

DISERTASI

MULTI OBJECTIVE DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH PADA SISTEM
TENAGA TERINTEGRASI DENGAN PEMBANGKIT TENAGA ANGIN

**MULTI OBJECTIVE DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH IN POWER
SYSTEM INTEGRATED WITH WIND POWER PLANT**

HARIPUDDIN
D053171002



PROGRAM STUDI S3 TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2021

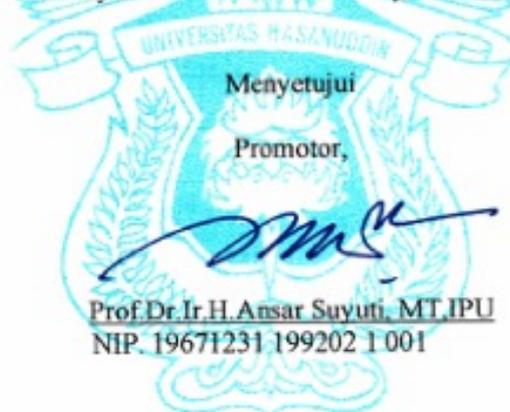
LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI

MULTI OBJECTIVE DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH PADA SISTEM
TENAGA TERINTEGRASI DENGAN PEMBANGKIT TENAGA ANGIN

Disusun dan Diajukan Oleh

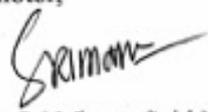
HARIPUDDIN
NIM : D053171002

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Doktor Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada Tanggal 24 Desember 2021 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

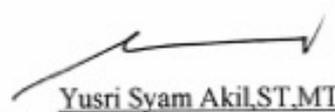


Prof.Dr.Ir.H.Ansar Suyuti, MT,IPU
NIP. 19671231 199202 1 001

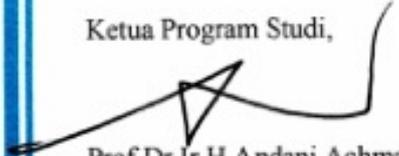
Co.Promotor,


Dr.Ir.Hj. Sri Mawar Said,MT
NIP. 19601106 198601 2 001

Co.Promotor,


Yusri Syam Akil,ST,MT,Phd
NIP. 19770322 200501 1 001

Ketua Program Studi,


Prof.Dr.Ir.H.Andani Achmad,M.T
NIP.19601231 198703 1002

Dekan Fakultas Teknik,


Prof.Dr.Ir.H.Muh.Arsyad Thaha,MT
NIP.19601231 198609 1001

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Haripuddin
NIM : D053171002
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S3

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

"Multi Objective Dynamic Economic Dispatch pada Sistem Tenaga Terintegrasi dengan Pembangkit Tenaga Angin"

Adalah karya tulisan saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan orang lain dan bahwa disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

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

Makassar, 29 Desember 2021

Yang menyatakan



Haripuddin

PRAKATA

Puji syukur peneliti panjatkan kehadirat Allah S.W.T atas segala rahmat, taufik dan karuniaNya sehingga laporan akhir disertasi sebagai syarat untuk mencapai gelar Doktor pada Program Studi S3 Teknik Elektro Pascasarjana Unhas dengan judul " *Multi Objective Dynamic Economic Dispatch* Pada Sistem Tenaga Terintegrasi Dengan Pembangkit Tenaga Angin " sehingga dapat terselesaikan dengan baik penulisan laporannya dalam kurun waktu sesuai yang diharapkan oleh peneliti.

Laporan hasil penelitian disertasi ini tidak akan terwujud tanpa adanya bantuan dari berbagai pihak, khususnya kepada ibu saya Hj. Sitti Dg. Marennu yang selalu mendoakan untuk penyelesaian studi S3 saya dan teristimewa kepada istri saya tercinta Hj.Rahmawati HS,SE,M.Si,Ak,CA,ASEAN CPA dosen Departemen Akuntansi Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Hasanuddin (FEB UH) yang selalu memberi dukungan dan semangat untuk penyelesaian studi S3 saya dan juga doa dari kedua anak saya serta keluarga yang selalu mengiringi perjalanan keberhasilan studi S3 saya di Program Studi S3 Teknik Elektro Pascasarjana Unhas. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini peneliti dengan sepenuh hati menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya serta ucapan terima kasih kepada :

1. Ibu Prof. Dr. Dwia Aries Tina Pulubuhu M.A, sebagai Rektor Universitas Hasanuddin
2. Bapak Prof.Dr.Ir.H.Husain Syam,M.Tp,IPU,ASEAN Eng, sebagai Rektor Universitas Negeri Makassar

3. Bapak Prof.Dr.Ir.H.Muhammad Arsyad Thaha,M.T, sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
4. Bapak Prof.Dr.Ir.H.Muhammad Yahya,M.Kes.,M.Eng,IPU,ASEAN Eng sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Makassar
5. Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, sebagai Dekan Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin
6. Ibu Dr.Eng.Dewiani,M.T., sebagai Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
7. Bapak Dr.Muhammad Yusuf Mappedasse,M.Pd, sebagai Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Makassar
8. Bapak Prof.Dr.Ir.H.Andani,M.T, sebagai Ketua Program Studi S3 Teknik Elektro Pascasarjana Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
9. Bapak Prof.Dr.Ir.H.Ansar Suyuti,M.T.,IPU, sebagai Promotor
10. Ibu Dr.Ir.Hj.Sri Mawar Said,M.T., sebagai Co.Promotor
11. Bapak Yusri Syam Akil, S.T.,M.T.,Ph.D., sebagai Co.Promotor
12. Bapak Tim Penguji internal maupun eksternal, bapak Prof.Dr.Ir.Sasongko Pramonohadi,DEA, bapak Dr.Eng.Wardi,ST,M.Eng, bapak Dr.Yusran,ST,MT, bapak Dr.Ikhlas Kitta,ST,MT, M.Bachtiar Nappu,ST,MT,M.Phil,Ph.D
13. Bapak/Ibu dosen dan seluruh staf pegawai Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin
14. Rekan-rekan mahasiswa Program Studi S3 Teknik Elektro Universitas Hasanuddin

Atas segala bimbingan, bantuan dan jasa baik dari semua pihak maka peneliti tak lupa panjatkan doa keberhasilan, kesuksesan, kesejahteraan, keselamatan dan diangkat derajatnya oleh Allah SWT dalam menata perjalanan karir di masa datang. Peneliti selalu mengharapkan kritik dan saran demi perbaikan penulisan laporan disertasi ini.

Akhirnya peneliti berharap agar laporan penelitian disertasi ini membawa manfaat bagi saya dan pembaca yang budiman.

Makassar, 27 Agustus 2021

ABSTRAK

HARIPUDDIN, *Multi-Objective Dynamic Economic Dispatch pada Sistem Tenaga Listrik Terintegrasi dengan Pembangkit Listrik Tenaga Angin* (Dibimbing oleh Ansar Suyuti, Sri Mawar Said, Yusri Syam Akil)

Sistem tenaga listrik yang besar memerlukan proses interkoneksi untuk menjaga kelangsungan pelayanan kelistrikan dan meringankan beban dari setiap pembangkit yang ada di dalam sistem interkoneksi tersebut. Dalam proses pendistribusian energi listrik dari pembangkit listrik tenaga termal ke pusat beban, diperlukan biaya operasi yang minimal dan daya pembangkitan dari unit pembangkit yang optimal. Penelitian ini adalah penelitian kuantitatif *non-eksperimen* yang bertujuan untuk membangun, menerapkan dan menentukan performa metode optimasi *hybrid Fruit Fly Optimization-Artificial Bee Colony* (FOA-ABC) dan *hybrid Modified Fruit Fly Optimization-Artificial Bee Colony* (MFOA-ABC) untuk penjadwalan operasi ekonomis pembangkit dengan *multi objective dynamic economic dispatch* pada sistem tenaga terintegrasi dengan pembangkit listrik tenaga angin. Metode penelitian yang digunakan adalah studi literatur dan pengumpulan data sekunder. Dalam penelitian ini, metode optimasi *hybrid* FOA-ABC dan *hybrid* MFOA-ABC diusulkan untuk mendapatkan solusi terbaik dari *multiobjective dynamic economic dispatch* (MDED) dalam sistem tenaga listrik untuk lima variabel objektif yang diuji dengan meninjau keseimbangan daya, batas daya generator, dan *generator ramp rate* sebagai *constraints*.

Hasil simulasi dari metode optimasi *hybrid* FOA-ABC dan *hybrid* MFOA-ABC untuk sistem kelistrikan IEEE 26 bus tanpa integrasi pembangkit listrik tenaga *wind* dan sistem kelistrikan IEEE 26 bus yang terintegrasi dengan pembangkit listrik tenaga *thermal-wind*, sistem kelistrikan standar IEEE 30 bus, dan sistem real kelistrikan Selselbar 150 kV dibandingkan dengan metode lain yang sudah ada. Sedangkan, sistem kelistrikan IEEE 14 bus dan sistem kelistrikan IEEE Indian Utility 62 bus dibandingkan dengan metode FOA, metode ABC, dan metode Lagrange. Hal simulasi menunjukkan bahwa metode optimasi *hybrid* FOA-ABC dan *hybrid* MFOA-ABC mampu menyelesaikan permasalahan MDED lebih baik dengan nilai yang diperoleh lebih kecil dibandingkan dengan metode lain yang menjadi pembanding. Disamping itu, integrasi pembangkit listrik tenaga angin dengan pembangkit listrik tenaga termal dapat mengurangi total biaya operasional pembangkitan dan rugi-rugi daya sistem dalam sistem yang terinterkoneksi.

Kata Kunci: *Multi-objective dynamic economic dispatch*, integrasi pembangkit listrik *thermal-wind*, variabel *objective*, *hybrid* FOA-ABC, *hybrid* MFOA-ABC

ABSTRACT

HARIPUDDIN, *Multi Objective Dynamic Economic Dispatch in Electrical Power System Integrated with Wind Power Generation* (Promoted by Ansar Suyuti, Sri Mawar Said, Yusri Syam Akil)

Large electric power systems require an interconnection process to maintain the continuity of electrical services and reduce the burden on each plant in the interconnection system. In the process of distributing electrical energy from a thermal power plant to a load center, minimal operating costs and optimal generation power are required. This research is a non-experimental quantitative research that aims to build, apply and determine the performance of the optimization method hybrid Fruit Fly Optimization-Artificial Bee Colony (FOA-ABC) and hybrid Modified Fruit Fly Optimization-Artificial Bee Colony (MFOA-ABC) for scheduling economic operation of generators with multi-objective dynamic economic dispatch at power systems integrated with wind power plants. The research method used is literature study and secondary data collection. In this study, the FOA-ABC hybrid optimization method and MFOA-ABC hybrid are proposed to get the best solution of multiobjective dynamic economic dispatch (MDED) in the electric power system for five objective variables tested by reviewing power balance, generator power limit, and generator ramp rate as constraints.

Simulation results of the FOA-ABC hybrid and MFOA-ABC hybrid optimization method for the IEEE 26 bus electrical system without the integration of wind power plants and the IEEE 26 bus electrical system integrated with wind thermal power plants, the IEEE 30 bus standard electrical system, and the 150 kV Sulsebar real electricity system compared to other existing methods. Meanwhile, the IEEE 14 bus electrical system and the IEEE Indian Utility 62 bus electrical system were compared with the FOA method, ABC method, and Lagrange method. The simulation shows that the FOA-ABC hybrid and MFOA-ABC hybrid optimization method are able to solve MDED problems better with a smaller value than the other comparison methods. In addition, the integration of wind power plants with thermal power plants can reduce the total operating costs of generating electricity and system power losses in an interconnected system.

Keywords: Multi-objective dynamic economic dispatch, integration of wind-thermal power plants, objective variable, FOA-ABC hybrid, MFOA-ABC hybrid

DAFTAR ISI

SAMPUL HASIL PENELITIAN	i
PENGESAHAN SEMINAR HASIL PENELITIAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	iii
PRAKATA	iv
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR LAMPIRAN	xxviii
BAB I. PENDAHULUAN	1
A. Latarbelakang	1
B. Rumusan Masalah	11
C. Tujuan Penelitian	12
D. Batasan Masalah	13
E. Manfaat Penelitian	15
F. Ruang Lingkup Penelitian	16
G. Penelitian Terkait (State of The Art)	16
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	28
A. Penjadwalan Ekonomis Dinamis (Dynamic Economic Dispatch)	28
B. Pembangkit Listrik Termal	33
C. Deskripsi Matematis Variabel Tujuan (Objective Function)	34
1. Variabel Biaya Bahan Bakar	34
2. Rugi-Rugi Transmisi Daya Aktif	35
3. Rugi-Rugi Transmisi Daya Reaktif	36
4. Indeks Emisi	37
5. Margin Layanan Daya Reaktif	37
D. Deskripsi Constraints	38
E. Pembangkit Listrik Tenaga Angin	40
1. Kecepatan Cut-In	42
2. Daya Rated dan Kecepatan Rated	42
3. Kecepatan Cut-Out	43
4. Efisiensi Turbin Angin atau Koefisien Daya	43
5. Variabel Biaya Wind Farm	43
a. Biaya Langsung (C_d) Wind Farm	44
b. Biaya Penalti (C_p) Wind Farm	44
c. Biaya Layanan (C_r) Wind Farm	45
F. Variabel Biaya Integrasi Thermal-Wind	46
G. Analisis Aliran Daya dan Klasifikasi Bus	46
H. Metode Newton Raphson	50
I. Tinjauan Stabilitas Tegangan	55

J. Pendekatan Indeks L Stabilitas Tegangan	57
K. Metode Optimasi	59
1. Metode Optimasi Lalat Buah (Fruit Fly Optimization Method)	60
2. Metode Koloni Lebah Buatan (Artificial Bee Colony Method)	63
L. Kerangka Pikir	69
BAB III. METODE PENELITIAN	74
A. Metode	74
1. Jenis Penelitian	74
2. Desain Penelitian	74
3. Tahapan Penelitian	81
4. Alat yang Digunakan	83
B. Lokasi dan Waktu Penelitian	84
C. Teknik Pengumpulan Data, Analisis Data, dan Validasi Data	84
D. Data dan Pemodelan Sistem	86
1. Data	86
2. Pemodelan Sistem	87
a. IEEE 14 Bus	87
b. IEEE 26 Bus	89
c. IEEE 30 Bus	92
d. Indian Utility 62 Bus	97
e. Sulsebar 150 kV	104
E. Model Matematis Optimasi	108
F. Metode Optimasi	113
1. Metode Optimasi Lalat Buah (FOA)	114
a. Diagram Alir	114
b. Inisialisasi	115
c. Penentuan Arah dan Jarak Tempuh FOA	115
d. Variabel Fitness	116
e. Tahapan Optimasi	116
2. Metode Optimasi Koloni Lebah Buatan (ABC)	117
a. Diagram Alir	117
b. Inisialisasi	117
c. Variabel Fitness	118
d. Tahapan Optimasi	118
3. Metode Optimasi Hybrid FOA-ABC dan Hybrid MFOA-ABC	119
a. Prosedur Algoritma Metode Hybrid FOA-ABC	119
b. Prosedur Algoritma Metode Hybrid MFOA-ABC	121
c. Diagram Alir metode Hybrid FOA-ABC dan Hybrid MFOA-ABC	122
d. Inisialisasi Kawanan Lalat Buah dan Koloni Lebah	127
e. Variabel Fitness	127
f. Tahapan Optimasi	127
g. Komparasi Hasil Proses FOA dan ABC	129

