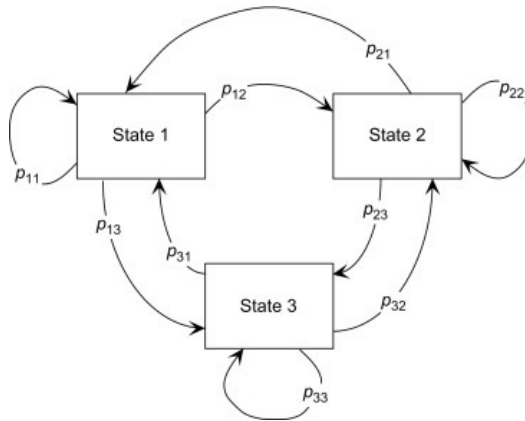
Peneliti pada [15] membuat definisi penentuan kapasitas *hosting* PLTS pertama. Kapasitas *hosting* PLTS pertama adalah kapasitas *hosting* PLTS ketika terdapat satu pelanggaran batas operasi [15]. Dalam penentuan kapasitas *hosting* PLTS pertama tersebut, sebelumnya perlu dilakukan analisis aliran daya. Analisis aliran daya ini digunakan sebagai acuan penentuan kapasitas *hosting* PLTS pertama dengan mempertimbangkan tegangan lebih sebagai batas operasi. Selanjutnya,

jutnya kapasitas *hosting* PLTS pertama ( $H_{1,m}$ ) dihitung dengan [15]

$$H_{1,m} = \min_{i \in S} \left\{ PV_{pen}^k \mid P(V_{max,m}^k(hr) > 1.05) \geq \frac{1}{m} \right\} \quad (2-10)$$

### 2.2.3 Konsep Markov Chain Monte Carlo

Terdapat dua jenis pendekatan Markov Chain Monte Carlo, yaitu *continuous-time* dan *discrete-time*. Dalam hal ini, Markov Chain Monte Carlo dengan karakteristik *continuous-time* mempunyai kemungkinan keluaran yang bersifat kontinyu, sedangkan Markov Chain Monte Carlo dengan karakteristik *discrete-time* mempunyai kemungkinan keluaran yang tertentu atau dapat diukur. Selanjutnya, jika himpunan dari Markov Chain Monte Carlo dengan karakteristik *discrete-time* mempunyai batas nilai, maka Markov Chain Monte Carlo tersebut mempunyai sifat *finite*. Sebagai gambaran sederhana sebelum masuk ke definisi Markov Chain Monte Carlo, prosedur perubahan keadaan pada Markov Chain Monte Carlo ditunjukkan pada Gambar 2.15. Teramati dalam gambar tersebut bahwa pada Markov Chain Monte Carlo, perubahan keadaan dilakukan berdasarkan suatu nilai probabilitas yang spesifik. Nilai-nilai probabilitas ini yang mengarahkan transisi dari suatu keadaan ke keadaan yang lain.



Gambar 2.15. Blok diagram Markov Chain Monte Carlo.



### 2.2.3.1 Proses Markov

Dalam proses Markov, untuk semua nilai  $q$ , nilai saat ini bergantung pada keluaran nilai sebelumnya [86]. 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

$$Pr[f_k = s_j \mid (f_{k-1} = s_i) \wedge q] = Pr[f_k = s_j \mid f_{k-1} = s_i] \quad (2-11)$$

### 2.2.3.2 Probabilitas Transisi Dari Proses Markov

Probabilitas transisi dari proses Markov adalah probabilitas dari suatu *state* jika sudah ada *state* sebelumnya [86]. Probabilitas transisi ke- $n$  dari proses Markov  $p_{ij}(n)$  adalah

$$p_{ij}(n) = Pr[f_n = s_j \mid f_{n-1} = s_i] \quad (2-12)$$

### 2.2.3.3 Markov Chain Monte Carlo

Dengan mengasumsikan bahwa  $\mathbf{P}$  adalah matriks dengan anggota-anggota  $p_{ij}$ , maka Markov Chain Monte Carlo didefinisikan sebagai proses Markov yang mempunyai matriks transisi  $\mathbf{P}$  [86]. Selanjutnya, penelitian ini menggunakan pendekatan hidden Markov model yang dikembangkan untuk mempertimbangkan kategori pelanggan dan kategori daya pelanggan. Layered hidden Markov model juga kemudian dikembangkan untuk menambahkan pertimbangan kategori PLTS/PLTS-baterai. Teori mengenai hidden Markov model disediakan pada [87], sedangkan teori mengenai layered Markov model disediakan pada penelitian [88].

### 2.2.4 Jumlah Proses Acak

Penentuan jumlah proses acak, yaitu metode *multistage non-finite population* (MNP), dipersentasikan oleh peneliti pada [89]. 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

$$u = \sqrt{\frac{\frac{u_3}{0.01} - \frac{u_3}{0.99}}{2}}, \quad (2-13)$$

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

$$u_3 = \sqrt{\frac{u_2 - u_1}{2}}, \quad (2-14)$$

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

$$u_1 = \frac{Z_{(1-\alpha)}\sigma}{E} \text{ dan } u_2 = \frac{Z_{(1-\alpha)}^2\sigma^2}{E^2}. \quad (2-15)$$

### 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 [90]. Selanjutnya, lima tahun setelah itu, oleh peneliti yang sama, disediakan contoh aplikasinya yang dipresentasikan pada [91].

### 2.2.6 Studi Akurasi

Akurasi dalam penentuan kapasitas *hosting* PLTS tersebar dapat ditentukan dengan cara mencari probabilitas metode untuk merasakan pelanggaran [15]. Hal ini diformulasikan sebagai

$$Acc_k^\epsilon(H_1) = \max_{0 \leq p \leq 100} \left\{ p \mid 0 < Pr(V_{max,k} \mid h_{1,k}^p > 1.05) \leq \epsilon \right\} \quad (2-16)$$

Agar resiko penetrasi PLTS tersebar skala besar dapat diukur, penghitungan resiko pelanggaran (RV) perlu dilakukan [31]. 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

$$RV (\%) = 100 - SV (\%) \quad (2-17)$$

Selanjutnya, mean absolute error (MAE) dapat digunakan untuk mengukur eror antara hasil estimasi dan data. Dengan membandingkan MAE metode sebelumnya dan MAE metode yang diusulkan, kinerja metode yang diusulkan dapat diukur. MAE diformulasikan sebagai berikut

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_{f,i} - x_{o,i}| \quad (2-18)$$

## 2.3 Hipotesis

Hipotesis dari penelitian disertasi ini adalah:

1. Peningkatan representasi ketidakpastian lokasi dan ukuran daya PLTS tersebar dari model penetrasi PLTS dalam penentuan kapasitas *hosting* stokastik, serta variabilitas permintaan beban dan iradiasi matahari dalam runtun waktu

melalui metode yang diusulkan pada penelitian ini dapat menaikkan akurasi metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik.

2. Pertimbangan PLTS-baterai dan operasi baterai pada penetrasi PLTS/PLTS-baterai melalui metode yang diusulkan pada penelitian ini dapat merepresentasikan kondisi riil terkait adanya kemungkinan penetrasi pelanggan-pelanggan dengan PLTS-baterai. Representasi riil ini ditunjukkan dari akurasi metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik yang diusulkan.

Pengujian akurasi dari metode yang diusulkan pada penelitian disertasi ini dilakukan dengan ukuran mean absolute error (MAE) melalui studi perbandingan dengan metode sebelumnya, yaitu metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik berbasis Monte Carlo.

## BAB III

### METODE PENELITIAN

Untuk menyelesaikan permasalahan yang telah dideskripsikan, suatu metodologi penelitian terkait penentuan kapasitas *hosting* stokastik perlu dirancang. Untuk alasan tersebut, penelitian disertasi ini mengusulkan metode pengembangan kapasitas *hosting* stokastik dengan Markov Chain Monte Carlo yang dijelaskan pada bab ini. Diagram alir dari metodologi penelitian disertasi ini ditunjukkan pada Gambar 3.1. Pada gambar tersebut, metodologi penelitian disertasi ini dibagi menjadi tiga bagian, yaitu

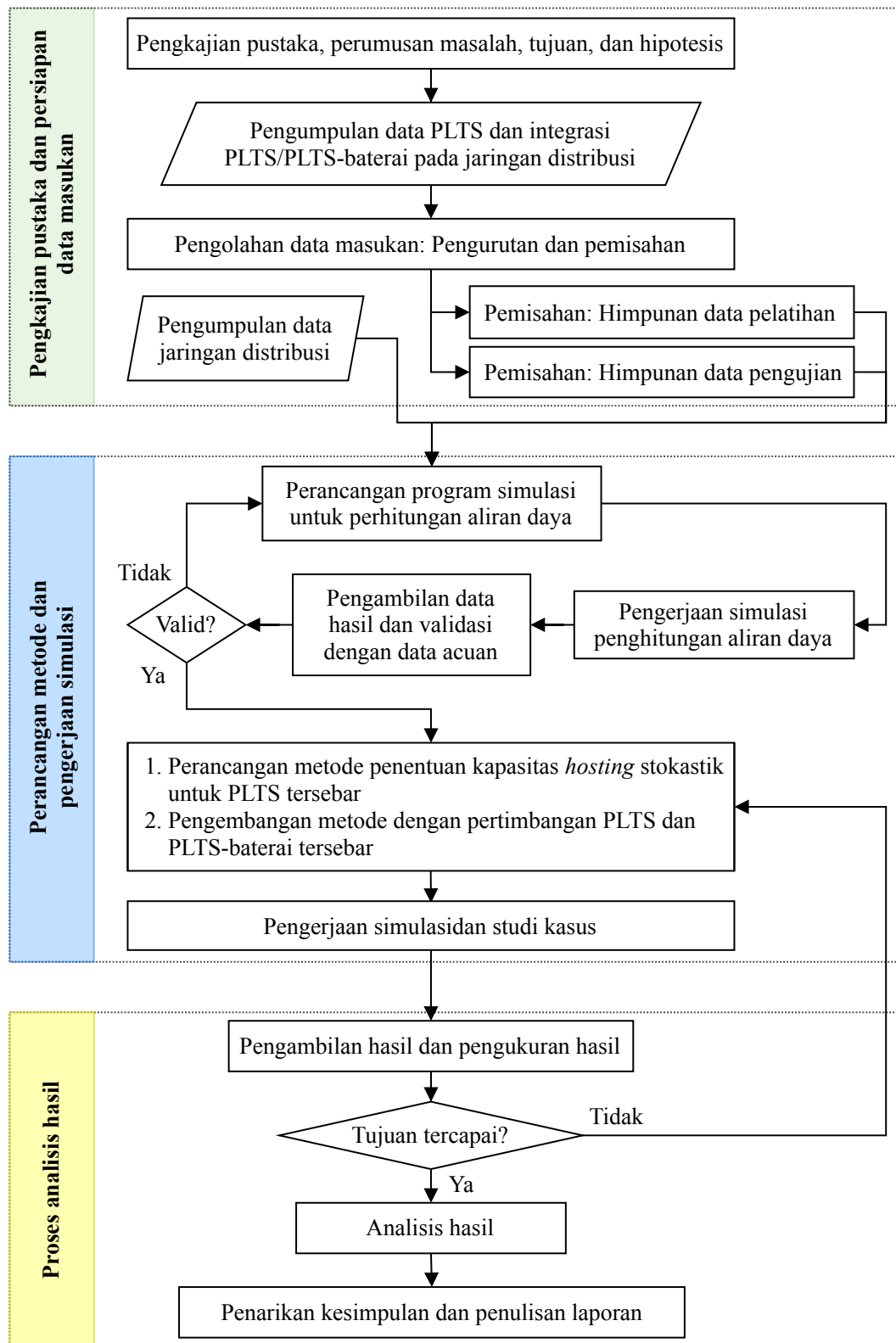
1. Pengkajian pustaka dan persiapan data masukan.
2. Perancangan metode dan pengerjaan simulasi.
3. Proses analisis hasil.

Metodologi penelitian pada disertasi ini dimulai dengan pengkajian pustaka dan persiapan data masukan. Pengkajian pustaka merupakan proses mengkaji penelitian-penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting*. Selanjutnya, data-data masukan dipersiapkan.

Proses selanjutnya dari metodologi penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 adalah perancangan metode dan pengerjaan simulasi. Pada proses ini, usulan metode dari penelitian ini dikerjakan. Pada Tabel 2.6 telah dijelaskan rincian usulan solusi dari rumusan masalah yang diangkat dalam penelitian disertasi ini. Dalam hal ini, usulan-usulan solusi tersebut dapat dikategorikan menjadi dua usulan metode, yaitu

1. Perancangan metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik untuk PLTS tersebut.
2. Pengembangan metode dengan pertimbangan PLTS dan PLTS-baterai tersebut.

Kedua usulan metode tersebut merupakan tahapan teknis dari pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik dengan Markov Chain Monte Carlo.



Gambar 3.1. Diagram alir metodologi penelitian.

Usulan metode pertama merupakan solusi untuk rumusan masalah: Kurangnya representasi ketidakpastian lokasi dan ukuran daya PLTS tersebar dari model penetrasi PLTS dalam penentuan kapasitas *hosting* stokastik, serta variabilitas permintaan beban dan iradiasi matahari dalam runtun waktu. Sesuai dengan karakteristik masalahnya, usulan metode dengan pendekatan hidden Markov model dikembangkan. Selanjutnya, usulan metode kedua merupakan solusi untuk rumusan masalah: Tidak dipertimbangkannya PLTS-baterai dan operasi baterai pada penetrasi PLTS/PLTS-baterai. Dengan karakteristik masalahnya, yaitu tingkatan *states* yang lebih tinggi, metode yang diusulkan adalah metode dengan pendekatan layered hidden Markov model.

Proses terakhir dari diagram alir penelitian pada Gambar 3.1 adalah proses analisis hasil. Pada proses ini, interpretasi hasil, implikasi, kesimpulan, dan rekomendasi untuk penelitian selanjutnya disediakan. Penjelasan terperinci dari masing-masing proses tersebut disediakan pada bagian-bagian selanjutnya dari bab ini.

