

SKRIPSI

**OPTIMAL POWER FLOW PADA SISTEM INTERKONEKSI
MEMPERHATIKAN FLUKTUASI PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA SURYA BERBASIS INCREMENTAL PARTICLE
SWARM OPTIMIZER**

Disusun dan diajukan oleh :

**DIDIN SETIAWAN
D041 19 1043**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**



Optimized using
trial version
www.balesio.com

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**OPTIMAL POWER FLOW PADA SISTEM INTERKONEKSI
MEMPERHATIKAN FLUKTUASI PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA SURYA BERBASIS INCREMENTAL PARTICLE
SWARM OPTIMIZER**

Disusun dan diajukan oleh

Didin Setiawan

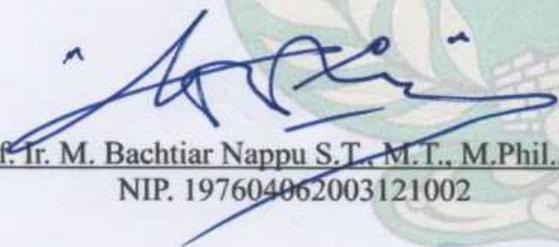
D041191043

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada Tanggal 1 Februari 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,


Prof. Ir. M. Bachtiar Nappu S.T., M.T., M.Phil., Ph.D
NIP. 197604062003121002


Ir. Hasniaty A., S.T., M.T., Ph.D
NIP. 197412052000122001

Ketua Program Studi,



Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T. IPM
NIP 19691026 199412 2 001



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Didin Setiawan

NIM : D041191043

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**OPTIMAL POWER FLOW PADA SISTEM INTERKONEKSI
MEMPERHATIKAN FLUKTUASI PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA SURYA BERBASIS INCREMENTAL PARTICLE
SWARM OPTIMIZER**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 19 Februari 2024

Yang Menyatakan



Didin Setiawan



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala yang telah memberikan rahmat-Nya, kesehatan, petunjuk, serta kesabaran sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Optimal Power Flow Pada Sistem Interkoneksi Memperhatikan Fluktuasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Berbasis Incremental Particle Swarm Optimizer” sebagai pemenuhan salah satu syarat kelulusan Pendidikan Strata (S1) Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk menyempurnakan skripsi ini. Penulis juga mengetahui bahwa dalam penyelesaian skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Kedua Orang tua Ibu Nurdahlia dan Bapak Rahmat dan keluarga yang tak pernah lelah memberikan dukungan, bantuan, dan doa sejak awal perkuliahan hingga terselesaikannya skripsi ini dengan baik.
2. Bapak Prof. Ir. Muhammad Bachtiar Nappu, ST, M.Phil., Ph.D, selaku Dosen Pembimbing I dan Ibu Dr. Ir. Hasniaty A, ST., MT. Selaku Dosen Pembimbing II yang telah senantiasa membimbing dan meluangkan waktunya untuk memberikan ide, dan saran-saran pada penulisan skripsi ini.
3. Bapak Ir. Tajuddin Waris, M.T selaku Dosen Penguji I dan Ibu Prof. Ir. Ardiaty Arief, ST, MTM, Ph.D. selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan banyak masukan serta ilmu dalam penyelesaian skripsi ini.
4. Bapak/Ibu Dosen dan seluruh staf Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan banyak ilmu maupun pengalaman yang membantu dalam kelancaran penyusunan skripsi ini.



Grup Riset Power and Energy System dan Electricity Market and Power System 2023 ZT (Yusril, Rahmat, Arjun, Aulia, dan Ayu) yang telah berjuang bersama dalam penyelesaian skripsi ini

6. Teman-teman TR19GER atas kebersamaan, kerjasama, pengalaman serta motivasinya selama masa perkuliahan hingga saat ini.
7. Segenap Direktur (Bapak Erwin Erian Yos) dan Staff (Kak Dirja, Kak Irsan, Kak Muwafiq, dan Kak Firman) CV. Cemerlang Air Cond yang telah menjadi salah satu tempat berbagi pengalaman kerja, motivasi, serta ilmu yang sangat bermanfaat selama pengerjaan skripsi hingga akhirnya selesai.
8. Teman-teman KP IKI Persero (Anak-anak ATIM) atas kebersamaan dan motivasinya dari masa KP sampai saat ini.
9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu yang telah membantu penulis dalam penyelesaian skripsi ini.

Akhir kata penulis berharap semoga skripsi ini memberikan manfaat pembaca semua dan semoga Allah SWT memberikan lindungan kepada kita semua.

Makassar, Februari 2024

Penulis



ABSTRAK

DIDIN SETIAWAN. *Optimal Power Flow Pada Sistem Interkoneksi Memperhatikan Fluktuasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Berbasis Incremental Particle Swarm Optimizer.* (dibimbing oleh Muhammad Bachtiar Nappu dan Hasniaty A.)

Sebagai negara dengan sumber energi alternatif dengan ketersediaan yang melimpah, Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan bentuk pengaplikasian dari energi surya yang termasuk energi baru terbarukan dikarenakan ketersediaannya yang sangat melimpah. Oleh karena itu, penggunaan PLTS terpusat dengan kapasitas besar sebagai pembangkitan on grid akan sangat diperhitungkan di masa depan mengingat ketersediaan sumber energi fosil yang kian menipis di Indonesia. Pengintegrasian PLTS pada jaringan tenaga listrik akan memberikan dampak positif berupa perbaikan taraf tegangan pada sistem serta penurunan rugi-rugi pada jaringan. Ditambah dengan metode optimal power flow yang akan menentukan kondisi operasi yang optimal dari jaringan interkoneksi dengan PLTS yang terintegrasi di dalamnya. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan pembahasan aliran daya optimal pada sistem interkoneksi dengan masuknya PLTS dengan metode optimisasi yang bersifat heuristik yaitu metode Incremental Particle Swarm Optimization (IPSO). Implementasi dari penggunaan metode IPSO adalah menemukan daya output optimal dari masing-masing pembangkit thermal untuk mendapatkan fungsi objektif optimal dengan masuknya output PLTS yang berfluktuatif. Hasil simulasi menunjukkan bahwa optimal power flow menggunakan IPSO mempertimbangkan fluktuasi PLTS memberikan nilai rugi-rugi daya aktif dan biaya pembangkitan sistem yang semakin rendah di semua skenario pembebanan. Hal ini membuktikan bahwa penambahan PLTS yang disertai penggunaan metode IPSO dapat memberikan penurunan rugi-rugi daya aktif dan memberikan biaya pembangkitan yang semakin murah pada sistem.

Kata Kunci: Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Optimal Power Flow, IEEE, IPSO



ABSTRACT

DIDIN SETIAWAN. *Optimal Power Flow on Interconnection System Considering Fluctuation of Solar Power Plant Based on Incremental Particle Swarm Optimizer.* (supervised by Muhammad Bachtiar Nappu and Hasniaty A.)

As a country with alternative energy sources with abundant availability, photovoltaic system is a form of application of solar energy which includes new renewable energy due to its abundant availability. Therefore, the use of centralized photovoltaic system with large capacities as on-grid generation will be highly considered in the future given the availability of dwindling fossil energy sources in Indonesia. The integration of photovoltaic system in the power grid will have a positive impact in the form of improving the voltage level in the system and reducing losses in the network. The optimal power flow method that will be use to determine the optimal operating conditions of the interconnection network with photovoltaic system integrated in it. This research aims to provide a assessment of optimal power flow in the interconnection system with the inclusion of photovoltaic system with a heuristic optimization method, namely the Incremental Particel Swarm Optimization (IPSO) method. The implementation of the use of the IPSO method is to find the optimal output power of each thermal generator to obtain the optimal objective function with the inclusion of fluctuating photovoltaic system output. Simulation results show that optimal power flow using IPSO considering photovoltaic system fluctuations provides a lower value of active power losses and system generation costs in all loading scenarios. This proves that the addition of photovoltaic system accompanied by the use of the IPSO method can provide a decrease in active power losses and provide cheaper generation costs to the system.

Keywords: Solar Power Plant, Optimal Power Flow, IEEE, IPSO.