BAB IV. HASIL PENELITIAN	130
A. Deskripsi Pengujian Model Sistem	130
B. Sistem Kelistrikan IEEE 14 Bus	134
C. Sistem Kelistrikan IEEE 26 Bus	143
D. Sistem Kelistrikan IEEE 30 Bus	159
E. Sistem Kelistrikan IEEE 62 Bus	189
F. Sistem Kelistrikan Suselbar 150 kV	201
1. Pengujian Sistem Kelistrikan Suselbar 150 kV	201
a. Pengujian Sistem Kelistrikan Suselbar 150 kV dengan Metode FOA	202
b. Pengujian Sistem Kelistrikan Suselbar 150 kV dengan Metode ABC	205
c. Pengujian Sistem Kelistrikan Suselbar 150 kV dengan Metode Hybrid FOA-ABC	208
d. Pengujian Sistem Kelistrikan Suselbar 150 kV dengan Metode Hybrid MFOA-ABC	214
2. Pengujian Pembangkit Termal Sistem Kelistrikan Suselbar 150 kV Terintegrasi dengan PLTB Tolo Menggunakan Metode Hybrid FOA-ABC	221
3. Profil Tegangan Sistem Kelistrikan Suselbar 150 kV	225
a. Profil Tegangan Sistem Kelistrikan Suselbar 150 kV dengan Metode FOA	225
b. Profil Tegangan Sistem Kelistrikan Suselbar 150 kV dengan Metode ABC	227
c. Profil Tegangan Sistem Kelistrikan Suselbar 150 kV dengan Metode Lagrange	229
d. Profil Tegangan Sistem Kelistrikan Suselbar 150 kV dengan Metode Hybrid FOA-ABC	231
e. Profil Tegangan Sistem Kelistrikan Suselbar 150 kV dengan Metode Hybrid MFOA-ABC	233
4. Indeks L Stabilitas Tegangan Sistem Kelistrikan Suselbar 150 kV	239
a. Stabilitas Indeks L dan Tegangan Sistem Kelistrikan Suselbar 150 kV Menggunakan metode FOA	239
b. Stabilitas Indeks L dan Tegangan Sistem Kelistrikan Suselbar 150 kV Menggunakan metode ABC	242
c. Stabilitas Indeks L dan Tegangan Sistem Kelistrikan Suselbar 150 kV Menggunakan metode Hybrid FOA-ABC	244
d. Stabilitas Indeks L dan Tegangan Sistem Kelistrikan Suselbar 150 kV Menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC	246
5. Kurva V-P (Pembebanan) Sistem Kelistrikan Suselbar 150 kV	249
a. Kurva V-P Sistem Kelistrikan Suselbar 150 kV Menggunakan Metode FOA	249

b. Kurva V-P Sistem Kelistrikan Sulselbar 150 kV	254
Menggunakan Metode ABC	
c. Kurva V-P Sistem Kelistrikan Sulselbar 150 kV	258
Menggunakan Metode Hybrid FOA-ABC	
d. Kurva V-P Sistem Kelistrikan Sulselbar 150 kV	262
Menggunakan Metode Hybrid MFOA-ABC	
 BAB V. PENUTUP	272
A. Kesimpulan	272
B. Saran	280
 DAFTAR PUSTAKA	282
BIODATA	289
LAMPIRAN	290

DAFTAR TABEL

Tabel 1	State of The Art	17
Tabel 2.1	Perencanaan, operasi dan kontrol sistem tenaga	30
Tabel 2.2	Publikasi DED sejak tahun 1972	30
Tabel 2.3	Masalah MODED dengan variabel biaya kuadratik (Q)	31
Tabel 2.4	Kelas kerapatan tenaga angin pada 10 m dan 50 m	41
Tabel 2.5	Klasifikasi jenis bus dan besaran	50
Tabel 3.1	Skenario pengujian metode optimasi	76
Tabel 3.2	Data bus sistem IEEE 14 Bus	88
Tabel 3.3	Data saluran sistem IEEE 14 bus	88
Tabel 3.4	Koefisien biaya sistem IEEE 14 bus	89
Tabel 3.5	Data injeksi kapasitor shunt sistem IEEE 14 bus	89
Tabel 3.6	Data pengaturan tap transformator sistem IEEE 14 bus	89
Tabel 3.7	Koefisien biaya bahan bakar sistem IEEE 26 bus	91
Tabel 3.8	Batas-batas daya generator sistem IEEE 26 bus	91
Tabel 3.9	Data histori wind farm sistem IEEE 26 bus	91
Tabel 3.10	Data bus sistem IEEE 30 bus	93
Tabel 3.11	Data saluran sistem IEEE 30 bus	94
Tabel 3.12	Data pengaturan tap transformator sistem IEEE 30 bus	95
Tabel 3.13	Data injeksi Q kapasitor shunt sistem IEEE 30 bus	95
Tabel 3.14	Koefisien biaya bahan bakar pembangkit sistem IEEE 30 bus	96
Tabel 3.15	Koefisien emisi sistem IEEE 30 bus	96
Tabel 3.16	Batas-batas generator ramp rate dan luaran generator pada waktu t-1 sistem IEEE 30 bus	97
Tabel 3.17	Data bus sistem Indian Utility 62 bus	98
Tabel 3.18	Data saluran sistem Indian Utility 62 bus	100
Tabel 3.19	Data koefisien biaya sistem Indian Utility 62 bus	102
Tabel 3.20	Data pengaturan tap transformator sistem Indian Utility 62 bus	103

Tabel 3.21	Data pembangkitan dan pembebanan sistem Suselbar 150 kV	105
Tabel 3.22	Impedansi saluran transmisi sistem Suselbar 150 kV	106
Tabel 3.23	Batas-batas daya generator dan generator ramp rate sistem Suselbar 150 kV	107
Tabel 3.24	Koefisien biaya bahan bakar pembangkit sistem Suselbar 150 kV	107
Tabel 3.25	Data histori pembangkit listrik tenaga bayu Tolo (PLTB Tolo)	108
Tabel 4.1	Hasil pengujian sistem IEEE 14 bus menggunakan metode FOA	135
Tabel 4.2	Hasil pengujian sistem IEEE 14 bus menggunakan metode ABC	136
Tabel 4.3	Hasil pengujian sistem IEEE 14 bus menggunakan metode Hybrid FOA-ABC	137
Tabel 4.4	Hasil pengujian sistem IEEE 14 bus menggunakan metode hybrid MFOA-ABC	139
Tabel 4.5	Perbandingan hasil optimasi sistem IEEE 14 bus metode Hybrid FOA-ABC dan metode Hybrid MFOA-ABC dengan metode lain	140
Tabel 4.6	Hasil optimasi pengujian kasus 1 sistem IEEE 26 bus menggunakan metode Hybrid FOA-ABC dengan pembangkit listrik tenaga termal	144
Tabel 4.7	Hasil optimasi pengujian kasus 1 sistem IEEE 26 bus menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC dengan pembangkit listrik tenaga termal	145
Tabel 4.8	Hasil optimasi pengujian kasus 2 sistem IEEE 26 bus menggunakan metode Hybrid FOA-AC dengan integrasi pembangkit listrik termal-angin	147

Tabel 4.9	Hasil optimasi pengujian kasus 2 sistem IEEE 26 bus menggunakan metode Hybrid MFOA-AC dengan integrasi pembangkit listrik termal-angin	149
Tabel 4.10	Hasil perbandingan optimasi sistem IEEE 26 bus menggunakan metode Hybrid dengan metode lain	152
Tabel 4.11	Hasil optimasi pengujian kasus 1 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode FOA dengan dua variabel objective	160
Tabel 4.12	Hasil optimasi pengujian kasus 1 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode ABC dengan dua variabel objective	161
Tabel 4.13	Hasil optimasi pengujian kasus 1 sistem IEEE 30 bus dengan metode Hybrid FOA-ABC untuk dua variabel objective	162
Tabel 4.14	Hasil optimasi pengujian kasus 1 sistem IEEE 30 bus dengan metode Hybrid MFOA-ABC dengan dua variabel objective	164
Tabel 4.15	Perbandingan optimasi hasil pengujian kasus 1 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode hybrid dengan metode FOA dan ABC	165
Tabel 4.16	Hasil optimasi pengujian kasus 2 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode FOA dengan tiga variabel <i>objective</i>	167
Tabel 4.17	Hasil optimasi pengujian kasus 2 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode ABC dengan tiga variabel <i>objective</i>	169
Tabel 4.18	Hasil optimasi pengujian kasus 2 sistem IEEE 30 bus dengan metode Hybrid FOA-ABC untuk tiga variabel <i>objective</i>	170
Tabel 4.19	Hasil optimasi pengujian kasus 2 sistem IEEE 30 bus dengan metode Hybrid MFOA-ABC untuk tiga variabel <i>objective</i>	171
Tabel 4.20	Perbandingan optimasi hasil pengujian kasus 2 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode Hybrid dengan metode FOA dan metode ABC	173
Tabel 4.21	Hasil optimasi pengujian kasus 3 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode FOA dengan lima variabel <i>objective</i>	176

Tabel 4.22	Hasil optimasi pengujian kasus 3 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode ABC dengan lima variabel <i>objective</i>	178
Tabel 4.23	Hasil optimasi pengujian kasus 3 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode Hybrid FOA-ABC dengan lima variabel <i>objective</i> dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i>	180
Tabel 4.24	Hasil optimasi pengujian kasus 3 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode hybrid FOA-ABC dengan lima variabel <i>objective</i> untuk batas-batas daya generator dan generator ramp rate sebagai <i>constraint</i>	181
Tabel 4.25	Hasil optimasi biaya bahan bakar pembangkitan dan indeks emisi yang diperoleh menggunakan metode hybrid FOA-ABC mempertimbangkan biaya pembobotan generator dan emisi pembobotan generator.	183
Tabel 4.26	Hasil optimasi pengujian kasus 3 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC dengan lima variabel <i>objective</i>	184
Tabel 4.27	Perbandingan optimasi hasil pengujian kasus 3 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode hybrid dengan metode FOA, metode ABC, dan PSO	186
Tabel 4.28	Hasil optimasi pengujian sistem IEEE 62 bus menggunakan metode FOA	190
Tabel 4.29	Hasil optimasi pengujian sistem IEEE 62 bus menggunakan metode ABC	192
Tabel 4.30	Hasil optimasi pengujian sistem IEEE 62 bus menggunakan metode Hybrid FOA-ABC	194
Tabel 4.31	Hasil optimasi pengujian sistem IEEE 62 bus menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC	196
Tabel 4.32	Perbandingan hasil optimasi metode Hybrid FOA-ABC dan metode Hybrid MFOA-ABC dengan metode lain sistem IEEE 62 bus	198

Tabel 4.33	Hasil optimasi pengujian sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode FOA dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i>	202
Tabel 4.34	Hasil optimasi pengujian sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode FOA dengan batas-batas daya dan generator ramp rate sebagai <i>constraint</i>	204
Tabel 4.35	Hasil optimasi pengujian sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode ABC dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i>	206
Tabel 4.36	Hasil optimasi pengujian sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode ABC dengan batas-batas daya generator dan generator ramp rate sebagai <i>constraint</i>	206
Tabel 4.37	Hasil optimasi pengujian pembangkit termal sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode hybrid FOA-ABC dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraintI</i> untuk beban puncak 339,74 MW	208
Tabel 4.38	Hasil optimasi pengujian pembangkit termal sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode hybrid FOA-ABC dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraintI</i> untuk beban puncak 452,445 MW	209
Tabel 4.39	Hasil optimasi pengujian pembangkit termal sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode hybrid FOA-ABC dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraintI</i> untuk beban puncak 565,15 MW	211
Tabel 4.40	Hasil optimasi pengujian sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode hybrid FOA-ABC dengan batas-batas daya generator dan generator ramp rate sebagai <i>constraint</i>	212
Tabel 4.41	Hasil optimasi pengujian sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode hybrid MFOA-ABC dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i>	214

Tabel 4.42	Hasil optimasi pengujian sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode hybrid MFOA-ABC dengan batas-batas daya generator dan generator ramp rate sebagai <i>constraint</i>	216
Tabel 4.43	Perbandingan hasil optimasi pengujian sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i>	217
Tabel 4.44	Perbandingan hasil optimasi pengujian sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV dengan batas-batas daya generator dan generator ramp rate sebagai <i>constraint</i>	220
Tabel 4.45	Hasil optimasi pengujian pembangkit termal sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV terintegrasi PLTB Tolo dengan batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraint</i>	222
Tabel 4.46	Perbandingan hasil optimasi pengujian pembangkit termal sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV terintegrasi PLTB Tolo dengan batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraint</i> sebelum dan sesudah integrasi	223
Tabel 4.47	Profil tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV dengan menggunakan metode FOA dengan batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraint</i>	225
Tabel 4.48	Profil tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV dengan menggunakan metode ABC dengan batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraint</i>	227
Tabel 4.49	Profil tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV dengan menggunakan metode Lagrange dengan batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraint</i>	230
Tabel 4.50	Profil tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV dengan menggunakan metode Hybrid FOA-ABC dengan batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraint</i>	232

Tabel 4.51	Profil tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV dengan menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC dengan batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraint</i>	234
Tabel 4.52	Perbandingan profil tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC, Hybrid FOA-ABC, metode FOA, metode ABC, dan metode Lagrange dengan batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraint</i>	236
Tabel 4.53	Nilai indeks L stabilitas tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode FOA	240
Tabel 4.54	Nilai indeks L stabilitas tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode ABC	242
Tabel 4.55	Nilai indeks L stabilitas tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode Hybrid FOA-ABC	244
Tabel 4.56	Nilai indeks L stabilitas tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC	247
Tabel 4.57	Nilai indeks L stabilitas tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode FOA dengan pembebanan pada bus 3 sebesar 289 MW	250
Tabel 4.58	Hasil optimasi pengujian sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode FOA dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i> saat pembebanan pada bus 3 sebesar 289 MW	252
Tabel 4.59	Nilai indeks L stabilitas tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode ABC dengan pembebanan pada bus 3 sebesar 289 MW	254
Tabel 4.60	Hasil optimasi pengujian sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode ABC dengan batas-batas daya	257

	generator sebagai <i>constraint</i> saat pembebanan pada bus 3 sebesar 289 MW	
Tabel 4.61	Nilai indeks L stabilitas tegangan sistem kelistrikan Sulsebar 150 kV menggunakan metode Hybrid FOA-ABC dengan pembebanan pada bus 3 sebesar 289 MW	258
Tabel 4.62	Hasil optimasi pengujian sistem kelistrikan Sulsebar 150 kV menggunakan metode hybrid FOA-ABC dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i> saat pembebanan pada bus 3 sebesar 289 MW	261
Tabel 4.63	Nilai indeks L stabilitas tegangan sistem kelistrikan Sulsebar 150 kV menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC dengan pembebanan pada bus 3 sebesar 289 MW	263
Tabel 4.64	Hasil optimasi pengujian sistem kelistrikan Sulsebar 150 kV menggunakan metode hybrid MFOA-ABC dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i> saat pembebanan pada bus 3 sebesar 289 MW	265
Tabel 4.65	Perbandingan profil tegangan pada bus 3 dengan menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC, metode Hybrid FOA-ABC, metode FOA, dan metode ABC saat pembebanan sebesar 289 MW	267
Tabel 4.66	Perbandingan hasil optimasi pengujian sistem kelistrikan Sulsebar 150 kV dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i> saat pembebanan pada bus 3 sebesar 289 MW	269

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Pemetaan Publikasi	25
Gambar 2.1	N unit pembangkit termal yang melayani beban	29
Gambar 2.2	Karakteristik masukan-luaran pembangkit listrik termal	33
Gambar 2.3	Luaran daya turbin angin dengan kecepatan stabil	42
Gambar 2.4	Rangkaian π nominal suatu saluran transmisi jarak menengah	48
Gambar 2.5	Kurva V-P	56
Gambar 2.6	Struktur teknik optimasi heuristik	60
Gambar 2.7	Skema pencarian makanan dari kawanan lalat buah	61
Gambar 2.8	Flowchart metode optimasi FOA	63
Gambar 2.9	Flowchart metode optimasi ABC	68
Gambar 2.10a	Bagan kerangka pikir pemetaan permasalahan penjadwalan ekonomis dinamik pembangkit	71
Gambar 2.10b	Bagan kerangka pikir desain, pemodelan, dan metode optimasi penjadwalan ekonomis dinamik pembangkit	72
Gambar 2.10c	Bagan kerangka pikir luaran dan hasil penelitian penjadwalan ekonomis dinamik pembangkit	73
Gambar 3.1	Bagan alir desain penelitian-1	78
Gambar 3.2	Bagan alir desain penelitian-2	79
Gambar 3.3	Bagan alir desain penelitian-3	80
Gambar 3.4	Bagan alir desain penelitian-4	81
Gambar 3.5a	Proses tahapan penelitian-1	82
Gambar 3.5b	Proses tahapan penelitian-2	83
Gambar 3.6	Diagram satu garis sistem IEEE 14 bus	87
Gambar 3.7	Diagram satu garis sistem IEEE 26 bus	90
Gambar 3.8	Diagram satu garis sistem IEEE 30 bus	93
Gambar 3.9	Diagram satu garis sistem Indian Utility 62 bus	98
Gambar 3.10	Diagram satu garis sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV	105