### 3.1 Pengkajian Pustaka dan Persiapan Data Masukan

Pada pengkajian pustaka, berbagai teori, metode, aplikasi, dan temuan baru mengenai pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* dikaji. Langkah selanjutnya adalah perumusan masalah, pengidentifikasian keaslian penelitian, penetapan tujuan, dan penentuan hipotesis. Untuk mengerjakan simulasi penentuan kapasitas *hosting* stokastik dengan Markov Chain Monte Carlo tersebut, penelitian disertasi ini membutuhkan data-data historis terkait PLTS dan sistem distribusi tegangan rendah sebagai data-data masukan. Pada langkah selanjutnya, pengolahan data masukan diperlukan sebelum data-data masukan tersebut digunakan. Data-data masukan tersebut adalah data sekunder yang didapat baik dari lembaga-lembaga riset terkait penetrasi PLTS skala besar, maupun Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Data-data masukan yang dipersiapkan dalam penelitian disertasi ini antara lain

1. Ukuran daya PLTS untuk pelanggan-pelanggan dengan PLTS.

2. Ukuran daya PLTS dan baterai untuk pelanggan-pelanggan dengan PLTS-baterai.
3. Iradiasi-iradiasi matahari dalam suatu rentang waktu.
4. Jaringan distribusi.
5. Permintaan-permintaan beban dalam suatu rentang waktu.

Data ukuran-ukuran PLTS untuk pelanggan-pelanggan dengan PLTS didapatkan dari proyek-proyek integrasi PLTS yang dikumpulkan oleh dari California Distributed Generation Statistics. Data-data tersebut dikumpulkan dari perusahaan-perusahaan penyedia layanan listrik di United States, seperti Pacific Gas & Electric Company (PG&E), Southern California Edison Company (SCE), dan San Diego Gas & Electric Company (SDG&E). Perusahaan-perusahaan tersebut menyediakan data ukuran-ukuran daya PLTS untuk pelanggan-pelanggan dengan PLTS yang dipenetrasi ke jaringan distribusi tegangan rendah dari tahun 1998. Data-data tersebut digunakan untuk menentukan ukuran PLTS untuk setiap proses acak dari integrasi PLTS ke jaringan distribusi.

Data ukuran-ukuran daya PLTS dan baterai untuk pelanggan-pelanggan dengan PLTS-baterai juga didapatkan dari PG&E, SCE, dan SDG&E. Walaupun demikian, data-data dari perusahaan-perusahaan penyedia layanan listrik tersebut menunjukkan bahwa pelanggan-pelanggan dengan PLTS-baterai baru mulai mengintegrasikan PLTS-baterai dari tahun 2012. Berdasarkan hal tersebut, serta dengan pertimbangan teknologi dan kesiapan dari penetrasi PLTS-baterai tersebut, kemungkinan terjadinya pelanggan-pelanggan untuk memasang PLTS-baterai diasumsikan mulai ada dari tahun 2012. Oleh karena itu, data yang digunakan untuk menghitung probabilitas-probabilitas transisi dari model Markov yang diusulkan dimulai dari tahun 2012. Sebagai tambahan, hal ini dilakukan karena probabilitas-probabilitas transisi yang dihitung tersebut, selain untuk menentukan ukuran-ukuran daya PLTS dan baterai, juga bertujuan untuk menentukan transisi keadaan antara pelanggan dengan PLTS saja atau pelanggan dengan PLTS-baterai.

Dari sisi pengolahan data masukan dari ukuran daya PLTS pada penetrasi PLTS dan ukuran daya PLTS-baterai tersebut pada penetrasi PLTS-baterai



tersebar tersebut, terdapat dua tahap pengolahan data yang dilakukan pada penelitian disertasi ini, yaitu pengurutan data dan pemisahan data. Tahap pertama dari pengolahan data adalah pengurutan data-data proyek integrasi PLTS berdasarkan waktu keluarnya ijin dari operator jaringan distribusi untuk melakukan penyambungan PLTS ke jaringan tersebut. Sebagai tahap kedua, data-data masukan yang telah diurutkan tersebut kemudian dipisah menjadi dua jenis himpunan, yaitu himpunan data-data untuk pelatihan dan pengujian. Masing-masing himpunan data tersebut dirancang untuk pengerjaan simulasi-simulasi yang selanjutnya dilakukan. Himpunan data pelatihan dirancang sebagai data-data yang digunakan untuk membuat probabilitas-probabilitas transisi dari model Markov yang diusulkan, sedangkan himpunan data pengujian dirancang sebagai data-data yang digunakan untuk menilai kinerja metode Markov Chain Monte Carlo yang diusulkan.

Data iradiasi-iradiasi matahari untuk berbagai kondisi awan yang digunakan pada penelitian disertasi ini disediakan oleh laboratorium CanmetENERGY in Varennes. Lokasi instalasi sistem PLTS untuk pengambilan data adalah Varennes, Quebec. Kondisi awan yang dipertimbangkan adalah cerah, mendung, variasi, dan sangat bervariasi. Data-data tersebut menggunakan resolusi pengamatan per 1 menit. Meskipun demikian, data yang digunakan untuk masukan simulasi adalah daya keluaran PLTS. Data iradiasi-iradiasi matahari tersebut ( $W/m^2$ ) dikalikan dengan luas panel PLTS ( $m^2$ ) yang diintegrasikan ke jaringan distribusi untuk mendapatkan daya PLTS yang diinginkan ( $W$ ).

Berkaitan dengan jaringan distribusi tegangan rendah yang digunakan, penelitian disertasi ini menggunakan sistem distribusi IEEE 8500-node. Penyulang tersebut digunakan untuk menunjukkan kinerja metode yang diusulkan untuk diterapkan pada penyulang yang berbeda.

Data permintaan-permintaan beban dalam rentang waktu 24 jam didapat dari data permintaan-permintaan beban yang disusun oleh Test Feeders Working Group of the Distribution System Analysis Subcommittee of the Power Systems Analysis, Computing, and Economics (PSACE). Dalam penelitian ini, beban-beban diasumsikan bersifat P-Q (daya aktif dan daya reaktif) konstan. Karena daya-daya keluaran

PLTS dan permintaan-permintaan beban menggunakan resolusi pengamatan per 1 menit, maka penelitian disertasi ini menggunakan kerangka analisis dengan resolusi pengamatan per 1 menit.

### 3.2 Perancangan Metode dan Pengerjaan Simulasi

Bagian ini dimulai dengan pembuatan program untuk perhitungan aliran daya dari sistem distribusi yang digunakan. Program simulasi yang digunakan untuk penghitungan aliran daya tersebut adalah OpenDSS. Pada setiap integrasi PLTS atau PLTS-baterai tersebar, perhitungan aliran daya dari program jaringan distribusi pada penelitian disertasi ini dirancang untuk menghasilkan resolusi pengamatan per 1 menit. Untuk tujuan tersebut, meteran untuk mengukur perubahan tegangan pada semua bus untuk resolusi pengamatan per 1 menit tersebut dipasang di semua bus. Hal ini dilakukan untuk mengamati setiap perubahan daya keluaran PLTS dan permintaan beban yang direkam untuk setiap 1 menit perubahan.

Setelah perancangan program simulasi penghitungan aliran daya, langkah selanjutnya adalah pengerjaan simulasi. Simulasi aliran daya ini dikerjakan sebelum program penentuan kapasitas *hosting* stokastik dirancang. Hal ini dilakukan karena tujuan dari simulasi ini adalah validasi program. Program aliran daya tersebut divalidasi dengan cara membandingkan hasil simulasi pada penelitian disertasi ini dengan hasil simulasi pada dokumen data sistem distribusi sumber. Validasi ini dikerjakan untuk mendapatkan program sistem distribusi yang sesuai sebelum usulan metode diterapkan. Perancangan program sistem distribusi untuk perhitungan aliran daya akan terus diperbaiki jika validasinya gagal. Jika validasinya berhasil, proses selanjutnya adalah perancangan metode yang diusulkan. Perancangan metode ini diawali dengan formulasi permasalahan dari kapasitas *hosting* stokastik.

Perancangan metode yang diusulkan pada penelitian disertasi ini dibagi menjadi dua tahap, sebagai berikut

1. Perancangan metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik untuk PLTS tersebar.

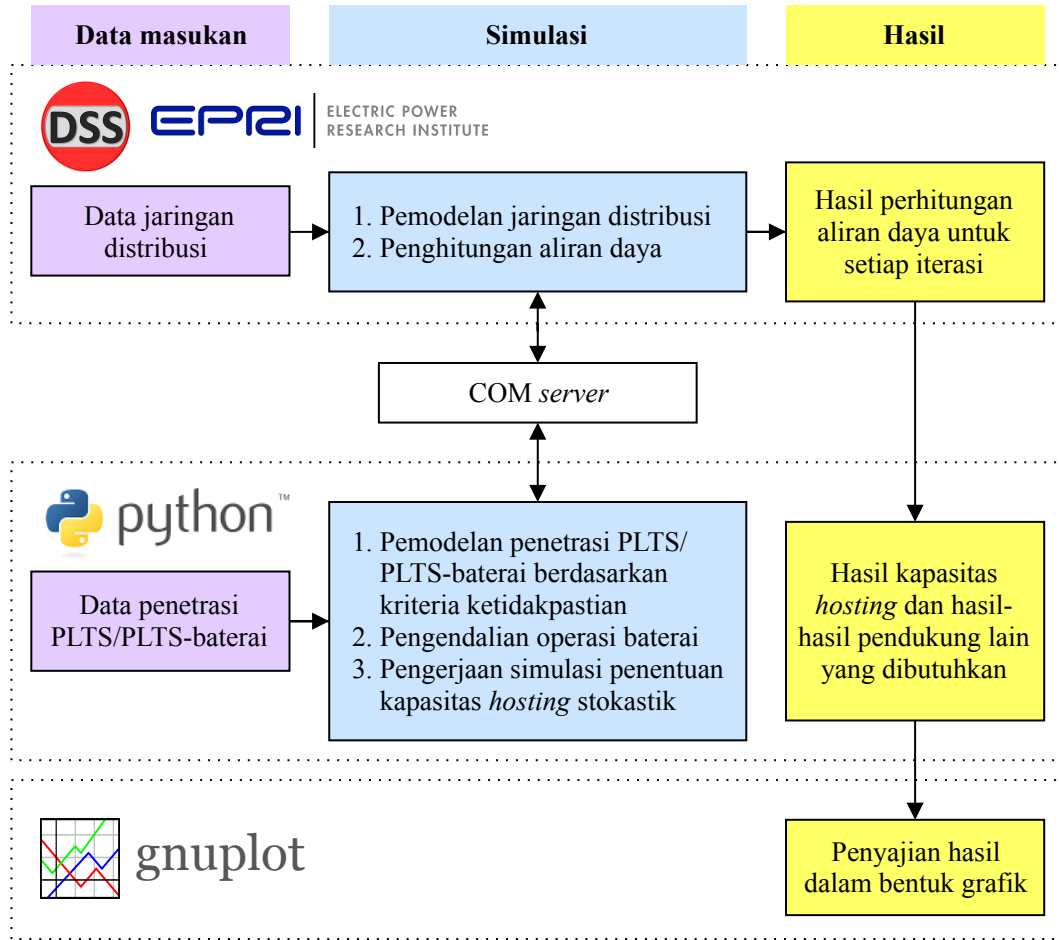
## 2. Pengembangan metode dengan pertimbangan PLTS dan PLTS-baterai tersebar.

Pada tahap pertama, pelanggan-pelanggan dengan PLTS-baterai belum dimasukkan dalam penetrasi. Hal ini dilakukan karena tujuan dari pengembangan metode tahap pertama adalah pendekatan Markov Chain Monte Carlo untuk pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik. Untuk memasukkan pertimbangan PLTS-baterai tersebar, pengembangan metode tahap kedua dikerjakan. Dalam hal ini, operasi baterai juga diperhatikan.

Untuk mengerjakan simulasi dari metode yang diusulkan, penelitian disertasi ini menggunakan OpenDSS, python, dan gnuplot. Gambar 3.2 disediakan untuk menunjukkan penggunaan ketiga alat tersebut dalam penelitian disertasi ini. OpenDSS adalah alat simulasi sistem tenaga listrik yang berbasis program. Dalam penelitian disertasi ini, OpenDSS digunakan untuk pemodelan jaringan distribusi dan penghitungan aliran daya. Pada setiap iterasi penetrasi, hasil perhitungan dihasilkan dari program tersebut. Untuk pemrograman metode yang diusulkan, bahasa pemrograman python digunakan pada penelitian disertasi ini. Program python tersebut mengerjakan pemodelan penetrasi PLTS atau PLTS-baterai tersebar berdasarkan ketidakpastian-ketidakpastian, pengendalian operasi baterai untuk PLTS-baterai tersebar, dan pengerjaan simulasi penentuan kapasitas *hosting* stokastik. Penelitian ini menggunakan COM server yang disediakan oleh OpenDSS untuk menghubungkan antara OpenDSS dan python. Dalam hal ini, keleluasaan pemrograman yang disediakan oleh python ditujukan untuk memperoleh berbagai hasil yang dibutuhkan. Selanjutnya, gnuplot digunakan untuk menampilkan hasil dalam bentuk grafik.