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Studi Aliran Daya.....	5
2.2 Optimal Power Flow.....	6
2.3 Kurva Beban.....	8
2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Surya.....	9
2.4.1 Pengertian Surya.....	9
2.4.2 Sumber Energi Surya.....	10
2.4.3 Sel Surya.....	11
2.4.4 Panel Surya.....	12
2.4.5 Sistem PLTS On Grid.....	13
2.5 Incremental Particle Swarm Optimizer.....	15
2.5.1 Particle Swarm Optimization.....	15
2.5.2 Incremental Social Learning (ISL).....	16
2.5.3 Incremental Particle Swarm Optimization.....	17
2.6 State of The Art.....	18
METODE PENELITIAN.....	22
1. Penelitian.....	22
2. Jenis Penelitian.....	22
3. Metode Penelitian.....	22



3.4	Alat dan Bahan	22
3.4.1	Alat.....	22
3.4.2	Bahan	22
3.5	Pengumpulan Data	22
3.5.1	Sistem IEEE 14 Bus	24
3.5.2	Sistem IEEE 30 Bus	26
3.5.3	Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)	29
3.6	Diagram Penelitian.....	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		36
4.1	Simulasi aliran daya sebelum optimasi tanpa PLTS	37
4.1.1	Sistem IEEE 14 Bus	37
4.1.2	Sistem IEEE 30 Bus	39
4.2	Simulasi Aliran Daya dengan PLTS	41
4.2.1	Sistem IEEE 14 Bus	41
4.2.2	Sistem IEEE 30 Bus	83
4.3	Pembahasan.....	138
4.3.1	Sistem IEEE 14 Bus	139
4.3.2	Sistem IEEE 30 Bus	148
4.3.3	Perbandingan Penempatan PLTS pada Sistem IEEE 14 Bus dan IEEE 30 Bus	160
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		162
5.1	Kesimpulan	162
5.2	Saran	163
DAFTAR PUSTAKA		164



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Kurva beban harian (Gonen, 2015).....	8
Gambar 2 Peta potensi energi surya di Indonesia (Mariya, 2019)	9
Gambar 3 penyebaran jenis radiasi matahari.....	10
Gambar 4 Radiasi matahari pada permukaan bumi (Ventiano et al., 2019)	11
Gambar 5 Model PLTS On Grid	14
Gambar 6 Model Kontrol Konstan P dan V	14
Gambar 7 Single Line Diagram IEEE 14 Bus (Weckesser).....	24
Gambar 8 Single Line Diagram IEEE 30 Bus (Weckesser).....	26
Gambar 9 Diagram Penelitian	31
Gambar 10 Simulasi program	32
Gambar 11 Flowchart Tahapan Eksekusi Program IPSO	34
Gambar 12 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 13 pembebanan 60% output 20% PLTS	42
Gambar 13 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 13 pembebanan 60% output 100% PLTS	43
Gambar 14 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 13 pembebanan 100% output 20% PLTS	44
Gambar 15 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 13 pembebanan 100% output 20% PLTS	45
Gambar 16 Rugi-rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 13 pembebanan 60%.....	46
Gambar 17 Rugi-rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 13 pembebanan 80%.....	48
Gambar 18 Rugi-rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 13 pembebanan 100%...50	50
Gambar 19 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 14 pembebanan 60% output 20% PLTS	55
Gambar 20 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 14 pembebanan 60% output 100% PLTS	56
Gambar 21 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 14 pembebanan 100% output 20% PLTS	57
Gambar 22 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 14 pembebanan 100% output 20% PLTS	58
3 Rugi-rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 14 pembebanan 60%.....	59
4 Rugi-rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 14 pembebanan 80%.....	61
5 Rugi-rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 14 pembebanan 100%...63	63



Gambar 26 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 13 dan bus 14 pembebanan 60% output 20% PLTS	69
Gambar 27 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 13 dan bus 14 pembebanan 60% output 100% PLTS	70
Gambar 28 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 13 dan bus 14 pembebanan 100% output 20% PLTS	71
Gambar 29 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 13 dan bus 14 pembebanan 100% output 20% PLTS	72
Gambar 30 Rugi-rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 13 dan bus 14 pembebanan 60%	73
Gambar 31 Rugi-rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 13 dan bus 14 pembebanan 80%	75
Gambar 32 Rugi-rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 13 dan bus 14 pembebanan 100%	77
Gambar 33 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 15 pembebanan 60% output 20% PLTS	83
Gambar 34 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 15 pembebanan 60% output 100% PLTS	84
Gambar 35 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 15 pembebanan 100% output 20% PLTS	85
Gambar 36 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 15 pembebanan 100% output 20% PLTS	86
Gambar 37 Rugi-rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 15 pembebanan 60%.....	87
Gambar 38 Rugi-rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 15 pembebanan 80%.....	89
Gambar 39 Rugi-rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 15 pembebanan 100%...	91
Gambar 40 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 26 pembebanan 60% output 20% PLTS	97
Gambar 41 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 26 pembebanan 60% output 100% PLTS	98
Gambar 42 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 26 pembebanan 100% output 20% PLTS	99
Gambar 43 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 26 pembebanan 100% output 20% PLTS	100
4 Rugi-rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 26 pembebanan 60%...	101
5 Rugi-rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 26 pembebanan 80%...	103



Gambar 46 Rugi-rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 26 pembebanan 100%.105	
Gambar 47 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 15 dan bus 26 pembebanan 60% output 20% PLTS	111
Gambar 48 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 15 dan bus 26 pembebanan 60% output 100% PLTS	112
Gambar 49 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 15 dan bus 26 pembebanan 100% output 20% PLTS	113
Gambar 50 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 15 dan bus 26 pembebanan 100% output 20% PLTS	114
Gambar 51 Rugi-rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 15 dan bus 26 pembebanan 60%	115
Gambar 52 Rugi-rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 15 dan bus 26 pembebanan 80%	117
Gambar 53 Rugi-rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 15 dan bus 26 pembebanan 100%	119
Gambar 54 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 30 pembebanan 60% output 20% PLTS	125
Gambar 55 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 30 pembebanan 60% output 100% PLTS	126
Gambar 56 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 30 pembebanan 100% output 20% PLTS	127
Gambar 57 Tegangan bus sistem dengan PLTS pada bus 30 pembebanan 100% output 20% PLTS	128
Gambar 58 Rugi-rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 30 pembebanan 60%...129	
Gambar 59 Rugi-rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 30 pembebanan 80%...131	
Gambar 60 Rugi-rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 30 pembebanan 100%.133	



DAFTAR TABEL

Tabel 1 State of The Art	18
Tabel 2 Data generator sistem IEEE 14 bus	24
Tabel 3 Data saluran sistem IEEE 14 bus	24
Tabel 4 Data bus sistem IEEE 14 bus.....	25
Tabel 5 Koefisien biaya pembangkitan IEEE 14 bus.....	26
Tabel 6 Data generator sistem IEEE 30 bus	27
Tabel 7 Data saluran IEEE 30 bus.....	27
Tabel 8 Data bus sistem IEEE 30 bus.....	28
Tabel 9 Koefisien pembangkit sistem IEEE 30 bus.....	29
Tabel 10 Data radiasi matahari dan daya output PLTS	30
Tabel 11 Data tegangan IEEE 14 bus sebelum penambahan PLTS.....	37
Tabel 12 Data rugi-rugi daya aktif IEEE 14 bus sebelum penambahan PLTS	38
Tabel 13 Data tegangan IEEE 14 bus sebelum penambahan PLTS	39
Tabel 14 Data rugi-rugi daya aktif IEEE 14 bus sebelum penambahan PLTS	40
Tabel 15 Rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 13 pembebanan 60%	47
Tabel 16 Rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 13 pembebanan 80%	49
Tabel 17 Rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 13 pembebanan 100%	50
Tabel 18 Biaya pembangkitan sistem dengan PLTS pada bus 13 pembebanan 60%	52
Tabel 19 Biaya pembangkitan sistem dengan PLTS pada bus 13 pembebanan 80%	53
Tabel 20 Biaya pembangkitan sistem dengan PLTS pada bus 13 pembebanan 100%	54
Tabel 21 Rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 14 pembebanan 60%	60
Tabel 22 Rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 14 pembebanan 80%	61
Tabel 23 Rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 14 pembebanan 100%	64
Tabel 24 Biaya pembangkitan sistem dengan PLTS pada bus 14 pembebanan 60%	66
Tabel 25 Biaya pembangkitan sistem dengan PLTS pada bus 14 pembebanan 80%	67
Tabel 26 Biaya pembangkitan sistem dengan PLTS pada bus 14 pembebanan 100%	68
Tabel 27 Rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 13 dan bus 14 pembebanan 60%	74
Tabel 28 Rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 14 pembebanan 80%	76
Tabel 29 Rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 13 dan bus 14 pembebanan 100%	78
Biaya pembangkitan sistem dengan PLTS pada bus 13 dan bus 14 pembebanan 60%	79