Gambar 3.11	Diagram alir optimasi MDED dengan metode FOA	115
Gambar 3.12	Diagram alir optimasi MDED dengan metode ABC	117
Gambar 3.13	Diagram alir metode hybrid FOA-ABC	124
Gambar 3.14	Diagram alir metode hybrid MFOA-ABC	125
Gambar 3.15	Diagram alir optimasi MDED dengan metode hybrid FOA-ABC dan metode hybrid MFOA-ABC	126
Gambar 4.1	Kurva konvergensi total biaya bahan bakar pembangkitan metode FOA sistem IEEE 14 bus	136
Gambar 4.2	Kurva konvergensi total biaya bahan bakar pembangkitan metode hybrid FOA-ABC sistem IEEE 14 bus	138
Gambar 4.3	Kurva konvergensi total biaya bahan bakar pembangkitan metode hybrid MFOA-ABC sistem IEEE 14 bus	140
Gambar 4.4	Kurva konvergensi total biaya bahan bakar pembangkitan termal sistem IEEE 26 bus menggunakan metode Hybrid FOA-ABC tanpa integrasi pembangkit listrik tenaga angin	145
Gambar 4.5	Kurva konvergensi total biaya bahan bakar pembangkitan termal sistem IEEE 26 bus menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC tanpa integrasi pembangkit listrik tenaga angin	146
Gambar 4.6	Kurva konvergensi total biaya pembangkitan sistem IEEE 26 bus menggunakan metode Hybrid FOA-ABC terintegrasi pembangkit listrik tenaga termal-angin	149
Gambar 4.7	Kurva konvergensi total biaya pembangkitan sistem IEEE 26 bus menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC integrasi pembangkit listrik tenaga termal-angin	151
Gambar 4.8	Kurva konvergensi indeks emisi pengujian kasus 1 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode optimasi FOA	161

Gambar 4.9	Kurva konvergensi indeks emisi pengujian kasus 1 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode optimasi Hybrid FOA-ABC	163
Gambar 4.10	Kurva konvergensi indeks emisi pengujian kasus 1 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode optimasi Hybrid MFOA-ABC	166
Gambar 4.11	Kurva konvergensi indeks emisi pengujian kasus 2 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode optimasi FOA	169
Gambar 4.12	Kurva konvergensi indeks emisi pengujian kasus 2 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode optimasi Hybrid FOA-ABC	171
Gambar 4.13	Kurva konvergensi indeks emisi pengujian kasus 2 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode optimasi Hybrid MFOA-ABC	173
Gambar 4.14	Kurva konvergensi biaya bahan bakar pembangkitan pengujian kasus 3 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode optimasi FOA	178
Gambar 4.15	Kurva konvergensi biaya bahan bakar pembangkitan pengujian kasus 3 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode hybrid FOA-ABC untuk batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i>	181
Gambar 4.16	Kurva konvergensi biaya bahan bakar pembangkitan pengujian kasus 3 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode hybrid FOA-ABC untuk batas-batas daya generator dan generator <i>ramp rate</i> sebagai <i>constraint</i>	183
Gambar 4.17	Kurva konvergensi total biaya bahan bakar pembangkitan pengujian kasus 3 sistem IEEE 30 bus menggunakan metode hybrid MFOA-ABC	186
Gambar 4.18	Kurva konvergensi biaya bahan bakar pembangkitan sistem IEEE 62 bus menggunakan metode FOA	192

Gambar 4.19	Kurva konvergensi total biaya bahan bakar pembangkitan sistem IEEE 62 bus menggunakan metode Hybrid FOA-ABC	196
Gambar 4.20	Kurva konvergensi total biaya bahan bakar pembangkitan sistem IEEE 62 bus menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC	198
Gambar 4.21	Kurva konvergensi biaya bahan bakar pembangkitan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode optimasi FOA dengan batas-batas daya sebagai <i>constraint</i>	203
Gambar 4.22	Kurva konvergensi biaya bahan bakar pembangkitan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode optimasi FOA dengan batas-batas daya generator dan <i>generator ramp rate</i> sebagai <i>constraint</i>	205
Gambar 4.23	Kurva konvergensi total biaya bahan bakar pembangkitan termal sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode optimasi FOA dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i> untuk beban 339,74 MW	209
Gambar 4.24	Kurva konvergensi total biaya bahan bakar pembangkitan termal sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode optimasi FOA dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i> untuk beban 452,445 MW	210
Gambar 4.25	Kurva konvergensi biaya bahan bakar pembangkitan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode Hybrid FOA-ABC dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i> untuk beban puncak 565,15 MW	212
Gambar 4.26	Kurva konvergensi total biaya bahan bakar pembangkitan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV	214

	menggunakan metode hybrid FOA-ABC dengan batas-batas daya generator dan <i>generator ramp rate</i> sebagai <i>constraint</i>	
Gambar 4.27	Kurva konvergensi biaya bahan bakar pembangkitan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i>	215
Gambar 4.28	Kurva konvergensi biaya bahan bakar pembangkitan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode hybrid MFOA-ABC dengan batas-batas daya generator dan <i>generator ramp rate</i> sebagai <i>constraint</i>	217
Gambar 4.29	Kurva konvergensi optimasi sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV terintegrasi PLTB Tolo untuk daya output PLTB Tolo 50,3 MW menggunakan metode Hybrid FOA-ABC	223
Gambar 4.30	Grafik profil tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode FOA dengan batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraint</i>	227
Gambar 4.31	Grafik profil tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode ABC dengan batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraint</i>	229
Gambar 4.32	Grafik profil tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode Lagrange dengan batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraint</i>	231
Gambar 4.33	Grafik profil tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode hybrid FOA-ABC dengan batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraint</i>	233
Gambar 4.34	Grafik profil tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode hybrid MFOA-ABC dengan	235

	batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraint</i>	
Gambar 4.35	Grafik perbandingan profil tegangan sistem kelistrikan Sulsebar 150 kV metode Hybrid FOA-ABC dan Hybrid MFOA-ABC dengan metode FOA, metode ABC dan metode Lagrange dengan batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraint</i>	237
Gambar 4.36	Nilai indeks L dan tegangan sistem kelistrikan Sulsebar 150 kV menggunakan metode FOA	241
Gambar 4.37	Nilai indeks L dan tegangan sistem kelistrikan Sulsebar 150 kV menggunakan metode ABC	243
Gambar 4.38	Nilai indeks L dan tegangan sistem kelistrikan Sulsebar 150 kV menggunakan metode Hybrid FOA-ABC	246
Gambar 4.39	Nilai indeks L dan tegangan sistem kelistrikan Sulsebar 150 kV menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC	248
Gambar 4.40	Grafik kurva V-P sistem kelistrikan Sulsebar 150 kV menggunakan metode FOA dengan pembebanan pada bus 3 sebesar 289 MW	251
Gambar 4.41	Kurva konvergensi biaya bahan bakar pembangkitan sistem kelistrikan Sulsebar 150 kV menggunakan metode FOA dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i> saat pembebanan pada bus 3 sebesar 289 MW.	253
Gambar 4.42	Grafik kurva V-P sistem kelistrikan Sulsebar 150 kV menggunakan metode ABC dengan pembebanan pada bus 3 sebesar 289 MW	256
Gambar 4.43	Grafik kurva V-P sistem kelistrikan Sulsebar 150 kV menggunakan metode Hybrid FOA-ABC dengan pembebanan pada bus 3 sebesar 289 MW	260
Gambar 4.44	Kurva konvergensi biaya bahan bakar pembangkitan sistem kelistrikan Sulsebar 150 kV menggunakan metode hybrid FOA-ABC dengan batas-batas daya	261

	generator sebagai <i>constraint</i> saat pembebanan pada bus 3 sebesar 289 MW	
Gambar 4.45	Grafik kurva V-P sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC dengan pembebanan pada bus 3 sebesar 289 MW	264
Gambar 4.46	Kurva konvergensi biaya bahan bakar pembangkitan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode hybrid MFOA-ABC dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i> saat pembebanan pada bus 3 sebesar 289 MW	266
Gambar 4.47	Grafik profil tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV saat pembebanan pada bus 3 sebesar 289 MW menggunakan metode Hybrid FOA-ABC, Hybrid MFOA-ABC, metode FOA, dan metode ABC	268
Gambar 4.48	Grafik perbandingan biaya bahan bakar dan rugi-rugi saluran transmisi daya aktif sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV saat pembebanan pada bus 3 sebesar 289 MW menggunakan metode Hybrid FOA-ABC, metode Hybrid MFOA-ABC, metode FOA, dan metode ABC	270

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	Daftar publikasi ilmiah	290
Lampiran B.1	Validasi terbalik, Hasil simulasi rugi-rugi daya aktif sistem IEEE 30 bus, di mana data sistem IEEE 30 bus dijalankan dengan menggunakan metode Newton Raphson sebelum metode optimasi Hybrid diterapkan	292
Lampiran B.2	Validasi terbalik, Hasil simulasi rugi-rugi daya aktif sistem IEEE 30 bus, di mana luaran dari metode optimasi Hybrid FOA-ABC dimasukkan kembali ke metode Newton Raphson	296
Lampiran C	Validasi metode ABC dengan variabel kuadratik dan integral	301
Lampiran D	Validasi metode FOA dengan variabel kuadratik dan integral	303
Lampiran E	Validasi metode Hybrid FOA-ABC dengan variabel kuadratik dan integral	305
Lampiran F	Validasi metode Hybrid MFOA-ABC dengan variabel kuadratik dan integral	307
Lampiran G.1	Hasil simulasi IEEE 14 bus menggunakan metode FOA	309
Lampiran G.2	Hasil simulasi IEEE 14 bus menggunakan metode ABC	310
Lampiran G.3	Hasil simulasi IEEE 14 bus menggunakan metode Hybrid FOA-ABC	311
Lampiran G.4	Hasil simulasi IEEE 14 bus menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC	312
Lampiran H.1	Hasil simulasi IEEE 26 Bus tanpa integrasi pembangkit listrik tenaga angin menggunakan metode hybrid FOA-ABC	314
Lampiran H.2	Hasil simulasi IEEE 26 Bus terintegrasi pembangkit listrik tenaga angin menggunakan metode hybrid FOA-ABC	314
Lampiran H.3	Hasil simulasi IEEE 26 Bus tanpa integrasi pembangkit listrik tenaga angin menggunakan metode hybrid MFOA-ABC	315
Lampiran H.4	Hasil simulasi IEEE 26 Bus terintegrasi pembangkit listrik tenaga angin menggunakan metode hybrid MFOA-ABC	315
Lampiran I.1	Hasil simulasi IEEE 30 Bus dengan dua variabel objektif menggunakan metode FOA	317

Lampiran I.2	Hasil simulasi IEEE 30 Bus dengan dua variabel objektif menggunakan metode ABC	318
Lampiran I.3	Hasil simulasi IEEE 30 Bus dengan dua variabel objektif menggunakan metode Hybrid FOA-ABC	320
Lampiran I.4	Hasil simulasi IEEE 30 Bus dengan dua variabel objektif menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC	322
Lampiran I.5	Hasil simulasi IEEE 30 Bus dengan tiga variabel objektif menggunakan metode FOA	323
Lampiran I.6	Hasil simulasi IEEE 30 Bus dengan tiga variabel objektif menggunakan metode ABC	325
Lampiran I.7	Hasil simulasi IEEE 30 Bus dengan tiga variabel objektif menggunakan metode Hybrid FOA-ABC	327
Lampiran I.8	Hasil simulasi IEEE 30 Bus dengan tiga variabel objektif menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC	328
Lampiran I.9	Hasil simulasi IEEE 30 Bus dengan lima variabel objektif menggunakan metode FOA	330
Lampiran I.10	Hasil simulasi IEEE 30 Bus dengan lima variabel objektif menggunakan metode ABC	332
Lampiran I.11	Hasil simulasi IEEE 30 Bus dengan lima variabel objektif menggunakan metode Hybrid FOA-ABC dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i>	334
Lampiran I.12	Hasil simulasi IEEE 30 Bus dengan lima variabel objektif menggunakan metode Hybrid FOA-ABC dengan batas-batas daya generator dan generator ramp rate sebagai <i>constraint</i>	336
Lampiran I.13	Hasil simulasi IEEE 30 Bus dengan lima variabel objektif menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC	338
Lampiran J.1	Hasil simulasi IEEE 62 Bus Indian Utility menggunakan metode FOA	340
Lampiran J.2	Hasil simulasi IEEE 62 Bus Indian Utility menggunakan metode ABC	344
Lampiran J.3	Hasil simulasi IEEE 62 Bus Indian Utility menggunakan metode Hybrid FOA-ABC	349
Lampiran J.4	Hasil simulasi IEEE 62 Bus Indian Utility menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC	353
Lampiran K.1	Hasil simulasi sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode FOA dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i>	358

Lampiran K.2	Hasil simulasi sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode ABC dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i>	359
Lampiran K.3	Hasil simulasi sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode Hybrid FOA-ABC dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i> untuk beban 339,74 MW	361
Lampiran K.4	Hasil simulasi sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode Hybrid FOA-ABC dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i> untuk beban 452,445 MW	363
Lampiran K.5	Hasil simulasi sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode Hybrid FOA-ABC dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i> untuk beban puncak 565,15 MW	362
Lampiran K.6	Hasil simulasi sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode Hybrid FOA-ABC dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i> terintegrasi dengan PLTB Tolo	367
Lampiran K.7	Hasil simulasi sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC dengan batas-batas daya generator sebagai <i>constraint</i>	368
Lampiran K.8	Hasil simulasi sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode FOA dengan batas-batas daya generator dan generator ramp rate sebagai <i>constraint</i>	370
Lampiran K.9	Hasil simulasi sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode ABC dengan batas-batas daya generator dan generator ramp rate sebagai <i>constraint</i>	372
Lampiran K.10	Hasil simulasi sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode Hybrid FOA-ABC dengan batas-batas daya generator dan generator ramp rate sebagai <i>constraint</i>	374
Lampiran K.11	Hasil simulasi sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC dengan batas-batas daya generator dan generator ramp rate sebagai <i>constraint</i>	376
Lampiran K.12	Hasil simulasi stabilitas tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV dengan indeks L menggunakan metode FOA dengan batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraints</i>	377

Lampiran K.13	Hasil simulasi stabilitas tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV dengan indeks L menggunakan metode ABC dengan batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraints</i>	378
Lampiran K.14	Hasil simulasi stabilitas tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV dengan indeks L menggunakan metode Hybrid FOA-ABC dengan batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraints</i>	379
Lampiran K.15	Hasil simulasi stabilitas tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV dengan indeks L menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC dengan batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraints</i>	380
Lampiran K.16	Hasil simulasi stabilitas tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV saat pembebanan pada bus 3 (bus Panakkukang) sebesar 289 MW dengan indeks L menggunakan metode FOA dengan batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraints</i>	380
Lampiran K.17	Hasil simulasi stabilitas tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV saat pembebanan pada bus 3 (bus Panakkukang) sebesar 289 MW dengan indeks L menggunakan metode ABC dengan batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraints</i>	381
Lampiran K.18	Hasil simulasi stabilitas tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV saat pembebanan pada bus 3 (bus Panakkukang) sebesar 289 MW dengan indeks L menggunakan metode Hybrid FOA-ABC dengan batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraints</i>	382
Lampiran K.19	Hasil simulasi stabilitas tegangan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV saat pembebanan pada bus 3 (bus Panakkukang) sebesar 289 MW dengan indeks L menggunakan metode Hybrid MFOA-ABC dengan batas-batas daya generator dan keseimbangan daya sebagai <i>constraints</i>	383

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Energi listrik merupakan sumber energi yang sangat penting saat ini bagi kehidupan manusia baik untuk kegiatan sektor industri, kegiatan komersial atau bisnis maupun sektor perumahan dan perkantoran, khususnya penggunaan energi listrik dalam kehidupan sehari-hari untuk kebutuhan rumah tangga. Energi listrik dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan proses produksi dan penerangan yang melibatkan berbagai macam alat-alat/mesin industri dan peralatan elektronik. Energi terkait erat dengan pencemaran lingkungan, pengembangan ekonomi dan kualitas hidup. Ketergantungan akan bahan bakar fosil tak terbarukan yang jumlahnya semakin hari semakin berkurang, saat ini menjadi penyebab utama terjadinya polusi dan perubahan iklim. Energi listrik secara historis terpusat dalam hal pembangkit yang berasal dari sumber energi konvensional yang tergantung pada batu bara dan minyak dengan biaya operasional yang tinggi, dan didistribusikan dalam satu arah jaringan listrik.