### 3.2.1 Kapasitas *Hosting* Stokastik

Untuk menghadapi kenaikan instalasi PLTS tersebar yang dihubungkan ke jaringan distribusi tegangan rendah, penyedia listrik berusaha untuk memfasilitasi sebanyak mungkin PLTS tersebar tanpa mengorbankan kinerja operasi sistem distribusi tenaga listrik. Berkaitan dengan hal tersebut, kemampuan sistem



Gambar 3.2. Blok diagram metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik berdasarkan alat yang digunakan.

distribusi tenaga listrik dalam menerima sambungan PLTS tersebar dapat diukur. Dengan mempertimbangkan karakteristik-karakteristik ketidakpastian penetrasi, jumlah maksimal PLTS tersebar yang dapat diintegrasikan ke jaringan distribusi sebelum terjadinya pelanggaran batas operasi itu didefinisikan sebagai kapasitas *hosting* stokastik. Kapasitas *hosting* stokastik ini diperlukan untuk mengambil keputusan untuk setiap permintaan penyambungan PLTS tersebar ke jaringan distribusi tenaga listrik. 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

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

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

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

### 3.2.2 Batas Kinerja Operasi

Karena kapasitas *hosting* PLTS tersebar ditentukan berdasarkan pelanggaran terhadap batas operasi sistem, batas operasi sistem tenaga listrik yang digunakan perlu untuk dijelaskan. Mengacu kepada regulasi yang mengatur mengenai batas tegangan lebih [62], 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 tersebar 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

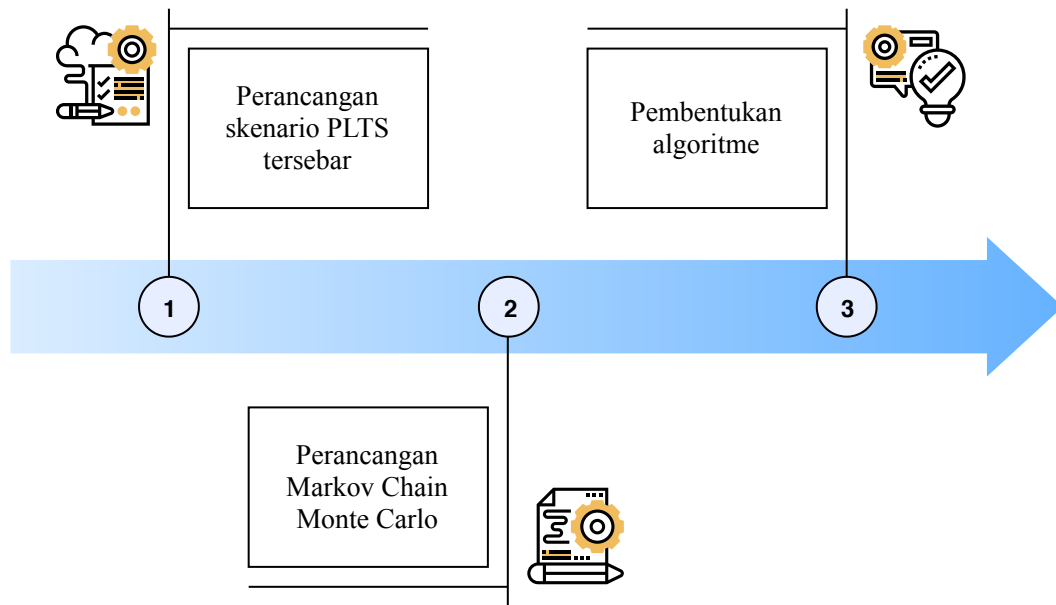
$$v_b \leq 1.05. \quad (3-3)$$

### 3.2.3 Kerangka Analisis Runtun Waktu

Agar dampak dari penetrasi PLTS tersebar dapat diinvestigasi dengan tepat, karakteristik dari penetrasi tersebut harus dikenali. Salah satu karakteristik dari penetrasi PLTS tersebar adalah perubahan yang cepat dari variabel-variabel ketidakpastian dalam lingkup penetrasi tersebut. Selanjutnya, karena kapasitas *hosting* stokastik adalah analisis yang berbasis pada dampak negatif dari penetrasi PLTS tersebar pada kinerja operasi sistem distribusi tenaga listrik, akurasi dalam menginvestigasi dampak negatif tersebut dipengaruhi oleh seberapa cepat jeda pengamatan untuk setiap sampel yang diambil. Oleh karena itu, kerangka analisis runtun waktu dalam studi penentuan kapasitas *hosting* stokastik perlu dirancang. Dalam penelitian disertasi ini, rancangan kerangka analisis runtun waktu diwujudkan melalui resolusi pengamatan dari daya keluaran PLTS dan kurva beban. Dalam hal ini, simulasi aliran daya untuk setiap proses penetrasi dikerjakan secara iteratif untuk setiap titik pengamatan.

### 3.2.4 Perancangan Metode Penentuan Kapasitas *hosting* Stokastik untuk PLTS Tersebar

Secara garis besar, proses perancangan metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik ditunjukkan pada Gambar 3.3. Proses ini dimulai dengan melakukan

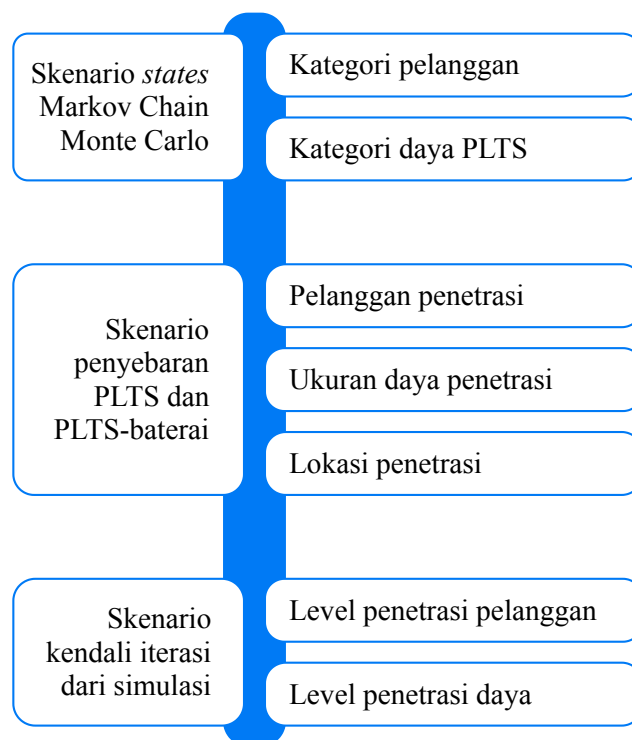


Gambar 3.3. Proses perancangan metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik untuk PLTS tersebar.

perancangan skenario dari penetrasi PLTS tersebar ke jaringan distribusi tenaga listrik. Proses selanjutnya adalah perancangan Markov Chain Monte Carlo untuk penentuan kapasitas *hosting* stokastik. Selanjutnya, proses terakhirnya adalah pembentukan algoritme dari metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik. Algoritme ini dibentuk dengan tujuan agar penelitian disertasi ini dapat diikuti dan dikembangkan pada masa mendatang. Pembentukan algoritme ini dilakukan dengan berdasarkan pada produk atau hasil dari kedua proses sebelumnya.

#### 3.2.4.1 Perancangan Skenario Penetrasi PLTS Tersebar

Perancangan skenario penetrasi PLTS tersebar adalah proses pertama dalam perancangan metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik. Rancangan skenario ini meliputi pendefinisian istilah-istilah yang digunakan dalam penelitian ini dan formulasi masalah. Istilah-istilah tersebut didefinisikan untuk memudahkan



Gambar 3.4. Proses perancangan skenario-skenario penetrasi PLTS tersebar.

dalam penyebutan setiap kejadian atau proses yang dikerjakan, sedangkan formulasi masalah adalah representasi permasalahan kapasitas *hosting* stokastik dalam rumus-rumus matematika. Hal-hal tersebut penting untuk membentuk strategi simulasi. Seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4, skenario penetrasi PLTS tersebar yang dirancang pada penelitian disertasi ini dibagi menjadi tiga macam, yaitu skenario untuk *states* dari Markov Chain Monte Carlo, skenario penyebaran PLTS, dan skenario kendali iterasi dari simulasi.

Skenario *states* dari Markov Chain Monte Carlo meliputi variabel-variabel keadaan yang menjadi objek perpindahan dalam Markov Chain Monte Carlo yang dirancang. *States* tersebut terdiri atas kategori pelanggan dan kategori daya PLTS. Selanjutnya, skenario penyebaran PLTS adalah skenario penetrasi PLTS tersebar dari sisi pelanggan yang berkaitan dengan karakteristik ketidakpastian penetrasinya. Hal ini mencakup penentuan pelanggan penetrasi, ukuran daya penetrasi dan lokasi penetrasi. Skenario terakhir dalam proses perancangan skenario penetrasi PLTS tersebar adalah skenario kendali iterasi dari simulasi. Karena simulasi yang dila-

kukan dengan proses acak untuk sampel besar, maka perlu diterapkannya kendali proses iterasi yang tepat. Dalam hal ini, level penetrasi pelanggan dijadikan acuan untuk memastikan agar proses acak berjalan sesuai yang diharapkan. Sementara itu, level penetrasi daya digunakan sebagai acuan tingkat penetrasi yang sudah ditempuh dan ukuran ketika batas maksimal penetrasi sudah tercapai.

Selain istilah-istilah terkait penetrasi yang digunakan pada penelitian ini, keluaran dari perancangan skenario penetrasi PLTS tersebar ini adalah formula matematika untuk setiap skenario. Formula-formula matematika ini digunakan sebagai dasar dalam pembentukan algoritme penentuan kapasitas *hosting* stokastik yang diusulkan. Sebelum pembentukan algoritme, perancangan Markov Chain Monte Carlo dikerjakan untuk mempertimbangkan karakteristik-karakteristik ketidakpastian dari penetrasi PLTS tersebar.

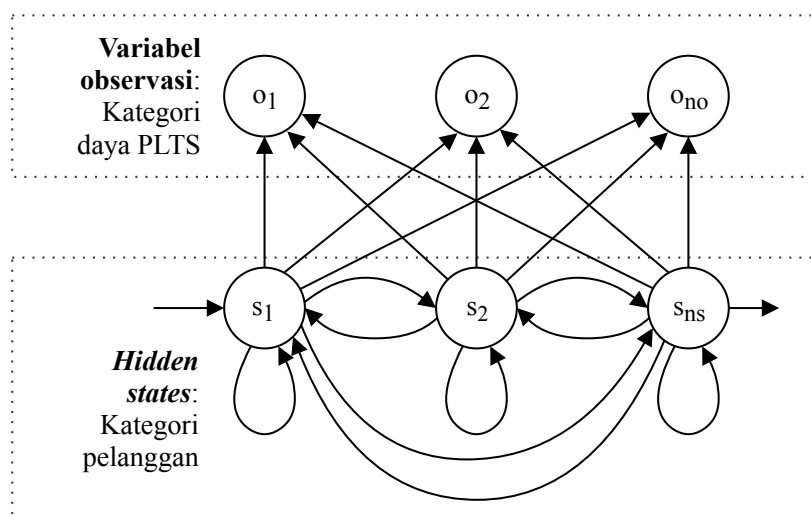
#### **3.2.4.2 Perancangan Markov Chain Monte Carlo**

Perancangan Markov Chain Monte Carlo untuk penentuan kapasitas *hosting* PLTS tersebar dilakukan dengan mendefinisikan matriks probabilitas transisi dan jumlah simulasi Markov Chain Monte Carlo. Markov Chain Monte Carlo yang diusulkan pada penelitian disertasi ini dikategorikan sebagai finite Markov model karena jumlah proses penetrasinya diskret dan tertentu. Jumlah proses penetrasi tersebut mengikuti jumlah pelanggan yang dilayani pada sistem distribusi tegangan rendah yang digunakan dalam penelitian.

Metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik Markov Chain Monte Carlo ini dirancang dengan menerapkan formula-formula matematika yang telah dihasilkan pada proses sebelumnya, yaitu perancangan skenario penetrasi PLTS tersebar. Terkait dengan skenario *states* dari Markov Chain Monte Carlo, terdapat dua macam skenario, yaitu kategori pelanggan dan kategori daya PLTS. Kategori pelanggan meliputi rumah tangga, pendidikan, komersial, industri, dan militer. Selanjutnya, kategori daya PLTS merupakan pengelompokan berdasarkan daya PLTS tersebar yang diintegrasikan. Hal ini menyebabkan perlunya untuk mengimplementasikan hidden Markov model. Diagram hidden Markov model ditunjukkan



pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5. Blok diagram hidden Markov model yang diusulkan.

Pada penelitian disertasi ini, kategori pelanggan bertindak sebagai *hidden states*, sedangkan kategori daya PLTS-nya merupakan variabel observasi. Hal ini diterapkan karena kategori daya PLTS merupakan variabel yang dicari nilainya, berdasarkan kategori pelanggan yang didapat pada setiap proses penetrasi, untuk diintegrasikan pada sistem distribusi. Kategori pelanggan pada proses penetrasi ke- $k$  dicari dengan probabilitas transisi dari kategori pelanggan pada proses penetrasi ke- $(k - 1)$ . Secara terpisah, dengan mengabaikan adanya variabel observasi, *hidden states* ini merupakan Markov model umum seperti ditunjukkan pada Gambar 2.15. Terkait penentuan kategori pelanggan, untuk proses penetrasi pertama, kategori pelanggan dicari dengan probabilitas awal. Selanjutnya, untuk setiap kategori pelanggan pada proses penetrasi ke- $k$ , variabel observasinya dicari dengan probabilitas transisi dari kategori pelanggan tersebut ke kategori daya PLTS.

Hidden Markov model yang dirancang pada penelitian ini menggunakan lima parameter yaitu

1. Jumlah *hidden states*.
2. Jumlah variabel observasi.
3. Probabilitas transisi.
4. Probabilitas keluaran.

### 5. Probabilitas awal dari *states*.

Berkaitan dengan parameter-parameter hidden Markov model tersebut, jumlah dari *hidden states* adalah parameter yang didapatkan secara empiris dari data eksperimen. Selanjutnya, jumlah variabel observasi merupakan variabel-variabel observasi untuk setiap *hidden state*. Parameter ini juga dikatakan sebagai panjang atau jumlah elemen dari vektor observasi.