Tabel 31 Biaya pembangkitan sistem dengan PLTS pada bus 14 pembebanan 80%	81
Tabel 32 Biaya pembangkitan sistem dengan PLTS pada bus 14 pembebanan 100%	82
Tabel 33 Rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 15 pembebanan 60%	88
Tabel 34 Rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 15 pembebanan 80%	90
Tabel 35 Rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 15 pembebanan 100%	92
Tabel 36 Biaya pembangkitan sistem dengan PLTS pada bus 15 pembebanan 60%	94
Tabel 37 Biaya pembangkitan sistem dengan PLTS pada bus 13 pembebanan 80%	95
Tabel 38 Biaya pembangkitan sistem dengan PLTS pada bus 13 pembebanan 100%	96
Tabel 39 Rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 26 pembebanan 60%	102
Tabel 40 Rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 15 pembebanan 80%	104
Tabel 41 Rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 26 pembebanan 100%	106
Tabel 42 Biaya pembangkitan sistem dengan PLTS pada bus 26 pembebanan 60%	107
Tabel 43 Biaya pembangkitan sistem dengan PLTS pada bus 13 pembebanan 80%	109
Tabel 44 Biaya pembangkitan sistem dengan PLTS pada bus 13 pembebanan 100%	110
Tabel 45 Rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 15 dan bus 26 pembebanan 60%	116
Tabel 46 Rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 15 dan bus 26 pembebanan 80%	118
Tabel 47 Rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 15 dan bus 26 pembebanan 100%	120
Tabel 48 Biaya pembangkitan sistem dengan PLTS pada bus 15 dan bus 26 pembebanan 60%	121
Tabel 49 Biaya pembangkitan sistem dengan PLTS pada bus 14 pembebanan 80%	123
Tabel 50 Biaya pembangkitan sistem dengan PLTS pada bus 15 dan bus 26 pembebanan 100%	124
Tabel 51 Rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 30 pembebanan 60%	130
Tabel 52 Rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 30 pembebanan 80%	131
Tabel 53 Rugi daya aktif sistem dengan PLTS pada bus 30 pembebanan 100%	133
Tabel 54 Biaya pembangkitan sistem dengan PLTS pada bus 30 pembebanan 60%	135
Tabel 55 Biaya pembangkitan sistem dengan PLTS pada bus 14 pembebanan 80%	136
Tabel 56 Biaya pembangkitan sistem dengan PLTS pada bus 15 dan bus 26 pembebanan 100%	137
Rugi daya aktif sistem IEEE 14 bus dengan pemasangan PLTS pada bus 13 sebelum dioptimasi dan setelah dioptimasi.....	139



Tabel 58 Biaya pembangkitan sistem IEEE 14 bus dengan pemasangan PLTS pada bus 13 sebelum dioptimasi dan setelah dioptimasi.....	141
Tabel 59 Rugi daya aktif sistem IEEE 14 bus dengan pemasangan PLTS pada bus 14 sebelum dioptimasi dan setelah dioptimasi.....	142
Tabel 60 Biaya pembangkitan sistem IEEE 14 bus dengan pemasangan PLTS pada bus 14 sebelum dioptimasi dan setelah dioptimasi.....	144
Tabel 61 Rugi daya aktif sistem IEEE 14 bus dengan pemasangan PLTS pada bus 13 dan bus 14 sebelum dioptimasi dan setelah dioptimasi.....	145
Tabel 62 Biaya pembangkitan sistem IEEE 14 bus dengan pemasangan PLTS pada bus 13 dan bus 14 sebelum dioptimasi dan setelah dioptimasi.....	147
Tabel 63 Rugi daya aktif sistem IEEE 30 bus dengan pemasangan PLTS pada bus 15 sebelum dioptimasi dan setelah dioptimasi.....	148
Tabel 64 Biaya pembangkitan sistem IEEE 30 bus dengan pemasangan PLTS pada bus 15 sebelum dioptimasi dan setelah dioptimasi.....	150
Tabel 65 Rugi daya aktif sistem IEEE 30 bus dengan pemasangan PLTS pada bus 26 sebelum dioptimasi dan setelah dioptimasi.....	151
Tabel 66 Biaya pembangkitan sistem IEEE 30 bus dengan pemasangan PLTS pada bus 26 sebelum dioptimasi dan setelah dioptimasi.....	153
Tabel 67 Rugi daya aktif sistem IEEE 30 bus dengan pemasangan PLTS pada bus 15 dan bus 26 sebelum dioptimasi dan setelah dioptimasi.....	154
Tabel 68 Biaya pembangkitan sistem IEEE 30 bus dengan pemasangan PLTS pada bus 15 dan bus 26 sebelum dioptimasi dan setelah dioptimasi.....	156
Tabel 69 Rugi daya aktif sistem IEEE 30 bus dengan pemasangan PLTS pada bus 30 sebelum dioptimasi dan setelah dioptimasi.....	157
Tabel 70 Biaya pembangkitan sistem IEEE 30 bus dengan pemasangan PLTS pada bus 30 sebelum dioptimasi dan setelah dioptimasi.....	159
Tabel 71 Perbandingan rugi-rugi daya aktif pada variasi penempatan PLTS sistem IEEE 14 bus	160
Tabel 72 Perbandingan biaya pembangkitan pada variasi penempatan PLTS sistem IEEE 14 bus	160
Tabel 73 Perbandingan rugi-rugi daya aktif pada variasi penempatan PLTS sistem IEEE 30 bus	161
Perbandingan biaya pembangkitan pada variasi penempatan PLTS sistem IEEE 30 bus	161



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu masalah ketenagalistrikan di Indonesia adalah penyebaran yang kurang merata. Ketidakmerataan ini disebabkan oleh operasi pembangkitan yang dibatasi oleh kondisi wilayah yang terbatas, biaya yang sangat besar, serta waktu yang lama (Saukani et al., 2016). Adanya batasan tersebut menjadikan perihalnya meningkatnya pertumbuhan penduduk dan ekonomi yang serta merta meningkatkan kebutuhan energi listrik dalam negeri menjadi problematika. Kebutuhan energi listrik yang semakin besar ini mengakibatkan seluruh pembangkitan harus menyesuaikan perubahan beban karena adanya beberapa aspek dari pembangkit seperti pemeliharaan, karakteristik, kemampuan pembangkit, biaya pembangkitan dan lain-lain (Nugraha & Wibowo, 2016). Oleh karena itu dalam aplikasi sesungguhnya, pada sistem interkoneksi terdapat beberapa pembangkit yang saling terhubung dan memiliki operasi pembangkitan yang berbeda-beda. Untuk memenuhi kebutuhan beban yang kian meningkat maka diperlukan sistem penjadwalan yang tepat dan akurat, yaitu dengan melakukan pengaturan pada setiap unit pembangkit untuk beroperasi secara optimal dan ekonomis (Saukani et al., 2016).

Indonesia adalah negara yang memiliki sumber daya energi yang cukup bervariasi. Disamping dengan sumber energi yang telah sering dikonversikan, yaitu minyak bumi, gas, batu bara, air, dan angin, terdapat pula sumber energi alternatif ketersediaannya cukup melimpah seperti panas bumi, biomassa, gelombang laut, nuklir, dan surya (Nappu et al., 2023). Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan bentuk pengaplikasian dari energi surya yang termasuk energi baru terbarukan dikarenakan ketersediaannya yang sangat melimpah. Oleh karena itu, penggunaan PLTS terpusat dengan kapasitas besar sebagai pembangkitan on grid akan sangat diperhitungkan di masa depan mengingat ketersediaan sumber energi yang kian menipis di Indonesia.



Integrasi PLTS pada jaringan tenaga listrik akan memberikan positif berupa perbaikan taraf tegangan pada sistem serta penurunan rugi-

rugi pada jaringan (Zainuddin, 2017). Metode OPF akan menentukan kondisi operasi yang optimal dari jaringan interkoneksi dengan PLTS yang terintegrasi di dalamnya. Tujuan utama dari metode OPF yaitu menentukan pengaturan *control variable* dan sistem persamaan yang mengoptimalkan nilai fungsi objektif dengan batasan yang diperhitungkan secara ekonomis dan cermat.

Metode OPF pada sistem dengan mempertimbangkan adanya PLTS telah banyak dilakukan dengan metode utama berupa penentuan titik hubung PLTS pada jaringan untuk mendapatkan hasil yang optimum (Mariya, 2019). Meskipun demikian, pengintegrasian PLTS pada sistem juga memberikan tantangan baru dalam *Optimal Power Flow* (OPF) dikarenakan hasil pembangkitannya yang sangat dipengaruhi oleh kondisi alam (intensitas cahaya matahari). Oleh karena itu, diperlukan suatu simulasi OPF yang mempertimbangkan pengaruh fluktualisasi output daya PLTS pada sistem interkoneksi.