Dunia berubah karena energi baru dari pembangkit yang lebih tersebar dengan penambahan sumber-sumber terbarukan seperti tenaga angin dan surya, aliran dua arah jaringan listrik, pengurangan energi emisi karbon (*decarbonized energy*), serta keterlibatan peningkatan dari sisi permintaan konsumen. Jaringan baru akan jauh lebih digital, lebih fleksibel, dinamis, dan terhubung dengan

peningkatan persyaratan untuk kinerja di mana listrik mengambil bagian yang lebih tinggi dari pembauran energi. Permintaan beban yang meningkat dan meningkatnya biaya bahan bakar dalam proses pembangkitan tenaga listrik maka dibutuhkan suatu evolusi sumber energi baru [1].

Produksi listrik berbasis sumber energi terbarukan tidak bergantung dari sumber konvensional dan variasi konsumsi energi. Pembangkitan berkelanjutan dijadwalkan sesuai dengan tingkat perkiraan beban serta beberapa pembatasan teknis dan ekonomi.

Sumber energi terbarukan bergantung cuaca, seperti pembangkit tenaga angin dan surya harus dioptimalkan pada kemungkinan luaran maksimumnya, untuk menyajikan partisipasi yang tinggi dari sumber energi terbarukan untuk bauran produksi energi listrik. Sewaktu-waktu jaringan energi lokal atau terisolasi perlu dipertimbangkan, termasuk risikonya yang mengarah ke pasokan energi yang tidak efisien. Masalah ini menjadi lebih penting dengan peningkatan berkelanjutan dari bagian sumber energi terbarukan pada pembangkitan tenaga listrik. Penetrasi tinggi dari pembangkitan energi terbarukan pada sistem tenaga yang semakin meningkat dan sifat *intermittent* dari sumber-sumber yang dapat diperbaharui seharusnya dikelola untuk menjaga keseimbangan antara sistem pembangkitan daya dan sisi permintaan beban yang dilayani [2].

Perencanaan integrasi energi telah menjadi suatu kebutuhan untuk pertumbuhan sektor energi listrik yang berkelanjutan dari setiap negara [3]. Pada sistem tenaga listrik, kualitas, keandalan, keamanan dan stabilitas sangat penting [4]. Stabilitas sistem memiliki efek yang signifikan ketika jaringan listrik yang

saling interkoneksi dikembangkan [5]. Sistem pembangkitan tenaga listrik praktis tidak menempatkan pembangkit listrik pada jarak yang sama dari pusat beban dan biaya bahan bakarnya juga berbeda. Kondisi operasi normal dari kapasitas pembangkitan sistem tenaga listrik adalah total permintaan beban ditambah rugi-rugi [6].

Tujuan penjadwalan ekonomis pembangkit adalah untuk menentukan luaran daya optimal dari unit-unit pembangkit untuk memenuhi kebutuhan permintaan beban dengan memenuhi beberapa batasan operasi untuk satu periode penyaluran daya dan ini juga dikenal dengan penjadwalan ekonomi klasik (CED) di mana batasan keamanan saluran diabaikan [7]. Tujuan utama dari seorang insinyur tenaga adalah untuk merancang sistem pembangkit tenaga listrik yang handal, optimal dan efisien pada biaya produksi dan operasi yang minimum [8]. Tujuan utama dari penggunaan tenaga listrik adalah untuk memberikan suplai daya yang handal dan berkualitas tinggi kepelanggan pada biaya yang paling minimum sementara pengoperasiannya untuk memenuhi batas-batas dan batasan-batasan yang mungkin pada unit-unit pembangkit dan pertimbangan lingkungan [9].

Penjadwalan ekonomis pembangkit (ED) adalah penentuan luaran optimal dari beberapa pembangkit listrik untuk memenuhi permintaan beban dengan biaya terendah. Sementara itu, Penjadwalan ekonomis dinamik (DED) adalah penjadwalan yang mampu memprediksi kemampuan beban untuk periode tertentu dan mengkoordinasikan perubahan beban sesuai tingkat respons dari unit generator. DED adalah suatu perluasan dari masalah penjadwalan ekonomis konvensional yang digunakan untuk menentukan jadwal pembangkitan optimal dari generator

sehingga dapat memenuhi prediksi permintaan beban di masa datang [10]. Menurut [11], masalah ED adalah bagaimana mengatur luaran dari unit generator untuk memenuhi permintaan listrik dengan biaya bahan bakar yang rendah dan memenuhi batasan sistem. Tetapi [12], ED adalah bagaimana cara mengurangi biaya pengoperasian pembangkit listrik untuk mendapatkan kondisi optimal pembangkit listrik pada beban tertentu. Demikian pula dalam [13], ED adalah metode untuk menghitung jumlah daya yang dibangkitkan dari setiap unit pembangkit untuk memenuhi permintaan beban dengan meminimumkan biaya bahan bakar dari pembangkit. Tetapi dalam penelitian [14] mengatakan bahwa optimasi biaya bahan bakar pembangkitan dengan mempertimbangkan penjadwan ekonomis dan emisi perlu dilakukan perubahan masalah optimasi ke variabel *objective* tunggal dengan menggunakan koefisien pembobotan dan faktor penalti harga.

Sejumlah metode optimasi yang telah digunakan terkait dengan masalah penjadwalan ekonomis (ED) oleh beberapa peneliti sebelumnya, seperti *genetic algorithm* dengan satu variabel *objective* [15], *modified adaptive multiobjective differential evolution (MAMODE) algorithm* dengan dua variabel *objective* [16], *evolutionary programming techniques algorithm* dengan satu variabel *objective* [17], *particle swarm optimization algorithm* dengan satu variabel *objective* [1], *enhanced quantum-behaved PSO* dengan satu variabel *objective* [11], *chaotic particle swarm optimization algorithm* dengan satu variabel *objective* [18], *particle swarm intelligence algorithm* dengan satu variabel *objective* [8], *backtracking search algorithm* dengan satu variabel *objective* [19], *improved bacterial foraging algorithm* dengan satu variabel *objective* [20], *knee point driven evolutionary*

algorithm dengan empat variabel *objective* [21], *artificial bee colony algorithm* dengan satu variabel *objective* [22], *fuzzified artificial bee colony* dengan tiga variabel *objective* [23], *improved local search involving bee colony optimization using lamda iteration combined with a golden section search method* dengan satu variabel *objective* [24], *firefly algorithm* dengan satu variabel *objective* [25], *firefly algorithm* dengan dua variabel *objective* [26], *enhanced moth-flame optimization algorithm* dengan dua variabel *objective* [27], *fuzzy cardinal method* dengan dua variabel *objective* [28], *quadratic programming method* dengan dua variabel *objective* [29], *gravitational search algorithm* dengan dua variabel *objective* [30], *parallel and distributed computation algorithm* dengan satu variabel *objective* [31], *fruit fly optimization algorithm* dengan dua variabel *objective* [32], *improved fruit fly optimization algorithm* dengan satu variabel *objective* [33], *FFO algorithm* dengan satu variabel *objective* [34], *advanced fruit fly optimization algorithm* dengan satu variabel *objective* [35], *MO-FOA algorithm* dengan dua variabel *objective* [36], *differential evolution method* dengan dua variabel *objective* [37], *evolutionary algorithm* dengan satu variabel *objective* [38], *efficient meta heuristic algorithm* dengan satu variabel *objective* [39], *harmony search algorithm* dengan dua variabel *objective* [40], *novel method with across neighborhood search algorithm* dengan satu variabel *objective* [41], *simulated annealing algorithm* dengan dua variabel *objective* [42], *assesment of hurricane versus sine-cosine optimization method* dengan dua variabel *objective* [43], *flower pollination algorithm* dengan dua variabel *objective* [44], *a chaotic krill herd algorithm* dengan satu variabel *objective* [45], *hybrid big bang-big crunch* dengan satu variabel

objective [12], *hybrid with cross-entropy method and sequential quadratic programming method* dengan satu variabel *objective* [46], *variable scaling hybrid differential evolution method* dengan satu variabel *objective* [47], *hybrid particle multi-swarm optimization method* dengan satu variabel *objective* [48], *hybrid PSO-TLBO optimization technique method* dengan dua variabel *objective* [49], *new hybrid ICA-PSO approach method* dengan satu variabel *objective* [50], *novel hybrid differential evolution algorithm* dengan satu variabel *objective* [51].

Penelitian yang terkait penjadwalan ekonomis dengan *multi objective dynamic economic dispatch* (MODED), diantaranya peneliti [52] dengan merangkum metode-metode yang digunakan dalam menyelesaikan masalah *multi objective dynamic economic dispatch* (MODED) dari yang deterministik, heuristik dan hibrid. Peneliti [53], MOELD dengan menggunakan algoritma hibrid *fuzzy, bacterial foraging-Nelder mead* dapat menyelesaikan masalah emisi, cadangan dan penjadwalan ekonomi beban (ERELD) di mana simulasinya menunjukkan pengurangan total biaya dari sistem. Peneliti [9], MODED dengan variabel biaya orde yang lebih tinggi, lebih akurat dan realistis dari pada variabel biaya kuadrat tradisional. Menurut [54] beberapa metode yang telah mempertimbangkan MODED dengan energi terbarukan (RE) di antaranya skenario *Thermal* (T) dan *Wind* (W) dengan *Simulated Annealing* (SA) dan *Direct Search Method* (DSM)-(SA-DSM), *Variable Time Resolution* (VTR) and *Scheduling Horizon* (SH)-(VTR-SH), T dan W menggunakan *Model Predictive Control* (MPC), (T, W, S dan E) menggunakan *Non Linear Constrained Method* (NLCM) dan *Weighted Aggregation* (WA) dan PSO-(WA-PSO). Peneliti [55] menyatakan bahwa metode

optimisasi *multi objective economic emission load dispatch* (MOEELD) untuk dua variabel *objective* dengan batasan beban dan batasan operasi diperhitungkan dengan asumsi tujuan variabel objektif individu, masalah *multi objective* diubah menjadi optimisasi *unique objective* dengan *goal attainment method* (GAM) yang kemudian diselesaikan dengan *simulated annealing technique* (SAT). Peneliti [56] mengemukakan bahwa model penjadwalan pembangkit *multi objective* dengan tiga variabel *objective* berdasarkan aliran daya optimal batasan keamanan digunakan untuk menangani tujuan ekonomi dan keamanan. Penelitian [57] mengusulkan suatu optimasi dengan *multi objective economic emission dispatch* (MOEED) dengan dua variabel *objective* yang disebut algoritma *Pareto Concavity Elimination Transformation* (PaCcET) yang diimplementasikan pada microgrid dengan berbagai sumber energi tersebar (DERs) untuk mencari kondisi operasi yang paling ekonomis tidak hanya meminimalkan total biaya bahan bakar tetapi juga untuk mencari solusi terbaik yang ramah lingkungan. Sedangkan, peneliti [16] mengusulkan suatu metode *modified adaptive multiobjective differential evolution* (MAMODE) dalam *model dynamic environmental economic dispatch* (DEED) dengan dua variabel *objective* untuk memecahkan masalah optimisasi *multiobjective* batasan tidak linier berdimensi tinggi dengan mempertimbangkan *valve point effect*, *ramp rate limits* dan variasi beban daya di mana hasil simulasinya menunjukkan bahwa DEED dapat diselesaikan dengan cepat dan perbandingan hasil numerik dari metode yang diusulkan mempunyai performa lebih tinggi. Peneliti [58] mengemukakan bahwa MODED dengan energi terbarukan, saluran HVDC mempunyai kemampuan yang lebih baik untuk mengontrol aliran daya,

menurunkan rugi-rugi saluran transmisi dan meningkatkan kemampuan untuk mempertahankan stabilitas tegangan.

Beberapa studi sebelumnya yang terkait dengan metode optimasi untuk masalah penjadwalan ekonomis pembangkit yang terintegrasi dengan *thermal-wind*, seperti *jaya algorithm* dengan satu variabel *objective* [59], *bat algorithm* dengan satu variabel *objective* [60], *plant growth simulation algorithm* dengan dua variabel *objective* [61], *gravitational search algorithm* dengan satu variabel *objective* [62], *group search optimizer with multiple producers algorithm* (GSOMP) dengan dua variabel *objective* [63], *improved harmony search algorithm* dengan dua variabel *objective* [64], *cuckoo search algorithm* dengan satu variabel *objective* [65], *BH, BBO, and DE algorithm* dengan satu variabel *objective* [66], *PSO algorithm* dengan satu variabel *objective* [67], *modified teaching learning based algorithm* (MTLBO) dengan satu variabel *objective* [68].

Deskripsi terkait integrasi *thermal-wind* diuraikan seperti pada penelitian yang dilakukan [1], bahwa kebutuhan untuk sumber energi terbarukan terjadi karena menipisnya sumber-sumber bahan bakar fosil sehingga koordinasi antara pembangkit tenaga angin dan termal diperlukan untuk mendapatkan pengoperasian yang lebih handal dan efisien di mana teknik *particle swarm optimization* (PSO) digunakan untuk mengkoordinasikan penjadwalan pembangkit tenaga angin-termal dan meminimalkan total biaya produksi. Peneliti [2] menyatakan bahwa biaya dan resiko dari integrasi pembangkit tenaga angin (termasuk biaya daya layanan, biaya emisi layanan dan biaya ILH dihitung berdasarkan kemungkinan prediksi kesalahan distribusi tenaga angin dan variabel tujuannya (*objective*) ditetapkan untuk

meminimalkan jumlah biaya ekonomi dan lingkungan. Sementara, [19] menyatakan bahwa sifat dari angin dan penyinaran matahari karena cuaca dan perubahan iklim yang tak menentu maka integrasi sistem pembangkit tenaga terbarukan mempersulit formulasi ELD dan mengusulkan suatu metode *backtracking search algorithm* (BSA) yang mempunyai struktur sederhana dan hanya satu parameter kontrol sebagai ukuran populasi untuk penjadwalan optimum dari integrasi matahari-angin-termal. Penelitian [69] mengemukakan dalam penelitiannya bahwa untuk meminimumkan biaya sistem dari integrasi pembangkit tenaga angin berskala besar maka metode penjadwalan ekonomis dinamik stokastik mampu menunjukkan keefektifannya dengan area pembangkit tenaga angin yang cukup luas di mana pengujiannya dilakukan pada sistem IEEE 30 bus.