Probabilitas transisi adalah probabilitas dari suatu *state* untuk bertransisi ke *state* berikutnya pada *hidden states*. Dalam implementasi simulasinya, probabilitas-probabilitas transisi ini dibentuk menjadi matriks probabilitas transisi. Dalam hal ini, 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. 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. Untuk menghitung probabilitas transisi, Persamaan (2-12) dikembangkan menjadi

$$p_{ij}^{tran} = Pr[a_{j,k}^m = y_j \mid a_{j,k-1}^m = y_i]. \quad (3-4)$$

Dengan mengaplikasikan Persamaan (3-4) untuk semua data penetrasi pada himpunan  $D$ , jumlah nilai probabilitas transisi sebanyak  $r \cdot r$  diperoleh. Kemudian, dengan mengasumsikan bahwa  $\mathbf{P}^{tran}$  adalah matriks persegi ( $r \times r$ ), matriks

probabilitas transisi  $\mathbf{P}^{\text{tran}}$  dirumuskan sebagai

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

Probabilitas keluaran merupakan probabilitas dari suatu *hidden state* untuk bertransisi ke variabel observasi. Probabilitas-probabilitas keluaran juga dihitung dari himpunan  $D$ . Selanjutnya, matriks probabilitas keluaran dari setiap *hidden state* juga dibentuk dengan dimensinya merupakan jumlah probabilitas keluaran dari setiap *hidden state* tersebut. Probabilitas keluaran dihitung dengan

$$p_{ij}^{kel} = Pr[b_{j,k}^m = z_j \mid b_{j,k-1}^m = z_i = y_j], \quad (3-5)$$

sedangkan matriks probabilitas keluarannya dirumuskan sebagai

$$\mathbf{P}^{\text{kel}} = \begin{matrix} & \begin{matrix} z_j & z_j & \dots & z_j \end{matrix} \\ \begin{matrix} z_i \\ z_i \\ \vdots \\ z_i \end{matrix} & \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1r} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{r1} & p_{r2} & \dots & p_{rr} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Berkaitan dengan probabilitas transisi dan probabilitas keluaran, *state* yang dicari saat ini pada *hidden states* hanya bergantung pada *state* terakhirnya, sedangkan variabel observasi hanya bergantung pada *state* saat ini pada *hidden states* tersebut. Maka dari itu, perhitungan tersebut hanya dapat dilakukan untuk *states* kedua dan selanjutnya. *State* pertama menggunakan suatu parameter yang

dinamakan probabilitas awal dari *states*. Selain proses penetrasinya yang dilakukan iterasi, simulasi Markov Chain Monte Carlo juga dilakukan iterasi. Perhitungan jumlah simulasi Markov Chain Monte Carlo menggunakan Persamaan (2-13).

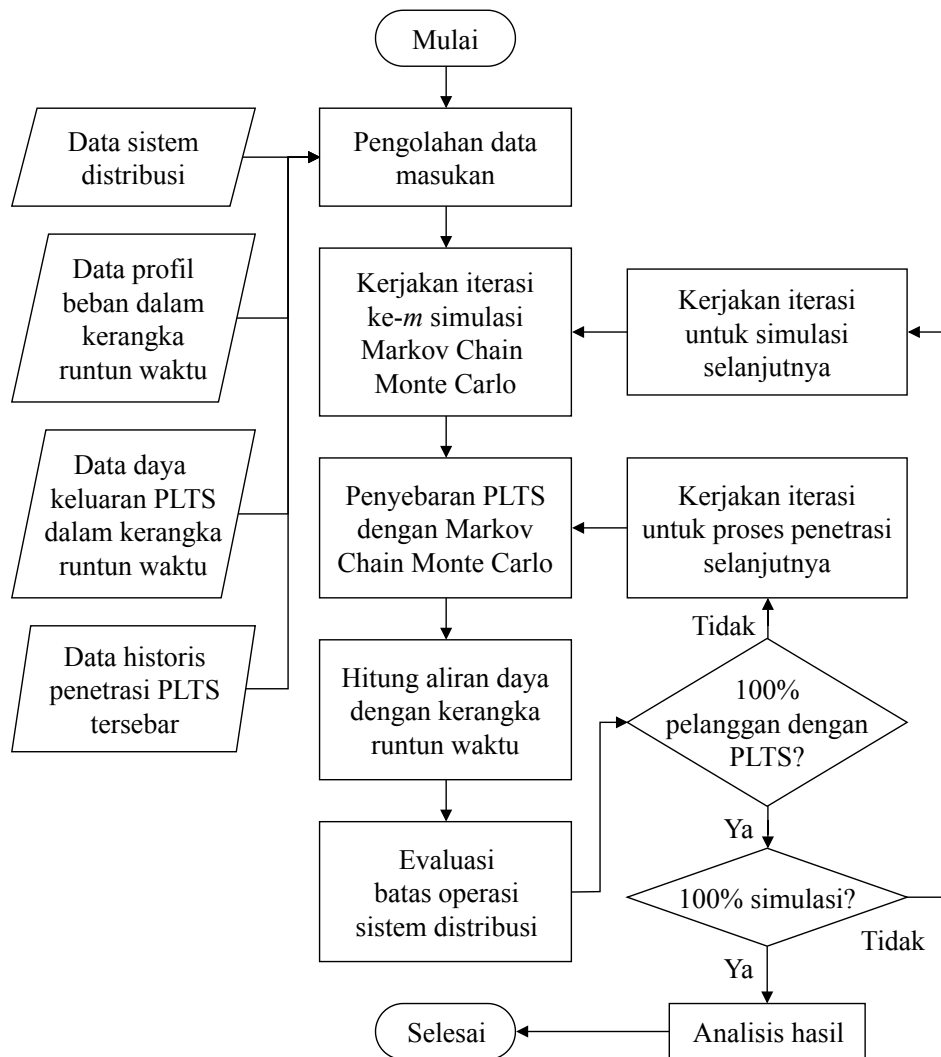
### 3.2.4.3 Pembentukan Algoritme

Pembentukan algoritme dilakukan dengan menerapkan skenario dan Markov Chain Monte Carlo yang telah dirancang. Algoritme yang dimaksud adalah algoritme penentuan kapasitas *hosting* stokastik untuk penetrasi PLTS tersebar. Dasar pembentukan algoritme tersebut adalah diagram alir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6. Seperti yang dapat diamati pada gambar tersebut, metode diawali dengan pengolahan data masukan. Data-data masukannya antara lain data sistem distribusi, data profil beban dalam kerangka runtun waktu, data keluaran PLTS dalam kerangka runtun waktu, dan data historis penetrasi PLTS tersebar.

Data sistem distribusi dirancang dalam bentuk program yang ditulis dengan OpenDSS dan python. Cara validasi program yang dirancang adalah dengan membandingkan hasil simulasi aliran dayanya dengan sumber acuan. Data profil beban dan daya keluaran PLTS disajikan dalam kerangka pengamatan runtun waktu dengan resolusi 1 menit. Penentuan rentang pengamatan dilakukan berdasarkan rentang waktu yang melingkupi permintaan-permintaan beban terendah dan daya-daya keluaran PLTS tertinggi. Hal ini dilakukan saat pengolahan data. Dalam hal ini, permintaan-permintaan beban dan daya-daya keluaran PLTS dinyatakan dalam pu. Untuk mengamati karakteristik distribusinya, data historis penetrasi PLTS tersebar diolah menjadi probability mass function (PMF). Data-data tersebut dipisah menjadi data pelatihan dan data pengujian. Data pelatihan digunakan untuk membentuk matriks probabilitas transisi dan matriks probabilitas keluaran, sedangkan data pengujian digunakan dalam proses pengujian metode. Dalam pembuatan matriks-matriks probabilitas, data historis penetrasi PLTS tersebar tersebut diurutkan berdasarkan urutan permintaan penyambungan dari pelanggan disetujui oleh penyedia layanan listrik. Untuk membuktikan bahwa metode yang diusulkan bekerja secara umum dan tidak hanya bergantung pada suatu data spesifik, penelitian disertasi ini menggunakan tiga himpunan data dari tiga penyedia

layanan listrik yang berbeda.

Langkah selanjutnya dari penentuan kapasitas *hosting* stokastik PLTS tersebar adalah pengerjaan iterasi pertama dari simulasi Markov Chain Monte Carlo. Iterasi ini dikerjakan berulang hingga tercapai 100% simulasi. Jika belum tercapai, maka simulasi akan terus diulang. Pada setiap iterasi, penyebaran PLTS dikerjakan berdasarkan skenario penetrasi dan metode Markov Chain Monte Carlo yang dirancang. Untuk setiap proses penetrasi, aliran dayanya dihitung. Mangacu pada kerangka runtun waktu yang telah dirancang, perhitungan aliran daya dilakukan untuk setiap sampel waktu. Hal ini dikerjakan untuk menginvestigasi dampak pene-



Gambar 3.6. Diagram alir dari usulan metode mengenai penentuan kapasitas *hosting* stokastik untuk PLTS tersebar dengan Markov Chain Monte Carlo.

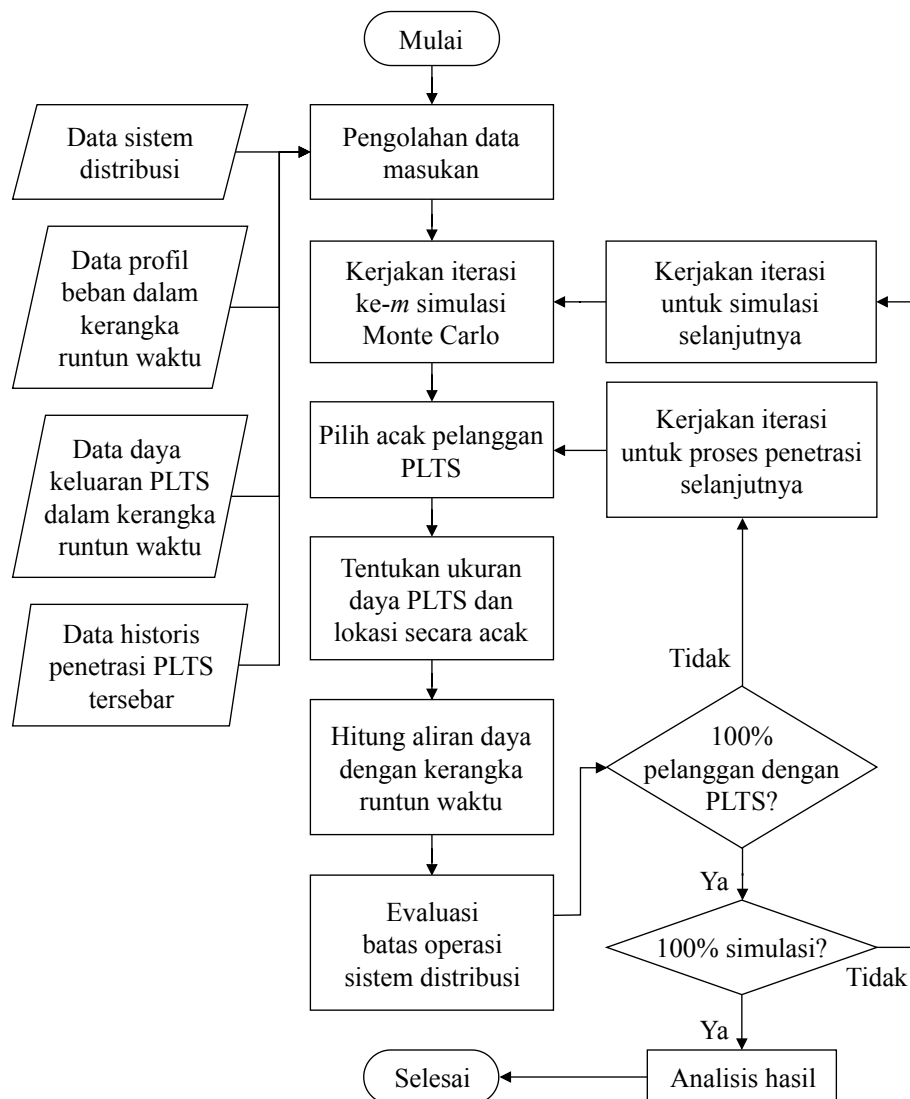
trasi pada setiap perubahan daya keluaran PLTS dan permintaan beban. Setelah itu, pengaruh penetrasi PLTS tersebar terhadap batas operasi sistem distribusi tenaga listrik diinvestigasi. Dalam hal ini, level penetrasi pelanggan dan level penetrasi daya digunakan sebagai kendali iterasi dalam menentukan kapasitas *hosting* stokastik. Kapasitas *hosting* merupakan level penetrasi daya sebelum terjadi pelanggaran batas operasi. Proses penetrasi ini dilakukan secara iteratif hingga tercapai 100% level penetrasi, baik level penetrasi pelanggan, maupun level penetrasi daya. Setelah semua simulasi dilakukan, langkah terakhir adalah analisis hasil.

Untuk mengukur performa metode berbasis Markov Chain Monte Carlo yang diusulkan, penelitian disertasi ini menyediakan perbandingan kinerja metode tersebut dengan metode sebelumnya. Sebagai pembanding, metode berbasis Monte Carlo dirancang. Terkait hal tersebut, penulis telah melakukan beberapa penelitian terkait dengan metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik berbasis Monte Carlo. Seperti yang diperlihatkan pada Tabel 3.1, penelitian-penelitian yang telah

Tabel 3.1. Penelitian yang Dikerjakan Sebelumnya oleh Penulis Terkait Penentuan Kapasitas *hosting* Stokastik Berbasis Monte Carlo

Referensi	Topik	Variabel ketidakpastian	Jenis Naskah
W. Y. Atmaja dkk., 2019 [37]	Estimasi kapasitas <i>hosting</i>	Pelanggan, lokasi integrasi, permintaan beban, daya keluaran PLTS	Artikel prosiding
W. Y. Atmaja dkk., 2019 [92]	Peningkatan kapasitas <i>hosting</i>	Pelanggan, ukuran daya PLTS (data historis), lokasi integrasi, permintaan beban, daya keluaran PLTS	Tesis
W. Y. Atmaja dkk., 2019 [38]	Peningkatan kapasitas <i>hosting</i>	Pelanggan, ukuran daya PLTS (1–6 kW), lokasi integrasi, permintaan beban, daya keluaran PLTS	Artikel prosiding
W. Y. Atmaja dkk., 2020 [39]	Evaluasi kapasitas <i>hosting</i>	Pelanggan, lokasi integrasi, permintaan beban, daya keluaran PLTS	Artikel prosiding

dilakukan meliputi estimasi kapasitas *hosting* stokastik [37], peningkatan kapasitas



Gambar 3.7. Diagram alir penentuan kapasitas *hosting* stokastik untuk PLTS tersebar dengan Monte Carlo.

*hosting* stokastik [38, 92], dan evaluasi kapasitas *hosting* stokastik [39]. Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dihasilkan tersebut, sebuah metode Monte Carlo dirancang pada penelitian ini dan diimplementasikan dengan menggunakan data-data jaringan distribusi dan data-data PLTS yang sama dengan yang diterapkan pada metode Markov Chain Monte Carlo.