Dalam analisis OPF, umumnya terdapat dua metode yang dapat digunakan yaitu metode *Deterministik* yang menggunakan matematika teknik dalam analisisnya dan metode *Undeterministik* berupa metode *heuristic* probabilitas yang memanfaatkan kecerdasan buatan dengan meniru gejala-gejala yang ada di alam (Riyanto et al., 2012). Salah satu kecerdasan buatan yang dapat digunakan adalah *Incremental Particle Swarm Optimizer* (IPSO). IPSO merupakan teknik optimasi yang dimana setiap partikel merubah posisinya untuk menentukan posisi optimal. Keunggulan dari penggunaan metode IPSO yaitu jumlah populasi akan meningkat setiap iterasi sehingga proses optimasi menjadi lebih cepat (Nappu et al., 2023).

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka pada tugas akhir ini diangkat judul yaitu “*OPTIMAL POWER FLOW PADA SISTEM INTERKONEKSI MEMPERHATIKAN FLUKTUASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA BERBASIS INCREMENTAL PARTICLE SWARM OPTIMIZER*”

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dapat dirumuskan masalah erikut:



1. Bagaimana merancang Algoritma berupa *Incremental Particle Swarm Optimizer* (IPSO) dalam menentukan *Artificial Intelligence (AI) Optimal Power Flow* terbaik?
2. Bagaimana perbandingan perubahan daya keluaran PLTS terhadap rugi-rugi jaringan sebelum dioptimasi dan setelah dioptimasi menggunakan metode OPF IPSO?
3. Bagaimana perbandingan biaya pembangkitan sebelum dioptimasi dan setelah dioptimasi menggunakan metode OPF IPSO?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Membuat program program berupa *Incremental Particle Swarm Optimizer* (IPSO) dalam menentukan *Artificial Intelligence (AI) Optimal Power Flow* terbaik.
2. Menganalisis perbandingan perubahan daya keluaran PLTS terhadap rugi-rugi jaringan sebelum dioptimasi dan setelah dioptimasi menggunakan metode OPF IPSO.
3. Menganalisis perbandingan biaya pembangkitan sebelum dioptimasi dan setelah dioptimasi menggunakan metode OPF IPSO.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut.

1. Dapat memberikan manfaat pada perkembangan sistem tenaga listrik khususnya dalam operasi optimal terkait permasalahan *Optimal Power Flow* dengan penambahan PLTS pada sistem interkoneksi
2. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil topik tugas akhir dengan permasalahan yang serupa.

Dapat menjadi referensi bagi utilitas kelistrikan dalam melakukan metode OPF sistem tenaga listrik untuk meminimalkan rugi-rugi daya pada saluran dengan memperhatikan Intensitas cahaya matahari.



1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Tugas akhir ini difokuskan pada bagaimana *Optimal Power Flow* sistem dengan memperhatikan fluktuasi output dari PLTS
2. Tugas akhir ini difokuskan pada bagaimana mensimulasikan hasil *Optimal Power Flow* pada Program *Incremental Particle Swarm Optimizer* (IPSO).

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penulisan proposal penelitian ini adalah:

I. PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang, pokok permasalahan, tujuan, manfaat penelitian, Batasan masalah, dan sistematika penulisan dari tugas akhir ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas mengenai analisis sistem jaringan tenaga listrik, analisis sistem Pembangkit Listrik tenaga Surya, teori-teori *Optimal Power Flow* dan program simulasi yang akan digunakan.

III. METODE PENELITIAN

Bab ini membahas mengenai bagaimana metode pengerjaan tugas akhir ini dilakukan dan Langkah-langkah pengerjaan yang dilakukan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas mengenai hasil dan pembahasan dari Analisa data pengambilan data yang telah dilakukan.

V. KESIMPULAN

Bab ini membahas kesimpulan dari hasil dan pembahasan yang telah didapatkan dari bab sebelumnya.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Studi Aliran Daya

Studi aliran daya atau *Load Flow Analysis* adalah metode yang dilakukan untuk mendapatkan nilai dari variabel-variabel yang dapat mempengaruhi kualitas jaringan tenaga listrik, yaitu:

1. Aliran daya aktif serta daya reaktif pada setiap cabang di jaringan.
2. Keadaan pembebanan bus.
3. Pengaruh perubahan beban pada jaringan.
4. Tegangan dan sudut fasa.
5. Rugi-rugi daya.
6. Kondisi optimum pembebanan.

Sistem tenaga listrik adalah sistem yang membangkitkan, mengatur, menyalurkan, membagi dan pada akhirnya menggunakan tenaga listrik tersebut. Sistem tenaga listrik dapat terdiri dari puluhan hingga ratusan bus yang terkoneksi satu sama lain. Daya listrik yang dibangkitkan oleh generator akan mengalir menuju ke seluruh beban yang ada pada sistem tersebut.

Besarnya arus bus dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Kirchoff untuk arus. Sehingga didapatkan persamaan:

$$\begin{aligned} I_i &= y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \\ &= (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \dots - y_{in}V_n \end{aligned} \quad (2.1)$$

Sedangkan untuk nilai daya aktif dan daya reaktif pada bus adalah

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2.2)$$

Atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i} \quad (2.3)$$



nensubstitusikan persamaan 2 dan persamaan 3 menghasilkan
n:

$$V_i \frac{P_i - jQ_i}{V_i} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq 1 \quad (2.4)$$

Dari persamaan 2.4, dapat dilihat bahwa persamaan aliran daya merupakan persamaan yang tidak linear, sehingga dibutuhkan proses iterasi untuk menyelesaikan persamaan tersebut.

2.2 Optimal Power Flow

Perhitungan Optimal Power Flow (OPF) dilakukan untuk menentukan kuantitas sistem di dalam pengaturan dan operasi sistem tenaga listrik. Berkembangnya jaringan tenaga listrik serta tuntutan akan jaminan keandalan sistem Tenaga listrik membuat operator dalam pengaturan dan operasi sistem tenaga listrik terus mengembangkan metode yang cepat dan efisien. Metode OPF adalah metode untuk melakukan perhitungan kebutuhan daya (P_{demand}) dari beban guna melakukan penjadwalan pembangkit dengan pengaturan yang ekonomis dan efisien dengan tujuan meminimalisir biaya total produksi dari pembangkit namun tetap menjaga sistem dalam keadaan aman dan andal (Ridho dkk, 2017).

Masalah aliran daya listrik dapat dinyatakan dengan penentuan besar beban dalam besaran megawatt atau megavar yang dipasang pada titik busbar tertentu dari sebuah sistem tenaga listrik dan daya pembangkit serta magnitude pada titik suatu sistem yang besamaan dengan deskripsi topologi lengkap sistem dengan nilai impedansi di dalamnya. Dengan matematika, persoalan tersebut dapat diminimalisir dengan cara nonlinear equations dimana komponen real dan imajiner dari titik tegangan adalah variabel. Hasil dari masalah aliran daya menjelaskan line mana yang berbeban, besar tegangan pada beberapa bus, berapa banyak daya pembangkit yang hilang dan dimana terjadi limit ke operator atau perencana suatu sistem (Monica, 2018).

Dalam rekayasa sistem tenaga listrik terdapat masalah optimasi yang biasa dikenal secara umum sebagai *Optimal Power Flow* (OPF) yang merupakan salah satu sub bidang dari optimasi *non linear* terbatas yang banyak diteliti oleh operator perencana suatu sistem tenaga listrik. OPF menyertakan berbagai masalah optimasi yang berusaha mengoptimalkan pengoperasian sistem tenaga listrik pada kondisi fisik berdasarkan hukum-hukum listrik dan batasan-batasan listrik.