Sifat intermitten dari pembangkit tenaga angin yang tak dapat diprediksi dapat menyebabkan fluktuasi daya *output* dari pembangkit merupakan ketidakpastian dan ini menjadi sebuah tantangan bagaimana mempertahankan keseimbangan antara pembangkit dan beban. Secara ringkas uraian tentang peneliti-peneliti sebelumnya yang telah melakukan riset mengenai penjadwalan ekonomis dinamik pembangkit yang terkait dengan penelitian ini diperlihatkan pada Tabel 1 (*State of the art*).

Di Indonesia, energi listrik terutama dihasilkan dari pembangkit listrik tenaga panas yang menggunakan bahan bakar fosil seperti batubara, minyak bumi, dan gas alam. Namun, ketersediaan bahan bakar fosil di dunia, terutama di Indonesia dengan seiring waktu penggunaannya cenderung terus menurun. Sebagai dampak penipisan bahan bakar fosil tersebut, hal itu akan meningkatkan harga

bahan bakar dan mempengaruhi biaya produksi untuk setiap unit generator dalam sistem kelistrikan selama operasinya. Selain itu, mengingat meningkatnya penggunaan permintaan beban listrik, hal tersebut akan meningkatkan penggunaan bahan bakar dan tentunya biaya produksi akan lebih tinggi untuk pembangkit listrik termal.

Di samping itu, undang-undang No.30 tahun 2007 tentang (1). Sumber daya energi fosil, panas bumi, hydro berskala besar, dan sumber energi nuklir dikuasai oleh negara dan dimanfaatkan sebaik-baiknya untuk kemakmuran dan kesejahteraan rakyat, (2). Sumber daya energi baru dan sumber daya energi baru terbarukan dikelola oleh negara dan dimanfaatkan sebaik-baiknya untuk kemakmuran dan kesejahteraan rakyat [70]. Undang-undang No.30 tahun 2009 tentang ketenagalistrikan, mengamanatkan bahwa pembangunan ketenagalistrikan bertujuan untuk menjamin ketersediaan tenaga listrik dalam jumlah yang cukup, kualitas yang baik dan harga yang wajar dalam rangka meningkatkan kesejahteraan dan kemakmuran rakyat secara adil dan merata serta mewujudkan pembangunan yang berkelanjutan [71]. Oleh karena itu, studi optimasi perlu dilakukan untuk mengurangi produksi biaya listrik dengan mencari daya pembangkitan tenaga listrik yang optimal untuk setiap pembangkit listrik termal dan penetrasi pembangkit listrik tenaga angin dalam sistem yang terinterkoneksi.

Penelitian ini mengusulkan "*Multi objective dynamic economic dispatch* pada sistem tenaga terintegrasi dengan pembangkit listrik tenaga angin menggunakan metode hybrid FOA-ABC dan metode hybrid MFOA-ABC" untuk mendapatkan solusi terbaik dari masalah MDED dengan meninjau lima variabel

objective sebagai parameter uji yang akan diminimumkan, yaitu biaya bahan bakar (*fuel cost*), rugi-rugi transmisi daya aktif (*active power transmission losses*), rugi-rugi transmisi daya reaktif (*reactive power transmission losses*), indeks emisi (*emission index*), dan margin layanan daya reaktif (*reactive power reserve margin*).

Pemilihan metode hybrid FOA-ABC dan metode hybrid MFOA-ABC dalam menyelesaikan masalah MDED pada sistem tenaga termal terintegrasi dengan pembangkit listrik tenaga angin dilakukan berdasarkan karakteristik dari metode FOA dan metode ABC dalam menyelesaikan masalah penjadwalan ekonomis pembangkit untuk mendapatkan solusi terbaiknya, yaitu (1) kedua metode ini termasuk dalam metode komputasi dan metode kuantitatif, (2) kedua metode ini termasuk metode heuristik dan kategori *artificial intelligence*, (3) kedua metode ini termasuk dalam *swarm method*, (4) kedua metode ini mempunyai waktu komputasi cukup cepat.

Data diuji dan divalidasi pada lima kasus sistem kelistrikan yang berbeda, yaitu sistem kelistrikan IEEE 14 bus, sistem kelistrikan IEEE 26 bus, sistem kelistrikan standar IEEE 30 bus, sistem kelistrikan Indian Utility 62 bus, dan sistem kelistrikan Sulsebar 150 kV.

B. Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang dapat dijabarkan berdasarkan latarbelakang yang telah diuraikan terkait penjadwalan operasi ekonomis pembangkit dan daya optimum pembangkit dengan *multi objective dynamic economic dispatch* pada sistem tenaga yang terintergrasi dengan pembangkit listrik tenaga angin adalah:

1. Bagaimana membangun algoritma metode hybrid FOA-ABC dan metode hybrid MFOA-ABC untuk penjadwalan operasi ekonomis pembangkit dengan *multi objective dynamic economic dispatch* pada sistem tenaga terintegrasi dengan pembangkit listrik tenaga angin?
2. Bagaimana penerapan metode hybrid FOA-ABC dan metode hybrid MFOA-ABC yang dikembangkan untuk penjadwalan operasi ekonomis pembangkit dengan *multi objective dynamic economic dispatch* pada sistem tenaga terintegrasi dengan pembangkit listrik tenaga angin?
3. Bagaimana performa metode hybrid FOA-ABC dan metode hybrid MFOA-ABC yang dikembangkan untuk penjadwalan operasi ekonomis pembangkit dengan *multi objective dynamic economic dispatch* pada sistem tenaga terintegrasi dengan pembangkit listrik tenaga angin dibandingkan dengan metode penjadwalan operasi ekonomis pembangkit lainnya yang menjadi pembanding?

C. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang akan dicapai berdasarkan rumusan masalah yang telah dikemukakan terkait penjadwalan operasi ekonomis pembangkit dan daya optimum pembangkit dengan *multi objective dynamic economic dispatch* pada sistem tenaga yang terintegrasi dengan pembangkit listrik tenaga angin adalah:

1. Membangun metode hybrid FOA-ABC dan metode hybrid MFOA-ABC untuk penjadwalan operasi ekonomis pembangkit dengan *multi objective dynamic*

economic dispatch pada sistem tenaga terintegrasi dengan pembangkit listrik tenaga angin.

2. Menerapkan metode hybrid FOA-ABC dan metode hybrid MFOA-ABC yang dikembangkan untuk penjadwalan operasi ekonomis pembangkit dengan *multi objective dynamic economic dispatch* pada sistem tenaga terintegrasi dengan pembangkit listrik tenaga angin.
3. Menentukan performa metode hybrid FOA-ABC dan metode hybrid MFOA-ABC yang dikembangkan untuk penjadwalan operasi ekonomis pembangkit dengan *multi objective dynamic economic dispatch* pada sistem tenaga terintegrasi dengan pembangkit listrik tenaga angin dibandingkan dengan metode penjadwalan operasi ekonomis pembangkit lainnya yang menjadi pembanding.

D. Batasan masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini untuk pengimplementasian metode *hybrid FOA-ABC* dalam menyelesaikan masalah *multiobjective dynamic economic dispatch* pada sistem kelistrikan standar IEEE maupun sistem real Sulselbar 150 kV adalah:

1. Pengujian pada sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV dilakukan pada pembangkit listrik tenaga termal yang terintegrasi dengan pembangkit listrik tenaga bayu Tolo (PLTB Tolo).
2. Data pengujian untuk sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV dilakukan dengan menggunakan data beban puncak, batas-batas daya pembangkit, dan koefisien

biaya pembangkitan dari setiap pembangkit. Data ini diperoleh dari penelitian mahasiswa sebelumnya karena data real sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV dan sistem Sulbagsel tidak diperoleh baik di UP2B maupun ketika magang selama 2 bulan di UIKL PT.PLN Persero wilayah Sulawesi.

3. Pengujian dilakukan dengan menggunakan tiga variabel *objective* untuk sistem kelistrikan IEEE 14 bus, sistem kelistrikan IEEE 26 bus dengan dua variabel *objective* baik untuk sistem kelistrikan IEEE 26 bus pembangkit termal maupun sistem kelistrikan IEEE 26 bus integrasi pembangkit *thermal-wind*, sistem kelistrikan standar IEEE 30 bus dengan lima variabel *objective*, sistem kelistrikan Indian Utility 62 bus dengan tiga variabel *objective*, dan sistem *real* Sulselbar 150 kV dengan dua variabel *objective*.
4. Tidak membahas unit commitment (UC) yang merupakan penjadwalan waktu penyalaan dan penghubungan unit pembangkit pada suatu sistem tenaga listrik yang direncanakan dalam waktu yang bervariasi dari beberapa jam hingga beberapa hari, dengan tujuan utama untuk memenuhi permintaan beban
4. Pembahasan dilakukan pada penjadwalan ekonomis pembangkit pada sistem tenaga listrik dengan menghitung biaya bahan bakar pembangkitan untuk pembangkit termal dan total biaya pembangkitan untuk integrasi pembangkit *thermal-wind* serta daya optimal yang dibangkitkan dari tiap pembangkit dengan mempertimbangkan batasan persamaan daya aktif dan daya reaktif serta batasan pertidaksamaan batas-batas daya generator dan batasan generator *ramp rate* untuk aliran daya optimal.

E. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian terkait penjadwalan operasi ekonomis pembangkit dan daya optimum pembangkit dengan *multi objective dynamic economic dispatch* pada sistem tenaga yang terintegrasi dengan pembangkit listrik tenaga angin dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Manfaat Teoritis

Penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan pada ruang lingkup sistem tenaga listrik, khususnya dalam hal penjadwalan operasi ekonomis pembangkit dan daya optimum pembangkit dari sistem tenaga listrik dengan *multi objective dynamic economic dispatch* menggunakan metode hybrid FOA-ABC dan metode hybrid MFOA-ABC serta penetrasi sumber energi terbarukan seperti tenaga angin yang terinterkoneksi ke sistem pembangkit tenaga termal yang sudah ada dengan meninjau keseimbangan daya (*power balance*), batas-batas daya generator (*power limits of generator*), dan batas-batas ramp rate dari generator (*ramp rate limits*) sebagai *constraints*.

2. Manfaat Praktis

Penelitian ini dapat menjadi sumber rujukan bagi peneliti lain yang tertarik untuk meneliti terkait dengan penjadwalan ekonomis pembangkit termal yang terintegrasi dengan pembangkit listrik tenaga angin, dan dapat dijadikan sebagai bahan pengambilan keputusan bagi para pelaku di bidang ketenagalistrikan terkait integrasi pembangkit listrik tenaga angin ke sistem interkoneksi pembangkit termal yang sudah terinterkoneksi sebelumnya.

F. Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian dalam pengimplementasian metode hybrid FOA-ABC dan metode hybrid MFOA-ABC untuk menyelesaikan masalah *multiobjective dynamic economic dispatch* (MDED) pada sistem tenaga terintegrasi dengan pembangkit listrik tenaga angin adalah:

1. Pengujian dilakukan pada lima sistem kelistrikan berbeda, yaitu sistem kelistrikan IEEE 14 bus, sistem kelistrikan standar IEEE 30 bus, sistem kelistrikan IEEE 26 bus, sistem kelistrikan Indian Utility 62 bus, dan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV dengan menggunakan metode FOA, metode ABC, metode hybrid FOA-ABC, dan metode hybrid MFOA-ABC.
2. Sistem diuji dan disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak komputasi matematik Matrix Laboratory (Matlab).

G. Penelitian Terkait (*State of the art*)

Penelitian ini dapat memberikan solusi efektif penjadwalan ekonomis pembangkit termal dan integrasi sumber energi terbarukan yaitu pembangkit listrik tenaga angin yang terinterkoneksi dengan pembangkit termal. Peneliti lain yang telah mengemukakan hasil penelitiannya yang telah dipublikasikan terkait dengan penjadwalan ekonomis pembangkit termal dan integrasi sumber energi terbarukan yang terinterkoneksi dengan pembangkit termal diuraikan dalam bentuk tabulasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. State of The Art

Peneliti, Sumber, Tahun	Masalah	Metode/Solusi yang ditawarkan	Parameter uji yang dioptimalkan
R.K.Kaushal et al, Int.J.Eng.Adv. Technol, 2020	Salah satu masalah terpenting pada sektor kelistrikan adalah memutuskan strategi operasional untuk memenuhi permintaan listrik dengan biaya yang minimum.	Hybrid PSO-TLBO	Biaya bahan bakar dan emisi
A.Aurasopon et al, Prz.Elektrotechniczny, 2019	Biaya operasi pembangkit listrik utamanya bergantung pada biaya bahan bakar generator yang diminimalkan melalui penjadwalan ekonomis.	Improved local search involving bee colony optimization using lamda iteration combined golden search method	Biaya bahan bakar
Y. Peng et al, ICMIC, 2017	Dengan meningkatnya penetrasi pembangkit energi terbarukan pada sistem tenaga, sifat intermiten dari sumber-sumber terbarukan seharusnya dikelola untuk menjaga keseimbangan antara sisi pembangkit tenaga dan pengguna.	<i>Real time price, Interruptible load with low price (ILL), Interruptible load with high compensation (ILH)</i>	Biaya bahan bakar dan emisi
H.T.Jadhav et al, EEEIC,2012	Daya yang dihasilkan dari sebagian besar sumber terbarukan jumlahnya terbatas dan tidak dapat memenuhi kebutuhan sistem tertentu, sehingga integrasi dengan jaringan didominasi oleh unit tenaga termal.	Plant Growth Simulation Algorithm	Biaya bahan bakar dan rugi-rugi transmisi daya aktif
Z.L Gaing, IEEE transactions on power systems, 2003	Karakteristik nonlinier generator meliputi zona terlarang yang diskontinu, batas generator ramp rate, dan variabel biaya generator yang tidak mulus atau cembung.	GA dan PSO	Biaya bahan bakar dan rugi-rugi transmisi daya aktif
S. K. Dash and S. Mohanty, ICECS, 2015	Masalah ancaman ekonomi, emisi dan keamanan saluran transmisi sebagai tujuan vital.	<i>Goal Attainment Method (GAM) dan Simulated Annealing Technique (SAT)</i>	Biaya bahan bakar dan emisi

Peneliti, Sumber, Tahun	Masalah	Metode/Solusi yang ditawarkan	Parameter uji yang dioptimalkan
C.Li et al, IEEE J.Emerg.Sel.T op.Power Electron, 2017	Model aliran daya termasuk dalam masalah optimisasi sehingga rugi-rugi transmisi dapat dipertimbangkan untuk penjadwalan pembangkit.	Algoritma genetika	Biaya bahan bakar
S. F. M.Manjusha, IRJET, 2016	Model <i>static economic dispatch</i> (SED) membuat banyak asumsi yang tidak praktis untuk sistem yang sesungguhnya.	Metode Lagrange's dan <i>Dynamic Programming</i>	Biaya bahan bakar, biaya layanan, biaya rugi-rugi transmisi, dan emisi
M. Peter Musau, IJEPE, 2015	Masalah DED mewakili sistem tenaga <i>real</i> perlu untuk ditinjau dan membuat formulasi yang lebih praktis dari pertimbangan yang sama untuk semua tujuan dan batasan yang mungkin.	Metode deterministik, Heuristik, dan Hibrid	Biaya bahan bakar
X.Jiang et al, Int.J.Electr.Po wer Energy Syst, 2013	Biaya bahan bakar dan emisi selama periode waktu tertentu yang akan dioptimalkan adalah variabel tujuan yang saling bertentangan.	Algoritma MAMODE	Biaya bahan bakar dan emisi
M. P. Musau et al, IEEE, 2016b	Dengan meningkatnya kesadaran pada proteksi lingkungan, utilitas telah memaksa untuk menggunakan sumber terbarukan dengan sistem tenaga hibrid dan untuk mengubah strategi operasinya untuk mengurangi polusi dan emisi atmosfer dari pembangkit tenaga listrik.	<i>Modified Firefly algorithm with Levy Flights and Derived Mutation</i> (MFA-LF-DM)	Biaya <i>thermal</i> , biaya <i>renewable</i> , biaya rugi transmisi, dan emisi
A.Y.Abdelaziz et al, Eng.Sci.Techn ol, 2016	Masalah ELD dirumuskan sebagai masalah optimisasi terbatas nonlinear dengan kendala kesetaraan dan ketidaksetaraan.	<i>Flower pollination algorithm</i>	Biaya bahan bakar dan emisi