Diagram alir penentuan kapasitas *hosting* stokastik untuk PLTS tersebar dengan Monte Carlo ditunjukkan pada Gambar 3.7. Monte Carlo yang digunakan pada penelitian ini menggunakan konsep dasar Monte Carlo yang digunakan

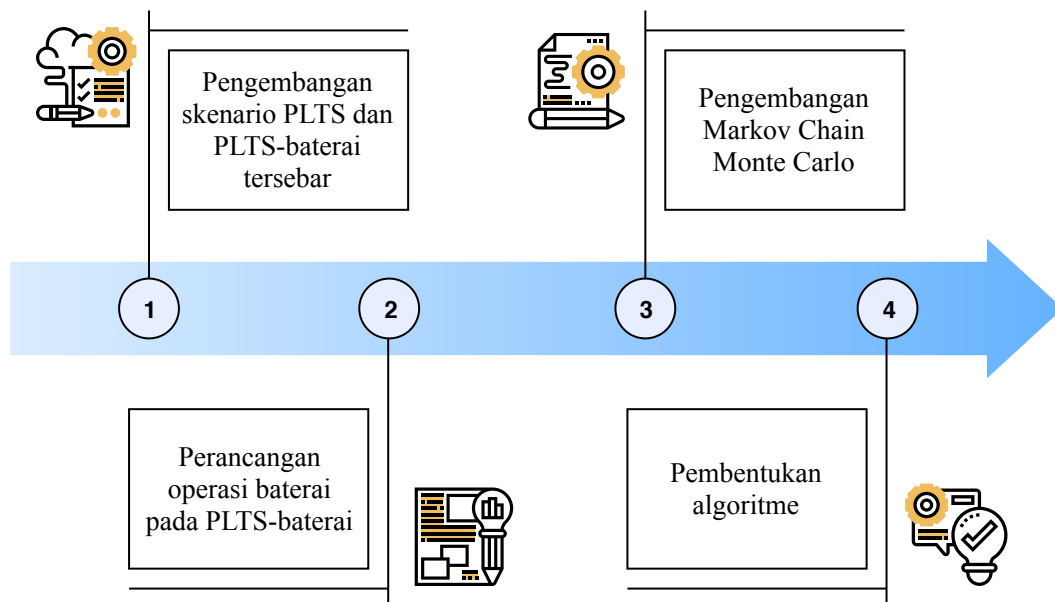
pada [15, 16, 34, 35, 92]. Meskipun demikian, beberapa pengembangan perlu dilakukan untuk disesuaikan dengan studi kasus pada penelitian ini agar studi perbandingan yang dilakukan proporsional. Dalam hal ini, secara manual dilakukan pemisahan kategori pelanggan seperti pada [16, 34], tetapi tidak hanya komersial dan rumah tangga. Kategori pelanggan yang diterapkan pada penelitian disertasi ini meliputi rumah tangga, pendidikan, komersial, industri, dan militer. Pengerjaan iterasi-iterasi dari simulasi Monte Carlo dan iterasi-iterasi proses penetrasinya sama dengan penelitian pada [15, 35, 92]. Selanjutnya, berbeda dengan penelitian pada [15, 35] yang menerapkan 2% pelanggan untuk setiap proses penetrasi, penelitian disertasi ini menggunakan mekanisme pemilihan pelanggan PLTS berupa satu pelanggan pada setiap proses penetrasi [92]. Meskipun begitu, berbeda dengan penelitian pada [92] yang menggunakan resolusi pengamatan 10 menit untuk kerangka runtun waktunya, atau resolusi 1 jam seperti pada [15], penelitian ini menggunakan resolusi pengamatan 1 menit. Setelah proses penyebaran PLTS, prosedur selanjutnya adalah perhitungan daya dan dilanjutkan dengan evaluasi batas operasi sistem distribusi. Sebagai tambahan, metode Monte Carlo tidak membutuhkan pembentukan probabilitas-probabilitas dari *states*-nya. Oleh karena itu, pengolahan data hanya dilakukan dengan membentuk PMF. Setiap pelanggan PLTS dipilih secara acak dari PMF tersebut dengan kepatuhan pada distribusi normal. Secara umum, pada studi perbandingan yang dilakukan ini, perbedaannya hanya terdapat pada metode Monte Carlo dan Markov Chain Monte Carlo, serta pengolahan masing-masing data masukannya. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, hal ini dilakukan agar studi perbandingan yang proporsional dapat disediakan.

### **3.2.5 Pengembangan Metode dengan Pertimbangan PLTS dan PLTS-Baterai Tersebar**

Pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik untuk penetrasi PLTS dan PLTS-baterai tidak hanya dilakukan dengan menambahkan baterai pada skenario penetrasi yang telah dirancang, tetapi dengan memasukkan probabilitas mengenai adanya kemungkinan pelanggan yang menyambungkan PLTS-baterai pada sistem distribusi tenaga listrik. Selain itu, karakteristik operasi baterai juga



dipertimbangkan. Akibatnya, hal tersebut meningkatkan ketidakpastian pada aliran dayanya. Proses pengembangan metode ini diperlihatkan pada Gambar 3.8.

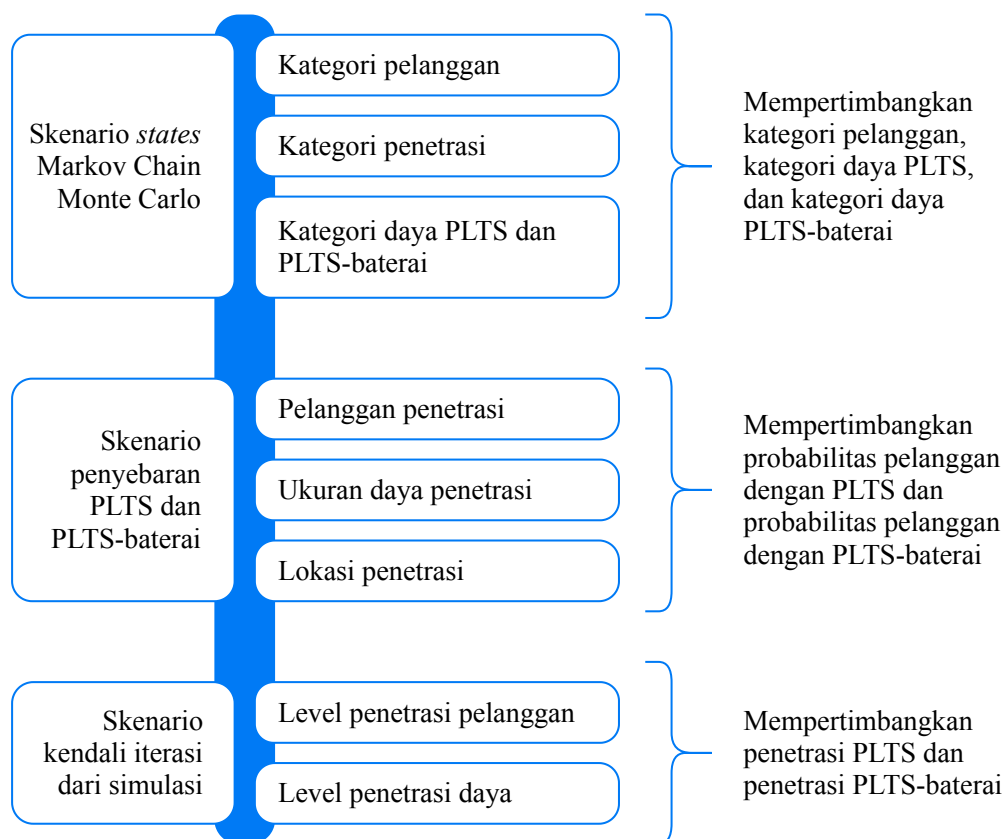


Gambar 3.8. Proses pengembangan metode dengan pertimbangan PLTS dan PLTS-baterai tersebar.

Proses pengembangan metode dimulai dengan melakukan pengembangan skenario dari penetrasi PLTS dan PLTS-baterai tersebar pada jaringan distribusi tenaga listrik tegangan rendah. Setelah itu, operasi baterai pada PLTS-baterai dirancang. Proses selanjutnya adalah perancangan Markov Chain Monte Carlo untuk penentuan kapasitas *hosting* stokastik. Pada proses terakhir, algoritme dari metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik dibentuk berdasarkan proses-proses sebelumnya.

### 3.2.5.1 Pengembangan Skenario Penetrasi PLTS dan PLTS-Baterai Tersebar

Seperti ditunjukkan pada Gambar 3.9, pengembangan skenario penetrasi PLTS dan PLTS-baterai tersebar dimulai dengan perancangan skenario *states* untuk Markov Chain Monte Carlo yang diusulkan. Proses ini mempunyai tiga kategori yang mewakili *states* yang dibentuk, yaitu kategori pelanggan, kategori penetrasi, dan kategori daya PLTS dan PLTS-baterai. Proses selanjutnya adalah perancangan skenario penyebaran PLTS dan PLTS-baterai yang meliputi perancangan skenario



Gambar 3.9. Proses pengembangan skenario-skenario penetrasi PLTS dan PLTS-baterai tersebar.

pelanggan penetrasi, ukuran daya penetrasi, dan lokasi penetrasi. Proses terakhir adalah perancangan skenario kendali iterasi dari simulasi. Pada proses ini, level penetrasi pelanggan dan level penetrasi daya dirancang. Meskipun sebagian istilah sudah dideskripsikan pada perancangan skenario-skenario penetrasi PLTS, pada bagian ini setiap skenario dirancang dengan pertimbangan PLTS dan PLTS-baterai.

Pada perancangan skenario *states* Markov Chain Monte Carlo, kategori pelanggan masih sama dengan rancangan sebelumnya, yaitu rumah tangga, pendidikan, komersial, industri, dan militer. Meskipun demikian, pada bagian ini, kategori penetrasi perlu dibentuk. Kategori penetrasi membagi penetrasi antara pelanggan-pelanggan yang mengintegrasikan PLTS saja dan pelanggan-pelanggan yang mengintegrasikan PLTS-baterai ke jaringan distribusi. Selanjutnya, kategori daya PLTS dan PLTS-baterai dirancang karena daya PLTS-baterai perlu dimasukkan kedalam perhitungan.

Untuk skenario penyebaran PLTS dan PLTS-baterai, masing-masing dari pelanggan penetrasi, ukuran daya penetrasi, dan lokasi daya penetrasi dibagi menjadi dua kategori. Kategori-kategori tersebut adalah kategori untuk PLTS saja dan PLTS-baterai. Hal yang berlainan diterapkan pada skenario kendali iterasi dari simulasi. Pada skenario ini, level penetrasi pelanggan dan level penetrasi daya sudah meliputi, baik untuk pelanggan dengan PLTS maupun PLTS baterai. Tidak ada pemisahan pada bagian ini. Hal ini dilakukan karena tujuan dari skenario ini adalah pengendalian iterasi yang didasarkan pada jumlah total pelanggan yang sudah melakukan penetrasi dan jumlah total daya yang telah dipenetrasikan pada sistem distribusi.

### 3.2.5.2 Perancangan Operasi Baterai pada PLTS-Baterai

Baterai membutuhkan sistem kendali dalam operasinya, terutama untuk *charging* dan *discharging*. Hal ini untuk mengeliminasi masalah-masalah yang mungkin terjadi, seperti *charging* berlebihan atau *discharging* berlebihan. Sistem baterai seperti ini dikenal dengan istilah *battery energy storage system* (BESS). Dalam hal ini, *state of charge* (SoC) adalah istilah untuk menyebut kondisi *charging* dan *discharging* tersebut. Dengan mengetahui hal-hal tersebut, dapat dipahami bahwa kendali SoC penting pada sistem distribusi terkait dengan penetrasi PLTS-baterai tersebar. Strategi *charging* dan *discharging* yang tepat dan kepatuhan kepada rekomendasi-rekomendasi dari manufaktur diperlukan untuk mencapai keluaran daya yang maksimal, efisiensi yang optimal, dan umur hidup dari baterai. Operasi BESS dimodelkan sebagai berikut

$$SoC_{t+1} = SoC_t + \frac{T_s}{B_s} (\eta^{ch} P_t^{ch} - \eta^{dis} P_t^{dis}), \quad (3-6)$$

dengan *SoC* adalah *state variable* SoC,  $\eta^{ch}$  adalah efisiensi *charging*,  $\eta^{dis}$  adalah efisiensi *discharging*,  $T_s$  adalah sampel waktu,  $B_s$  adalah kapasitas baterai,  $P_t^{ch}$  adalah daya *charging* pada waktu  $t$ , dan  $P_t^{dis}$  adalah daya *discharging* pada waktu  $t$ .