Berikut adalah rumus Economic Dispatch dimana konsepnya hanya memiliki satu batasan:

$$F(P_g) = \sum_{i=1}^n (a_i P_{gi}^2 + b_i P_{gi} + C_i) \quad (2.5)$$

Kemudian Batasan *Economic Dispatch* yaitu total daya pada pembangkitan sama dengan total daya ditambah rugi-rugi beban terlihat pada:

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_d + P_L \quad (2.6)$$

$$P_{i \min} \leq P_i + P_L \quad (2.7)$$

Dari persamaan di atas terlihat pada konsep *Economic Dispatch*, nilai dari beberapa variabel kontrol telah ditetapkan. Namun berbeda halnya pada OPF, dalam konsep OPF beberapa bahkan seluruh variable control harus diketahui terlebih dahulu. Oleh karena itu perbedaan yang jelas antara *Economic Dispatch* dan OPF terletak pada Batasan-batasan yang berlaku pada keduanya. Pada OPF, Batasan yang ada jauh lebih kompleks dibandingkan dengan *Economic Dispatch*.

$$P_{Ga} - P_{Da} = V_a \sum_{n=1}^{NB} V_b (G_{ab} \cos(\theta_a - \theta_b) + B_{ab} \sin(\theta_a - \theta_b)) \quad (2.8)$$

$$Q_{Ga} - Q_{Da} = V_a \sum_{n=1}^{NB} V_b (G_{ab} \sin(\theta_a - \theta_b) + B_{ab} \cos(\theta_a - \theta_b)) \quad (2.9)$$

Batasan OPF adalah sebagai berikut:

Batasan kapasitas pembangkit

$$P_{Gi, \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi, \max} \quad (2.10)$$

$$Q_{Gi, \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi, \max} \quad (2.11)$$

Batasan tegangan

$$V_{, \min} \leq V_m \leq V_{, \max} \quad (2.12)$$

Batasan saluran

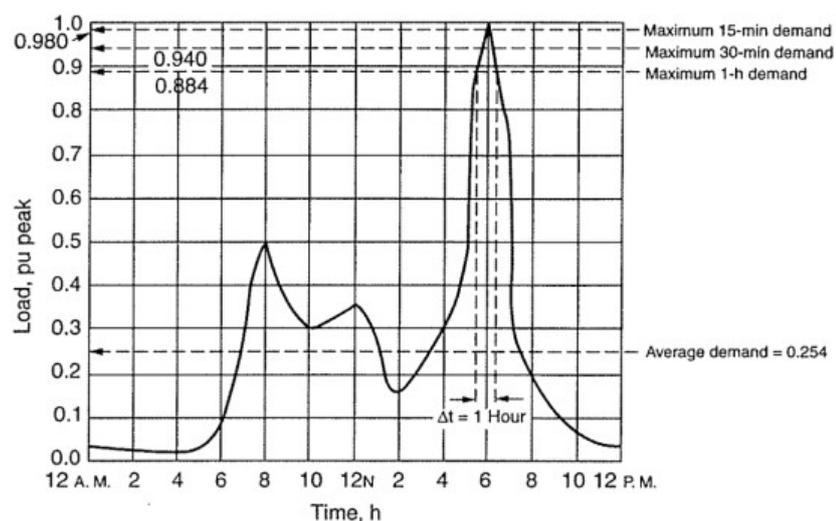
$$S_l \leq S_{l, \max} \quad (2.13)$$



2.3 Kurva Beban

Kurva beban harian adalah grafik yang menunjukkan perubahan permintaan dan penggunaan energi listrik dalam jaringan transmisi selama periode 24 jam. Kurva ini sangat penting dalam perencanaan, operasi, dan pengelolaan sistem tenaga listrik. Kurva beban ini biasanya diukur dengan kW, Ampere atau KVA sebagai fungsi dari waktu.

Interval untuk waktu pengukuran dapat bervariasi dan biasanya ditentukan berdasarkan pada penggunaan hasil pengukuran, seperti contoh pada interval waktu 30 menit atau juga interval waktu 60 menit yang sangat berguna dalam penentuan kapasitas rangkaian. Namun biasanya beban diukur untuk interval waktu 15 menit, 30 menit, satu hari atau satu bulan (Suswanto, 2009).



Gambar 1 Kurva beban harian (Gonen, 2015)

Gambar 1 memperlihatkan kurva beban harian yang menunjukkan beban sebagai fungsi waktu. Beban dilihat dalam satuan per unit (p.u.) dan ditunjukkan dalam rentang waktu 30 menit hingga 60 menit selama 24 jam. Beban relatif datar pada waktu dini hari hingga jam 5 pagi. Beban puncak adalah titik tertinggi pada kurva beban harian. Puncak beban mewakili waktu di mana permintaan energi mencapai tingkat tertinggi sepanjang hari. Adapun beban puncak pada kurva beban dapat berbeda-beda seperti pada beban industri yang mana terjadi pada siang hari yaitu antara 10.00 pagi hingga pukul 04.00 sore

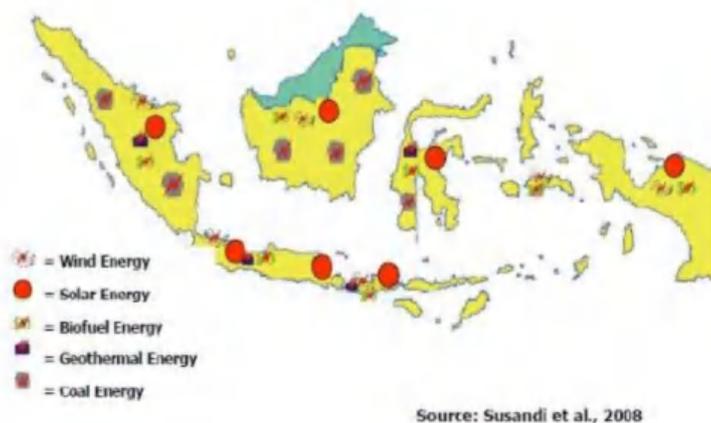


namun pada beban rumah tangga yang mana terjadi pada rentang pukul 06.00 sore hingga pukul 11.00 malam (Suswanto, 2009).

2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

2.4.1 Pengertian Surya

Energi surya adalah radiasi yang diproduksi dari reaksi fusi nuklir yang terjadi pada inti matahari. Energi surya yang dihasilkan matahari merupakan suplai utama hampir semua panas dan cahaya yang diterima bumi yang dalam prosesnya terkonversi menjadi berbagai variasi bentuk energi. Selain itu, energi surya memiliki ketersediaan yang sangat besar dan bersifat kontinu dipancarkan oleh matahari. Energi surya yang sampai ke bumi berbentuk paket-paket energi yang disebut foton. Seluruh radiasi elektromagnetik termasuk cahaya matahari mengandung foton yang dimana foton tersebut mengandung energi. Terdapat dua parameter utama dalam energi surya: pertama intensitas radiasi, yaitu jumlah daya matahari yang datang pada permukaan perluas area, dan karakteristik spektrum cahaya matahari. Tenaga surya dapat digunakan untuk menghasilkan listrik untuk memasok kebutuhan energi dengan mengubahnya menjadi listrik dengan menggunakan sistem fotovoltaik. Pembangkit listrik fotovoltaik sangat potensial untuk dikembangkan di Indonesia yang digunakan untuk memasok listrik pada daerah terpencil atau di daerah perkotaan yang beroperasi sebagai pembangkit listrik hybrid (Suroso, 2014).



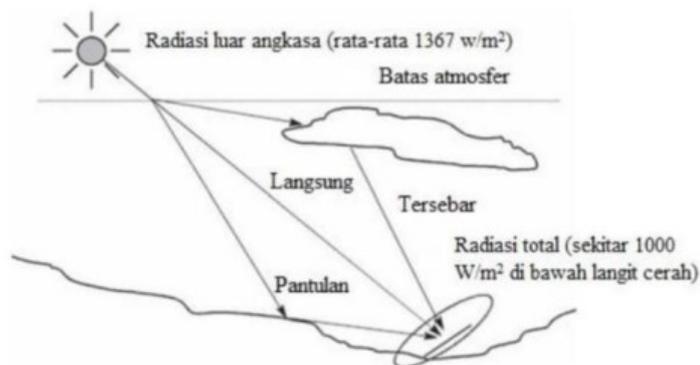
Gambar 2 Peta potensi energi surya di Indonesia (Mariya, 2019)



Gambar 2 memperlihatkan peta potensi energi surya yang tersebar di Indonesia. Energi surya atau matahari telah dimanfaatkan di banyak belahan dunia dan jika dieksploitasi dengan tepat, energi ini berpotensi menyediakan kebutuhan konsumsi energi dunia saat ini dalam waktu yang lebih lama.

2.4.2 Sumber Energi Surya

Sumber energi surya adalah dari matahari yang menghasilkan energi dalam bentuk radiasi. Energi dihasilkan dalam inti matahari melalui proses perpaduan antara atom hidrogen dan helium. Bagian dari massa hidrogen dikonversi menjadi energi. Dengan kata lain, matahari adalah reaktor fusi nuklir yang sangat besar dengan masa hidup (umur) sekitar $4,5 \times 10^9$ tahun. Ada beberapa jenis radiasi matahari yaitu Radiasi langsung (direct radiation), radiasi tersebar (diffuse radiation), radiasi pantulan (albedo), dan radiasi total (total radiation).