Peneliti, Sumber, Tahun	Masalah	Metode/Solusi yang ditawarkan	Parameter uji yang dioptimalkan
A.A.A.El-Ela et al, Proceeding Int.Middle East Power Syst.Conf., 2018	Masalah penjadwalan daya ekonomis adalah masalah operasi yang mendesak bagi operator sistem.	MO-FOA algorithm	Biaya bahan bakar dan emisi
H.P.Singh et al, Arch.Electr.En g, 2019	Generator juga memiliki kebutuhan daya reaktif bersama dengan permintaan daya aktif untuk memenuhi permintaan daya total.	fuzzy cardinal method	biaya bahan bakar dan emisi
N.Sinha et al, IEEE Trans.Evol.Co mp, 2003	Karakteristik input-output dari unit-unit pembangkit secara inheren sangat tidak linier karena pembebanan titik-katup, batas laju, yang dapat menghasilkan beberapa titik minimum lokal dalam variabel biaya.	<i>Evolutionary programming techniques</i>	Biaya bahan bakar
C.Jiejin et al, Energy convers.Manag ,2007	Sulit untuk memecahkan masalah ED karena masalah ED adalah masalah optimisasi diskrit nonlinier, non-cembung.	<i>Chaotic particle swarm optimization</i>	Biaya bahan bakar
J.Chen et al, J.Electr.Eng.T echnol, 2020	Penjadwalan ekonomis multi-area (MAED) adalah salah satu masalah vital dalam operasi ekonomis sistem tenaga yang terinterkoneksi	<i>New hybrid ICA-PSO</i>	Biaya bahan bakar
J. Qiu et al, IET, 2017	Biasanya persyaratan keamanan dan tujuan ekonomi saling bertentangan satu sama lain dalam penjadwalan pembangkit.	Kriteria keamanan deterministik N-1	Biaya bahan bakar dan indeks resiko
V. A. K. Bharath kumar S et al, IJEET,2013	Pembangkit listrik, cadangan berputar dan biaya emisi dipertimbangkan secara simultan dalam variabel <i>objective</i>	<i>Bacterial foraging dan Nelder mead (BF-NM)</i>	Biaya bahan bakar dan biaya layanan

Peneliti, Sumber, Tahun	Masalah	Metode/Solusi yang ditawarkan	Parameter uji yang dioptimalkan
J.Liang et al, Proceeding Int.Conf.Ind.El ectron.Appl, 2019	Masalah ED mempunyai karakteristik dimensi tinggi, <i>non-convex</i> , diskrit, <i>multi-constraints</i> yang membuat sulit untuk menemukan solusi optimalnya	<i>Improved fruit fly optimization algorithm</i>	Biaya bahan bakar
C.Koodalsamy et al, Turkish J.Electr.Eng.C omput.Sci, 2013	Masalah pengiriman ekonomi (ED) adalah salah satu masalah optimisasi penting dalam operasi sistem tenaga dengan operasi yang andal, nonpolusi, dan ekonomis.	<i>Fuzzified artificial bee colony</i>	Biaya bahan bakar, emisi, dan keandalan
V. Suresh and S. Sreejith, IJRER, 2015	Eskalasi harga bahan bakar, kekhawatiran lingkungan dan berkurangnya cadangan bahan bakar fosil telah memaksa penggabungan sumber energi terbarukan dengan pembangkit yang ada.	Variabel distribusi beta	Biaya bahan bakar
C. Tang et al, LJS ,2009	Bagaimana mendapatkan model distribusi bersyarat dari <i>output</i> pembangkit tenaga angin adalah masalah mendasar pada penjadalan ekonomi stokastik.	Model distribusi bersyarat (<i>conditional distribution models</i>)	Biaya <i>thermal</i> dan biaya <i>renewable</i>
J. Meng et al, IEEE, 2013	Karakteristik angin dan matahari yang tak dapat diprediksi dan berubah-ubah menyebabkan tantangan yang signifikan dalam penggabungan ketidakpastian dalam sistem tenaga listrik.	Cplex	Biaya bahan bakar
X. Jiang et al IJEPES, 2013	Biaya bahan bakar dan efek emisi selama periode waktu tertentu dioptimalkan sebagai tujuan yang saling bertentangan	<i>Algoritma modified adaptive multiobjective differential evolution (MAMODE)</i>	Biaya bahan bakar dan emisi

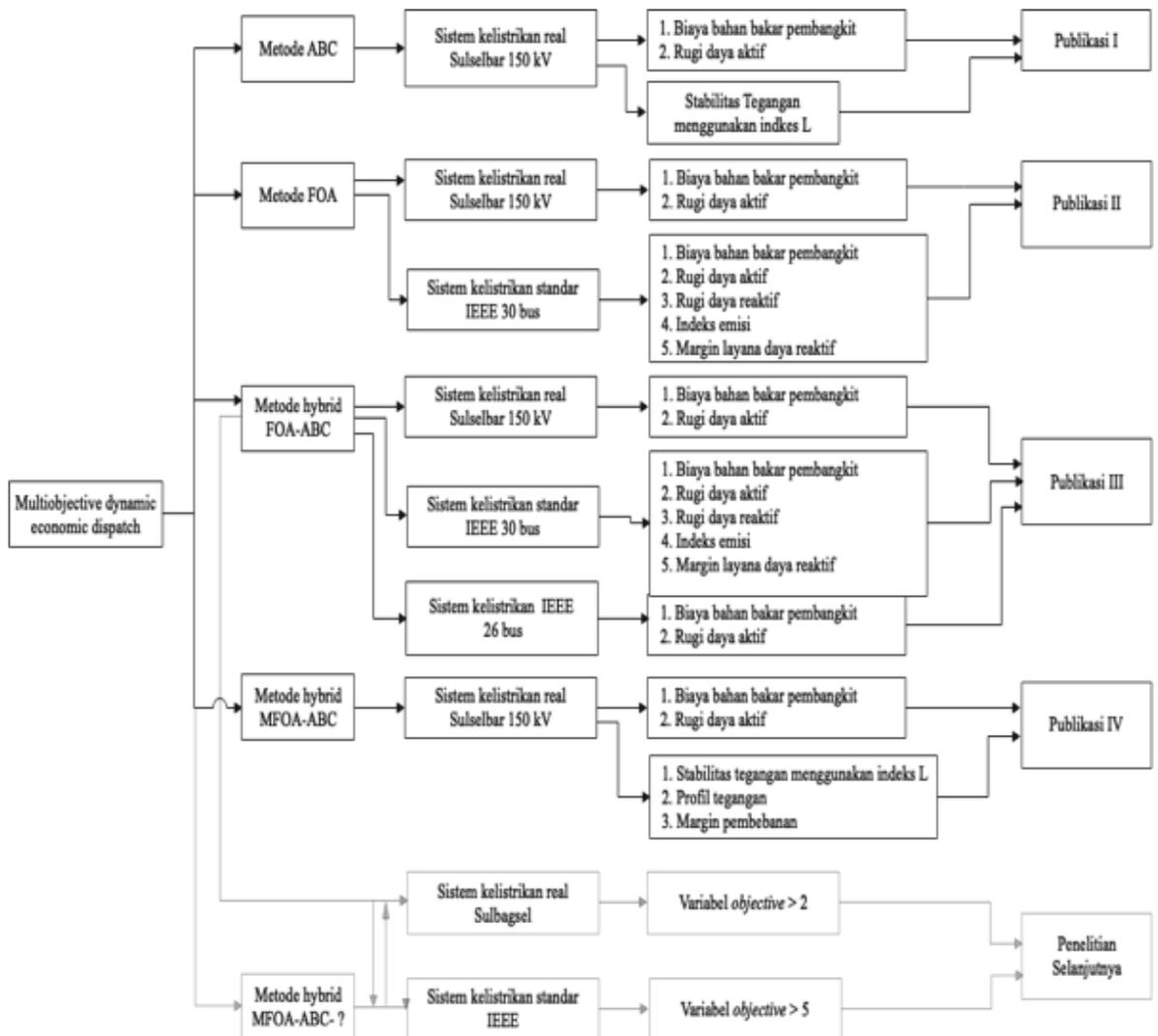
Peneliti, Sumber, Tahun	Masalah	Metode/Solusi yang ditawarkan	Parameter uji yang dioptimalkan
R. Saravanan et al, IJARI, 2017	Kebutuhan untuk energi terbarukan terjadi karena makin berkurangnya bahan bakar fosil. Oleh karena itu perlu untuk mengoperasikan pembangkit terbarukan dengan pembangkit termal.	<i>Particle swarm optimization (PSO)</i>	Biaya <i>thermal</i> dan biaya <i>wind</i>
N. Tyagi et al, IJEST, 2016	Sifat yang tak menentu dari angin , penyinaran matahari karena perubahan cuaca dan iklim, integrasi dari formulasi ELD pembangkit tenaga terbarukan sangat kompleks.	<i>Backtracking search algorithm (BSA)</i>	Biaya <i>thermal</i> dan biaya <i>wind</i>
Vahid Sarfi et al, IEEE, 2017	Dua tantangan utama dalam operasi mikrogrid adalah penjadwalan DER pada suplai dan permintaan yang tak menentu dan determinasi dari level layanan yang tepat.	<i>The Pareto concavity elimination transformation (PaCcET)</i>	Biaya bahan bakar dan emisi
S. Farook and M. Manjusha, IEEJ, 2017	Masalah penjadwalan ekonomi klasik dimodelkan sebagai sebuah masalah statik adalah tidak praktis.	<i>Algoritma Knee point driven Evolutionary genetic (KnEA)</i>	Biaya bahan bakar, biaya layanan, biaya rugi-rugi transmisi, dan emisi
S.Soliman et all, Energy Systems, 2012	Untuk sistem tenaga listrik dengan sumber daya pembangkit termal, variabel operasi ekonomis yang penting adalah variabel aliran beban optimal (OLF). Berbeda dengan masalah aliran beban, di mana pembangkitan daya aktif ditentukan, dalam OLF, pembangkitan optimal dicari untuk meminimalkan biaya operasi sistem.	PSO	Biaya bahan bakar, rugi transmisi daya aktif, rugi transmisi daya reaktif, indeks emisi, margin layanan daya reaktif

Peneliti, Sumber, Tahun	Masalah	Metode/Solusi yang ditawarkan	Parameter uji yang dioptimalkan
Z Zakaria et al, IEEE, 2014	Penjadwalan daya optimal akan berkontribusi pada pengelolaan beban sistem tenaga yang sehat	<i>Adaptive Tumble Bacterial Foraging Optimization (ATBFO)</i> dan <i>Adaptive Mutation Bacterial Foraging Optimization (AMBFO)</i>	Biaya bahan bakar
A. K. Nurlita Gamayanti, Abdullah Alkaff, JIEEE, 2015	Optimasi biaya bahan bakar yang dilakukan saat ini masih statis atau hanya untuk satu waktu optimasi dan tentunya kurang dapat meminimumkan biaya produksi listrik	<i>Artificial Bee Colony (ABC)</i>	Biaya bahan bakar
S. G. Gaurav, Kumar Gupta, IEEE, 2017	Di masa mendatang kebutuhan energi pasti akan naik yang menyebabkan interkoneksi yang lebih kompleks dari seluruh jaringan listrik di seluruh dunia, oleh karena itu perlu untuk menurunkan biaya operasi sistem pembangkit tenaga listrik untuk memenuhi melonjaknya harga energi .	<i>Particle Swarm Optimization (PSO)</i>	Biaya bahan bakar
S.Sadoudi et al, Proc.Int.Conf. Appl.Smart Syst.ICASS, 2019	Dengan masuknya energi terbarukan (RE) dalam sistem, biaya produksi sering dikombinasikan dengan pengurangan emisi gas.	<i>Gravitational search algorithm</i>	Biaya bahan bakar dan emisi
M.P.Musau et al, IEEE PES Power Africa, 2016	Utilitas sumber terbarukan dengan sistem tenaga hibrid memodifikasi strategi operasi untuk mengurangi polusi dan emisi atmosfer dari pembangkit listrik.	<i>MFA-LF-DM method</i>	Biaya thermal, biaya renewable, biaya rugi transmisi, dan emisi

Peneliti, Sumber, Tahun	Masalah	Metode/Solusi yang ditawarkan	Parameter uji yang dioptimalkan
Haripuddin et al, 2021	Harga bahan bakar fosil mahal dan ketersediaannya cenderung terus menurun dan sifat intermitten dari pembangkit tenaga angin yang tak dapat diprediksi yang dapat menyebabkan fluktuasi daya output dari pembangkit merupakan ketidakpastian dan ini menjadi sebuah tantangan bagaimana mempertahankan keseimbangan antara pembangkit dan beban.	Metode Hybrid FOA-ABC	Biaya bahan bakar, rugi-rugi transmisi daya aktif, rugi-rugi transmisi daya reaktif, indeks emisi, dan margin layanan daya reaktif

PENELITIAN YANG DIAJUKAN	KEBARUAN YANG DITAWARKAN
<i>MULTI OBJECTIVE DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH</i> PADA SISTEM TENAGA LISTRIK TERINTEGRASI DENGAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN	<ol style="list-style-type: none"> 1. Penentuan dalam menyelesaikan masalah MDED dengan menggunakan lima variabel <i>objective</i> untuk sistem kelistrikan standar IEEE 30 bus, sistem kelistrikan IEEE 14 bus dan sistem IEEE 62 bus Indian Utility dengan tiga variabel <i>objective</i>, sistem kelistrikan IEEE 26 bus dan sistem real Sulselbar 150 kV dengan dua variabel <i>objective</i> dilakukan dengan menggabungkan dua metode metaheuristik (FOA dan ABC) 2. Metode <i>hybrid</i> FOA-ABC dan metode hybrid MFOA-ABC mampu memberikan solusi terbaik MDED untuk sistem <i>thermal</i> dan integrasi <i>thermal-wind</i> dengan nilai yang lebih kecil dari metode yang menjadi pembanding.

Hasil penelitian yang dipaparkan dalam naskah disertasi ini telah memenuhi unsur kebaruan (*NOVELTY*) dengan menggunakan metode hybrid FOA-ABC dan metode hybrid MFOA-ABC yang menggabungkan dua metode yaitu metode FOA dan metode ABC untuk menyelesaikan penjadwalan ekonomis pembangkit pada sistem tenaga listrik terintegrasi dengan pembangkit listrik tenaga angin dengan *multiobjective* pada lima sistem kelistrikan yang berbeda, yaitu sistem kelistrikan IEEE 14 bus, sistem kelistrikan IEEE 26 bus, sistem kelistrikan standar IEEE 30 bus, sistem kelistrikan Indian Utility 62 bus, dan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV dengan membandingkan metode hybrid MFOA-ABC dan metode hybrid FOA-ABC dengan metode FOA, metode ABC, dan metode lainnya yang menjadi pembanding dalam penelitian ini untuk menguji keefektifan dari metode yang diusulkan, dan juga kedua metode Hybrid ini telah mendapatkan surat pencatatan ciptaan (HAKI) yang telah dikeluarkan oleh Direktur Jenderal Kekayaan Intelektual untuk metode optimasi Hybrid FOA-ABC dengan nomor pencatatan 000264143 dan untuk metode optimasi Hybrid MFOA-ABC dengan nomor pencatatan 000263937, serta telah memenuhi syarat publikasi yang menjadi prasyarat seperti yang diperlihatkan dipemetaan publikasi pada Gambar 1. Kontribusi dari penelitian ini untuk ilmu pengetahuan adalah suatu metode baru penjadwalan ekonomis pembangkit sistem tenaga listrik yaitu berupa metode Hybrid FOA-ABC dan metode Hybrid MFOA-ABC.