Dalam operasi sistem distribusi tenaga listrik dengan adanya penetrasi

PLTS-baterai, hubungan antara daya baterai  $P_{Batt,t}$ , daya PLTS  $P_{PV,t}$ , permintaan daya beban  $P_{L,t}$ , dan suplai daya dari jaringan  $P_{g,t}$  pada suatu waktu  $t$ , yaitu sebagai berikut

$$P_{g,t} = P_{L,t} - (P_{PV,t} + P_{Batt,t}), \quad (3-7)$$

dengan

$$P_{Batt,t} = -P_t^{ch} + P_t^{dis}. \quad (3-8)$$

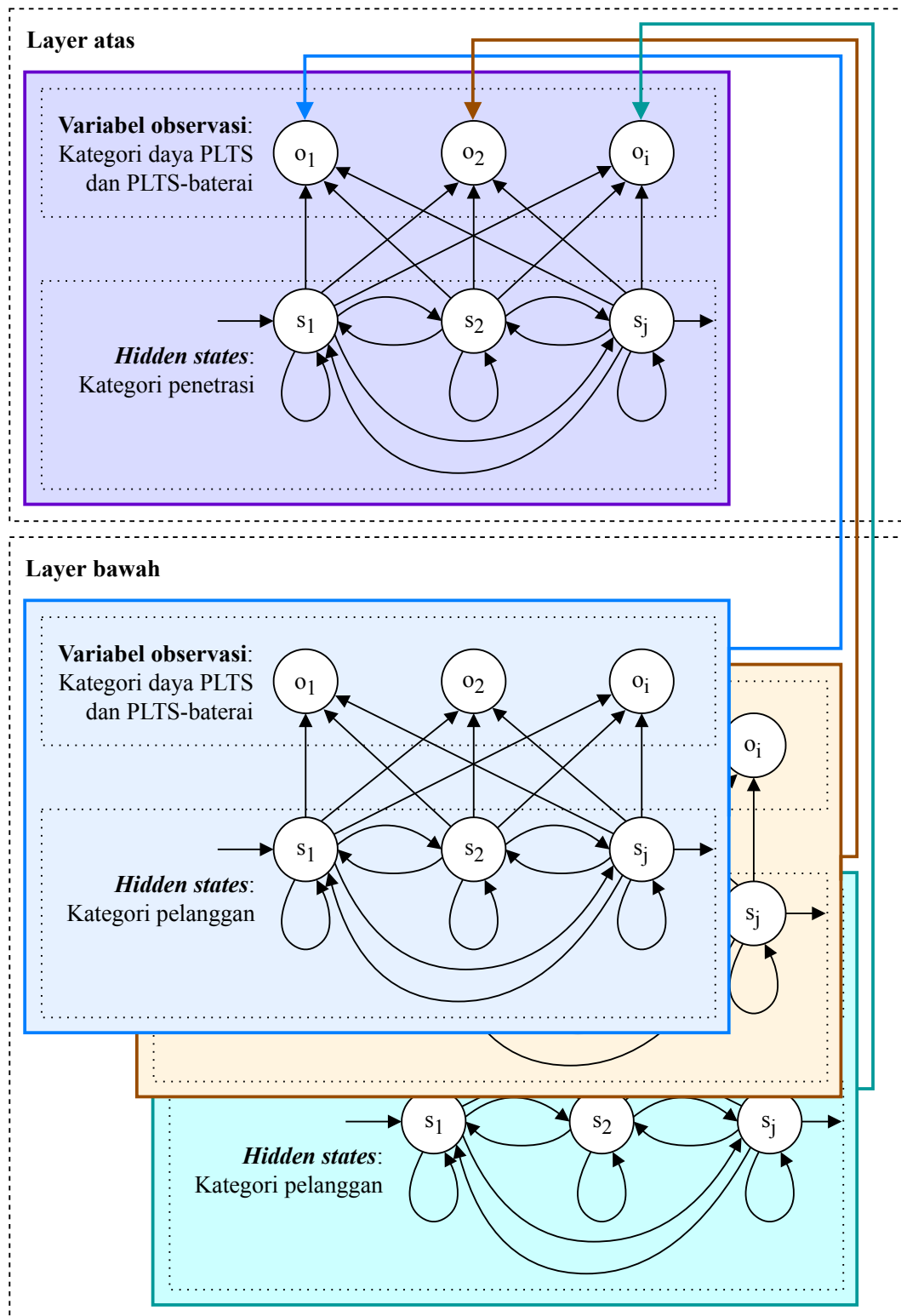
### 3.2.5.3 Pengembangan Markov Chain Monte Carlo

Selain untuk meningkatkan akurasi, tujuan pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik dengan Markov Chain Monte Carlo adalah untuk meningkatkan tingkat representatif, yaitu dengan mempertimbangkan PLTS-baterai sebagai ketidakpastian yang muncul saat penetrasi. Seperti yang telah dijelaskan, dengan memasukkan kriteria penetrasi PLTS-baterai, terdapat tiga kategori yang perlu dipertimbangkan. Ketiga kategori tersebut adalah, kategori pelanggan, kategori penetrasi, serta kategori daya PLTS dan PLTS-baterai. Untuk tujuan tersebut, penelitian disertasi ini mengembangkan layered hidden Markov model untuk pendekatan Markov Chain Monte Carlo yang diusulkan. Terkait hal tersebut, diagram layered hidden Markov model diilustrasikan pada Gambar 3.10.

Layered hidden Markov model yang diusulkan pada penelitian disertasi ini terdiri atas dua layer, yaitu layer bawah dan layer atas. Masing-masing dari kedua layer tersebut terdiri atas hidden Markov model. Pada layer bawah, *hidden states*-nya merupakan kategori pelanggan, sedangkan variabel observasinya adalah kategori daya PLTS dan PLTS-baterai. Variabel observasi ini didapat dari data historis. Dengan sejumlah  $n$  hidden Markov model,  $n$  keluaran dihasilkan. Keluaran ini menjadi variabel-variabel observasi pada layer atas. Selanjutnya, *hidden states* dari layer atas adalah kategori penetrasi.

Rancangan layered hidden Markov model pada penelitian ini menggunakan delapan parameter yaitu

1. Jumlah *hidden states* pada layer bawah.
2. Jumlah *hidden states* pada layer atas



Gambar 3.10. Blok diagram layered hidden Markov model yang diusulkan.

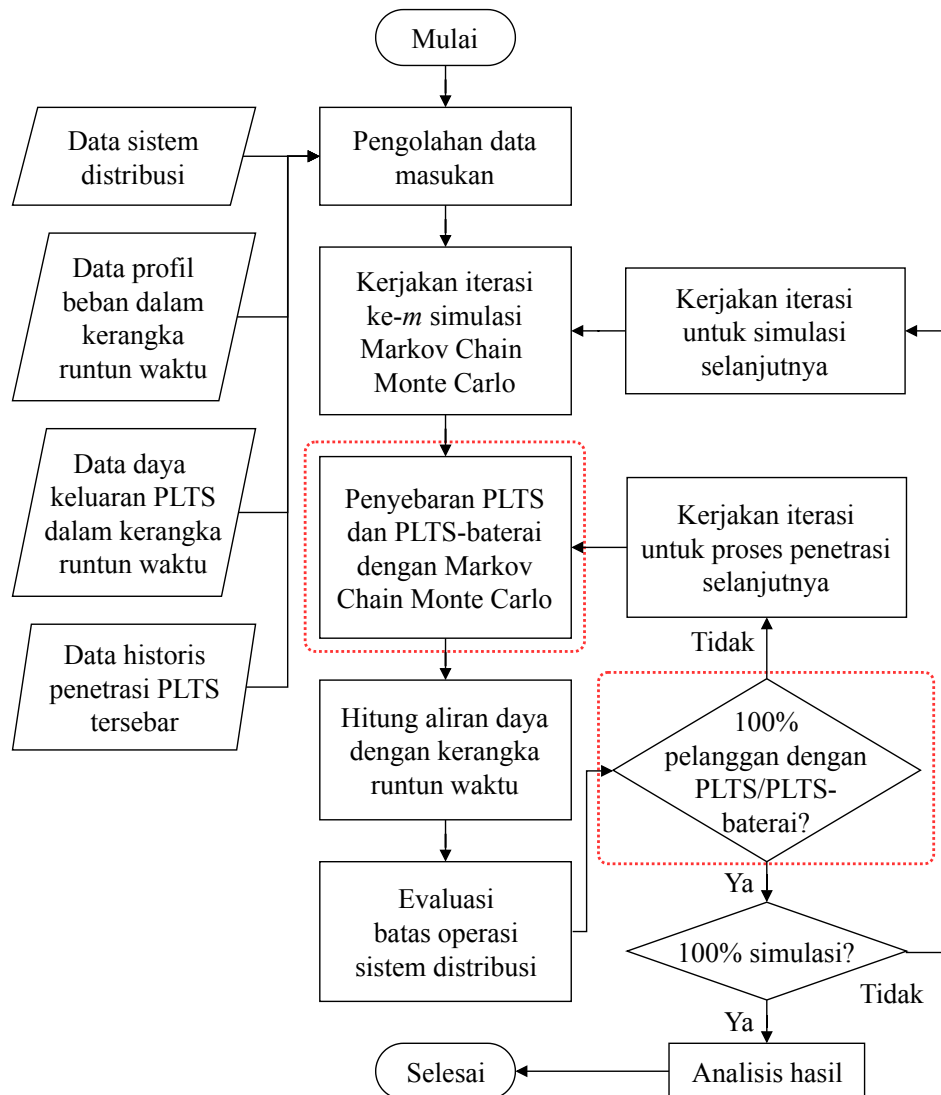
3. Jumlah variabel observasi.
4. Probabilitas transisi layer bawah.
5. Probabilitas transisi layer atas.
6. Probabilitas keluaran.
7. Probabilitas awal dari *states* pada layer bawah.
8. Probabilitas awal dari *states* pada layer atas.

Jumlah *hidden states*, baik layer bawah maupun layer atas, diperoleh dari data historis. Jumlah variabel observasi merupakan banyaknya variabel-variabel observasi untuk setiap *hidden state*. Selanjutnya, probabilitas transisi layer bawah dan probabilitas keluaran layer atas dihitung dengan menggunakan Persamaan (3-4), sedangkan probabilitas keluaran dihitung dengan menggunakan Persamaan (3-5). Setelah probabilitas-probabilitas tersebut didapatkan, langkah selanjutnya adalah membuat matriks, baik untuk probabilitas transisi maupun probabilitas keluaran.

#### 3.2.5.4 Pembentukan Algoritme

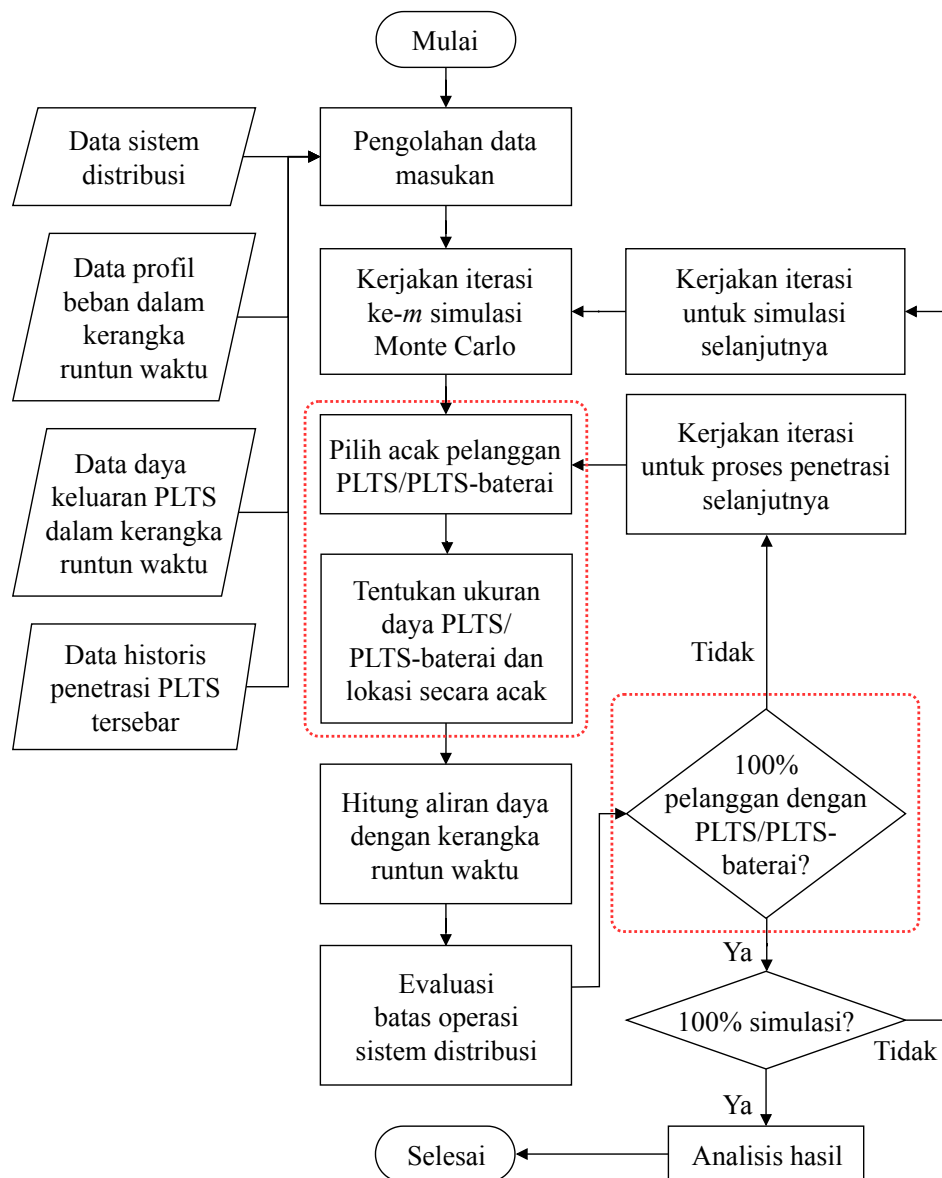
Pembentukan algoritme penentuan kapasitas *hosting* stokastik pada penetrasi PLTS dan PLTS-baterai tersebar dengan Markov Chain Monte Carlo dilakukan dengan berdasarkan pada diagram alir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.11. Diagram alir ini dibuat dengan mengambil dasar diagram alir penentuan kapasitas *hosting* stokastik pada penetrasi PLTS tersebar yang ditunjukkan pada Gambar 3.6. Dari sisi pengolahan data masukan, untuk masing-masing penyedia layanan listrik yang digunakan dalam penelitian ini, tiga kategori dibentuk. Deskripsi mengenai ketiga kategori ini telah disediakan pada bagian sebelumnya. Dari ketiga kategori tersebut, kategori penetrasi serta kategori daya PLTS dan PLTS-baterai merupakan kategori yang dirancang karena terdapatnya pertimbangan PLTS-baterai.

Pada penetrasi PLTS dan PLTS-baterai tersebar ini, seperti skenario-skenario yang telah dirancang, probabilitas terdapatnya pelanggan-pelanggan yang mengintegrasikan PLTS-baterai ke sistem distribusi tegangan rendah diperhitungkan. Selain itu, penetrasi PLTS-baterai mempengaruhi hitungan analisis aliran dayanya. Hal ini terjadi karena baterai mempunyai



Gambar 3.11. Diagram alir dari usulan metode mengenai penentuan kapasitas *hosting* stokastik untuk PLTS tersebar dengan Markov Chain Monte Carlo.

karakteristik operasi yang berbeda dengan PLTS. Selanjutnya, pada pengendalian iterasinya, simulasi dihentikan ketika seluruh pelanggan telah memasang baik PLTS maupun PLTS-baterai. Untuk menguji metode yang diusulkan ini, studi perbandingan dengan metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik untuk penetrasi PLTS dan PLTS-baterai juga dilakukan. Diagram alir penentuan kapasitas *hosting* stokastik untuk PLTS tersebar dengan Monte Carlo diilustrasikan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12. Diagram alir penentuan kapasitas *hosting* stokastik untuk PLTS tersebar dengan Monte Carlo.