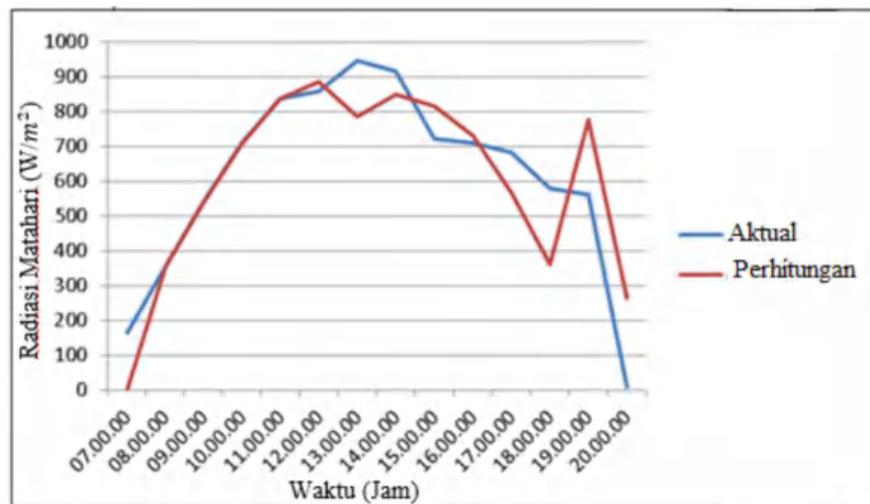


Gambar 3 penyebaran jenis radiasi matahari

Gambar 3 memperlihatkan tentang peristiwa radiasi dan jenis radiasi. Radiasi merupakan energi cahaya matahari yang jatuh pada permukaan bumi, besar radiasi ini dalam W/m^2 dengan besar radiasi maksimum yaitu $1000 W/m^2$. Lamanya matahari bersinar dalam satu hari dan satu musim akan mempengaruhi jumlah energi yang jatuh pada permukaan datar di permukaan bumi. Jika permukaan satu meter persegi dimiringkan dan menjadi tegak lurus terhadap arah datang sinar akan membuat densitas energi yang diterima akan semakin bertambah (ana et al., 2022).



Radiasi yang mencapai permukaan bumi terdiri dari radiasi langsung (direct radiation) dan radiasi tersebar (diffusion radiation). Radiasi tersebar tidak sebesar radiasi langsung tetapi masih dapat menghasilkan energi panas untuk kolektor dan energi listrik untuk panel surya. Di sisi lain, radiasi langsung adalah jenis radiasi utama yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik.



Gambar 4 Radiasi matahari pada permukaan bumi (Ventiano et al., 2019)

Gambar 4 memperlihatkan nilai radiasi matahari yang sampai ke bumi. Adapun nilai radiasi ini dapat dipengaruhi oleh banyak faktor yang mana salah satunya adalah kondisi awan. Dari gambar 3 dapat diketahui bahwa radiasi matahari mulai dapat dirasakan pada awal pukul 06.00 hingga pukul 20.00 dengan nilai radiasi terbesar yang terjadi antara pukul 11.00 – 15.00. Pada waktu ini, nilai radiasi yang tercatat adalah sebesar 850 W/m² (Ventiano et al., 2019).

2.4.3 Sel Surya

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) adalah suatu pembangkit yang mengkonversikan energi foton dari surya menjadi energi listrik. Konversi energi ini terjadi pada panel surya yang terdiri dari sel-sel surya. PLTS memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik DC (Direct Current), yang dapat diubah menjadi listrik AC (Alternating Current) apabila diperlukan. PLTS pada dasarnya mencatu daya yang dapat dirancang untuk mencatu kebutuhan listrik mulai dari kecil maupun skala besar, baik secara mandiri maupun hibrida.



Pembangkit sel surya atau biasa disebut PV merupakan suatu sistem yang dapat mengubah energi yang terkandung dalam cahaya matahari secara langsung menjadi energi listrik. Besaran daya yang diubah oleh sel surya sangat bergantung pada intensitas radiasi yang ada dan suhu sekitar yang mempengaruhi kerja sel surya itu sendiri. Berdasar kondisi standar, energi yang terkandung dalam cahaya matahari adalah sebesar 1000W/m² pada suhu 25°C. Oleh karena itu, besar radiasi yang ada serta suhu sekitar menjadi faktor penentu besar kecilnya daya yang dihasilkan oleh sel surya. Berikut ini adalah daya output yang dihasilkan oleh sel surya (Ramadhana et al., 2022) :

$$P_{PV} = \left[P_{PV,STC} \left(\frac{G_T}{G_{T,STC}} \right) [1 - \gamma(T_j - T_r)] \right] N_{PVs} N_{PVp} \quad (2.14)$$

Keterangan :

P_{PV}	: Daya keluaran dari modul saat radiasi GT (Watt)
$P_{PV,STC}$: Daya modul maksimum pada kondisi standar/STC (Watt)
G_T	: Radiasi aktual (W/m ²)
$G_{T,STC}$: Radiasi saat kondisi standar STC (1000 W/m ²)
γ	: Koefisien suhu modul sel surya (%/oC)
T_j	: Suhu sel (°C)
T_r	: Suhu referensi (°C)
N_{PVs}	: Jumlah sel surya dipasang seri
N_{PVp}	: Jumlah sel surya dipasang paralel

2.4.4 Panel Surya

Panel surya terdiri dari beberapa sel surya yang digabungkan secara seri maupun paralel yang digunakan untuk merubah radiasi matahari menjadi energi listrik. Sel surya merupakan bahan semikonduktor dalam bentuk dioda sambungan PN yang mampu menciptakan energi listrik melalui proses pemutusan ikatan elektron pada atom-atom dalam kistal semikonduktor ketika ditambahkan sejumlah

ada beberapa jenis sel surya antara lain : *Monocrystalline silicon*, *polycrystalline silicon*, dan *Amorphous silicon* (Akhmad, 2005).



Total radiasi matahari adalah daya radiasi yang dihasilkan oleh matahari per luas penyinaran yang mengenai panel surya dengan satuan (W/m^2). Untuk menghitung daya listrik yang dibangkitkan oleh matahari pada panel surya yaitu:

$$P = A \times G \quad (2.15)$$

Keterangan :

P = Daya yang dibangkitkan oleh panel surya (Watt)

A = Luas panel (m^2)

G = Radiasi total matahari (W/m^2)

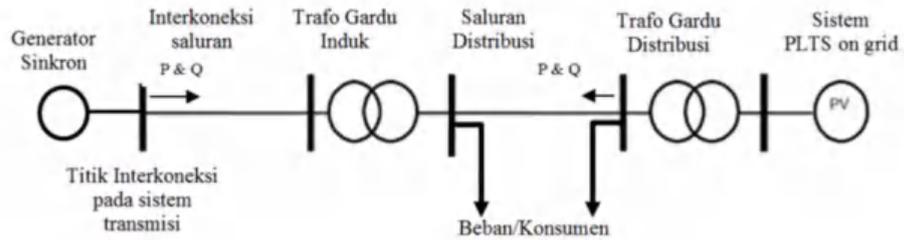
2.4.5 Sistem PLTS On Grid

PLTS on grid adalah model pembangkit listrik yang terhubung langsung ke jaringan distribusi pada sisi pelanggan. PLTS yang terhubung dengan jaringan listrik eksisting dapat dibedakan dari skala kapasitasnya yaitu skala kecil untuk kapasitas 5 kW – 100 kW, skala menengah 100 kW – 500 kW dan skala besar yaitu 500 kW – 20 MW. Daya listrik DC yang dihasilkan dari panel surya dikonversikan menjadi daya AC melalui inverter. Inverter terhubung ke Transformator penaik tegangan yang terhubung ke grid atau jala-jala (sistem distribusi). Nilai beban yang terdapat pada inverter PLTS adalah daya beban pada grid (beban penyulang). Penempatan PLTS on grid pada sistem dapat dilakukan pada seluruh bagian sistem, namun umumnya penempatan PLTS terpusat dilakukan pada saluran udara tegangan menengah (SUTM) dengan taraf tegangan 6 kV – 33 kV (Mariya, 2019). Persyaratan utama untuk terhubung ke grid sangat ditentukan oleh kualitas arus (IPV) dan tegangan (VPV) sistem PLTS dengan arus (IAC) dan tegangan (VDC) pada jaringan (Zainuddin, 2017).