Gambar 1. Pemetaan Publikasi

H. Sistematika Penulisan

Laporan hasil penelitian disertasi ini disusun secara sistematis yang dimulai dari lembar pengesahan hasil penelitian, pernyataan keaslian disertasi, prakata, abstrak, daftar isi, daftar gambar, daftar tabel dan dilanjutkan lima bab yang merupakan ringkasan dari teori-teori terkait, metode penelitian yang digunakan,

hasil penelitian dan kesimpulan. Deskripsi singkat dari setiap bab dapat diuraikan sebagai berikut:

BAB I. Pendahuluan

Deskripsi singkat pada bab I ini memuat latarbelakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, ruang lingkup penelitian, penelitian terkait dan sistematika penulisan.

BAB II. Tinjauan Pustaka

Deskripsi singkat pada bab II ini menjelaskan tentang penjadwalan ekonomis dinamis pembangkit, pembangkit listrik termal, deskripsi matematis variabel tujuan (*objective function*), deskripsi *constraints*, pembangkit listrik tenaga angin, variabel biaya integrasi *thermal-wind*, analisis aliran daya dan klasifikasi bus, metode Newton Raphson, tinjauan stabilitas tegangan, pendekatan indeks L stabilitas tegangan, metode optimasi lalat buah (FOA), metode koloni lebah buatan (ABC) dan kerangka pikir penelitian.

BAB III. Metode Penelitian

Deskripsi singkat pada bab III ini menjelaskan tentang jenis penelitian, desain penelitian, tahapan penelitian, alat yang digunakan, lokasi dan waktu penelitian, teknik pengumpulan data, analisis data, dan validasi data, data dan pemodelan sistem. Data sekunder yang digunakan berupa data *single line diagram* sistem IEEE 14 bus, sistem IEEE 26 bus, sistem IEEE 30 bus, sistem IEEE Indian Utility 62 bus, dan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV. Data bus sistem IEEE 14 bus, sistem IEEE 30 bus, sistem IEEE Indian Utility 62 bus, dan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV. Data pengaturan tap transformator sistem IEEE 30 bus, data

injeksi kapasitor shunt sistem IEEE 30 bus, koefisien biaya bahan bakar pembangkit dan emisi sistem IEEE 30 bus, batasan generator ramp rate sistem IEEE 30 bus, data pembangkitan dan pembebanan sistem Selselbar 150 kV. Batas-batas daya generator dan generator ramp rate sistem Selselbar 150 kV, koefisien biaya bahan bakar pembangkit sistem Selselbar 150 kV, koefisien biaya bahan bakar sistem IEEE 26 bus, batas-batas daya generator sistem IEEE 26 bus, data koefisien B, B0, B00, dan data beban sistem IEEE 26 bus, kapasitas pembangkit wind farm.

BAB IV. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Deskripsi singkat pada bab IV ini menjelaskan tentang hasil simulasi dari metode FOA, metode ABC, metode Hybrid FOA-ABC, dan metode hybrid MFOA-ABC untuk kelima sistem kelistrikan yakni, sistem kelistrikan IEEE 14 bus, sistem kelistrikan IEEE 26 bus baik untuk pembangkit listrik termal maupun integrasi pembangkit listrik *thermal-wind*, sistem kelistrikan standar IEEE 30 bus, sistem kelistrikan IEEE Indian Utility 62 bus, dan sistem kelistrikan Selselbar 150 kV.

BAB V. Kesimpulan dan Saran

Deskripsi singkat pada bab V ini menjelaskan kesimpulan hasil penelitian untuk menjawab tujuan penelitian yang diajukan dan saran untuk penelitian lebih lanjut terkait penjadwalan ekonomis dinamis pembangkit dengan *multiobjective*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

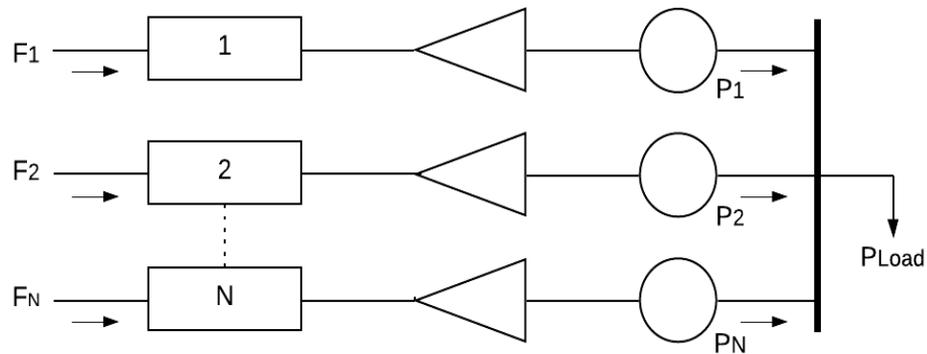
A. Penjadwalan Ekonomis Dinamik (*Dynamic Economic Dispatch*)

Secara umum, penjadwalan ekonomis (*Economic Dispatch* atau ED) dapat dikategorikan sebagai penjadwalan ekonomis klasik (*Classical Economic Dispatch* atau CED) dan penjadwalan ekonomis dinamik (*Dynamic Economic Dispatch* atau DED). Pada dasarnya, ED memiliki tujuan untuk menentukan luaran daya yang optimal untuk unit pembangkit agar dapat memenuhi permintaan listrik dengan memenuhi batas operasi pada periode pendistribusian dayanya di mana batas keamanan saluran diabaikan yang dikenal sebagai CED [7]. Sedangkan, DED adalah penjadwalan yang memiliki kemampuan prediktif beban untuk satu periode tertentu yang dapat mengkoordinasikan perubahan beban dengan kemampuan laju respon dari unit pembangkit [22].

Penjadwalan ekonomis dinamik (DED) dari suatu pembangkit listrik termal mempertimbangkan hal-hal seperti efek buka katub (*valve point effect*), batas-batas *ramp rate* (*ramp rate limits*), emisi dan integrasi dari pembangkit energi terbarukan.

Sistem yang terdiri dari N unit pembangkit termal dan terhubung ke bus tunggal melayani beban listrik P_{load} diperlihatkan pada Gambar 2.1. *Input* setiap unit, ditampilkan sebagai F_i , menunjukkan biaya dari setiap unit pembangkitan. *Output* dari setiap unit (P_i), adalah daya listrik yang dihasilkan oleh setiap unit pembangkitan. Biaya total dari sistem ini adalah jumlah biaya masing-masing dari

setiap unit pembangkitan. Batasan penting pada pengoperasian sistem ini adalah bahwa jumlah luaran daya yang dibangkitkan harus sama dengan permintaan beban yang dilayani.



Gambar 2.1. N unit pembangkit termal yang melayani beban [72]

Variabel biaya C_i diasumsikan diketahui pada setiap unit pembangkit. Masalahnya adalah mencari besarnya biaya pembangkitan yang sebenarnya, sehingga variabel objektif (total biaya produksi) minimum dapat dirumuskan seperti pada Persamaan 1 [73].

$$\begin{aligned}
 C_t &= \sum_{i=1}^{n_g} C_i \\
 &= \sum_{i=1}^{n_g} \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2
 \end{aligned} \tag{1}$$

di mana C_t adalah total biaya produksi, C_i adalah biaya produksi dari setiap pembangkit, P_i adalah besarnya kapasitas pembangkit dari setiap unit pembangkitan dan α_i , β_i , γ_i adalah koefisien biaya dari setiap unit pembangkitan.

Penjadwalan ekonomis dinamis (DED) memberikan kontribusi yang cukup dalam perencanaan, operasi dan kontrol sistem tenaga sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Perencanaan, operasi dan kontrol sistem tenaga

Area optimisasi	Persentase Publikasi
SED	21
DED	4
OPF	27
HTS	14

Sumber: [52]

Publikasi DED tanpa dan dengan energi terbarukan sejak tahun 1972 hingga April tahun 2015 ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Publikasi DED sejak tahun 1972

Nomor	Tahun	Tanpa Energi Terbarukan	Dengan Energi Terbarukan
1	1972-1996	7	–
2	1997	5	–
3	1999	1	–
4	2000	1	–
5	2001	2	–
6	2002	4	1
7	2004	4	2
8	2005	6	2
9	2006	7	1
10	2007	2	–
11	2008	9	4
12	2009	7	2

Nomor	Tahun	Tanpa Energi Terbarukan	Dengan Energi Terbarukan
13	2010	8	3
14	2011	7	4
15	2012	13	7
16	2013	10	5
17	2014	15	8
18	2015	8	3

Sumber: [52]

Tujuan utama dari DED adalah untuk menentukan output daya optimal dari unit pembangkit secara langsung untuk memenuhi permintaan beban terhadap berbagai persamaan operasional dan batasan ketidaksamaan selama periode penjadwalan [20,50].

Masalah *multi objective dynamic economic dispatch* (MODED) yang mencakup jumlah dan jenis tujuan (*objective*), jenis metode yang digunakan dan jumlah batasannya (*constraints*) secara ringkas ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Masalah MODED dengan variabel biaya kuadratik (Q)

Peneliti	n	Tujuan	Metode	Jumlah batasan	Jenis
Faisal .A. Mohamed ,2009	4	T,W,S,E	Non Linear Constrained Method (NLCM)	2	Q
M.A Abibo, 2003	2	T,TL	Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)	3	Q
Zhao Bo and Cao Yi-Jia,2005	3	T,E,TL	Multi Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)	5	Q
M.A Abibo, 2006	2	T,TL	SPEA and Strength Pareto Genetic Algorithm (SPGA)	4	Q

Peneliti	n	Tujuan	Metode	Jumlah batasan	Jenis
M .Basu, 2007	2	T,E	Evolutionary Programming (EP) and Fuzzy Logic (FL)-(EP-FL)	4	Q
C .Chen, 2007	2	T,W	Simulated Annealing (SA) and Direct Search Method (DSM)-(SA-DSM)	4	Q
M.Basu, 2008	2	T,E	Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II (ENSGA-II)	3	Q
R.P Brent,2010	2	T,E	Preference-based Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (PNDSGA)	5	Q
Zwe-Lee Gaing et al ,2009	2	T,E	Bacterial Foraging(BF)-PSO-Differential Evolution-(DE) (BF-PSO-DE)	4	Q
Alsumait et al, 2010	2	T,E	Pattern Search (PS)	3	Q
S.Subramanial et al, 2010	3	T,E,TL	Sequential Approach with Matrix Framework (SAMF)	6	Q
Chunghun et al,2013	3	T,W,S	Model Predictive Control (MPC)	5	Q
Haiwang Zhong et al,2013	2	T,TL	Penalty-Based Algorithm (PBA)	4	Q
Azza A. ElDesouky, 2013	4	T,W,S,E	Weighted Aggregation (WA) and PSO(WAPSO)	7	Q
Bakirtzis et al ,2014	2	T,W	Variable Time Resolution (VTR) and Scheduling Horizon (SH)-(VTRSH)	4	Q
Soubache ID and Sudhakara Reddy,2014	2	T,E	Multi Objective Computer Programming Based Method(MOCPBM)	5	Q

Sumber: [52]

Keterangan:

Q : Variabel kuadratik, T : Variabel tujuan biaya termal

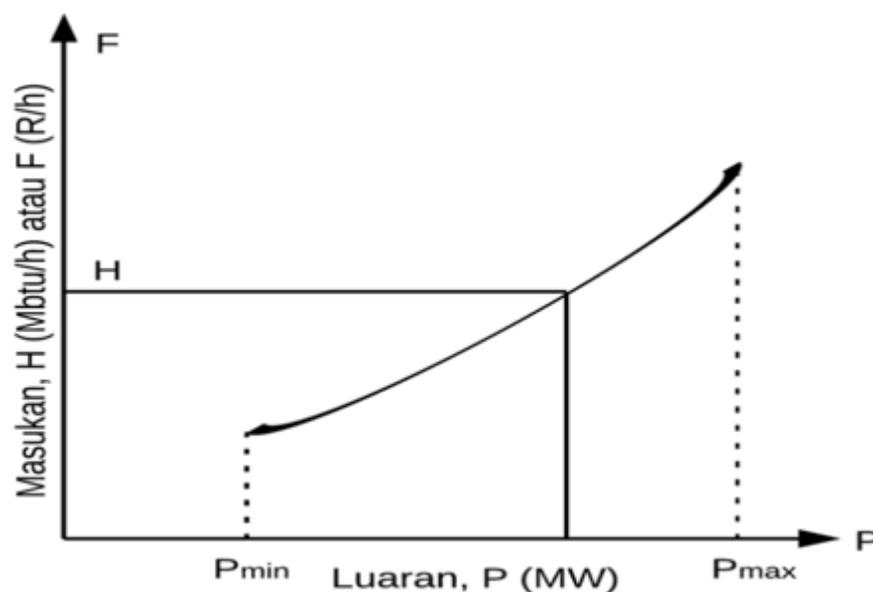
n : Jumlah tujuan , W: Variabel tujuan biaya angin

E : Variabel tujuan biaya emisi, TL : Rugi-rugi transmisi

B. Pembangkit Listrik Termal

Pembangkit listrik yang paling banyak digunakan dalam sistem tenaga listrik saat ini adalah pembangkit listrik termal. Pembangkit listrik termal adalah proses pembangkitan listrik konvensional yang membangkitkan listrik dari energi panas. Dalam analisa permasalahan operasi sistem tenaga listrik, terdapat banyak parameter yang perlu diperhatikan. Parameter fundamental yang perlu diperhatikan untuk permasalahan pengoperasian sistem pembangkit tenaga listrik secara ekonomis adalah mengatur masukan-luaran dari sistem pembangkit listrik termal [22].

Karakteristik masukan-luaran dari unit pembangkit listrik termal yang ideal digambarkan dengan kurva nonlinier. Karakteristik masukan-luaran yang banyak digunakan dari unit pembangkit listrik termal adalah variabel kuadratik seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Karakteristik masukan-luaran pembangkit listrik termal [7]

Faktor-faktor yang mempengaruhi pembangkitan tenaga listrik pada biaya minimumnya adalah operasi efisiensi generator, biaya bahan bakar dan rugi-rugi transmisi. Generator yang paling efisien dalam sistem tidak menjamin biaya minimum karena mungkin terletak di daerah di mana biaya bahan bakar tinggi. Pembangkit yang ditempatkan jauh dari pusat-pusat beban maka rugi-rugi transmisi menjadi pertimbangan lebih dan karenanya pembangkit mungkin menjadi tidak ekonomis. Oleh karena itu, masalahnya adalah untuk menentukan pembangkitan tenaga listrik dari pembangkit yang berbeda sehingga total biaya operasinya minimum sehingga biaya operasi pembangkitan tenaga listrik ini memainkan peran penting dalam penjadwalan ekonomis pembangkit [73].

C. Deskripsi Matematis Variabel Tujuan (*Objective Variable*)

Variabel tujuan terkait dengan pendekatan dan masalah pengoptimalan. Suatu variabel tujuan dimaksudkan untuk diminimalkan atau dimaksimalkan melalui proses optimisasi. Dalam penelitian ini, optimasi dilakukan dengan meninjau lima variabel tujuan yang akan diminimumkan yaitu biaya bahan bakar, rugi-rugi transmisi daya aktif, rugi-rugi transmisi daya reaktif, indeks emisi, dan margin layanan daya reaktif.