### 3.3 Proses Analisis Hasil

Hasil-hasil penelitian merupakan nilai-nilai keluaran yang didapat dari penerapan metode yang diusulkan pada studi kasus yang dirancang. Untuk mengukur kinerja dari metode yang diusulkan, metode sebelumnya yaitu yang berbasis Monte Carlo dirancang dan juga disimulasikan. Terkait hal tersebut, kerangka analisis penelitian dan penarikan kesimpulan perlu dirancang agar hasil-hasil penelitian dapat diinterpretasikan dengan tepat. Pada penelitian ini, analisis dibagi



menjadi dua bagian besar, yaitu analisis hasil kapasitas *hosting* stokastik dan evaluasi akurasi.

### **3.3.1 Analisis Hasil Kapasitas *hosting* Stokastik**

Analisis hasil kapasitas *hosting* stokastik dilakukan dengan mendiskusikan hasil-hasil kapasitas *hosting* stokastik dari penerapan metode yang diusulkan. Analisis ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu pengaruh penetrasi PLTS dan PLTS-baterai terhadap kapasitas *hosting* stokastik dan pengaruh penetrasi PLTS dan PLTS-baterai terhadap batas operasi sistem distribusi.

#### **3.3.1.1 Pengaruh Penetrasi PLTS dan PLTS-Baterai terhadap Kapasitas *hosting* Stokastik**

Pengaruh penetrasi PLTS dan PLTS-baterai terhadap kapasitas *hosting* stokastik perlu dianalisis. Karena penetrasi tersebut dipengaruhi oleh karakteristik-karakteristik ketidakpastian, analisis tersebut dilakukan dengan mengamati pengaruh dari karakteristik-karakteristik ketidakpastian tersebut terhadap kapasitas *hosting* stokastik.

#### **3.3.1.2 Pengaruh Penetrasi PLTS dan PLTS-Baterai terhadap Batas Operasi Sistem Distribusi**

Karena penelitian ini menggunakan tegangan lebih sebagai batas operasi sistem distribusi yang diamati, maka disini dianalisis pengaruh dari penetrasi PLTS dan PLTS-baterai terhadap tegangan lebih di jaringan distribusi.

#### **3.3.1.3 Studi Sensitivitas**

Karena penelitian ini mengimplementasikan proses acak, sebuah studi sensitivitas dibutuhkan untuk menganalisis pengaruh variabel masukan terhadap variabel keluaran. Hasil dari studi sensitivitas ini adalah karakteristik aplikatif dari usulan metode untuk penentuan kapasitas *hosting* stokastik, seperti pengaruh variabel-variabel masukan untuk usulan-usulan solusi terhadap kapasitas *hosting*, serta pengaruh parameter-parameter sistem distribusi terhadap kapasitas *hosting*.

stokastik. Pada bagian ini juga dilakukan analisis terhadap masing-masing usulan solusi yang ditunjukkan pada Tabel 2.6. Pengaruh dari usulan-usulan solusi tersebut diamati dampaknya terhadap kapasitas *hosting* stokastik yang dikerjakan.

### 3.3.2 Evaluasi Akurasi

Untuk mengevaluasi akurasi dari metode yang diusulkan, Persamaan (2-16) dan Persamaan (2-18) digunakan pada penelitian disertasi ini. Persamaan (2-16) adalah formula perhitungan untuk akurasi metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik yang diusulkan dalam merasakan pelanggaran batas operasi sistem distribusi. Persamaan (2-18) adalah formula perhitungan MAE. Dengan MAE, eror dari metode yang diusulkan untuk penentuan kapasitas *hosting* stokastik diukur dengan dasar nilai-nilai data historis penetrasi PLTS dan PLTS-baterai.

## BAB IV

### KEMAJUAN PENELITIAN

Bab ini menyediakan kemajuan-kemajuan penelitian yang sudah didapatkan. Penelitian ini dimulai dengan merancang metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik untuk penetrasi PLTS tersebar dengan menggunakan Markov Chain Monte Carlo sederhana, belum menggunakan *hidden Markov model*.

#### 4.1 Rancangan Skenario Penetrasi PLTS Tersebar

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

$$A = \{A^1, A^2, \dots, A^m, \dots, A^u\}. \quad (4-1)$$

Dalam penelitian ini, jumlah semua skenario penetrasi  $u$  juga merepresentasikan jumlah simulasi Markov Chain Monte Carlo.

2. *States dari Markov Chain Monte Carlo*: Pada penelitian ini, *states* dari Markov Chain Monte Carlo merepresentasikan kluster yang mungkin dari pelanggan, yaitu

$$Y = \{y|y \text{ adalah kluster dari pelanggan}\}. \quad (4-2)$$

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

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

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

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

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

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

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

$$C_j^k = \{c_{j,1}^k, c_{j,2}^k, \dots, c_{j,m}^k, \dots, c_{j,u}^k\}. \quad (4-5)$$

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 Chain Monte Carlo. Ukuran daya penetrasi  $x_{j,k}^m$  dirumuskan dalam himpunan

ukuran daya penetrasi  $X_j^m$  sebagai

$$X_j^m = \{x_{j,1}^m, x_{j,2}^m, \dots, x_{j,k}^m, \dots, x_{j,w}^m\}, \quad (4-6)$$

dan dapat dirumuskan sebagai

$$X_j^k = \{x_{j,1}^k, x_{j,2}^k, \dots, x_{j,m}^k, \dots, x_{j,u}^k\}. \quad (4-7)$$

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

$$cp_k^m = k, \quad (4-8)$$

dan untuk semua penetrasi,

$$cp_w^m = w, \quad (4-9)$$

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

$$CP^m = \{cp_1^m, cp_2^m, \dots, cp_k^m, \dots, cp_w^m\}. \quad (4-10)$$

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

$$xp_k^m = \sum_{k=1}^k x_{j,k}^m, \quad (4-11)$$

jika telah tercapai 100% penetrasi maka

$$xp_w^m = \sum_{k=1}^w x_{j,k}^m, \quad (4-12)$$

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

$$XP^m = \{xp_1^m, xp_2^m, \dots, xp_k^m, \dots, xp_w^m\}. \quad (4-13)$$

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

$$l_{j,k}^m = location(c_{j,k}^m), \quad (4-14)$$

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

$$L_j^m = \{l_{j,1}^m, l_{j,2}^m, \dots, l_{j,k}^m, \dots, l_{j,w}^m\}. \quad (4-15)$$

9. *Daya keluaran PLTS*: Himpunan daya-daya keluaran PLTS untuk suatu rentang waktu pada skenario penetrasi ke- $m$  dan proses penetrasi ke- $k$  didefinisikan sebagai daya keluaran PLTS  $e_k^m$ . Untuk skenario penetrasi ke- $m$ , daya-daya keluaran PLTS diformulasikan sebagai

$$E^m = \{E_1^m, E_2^m, \dots, E_k^m, \dots, E_w^m\}. \quad (4-16)$$

dengan daya keluaran PLTS  $E_k^m$  dideskripsikan sebagai

$$E_k^m = \{e_{k,1}^m, e_{k,2}^m, \dots, e_{k,t}^m, \dots, e_{w,v}^m\}. \quad (4-17)$$

10. *Permintaan beban*: Permintaan beban  $g_k^m$  dideskripsikan sebagai himpunan permintaan-permintaan beban untuk suatu rentang waktu pada skenario penetrasi ke- $m$  dan proses penetrasi ke- $k$ . Untuk skenario penetrasi ke- $m$ , permintaan-permintaan beban dirumuskan sebagai

$$G^m = \{G_1^m, G_2^m, \dots, G_k^m, \dots, G_w^m\}. \quad (4-18)$$

dengan permintaan beban  $G_k^m$  diformulasikan sebagai

$$G_k^m = \{g_{k,1}^m, g_{k,2}^m, \dots, g_{k,t}^m, \dots, g_{w,v}^m\}. \quad (4-19)$$

## 4.2 Algoritme

Dengan menggunakan diagram alir penentuan kapasitas *hosting* stokastik untuk PLTS tersebar yang ditunjukkan pada Gambar 3.6, dan dengan skenario-skenario penetrasi PLTS yang telah dirancang, Algoritme 1 dirancang.

---

**Algorithm 1** Markov Chain Monte Carlo untuk Penentuan Kapasitas *Hosting* Stokastik

---

```

1: procedure MAKESETPHOTOVOLTAICPENETRATION
2:   Create sorted data set  $D$ 
3: end procedure
4:
5: procedure MAKESETPHOTOVOLTAICPENETRATION
6:   MAKESETPHOTOVOLTAICPENETRATION
7:   Create set  $Y$  from set  $D$ 
8: end procedure
9:
10: procedure OBTAINLOADCURVE
11:   Obtain load curve containing load demands in time-series
12: end procedure
13:
14: procedure OBTAINPHOTOVOLTAICOUTPUT
15:   Obtain photovoltaic output in time-series
16: end procedure
17:
18: procedure MAKESETPHOTOVOLTAICALLOCATION
19:   Create set  $A$  using Eq. (4-1)
20:   Create set  $A^m$  using Eq. (4-3)
21: end procedure
22:
23: procedure MAKESETCUSTOMERWITHPHOTOVOLTAIC
24:   Create  $C_j^m$  using Eq. (4-4)
25: end procedure
26:
27: procedure MAKESETPHOTOVOLTAICSIZE
28:   Create  $X_j^m$  using Eq. (4-6)
29: end procedure
30:
31: function CALCULATECP
32:   Calculate  $cp_k^m$  using Eq. (4-8)
33:   return  $cp_k^m$ 
34: end function
35:
36: function CALCULATEXP
37:   Calculate  $xp_k^m$  using Eq. (4-11)
38:   return  $xp_k^m$ 
39: end function
40:
41: procedure MAKESETINTEGRATIONLOCATION
42:   Create  $L_j^m$  using Eq. (4-15)
43: end procedure

```

---



---

**Algorithm 1** Markov Chain Monte Carlo untuk Penentuan Kapasitas *Hosting* Stokastik

---

```

44: function CALCULATEH
45:   Calculate  $h^m$  using Eq. (3-1)
46:   return  $h^m$ 
47: end function
48:
49: function TRANSPROBMATRIX
50:   MAKESETMARKOVSTATES
51:   for each  $\{y_i, y_j\}$  in  $Y$  do
52:      $y_i \leftarrow$  prior outcome value
53:      $y_j \leftarrow$  posterior outcome value
54:     Calculate  $p_{ij}$  using Eq. (??)
55:   end for
56:   Create  $r \times r$  transition probability matrix  $\mathbf{P}$  with  $p_{ij}$  as entries
57:   return matrix  $\mathbf{P}$ 
58: end function
59:
60: function PERFORMPHOTOVOLTAICALLOCATION
61:   if  $r$  changes then
62:     Update  $Y$  with remaining  $y$ 
63:   end if
64:   for each  $k$  in rooftop photovoltaic process  $a_k^m$  do
65:     TRANSPROBMATRIX( $a_k^m$ )
66:     Calculate state  $y_j$  given state  $y_i$  using matrix  $\mathbf{P}$ 
67:   end for
68:   return State  $y_j$ 
69: end function
70:
71: function PERFORMMARKOVCHAINSMONTECARLO
72:   OBTAINLOADCURVE
73:   OBTAINPHOTOVOLTAICOUTPUT
74:   Construct a code of the distribution grid under study
75:   Define the operational limits concerned
76:   Initialize  $m : m = 1$ 
77:   Initialize  $k : k = 1$ 
78:   Obtain  $a_k^m$ 
79:   MAKESETPHOTOVOLTAICALLOCATION
80:   Initialize  $y_j$ 
81:   Obtain  $c_{j,k}^m$ ,  $x_{j,k}^m$ , and  $l_{j,k}^m$ 
82:   MAKESETCUSTOMERWITHPHOTOVOLTAIC
83:   MAKESETPHOTOVOLTAICSIZE
84:   MAKESETINTEGRATIONLOCATION
85:   while  $m$  in  $cp_k^m \neq u$  do
86:     CALCULATECP
87:     CALCULATEXP

```

---

---

**Algorithm 1** Markov Chain Monte Carlo untuk Penentuan Kapasitas *Hosting* Stokastik

---

```

88:      if  $m \geq 2$  then
89:          Update  $a_k^m$ 
90:      end if
91:      while  $k$  in  $cp_k^m \neq w$  do
92:          if  $k \geq 2$  then
93:               $y_i \leftarrow y_j$ 
94:              PERFORMPHOTOVOLTAICALLOCATION
95:              Determine  $c_{j,k}^m$ ,  $x_{j,k}^m$ , and  $l_{j,k}^m$ 
96:          end if
97:          Penetrate rooftop photovoltaic using  $c_{j,k}^m$ ,  $x_{j,k}^m$ , and  $l_{j,k}^m$ 
98:          Run power flow in time-series
99:          Evaluate the results using the operational limits
100:         if violation occurs at  $xp_k^m$  then
101:             Determine  $xp_{k-1}^m$  as rooftop photovoltaic hosting capacity
102:         end if
103:         Update  $k$  :  $k = k + 1$ 
104:     end while
105:     Calculate  $h_{min}$  using Eq. (3-2)
106:     Update  $m$  :  $m = m + 1$ 
107: end while
108: return  $A^m$ ,  $C_j^m$ ,  $X_j^m$ ,  $CP^m$ ,  $XP^m$ ,  $L_j^m$ , and  $h_{min}$ 
109: Record the desired results
110: end function

```

---

## BAB V

### JADWAL PENELITIAN

Aktivitas	2020 (Semester 1)						2021 (Semester 2)					
	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
Studi pustaka dan persiapan												
Perumusan masalah dan hipotesis												
Pengumpulan data												
Pemodelan sistem distribusi												
Uji validitas model sistem distribusi												
<b>Tahap I:</b> Perancangan metode dengan <i>Markov model</i>												
Simulasi, evaluasi, dan perbaikan												
Ujian komprehensif												
Penyusunan dan pengiriman artikel I												

Aktivitas	2021 (Semester 3)						2022 (Semester 4)					
	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
<b>Tahap II:</b> Pengembangan metode dengan <i>hidden Markov model</i>												
Simulasi, evaluasi, dan perbaikan												
Penyusunan dan pengiriman artikel II												
Seminar hasil I												
<b>Tahap III:</b> Pengembangan metode dengan PLTS-baterai menggunakan <i>layered hidden Markov model</i>												
Simulasi, evaluasi, dan perbaikan												
Penyusunan dan pengiriman artikel III												



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Energy Agency Photovoltaics Power Systems, “2020 Snapshot of Global PV Markets,” International Energy Agency, Tech. Rep., 2020.
- [2] International Renewable Energy Agency, “Renewable Capacity Statistics 2020,” International Renewable Energy Agency, Tech. Rep., 2020.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] A. Y. Elrayyah, 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] J. Abreu, N. Wingartz, and N. Hardy, “New Trends in Solar: A Comparative Study Assessing the Attitudes Towards the Adoption of Rooftop PV,” *Energy Policy*, vol. 128, pp. 347–363, 2019.
- [11] S. Comello, S. Reichelstein, and A. Sahoo, “The Road Ahead for Solar PV Power,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, pp. 744–756, 2018.