Sistem PLTS berbeda dari segi utilitas beserta karakteristiknya dengan pembangkit lainnya. Perbedaan paling mendasar adalah tidak adanya penggunaan yang sifatnya mekanis pada proses konversi energi matahari. Karena tidak stem mekanik, maka jenis operasional dan penanganannya juga berbeda. an yang paling utama adalah beberapa kondisi dinamis yaitu dimana

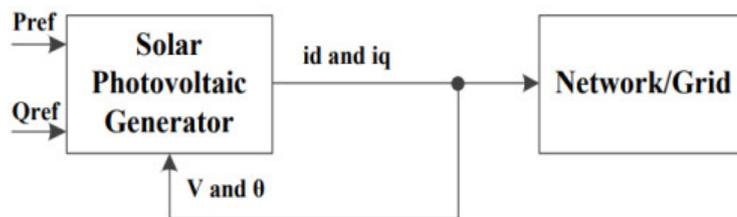


intensitas radiasi dan suhu yang bersifat fluktuatif terhadap waktu. Gambar 4 menampilkan model aliran daya PLTS on grid.



Gambar 5 Model PLTS On Grid

Gambar 5 memperlihatkan model PLTS on grid dimana Generator Sinkron (GS) terhubung dengan interkoneksi saluran transmisi atau distribusi. Sistem PLTS on grid terkoneksi dengan Gardu Distribusi (GD) tanpa melalui Gardu Induk. Gambar 5 (a)(b) menampilkan struktur dasar konfigurasi PLTS on grid.



(a)



(b)

Gambar 6 Model Kontrol Konstan P dan V



Konsep struktur dasar PLTS on grid sesuai model kontrol konstan pada sistem inverter. Model kontrol konstan P dan Q yaitu kontrol daya aktif dan reaktif dalam kondisi steady state. Model kontrol konstan P dan V yaitu alih fungsi kontrol daya dan tegangan dengan model loop tertutup. Dalam model ini daya aktif dan tegangan yang dikirimkan dapat dikontrol sesuai daya mampu inverter yang terhubung ke grid.

2.5 Incremental Particle Swarm Optimizer

2.5.1 Particle Swarm Optimization

Particle Swarm Optimization (PSO) adalah metode optimasi berdasarkan populasi yang dikembangkan oleh Kennedy dan Eberhart (Montes de Oca et al., 2008). Algoritma PSO adalah teknik optimasi berbasis populasi yang terinspirasi oleh perilaku sosial dari pergerakan burung atau ikan (*bird flocking* atau *fish schooling*). Prosedur pada PSO mengidentifikasi masing-masing individu sebagai partikel yang akan terbang mengitari daerah pencarian multi dimensional sembari menyesuaikan posisinya berdasarkan pengalaman setiap partikel masing-masing.

Algoritma PSO menggabungkan dua metode, yaitu metode pencarian local (local search) dan juga metode pencarian global (global search). Tiap partikel memiliki posisi x_i dan kecepatan v_i pada ruang pencarian yang berdimensi N, dengan i merupakan partikel ke- i dan N menyatakan suatu dimensi rang pencarian. Inisialisasi algoritma PSO diawali dengan menyatakan posisi partikel secara acak dan mencari nilai optimal dengan cara memperbarui posisinya. Setiap iterasi masing-masing partikel akan memperbarui posisinya dengan mengikuti dua nilai terbaik, yaitu solusi terbaik pada populasi (g_{best}) dan solusi terbaik yang didapat oleh tiap partikel (p_{best}). Setelah mendapatkan kedua nilai terbaik, maka posisi dan kecepatan partikel diperbarui menggunakan persamaan berikut :

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1r_1(p_{best_i} - x_i^k) + c_2r_2(g_{best_i} - x_i^k) \quad (2.16)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (2.17)$$



Dimana v_{ik} merupakan kecepatan pada partikel ke- i dengan iterasi ke k , dan adalah solusi partikel ke I dan iterasi ke k . c yaitu konstanta positif, dan r_1, r_2 merupakan dua variabel acak yang terdistribusi uniform 0 hingga 1. Pada persamaan, w merupakan bobot inersia yang menunjukkan pengaruh adanya perubahan dari kecepatan vektor lama ke vektor yang baru (Marco Dorigo et al, 2011).

Penerapan metode PSO pada optimal power flow sistem dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. *Particle* didefinisikan sebagai seluruh partikel yang ada pada kawanan dalam hal ini berupa pembangkit dan kondensor yang ada pada sistem yaitu pembangkit thermal, penyedia daya reaktif atau kondensor, serta PLTS.
2. Populasi didefinisikan sebagai kumpulan dari partikel-partikel yaitu pembangkit, kondensor, dan PLTS yang saling berinterkoneksi pada sistem.
3. Posisi didefinisikan sebagai nilai acak dari setiap partikel yang ada pada kawanan, dalam hal ini adalah nilai output dari setiap pembangkit, kondensor, serta PLTS.
4. Ruang pencarian didefinisikan sebagai fungsi objektif yang diterapkan berupa batas tegangan yang diizinkan serta nilai kapasitas injeksi daya aktif sebagai variabel untuk mengurangi rugi-rugi daya aktif pada sistem interkoneksi.
5. Pengalaman didefinisikan sebagai solusi yang dihasilkan dari metode pencarian local dan juga metode pencarian global yang mana akan digunakan untuk menentukan posisi partikel pada iterasi selanjutnya hingga terjadi konvergensi yang diinginkan.

2.5.2 Incremental Social Learning (ISL)

Konsep dasar ISL adalah menambahkan partikel ke populasi pada waktu yang dijadwalkan. ISL biasanya diterapkan dalam algoritma multi agen, agen baru yang menambah populasi dapat langsung belajar secara sosial dari agen yang lebih berpengalaman pada populasi. Itu membuat agen baru itu lebih cepat dalam menemukan solusi yang baik. Dalam tulisan ini ISL akan diterapkan dalam algoritma optimasi berbasis populasi (PSO) ke meningkatkan kinerja PSO (Nappu et al, 2013).



2.5.3 Incremental Particle Swarm Optimization

Berbeda dengan PSO standar dikembangkan oleh Kennedy dan Eberhart, IPSO yang digunakan dalam penelitian ini dikembangkan oleh Marco A. et al. yang memiliki algoritma dengan populasi yang berkembang yang diadopsi dari algoritma pembelajaran sosial inkremental (ISL). Keuntungan dari IPSOLS adalah jumlah populasi meningkat setiap iterasi menggunakan algoritma yang telah dimodifikasi, sehingga pencarian solusi optimal global bisa lebih cepat. Keunggulan lain dari IPSO adalah memiliki algoritma pencarian lokal yang hanya digunakan ketika dianggap bermanfaat untuk menghindari terjebak nilai lokal optimal. Aturan pertumbuhan populasi yang digunakan dalam penelitian ini dapat ditulis sebagai berikut :

$$X'_{new} = X_{new} + U \cdot (P_{model} - X_{new}) \quad (2.18)$$

Keterangan:

- $x'_{new,j}$: posisi terbaru dari perkembangan particle
- $x_{new,j}$: posisi terbaru dari particle asli
- $p_{model,j}$: posisi dari particle model

$x_{new,j}$ ' merupakan partikel baru dengan posisi terbaru, $x_{new,j}$ adalah partikel asli dengan posisi acak baru, $p_{model,j}$ merupakan posisi model partikel, dan U adalah nomor yang terdistribusi secara acak dengan rentang $[0, 1)$. Ketika aturan tersebut diterapkan pada tiap dimensi, partikel baru dengan posisi terbaik yang sebelumnya di inisialisasi ke poin x_{new} , ' kecepatannya diatur ke nol. Nomor acak U adalah sama untuk semua dimensi untuk memastikan partikel baru dengan posisi terbaru akan terletak di suatu tempat sepanjang vektor $p_{model,j} - x_{new,j}$. Menggunakan nomor acak independen untuk setiap dimensi akan menurunkan kekuatan bias yang disebabkan oleh aturan inisialisasi karena daya tarik vektor akan berotasi dan diskalakan sehubungan dengan daya tarik vektor. Akhirnya, lingkungan partikel baru yang akan menerima informasi dalam iterasi berikutnya, n secara acak, dan tetap terhubung dengan tingkat topologi populasi suatu (De Oca et al., 2010).



2.6 State of The Art

Tabel 1 State of The Art

Penulis/Tahun	Judul	Metode	Hasil	Review
Willy Akbar Ajami, Muhammad Bachtiar Nappu, Ardiaty Arief/ 2023	Energy Efficiency in Modern Power Systems Utilizing Advanced Incremental Particle Swarm Optimization– Based OPF	Incremental Particle Swarm Optimization (IPSO)	Dengan menggunakan metode IPSO, diperoleh nilai rugi-rugi daya serta biaya pembangkit yang lebih rendah.	Secara umum, pada jurnal ini pembaca dapat mengetahui bagaimana metode IPSO mampu mengurangi nilai rugi-rugi daya aktif serta biaya pembangkit listrik pada simulasi aliran daya optimal system IEEE 30 Bus dengan mempertimbangkan adanya PLTB. Akan tetapi, tidak ada variasi penempatan PLTB serta dapat dilakukan penelitian pada system IEEE 14 Bus dan lainnya.
Dedy Hermanto, Feby Ardianto/ 2020	Operasi Ekonomis Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) Keramasan dengan Metode Pendekatan Lagrange Multiplier	Lagrange Multiplier	Dengan menggunakan metode Lagrange Multiplier pada operasi ekonomis pada pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) keramasan, diperoleh penghematan yang dapat mencapai ratusan ribu per jamnya	Sistem pembangkit tenaga listrik pada pembangkitan keramasan yang terdiri dari unit PLTG, PLTGU 1 dan PLTGU 2. Adapun parameter yang mempengaruhi operasi sistem pembangkitan tenaga listrik adalah biaya bakar sehingga dapat memberikan solusi operasi ekonomis pada pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) Keramasan.
1	Optimasi Penjadwalan	Simualted Annealing	Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap adalah	Penggunaan bahan bakar menyumbang baiya terbesar



	<p>Ekonomis Pada Unit Pembangkit PLTG di PLTGU PT Indonesia Power Tambak Lorok Menggunakan Sumulated Annealing Algorithm</p>	<p>Algorithm dan metode Lagrange</p>	<p>salah satu jenis pembangkit thermal yang banyak digunakan dikarenakan memiliki kapasitas pembangkitan yang mampu memenuhi kebutuhan energi listrik dalam jumlah yang cukup besar. Seperti pada jenis pembangkit thermal yang lain, isu penggunaan bahan bakar menyumbang biaya terbesar dalam hal pengoperasiannya sehingga dibutuhkan penjadwalan ekonomis</p>	<p>pada pengoperasian pembangkitan di PLTGU PT. Indonesia Power</p>
<p>M Ntombela, K Musasa, MC Leoaneka/ 2022</p>	<p>Power Loss Minimization and Voltage Profile Improvement by System Reconfiguration, DG Sizing, and Placement</p>	<p>HGAIPS O</p>	<p>Dengan mengoptimalkan lokasi dan ukuran DG, masalah kehilangan daya pada sistem dapat diatasi karena kehilangan daya berkurang dan profil tegangan menjadi lebih baik.</p>	<p>Penelitian ini mengusulkan metodologi rekonfigurasi berdasarkan algoritma optimasi hibrida, yang terdiri dari kombinasi algoritma genetika (GA) dan algoritma optimasi partikel berenang yang ditingkatkan (IPSO) untuk meminimalkan kehilangan daya aktif dan mempertahankan magnitudo tegangan sekitar 1 p.u.</p>
<p>P Mohapatra/ 2022</p>	<p>Combined economic emission dispatch in hybrid power systems using competitive swarm optimization</p>	<p>competitive swarm optimization</p>	<p>Dalam beberapa dekade terakhir, emisi gas rumah kaca telah meningkat secara eksponensial karena produksi energi listrik yang besar dari bahan bakar fosil konvensional menimbulkan tantangan lingkungan yang kritis. Energi terbarukan (RE) memantapkan diri sebagai teknologi utama untuk</p>	<p>Dalam makalah ini, sistem tenaga hibrida IEEE 30-bus (HPS) yang terdiri dari energi termal dan energi terbarukan dipertimbangkan untuk meminimalkan emisi gas rumah kaca dan biaya pembangkitan. Keadaan yang tidak pasti seperti underestimasi dan overestimasi diatasi dengan biaya penalti dan biaya cadangan.</p>



			<p>mengurangi emisi karbon, selain biaya rendah dan efisiensi tinggi. Namun, batas operasional dan prosedur pembangkitan listrik dari energi terbarukan mengundang tantangan besar.</p> <p>Ketidakpastian dalam produksi dengan perkiraan yang tepat dan bebas dari kesalahan membuatnya sangat rumit. Oleh karena itu, pendekatan yang efektif dengan organisasi metadis dari energi terbarukan adalah kebutuhan saat ini untuk sistem yang handal dan aman.</p>	
Muammar Zainuddin/ 2017	Pengaruh Masuknya PLTS on Grid Skala Besar Pada Sistem Distribusi 20 KV Terhadap Kualitas Tegangan dan Rugi-rugi Daya	Newton Raphson	Pemasangan PLTS On Grid mampu memberikan perbaikan taraf tegangan di pada sisi beban	Secara umum, pembaca mengetahui bagaimana pengaruh PLTS pada perbaikan taraf tegangan pada sistem dengan scenario tertentu
Rizky Ramadyan Widiarto/ 2016	Manajemen Optimal Power Flow Pada Jaring Terhubung Pv (Photo Voltaic) Dilengkapi Baterai Menggunakan Bellman Algorithm	Bellman Algorithm	Pemasangan PLTS pada sistem dengan menggunakan baterai memiliki pengaruh pada <i>optimal power flow</i>	Secara umum, pembaca akan mendapatkan gambaran mengenai OPF pada sistem dengan PLTS yang terhubung dimana memperhitungkan penggunaan baterai
Mohammad Hafidz dan Mariya JP/ 2019	Perancangan Interkoneksi Pembangkit Listrik Tenaga Surya 1 MWP On-Grid Pada Jaringan Distribusi Cileungsi	Newton Raphson pada Software ETAP	Perancangan Interkoneksi PLTS pada jaringan distribusi terbukti dapat dilakukan dan tidak memberikan dampak yang besar pada sistem ketika terjadi gangguan pada PLTS	Secara umum, pembaca mendapatkan gambaran simulasi interkoneksi PLTS pada jaringan dalam hal OPF, efek gangguan hubung singkat PLTS, dan penentuan titik hubung



Tan Karunia Dzikra dan Firmansyah Nur Budiman	Economic Dispatch Dengan Memperhitungkan Integrasi Solar Energi Menggunakan Metode Quadratic Programming	Quadratic Programm ing	Diketahui bahwa penambahan energi terbarukan seperti solar energi mampu mengurangi biaya total secara keseluruhan	Secara umum, didapatkan hasil daya optimal dengan mempertibangkan biaya bahan bakar paling ekonomis yang disertai dengan penggunaan PLTS pada sistem
Yashwant Saw;w, S. C. Gupta, Aashish Kumar Bohre/ 2017	Optimal sizing of standalone PV/Wind/Bio mass hybrid energy system using GA and PSO optimization technique	GA dan PSO optimizati on	Memberikan pembuktian bahwa Metode PSO memberikan hasil harga listrik lebih baik daripada metode GA.	Secara umum, pada jurnal ini pembaca dapat memahami perbandingan antara metode GA dan PSO untuk masalah optimal perencanaan PVwind- biomass hibrid sistem energi, namun perlu dilakukan penelitian dengan mempertimbangkan rugi- rugi dan simulasi menggunakan metode lainnya.



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Judul Penelitian

Judul yang diangkat pada penelitian ini adalah Optimal Power Flow Pada Sistem Interkoneksi Memperhatikan Fluktuasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Berbasis Incremental Particle Swarm Optimizer.

3.2 Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di Grup Riset Energy dan Power System, Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

3.3 Waktu Penelitian

Pelaksanaan penelitian dari tugas akhir ini akan dimulai pada Desember 2022 hingga April 2023. Adapun penulisan tugas akhir dimulai dari bulan April 2023 hingga Oktober 2023.

3.4 Alat dan Bahan

3.4.1 Alat

Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

1. Laptop

Laptop yang digunakan pada penelitian ini adalah ASUS TUF FX505DT dengan prosessor ryzen 5 3550 H, 64 bit, dengan RAM 16GB.

2. MATLAB

Software yang digunakan pada penelitian ini adalah MATLAB R2013a

3.4.2 Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu data jaringan. Data yang digunakan pada penelitian ini didapatkan dari IEEE dengan jenis sistem IEEE 14 bus dan 30 bus



3.5 Pengumpulan Data

nis dari penelitian ini merupakan studi kasus pada sistem listrikan yang sistemnya terintegrasi dengan PLTS. Pada penelitian ini menjadikan output PLTS sebagai objek penelitian dengan analisis OPF