- [12] E. Karakaya, A. Hidalgo, and C. Nuur, “Motivators for Adoption of Photovoltaic Systems at Grid Parity: A Case Study from Southern Germany,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 1090–1098, 2015.
- [13] K. Handayani, Y. Krozer, and T. Filatova, “From Fossil Fuels to Renewables: An Analysis of Long-Term Scenarios Considering Technological Learning,” *Energy Policy*, vol. 127, pp. 134–146, 2019.
- [14] M. Bollen and F. Hassan, *Integration of Distributed Generation in the Power System*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- [15] 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.
- [16] Electric Power Research Institute, “Stochastic Analysis to Determine Feeder Hosting Capacity for Distributed Solar PV,” Electric Power Research Institute, Tech. Rep., 2012.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] S. Conti and S. Raiti, “Probabilistic Load Flow Using Monte Carlo Techniques for Distribution Networks with Photovoltaic Generators,” *Solar Energy*, vol. 81, no. 12, pp. 1473–1481, 2007.

- [24] R. A. Shayani, M. A. G. de Oliveira, and M. D. Oliveira, "Photovoltaic Generation Penetration Limits in Radial Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 1625–1631, 2011.
- [25] M. N. Kabir, Y. Mishra, and R. C. Bansal, "Probabilistic Load Flow for Distribution Systems with Uncertain PV Generation," *Applied Energy*, vol. 163, pp. 343–351, 2016.
- [26] M. A. Abdelkader, Z. H. Osman, and M. A. Elshahed, "New Analytical Approach for Simultaneous Feeder Reconfiguration and DG Hosting Allocation in Radial Distribution Networks," *Ain Shams Engineering Journal*, 2020.
- [27] C. Wang and M. H. Nehrir, "Analytical Approaches for Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 2068–2076, 2004.
- [28] T. Gözel and M. H. Hocaoglu, "An Analytical Method for the Sizing and Siting of Distributed Generators in Radial Systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 6, pp. 912–918, 2009.
- [29] G. Mokryani, Y. F. Hu, P. Papadopoulos, T. Niknam, and J. Aghaei, "Deterministic Approach for Active Distribution Networks Planning with High Penetration of Wind and Solar Power," *Renewable Energy*, vol. 113, pp. 942–951, 2017.
- [30] R. H. Zubo, G. Mokryani, H. S. Rajamani, J. Aghaei, T. Niknam, and P. Pillai, "Operation and Planning of Distribution Networks with Integration of Renewable Distributed Generators Considering Uncertainties: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, no. May 2016, pp. 1177–1198, 2017.
- [31] 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.
- [32] P. A. Gooding, E. Makram, and R. Hadidi, "Probability Analysis of Distributed Generation for Island Scenarios Utilizing Carolinas Data," *Electric Power Systems Research*, vol. 107, pp. 125–132, 2014.
- [33] 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.
- [34] A. Dubey, S. Santoso, and A. Maitra, "Understanding Photovoltaic Hosting Capacity of Distribution Circuits," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2015.

- [35] 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.
- [36] V. Behraves, R. Keypour, and A. A. Foroud, "Stochastic Analysis of Solar and Wind Hybrid Rooftop Generation Systems and Their Impact on Voltage Behavior in Low Voltage Distribution Systems," *Solar Energy*, vol. 166, no. June 2017, pp. 317–333, 2018.
- [37] 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.
- [38] W. Y. Atmaja, Sarjiya, M. P. Lesnanto, and E. Y. Pramono, "Hosting Capacity Improvement Using Reactive Power Control Strategy of Rooftop PV Inverters," in *2019 IEEE 7th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*. IEEE, aug 2019, pp. 213–217.
- [39] 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, pp. 020 022.1–020 022.6, sep 2020.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] International Renewable Energy Agency, "Behind-The-Meter Batteries," International Renewable Energy Agency, Tech. Rep., 2019.



- [45] G. B. Dantzig, "Linear Programming Under Uncertainty," *International Series in Operations Research and Management Science*, vol. 150, pp. 1–11, 2011.
- [46] K. N. Hasan, R. Preece, and J. V. Milanović, "Existing Approaches and Trends in Uncertainty Modelling and Probabilistic Stability Analysis of Power Systems with Renewable Generation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 101, pp. 168–180, 2019.
- [47] A. Kharrazi, V. Sreeram, and Y. Mishra, "Assessment Techniques of the Impact of Grid-Tied Rooftop Photovoltaic Generation on the Power Quality of Low Voltage Distribution Network - A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 120, pp. 1–16, 2020.
- [48] F. Shahnia, R. Majumder, A. Ghosh, G. Ledwich, and F. Zare, "Voltage Imbalance Analysis in Residential Low Voltage Distribution Networks with Rooftop PVs," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 9, pp. 1805–1814, 2011.
- [49] F. J. Ruiz-Rodriguez, J. C. Hernández, and F. Jurado, "Probabilistic Load Flow for Photovoltaic Distributed Generation Using the Cornish-Fisher Expansion," *Electric Power Systems Research*, vol. 89, pp. 129–138, 2012.
- [50] E. N. Silva, A. B. Rodrigues, and M. Da Guia Da Silva, "Stochastic Assessment of the Impact of Photovoltaic Distributed Generation on the Power Quality Indices of Distribution Networks," *Electric Power Systems Research*, vol. 135, pp. 59–67, 2016.
- [51] 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.
- [52] S. Hashemi and J. Østergaard, "Efficient Control of Energy Storage for Increasing the PV Hosting Capacity of LV Grids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2295–2303, 2018.
- [53] Y. Yang, H. Li, A. Aichhorn, J. Zheng, and M. Greenleaf, "Sizing Strategy of Distributed Battery Storage System with High Penetration of Photovoltaic for Voltage Regulation and Peak Load Shaving," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 982–991, 2014.
- [54] A. Navarro-Espinosa and L. F. Ochoa, "Probabilistic Impact Assessment of Low Carbon Technologies in LV Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 3, pp. 2192–2203, 2016.
- [55] A. Arshad, M. Lindner, and M. Lehtonen, "An Analysis of Photo-Voltaic Hosting Capacity in Finnish Low Voltage Distribution Networks," *Energies*, vol. 10, no. 11, pp. 1–16, 2017.

- [56] J. E. R. Baptista, A. B. Rodrigues, and M. Da Guia Da Silva, "Probabilistic Analysis of PV Generation Impacts on Voltage Sags in LV Distribution Networks Considering Failure Rates Dependent on Feeder Loading," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 3, pp. 1342–1350, 2019.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] T. T. Mai, A. N. M. Haque, P. P. Vergara, P. H. Nguyen, and G. Pemen, "Adaptive Coordination of Sequential Droop Control for PV Inverters to Mitigate Voltage Rise in PV-Rich LV Distribution Networks," *Electric Power Systems Research*, vol. 192, no. March 2020, pp. 1–13, 2021.
- [61] Standard EN 50160, "Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems," 2000.
- [62] ANSI C84.1, "American National Standard for Electric Power Systems and Equipment - Voltage Ratings (60 Hertz)," 2011.
- [63] IEC 60038:2002, "IEC Standard Voltages," 2002.
- [64] J. Lee and G. H. Kim, "Comparison Analysis of the Voltage Variation Ranges for Distribution Networks," in *Conference Proceedings - 2017 17th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 1st IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC / I and CPS Europe 2017*. IEEE, 2017, pp. 28–30.
- [65] M. H. J. Bollen and M. Häger, "Power Quality: Interactions Between Distributed Energy Resources, the Grid, and Other Customers," *Electric Power Quality and Utilisation Magazine*, vol. 1, pp. 51–61, 2005.
- [66] B. Palmintier, R. Broderick, B. Mather, M. Coddington, K. Baker, F. Ding, M. Reno, M. Lave, and A. Bharatkumar, "On the Path to SunShot: Emerging Issues and Challenges in Integrating Solar with the Distribution System," National Renewable Energy Laboratory and Sandia National Laboratories, Tech. Rep., 2016.

- [67] Electric Power Research Institute, “Grid Impacts of Distributed Generation with Advanced Inverter Functions,” Electric Power Research Institute, Tech. Rep., 2013.
- [68] S. Tao, C. Li, L. Zhang, and Y. Tang, “Operational Risk Assessment of Grid-Connected PV System Considering Weather Variability and Component Availability,” *Energy Procedia*, vol. 145, pp. 252–258, 2018.
- [69] F. Vallée, C. Versèle, J. Lobry, and F. Moïny, “Non-Sequential Monte Carlo Simulation Tool in Order to Minimize Gaseous Pollutants Emissions in Presence of Fluctuating Wind Power,” *Renewable Energy*, vol. 50, pp. 317–324, 2013.
- [70] P. Arun, R. Banerjee, and S. Bandyopadhyay, “Optimum Sizing of Photovoltaic Battery Systems Incorporating Uncertainty Through Design Space Approach,” *Solar Energy*, vol. 83, no. 7, pp. 1013–1025, 2009.
- [71] E. Zio, M. Delfanti, L. Giorgi, V. Olivieri, and G. Sansavini, “Monte Carlo Simulation-Based Probabilistic Assessment of DG Penetration in Medium Voltage Distribution Networks,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 64, pp. 852–860, 2015.
- [72] R. Billinton, “Evaluation of reliability worth in an electric power system,” *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 9, no. 3, pp. 1318–1326, 1994.
- [73] Q. Zhao, P. Wang, L. Goel, and Y. Ding, “Evaluation of Nodal Reliability Risk in A Deregulated Power System with Photovoltaic Power Penetration,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 8, no. 3, pp. 421–430, 2014.
- [74] J. D. Watson, N. R. Watson, D. Santos-Martin, A. R. Wood, S. Lemon, and A. J. Miller, “Impact of Solar Photovoltaics on the Low-Voltage Distribution Network in New Zealand,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 10, no. 1, pp. 1–9, 2016.
- [75] E. Quiles, C. Roldán-Blay, G. Escrivá-Escrivá, and C. Roldán-Porta, “Accurate Sizing of Residential Stand-Alone Photovoltaic Systems Considering System Reliability,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 3, pp. 1–18, 2020.
- [76] J. E. Smith, M. E. Rylander, R. S. N. L. Broderick, and B. N. Mather, “Alternatives to the 15% Rule - Modeling and Hosting Capacity Analysis of 16 Feeders,” Electric Power Research Institute, Tech. Rep., 2015.
- [77] 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.

- [78] A. Nourai, R. Sastry, and T. Walker, "A Vision & Strategy for Deployment of Energy Storage in Electric Utilities," *IEEE PES General Meeting, PES 2010*, pp. 1–4, 2010.
- [79] B. P. Roberts and C. Sandberg, "The Role of Energy Storage in Development of Smart Grids," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 1139–1144, 2011.
- [80] N. Jayasekara, M. A. Masoum, and P. J. Wolfs, "Optimal Operation of Distributed Energy Storage Systems to Improve Distribution Network Load and Generation Hosting Capability," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 250–261, 2016.
- [81] P. Hasanpor Divshali and L. Soder, "Improving Hosting Capacity of Rooftop PVs by Quadratic Control of an LV-Central BSS," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 1, pp. 919–927, 2019.
- [82] B. Lu and M. Shahidehpour, "Short-Term Scheduling of Battery in A Grid-Connected PV/Battery System," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 1053–1061, 2005.
- [83] H. Ben-Ammar, Y. Hadjadj-Aoul, G. Rubino, and S. Ait-Chellouche, "On the performance analysis of distributed caching systems using a customizable Markov chain model," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 130, no. August 2018, pp. 39–51, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.01.011>
- [84] W. R. Gilks, S. Richardson, and D. J. Spiegelhalter, *Markov Chain Monte Carlo in Practice*, 1st ed. Dordrecht: Springer-Science+Business Media, B.V., 1996.
- [85] F. Liang, C. Liu, and R. J. Carroll, *Advanced Markov Chain Monte Carlo Methods: Learning from Past Samples*, 1st ed. Chichester: A John Wiley and Sons, Ltd., 2010.
- [86] D. Revuz, *Markov Chains*. North Holland, Amsterdam: American Elsevier, New York, 1984.
- [87] D. R. Upper, "Theory and Algorithms for Hidden Markov Models and Generalized Hidden Markov Models," Doctoral Dissertation, University of California at Berkeley, 1997.
- [88] M. Penagarikano and G. Bordel, "Layered Markov Models: A New Architectural Approach to Automatic Speech Recognition," in *The 2004 14th IEEE Signal Processing Society Workshop Machine Learning for Signal Processing*. IEEE, 2004, pp. 305–314.
- [89] P. Louangrath, "Sample Size Determination for Non-Finite Population," in *International Conference on Discrete Mathematics and Applied Sciences*, 2014, pp. 1–24.

- [90] J. Arroyo and C. Mate, “Introducing Interval Time Series: Accuracy Measures,” in *COMPSTAT Proceedings in Computational Statistics*, 2006, pp. 1–8.
- [91] 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.
- [92] W. Y. Atmaja, Sarjiya, and L. M. Putranto, “Pengembangan Metode Penentuan Kapasitas Hosting untuk Penetrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap di Jaringan Distribusi Tegangan Rendah,” Master’s thesis, Universitas Gadjah Mada, 2019.