1. Variabel Biaya Bahan Bakar

Variabel biaya bahan bakar yang terkait dengan pembangkit listrik termal memiliki biaya bahan bakar per unit luaran daya bervariasi secara signifikan dengan luaran generator. Interpretasi biaya bahan bakar dari unit pembangkit mewakili

variabel karakteristik biaya dari unit pembangkit untuk masalah ED dinyatakan sebagai variabel kuadrat. Kurva hubungan masukan-luaran akan diperoleh dengan cara mengalikan $H(\text{Mbtu/h})$ dengan biaya bahan bakar (Rp/Mbtu) menjadi sebuah variabel $f_i(P_i)$ dalam (Rp/h) seperti yang dituliskan pada Persamaan 3 [22].

$$\text{Minimumkan } F_T = \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_i) \quad (2)$$

$$f_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (3)$$

di mana:

F_T = Total biaya bahan bakar

$F_i(P_i)$ = Biaya bahan bakar generator- i

P_i = Luaran daya dari unit generator i

a_i, b_i, c_i = Koefisien-koefisien biaya bahan bakar

N_G = Total jumlah generator

2. Rugi-Rugi

2.1. Rugi-Rugi Transmisi Daya Aktif

Pusat pembangkit dan beban pada umumnya terhubung dalam skenario yang terdistribusi secara geografis. Hilangnya sejumlah daya pada saluran transmisi harus diantisipasi sehingga rugi-rugi daya masih dalam batas-batas yang diisinkan. Oleh karena itu, rugi-rugi daya pada saluran transmisi baik aktif maupun reaktif harus diminimumkan untuk mencapai penjadwalan ekonomis yang tepat seperti yang dinyatakan pada Persamaan 4.

$$\text{Minimumkan } \sum P_i = \sum P_{Gi} - \sum P_{Di} = V_i \cdot \sum_{j=1}^n Y_{ij} \cdot V_j \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (4)$$

di mana P_i adalah rugi-rugi transmisi daya aktif, P_{Gi} adalah daya yang dibangkitkan oleh generator, dan P_{Di} adalah total daya permintaan beban, V_i dan V_j adalah tegangan pada bus i dan j , Y_{ij} adalah admitansi pada bus ij , δ_i , δ_j , dan θ_{ij} adalah besarnya sudut pada bus i dan bus j .

2.2. Rugi-Rugi Transmisi Daya Reaktif

Pada saluran transmisi tenaga listrik, aliran daya reaktif pada transmisi dapat memengaruhi tingkat daya di ujung penerima. Pemantauan dan pengaturan tegangan di ujung penerima sangat penting karena level tegangan pada ujung penerima yang lebih tinggi dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan konsumen dan akan mengakibatkan kerugian yang dianggap cukup besar. Rugi-rugi transmisi daya reaktif dapat dituliskan seperti pada Persamaan 5.

$$\text{Minimumkan } \sum Q_i = \sum Q_{Gi} - \sum Q_{Di} = V_i \cdot \sum_{j=1}^n Y_{ij} \cdot V_j \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (5)$$

di mana Q_i adalah rugi-rugi transmisi daya reaktif, Q_{Gi} adalah daya reaktif generator, dan Q_{Di} adalah daya reaktif beban.

2.3. Total Rugi Daya Jaringan

Rugi jaringan adalah variabel injeksi daya pada setiap simpul, di mana rugi jaringan sistem tenaga sebenarnya (P_L) dinyatakan dengan menggunakan koefisien B seperti pada Persamaan 6 [19,50,70].

$$P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^n B_{0i} P_i + B_{00} \quad (6)$$

di mana i adalah jumlah generator, j adalah jumlah bus dalam sistem, B_{ij} adalah elemen ij dari rugi koefisien matriks bujur sangkar, B_{0i} adalah elemen i dari rugi koefisien matriks dan B_{00} adalah konstanta koefisien rugi.

3. Indeks Emisi

Indeks emisi atau lingkungan adalah indeks perspektif lingkungan yang dihasilkan dari unit pembangkit termal seperti nitrogen oksida (NOx) dan sulfur oksida (SOx) yang dapat dimodelkan secara terpisah. Variabel tujuan keempat yang harus diminimumkan adalah indeks emisi dengan formulasi variabel kuadratik dan eksponensial yang dituliskan seperti pada Persamaan 8 [74].

$$E_T = \sum_{i=1}^{N_G} E_i(P_{Gi}) \quad (7)$$

$$E_i(P_{Gi}) = \sum_{i=1}^{N_G} 10^{-2}(\alpha_i + \beta_i \cdot P_{Gi} + \gamma_i \cdot P_{Gi}^2) + \zeta_i \cdot \exp(\lambda_i \cdot P_{Gi}) \quad (8)$$

di mana E_i adalah indeks emisi, P_{Gi} adalah daya yang dibangkitkan generator, α_i , β_i , γ_i , ζ_i , dan λ_i adalah koefisien karakteristik emisi dari generator yang terlibat.

4. Margin Layanan Daya Reaktif

Margin layanan daya reaktif adalah perbandingan antara rugi-rugi transmisi daya reaktif dengan daya reaktif maksimum generator yang dapat mendistribusikan layanan antara generator dan SVC secara proporsional. Variabel tujuan kelima yang akan dioptimalkan dirumuskan seperti pada Persamaan 9.

$$\text{Minimumkan } F = \sum_{i=1}^{N_G} \left[\frac{Q_i^2}{Q_{max}} \right] \quad (9)$$

di mana F adalah simbol untuk margin layanan daya reaktif, N_G adalah jumlah generator, Q_i adalah rugi-rugi transmisi daya reaktif, dan Q_{max} adalah daya reaktif maksimum dari generator.

Selanjutnya, penjadwalan ekonomis pembangkit dan emisi dapat diselesaikan dengan menggabungkan variabel biaya bahan bakar dan variabel indeks emisi menjadi variabel tunggal dengan mengalikan koefisien pembobotan dari masing-masing variabel objektifnya [14], seperti yang diperlihatkan pada persamaan (10).

$$F_{Ti} = \psi_c \cdot FC_i + \psi_E \cdot (\rho_i \cdot FE_i) \quad (10)$$

$$\psi_c + \psi_E = 1; \quad \psi_c \neq 0; \quad \psi_E \neq 0 \quad (11)$$

$$\rho_i = \frac{FC_i(P_{iMax})}{FE_i(P_{iMax})} \quad (12)$$

di mana F_{Ti} adalah variabel biaya bahan bakar dari setiap generator, FC_i adalah variabel biaya bahan bakar dari setiap generator, FE_i adalah variabel emisi yang dihasilkan dari setiap generator, ψ_c adalah biaya pembobotan generator, ψ_E adalah emisi pembobotan generator, dan ρ_i adalah faktor penalti harga.

D. Deskripsi Constraints

Daya pembangkitan dari pembangkit tenaga termal dan angin tidak boleh kurang atau lebih dari kapasitas minimum dan maksimum dari generator dan batasan pertidaksamaannya yang biasa disebut dengan batas-batas daya dari generator yang dapat dituliskan seperti pada Persamaan 13 dan 14.

$$P_{Gi,min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,max} \quad \text{untuk } i=1,2,\dots,N_G \quad (13)$$

$$0 < w_j \leq w_{j,rated} \quad (14)$$

di mana P_{Gi} adalah daya pembangkitan dari generator pembangkit termal, $P_{Gi,min}$ adalah batas minimum daya generator, $P_{Gi,max}$ adalah batas maksimum daya generator, N_G adalah jumlah generator, w_j adalah daya angin yang dijadwalkan, $w_{j,rated}$ adalah daya *rate* dari pembangkit tenaga angin. Disamping itu, perlu untuk dipertimbangkan total daya pembangkitan harus memenuhi total permintaan beban ditambah dengan total rugi daya jaringan yang biasa disebut dengan kesimbangan daya seperti yang dinyatakan pada Persamaan 15.

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{Gi} + \sum_{j=1}^n P_{Wj} = P_D + P_L \quad (15)$$

di mana $\sum_{i=1}^{N_g} P_{Gi}$ adalah total pembangkitan daya dari pembangkit termal, $\sum_{j=1}^n P_{Wj}$ adalah total daya luaran angin yang dijadwalkan, P_D adalah total permintaan beban, dan P_L total rugi-rugi daya [75].

Batasan selanjutnya adalah batasan batas-batas *ramp rate* dari generator. Batasan *ramp rate* adalah besaran laju perubahan daya luaran per satuan waktu atau laju respon dari pembangkit [22]. Batasan *ramp rate* digunakan untuk mencegah efek yang tidak diinginkan akibat dinamika perubahan yang cepat dan melebihi kemampuan generator. Batasan ini penting saat dilakukan penjadwalan generator dalam satu periode waktu, sehingga akan mempengaruhi batasan unit generator untuk waktu berikutnya seperti yang dirumuskan pada Persamaan 16.

$$\begin{aligned} P_{min,i}^t &= \max(P_{min,i}, P_i^{t-1} - DR_i) \\ P_{maks,i}^t &= \min(P_{maks,i}, P_i^{t-1} + UR_i) \end{aligned} \quad (16)$$

Di mana $P_{min,i}^t$ adalah batas minimum generator-*i* pada waktu *t* akan bernilai maksimum dari nilai desain batas minimum generator $P_{min,i}$ atau luaran generator-

i pada waktu $t-1$ (waktu sebelumnya) P_i^{t-1} dikurangi dengan laju nilai turun dari generator- i (DR_i). $P_{maks,i}^t$ adalah batas maksimum generator- i pada waktu t merupakan perbandingan nilai minimum dari batasan desain maksimum generator $P_{maks,i}$ dengan luaran generator- i pada waktu sebelumnya P_i^{t-1} dijumlahkan dengan laju nilai naik dari generator (UR_i). Batasan generator ramp rate ini muncul karena adanya batas minimum dan maksimum dari generator, sehingga persamaan batasan generator ramp rate dapat juga dituliskan seperti pada Persamaan 17 [9] :

$$\begin{aligned} p_i(t) - p_i(t-1) &\leq UR_i \\ p_i(t-1) - p_i(t) &\leq DR_i \end{aligned} \quad (17)$$

E. Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Turbin angin mengekstraksi energi dari udara yang bergerak dengan memperlambat angin dan mentransfer energi ini ke bagian poros yang berputar yang selanjutnya memutar generator untuk menghasilkan listrik. Tenaga angin yang tersedia bergantung pada kecepatan angin dan daerah usapan baling-baling turbin. Pembangkit listrik energi terbarukan seperti pembangkit listrik tenaga angin (PLTB) adalah yang kedua dari pembangkit listrik energi terbarukan yang mempunyai teknologi maju setelah pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Meskipun ada potensi signifikan untuk mengubah energi angin menjadi listrik, sejumlah masalah harus diatasi sebelum dapat digunakan secara maksimal. Angin bertiup di setiap sudut bumi. Namun demikian, angin tidak bertiup terus-menerus.

Selain itu, harus menjaga kecepatan tertentu agar efektif untuk menjalankan turbin angin dan menghasilkan listrik.

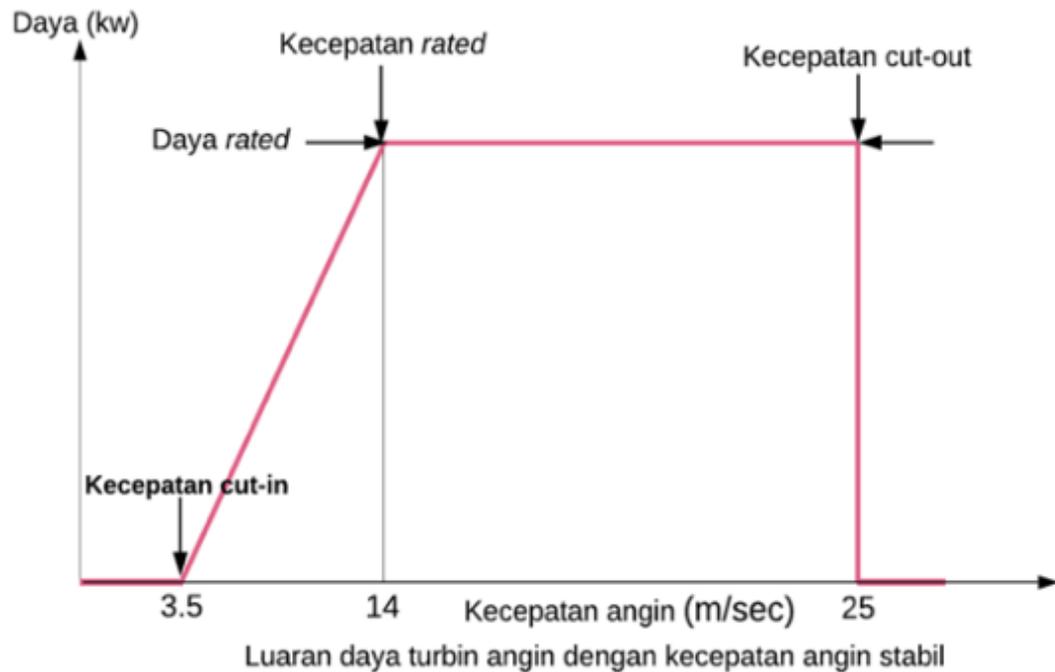
Sumber tenaga angin berdasarkan kecepatan angin dapat dikategorikan ke dalam tujuh kelas. Kelas angin mengacu pada berbagai kerapatan dan kecepatan tenaga angin yang menggambarkan energi yang terkandung dalam angin. Kelas tenaga angin diberikan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Kelas kerapatan tenaga angin pada 10 m dan 50 m

Kelas tenaga angin	10 m (33 ft)		50 m (164 ft)	
	Kerapatan tenaga angin (W/m^2)	Kecepatan m/s (mph)	Kerapatan tenaga angin (W/m^2)	Kecepatan m/s (mph)
1	< 100	< 4,4 (9,8)	< 200	
2	100–150	4,4 (9,8)–5,1 (11,5)	200–300	
3	150–200	5,1 (11,5)–5,6 (12,5)	300–400	
4	200–250	5,6 (12,5)–6,0 (13,4)	400–500	
5	250–300	6,0 (13,4)–6,4 (14,3)	500–600	
6	300–400	6,4 (14,3)–7,0 (15,7)	600–800	
7	> 400	> 7,0 (15,7)	> 800	

Sumber: [76]

Gambar 2.3 menunjukkan sebuah sketsa bagaimana luaran daya dari turbin angin yang bervariasi dengan kecepatan angin yang stabil.



Gambar 2.3. Luaran daya turbin angin dengan kecepatan stabil [72]

1. Kecepatan *Cut-In*

Kecepatan angin yang sangat rendah akan menghasilkan torsi yang rendah sehingga tidak dapat membuat baling-baling turbin untuk berputar. Turbin angin akan mulai berputar dan menghasilkan tenaga listrik ketika kecepatannya meningkat. Kecepatan saat turbin pertama mulai berputar dan menghasilkan daya disebut kecepatan *cut-In* dan biasanya antara 3 dan 4 m / detik.

2. Daya *Rated* dan Kecepatan *Rated*

Kecepatan angin yang meningkat di atas kecepatan *cut-in* menyebabkan tingkat daya luaran listrik meningkat dengan cepat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Luaran daya akan mencapai batas mampu generator saat kecepatan angin di antara 12 dan 17 m/s. Batas luaran generator inilah yang disebut daya *rated*

dan kecepatan angin yang dicapai disebut dengan kecepatan *rated*. Desain turbin diatur untuk membatasi daya hingga tingkat maksimumnya dan tidak ada peningkatan daya outputnya pada saat kecepatan angin yang lebih tinggi.

3. Kecepatan *Cut-Out*

Kecepatan angin yang meningkat di atas kecepatan *rated* menyebabkan gaya pada struktur turbin terus meningkat dan pada beberapa titik ada risiko kerusakan pada rotor. Akibatnya, sistem pengereman digunakan untuk membawa rotor ke posisi diam. Hal ini yang disebut dengan kecepatan *cut-out* dan biasanya sekitar 25 m / s.

4. Efisiensi Turbin Angin atau Koefisien Daya

Daya yang tersedia dalam aliran angin dengan luas penampang yang sama dengan turbin angin dapat dengan mudah ditunjukkan:

$$\text{Daya yang tersedia dalam Watt} = \frac{1}{2} \rho U^3 \frac{\pi d^2}{4} \quad (18)$$

Di mana:

U adalah kecepatan angin dalam (m/s)

ρ adalah kerapatan udara dalam (kg/m^3)

d adalah diameter rotor dalam (m)

5. Variabel Biaya *Wind Farm*

Variabel biaya *wind farm* terdiri atas biaya langsung (*direct cost*= C_d), biaya penalti (*penalty cost*= C_p), dan biaya layanan (*reserve cost*= C_r) yang dapat dituliskan seperti pada Persamaan 19 [68].

$$C(\text{WF}) = C_{d,j} + C_{p,j} + C_{r,j} \quad (19)$$

5.1. Biaya Langsung (C_d) *Wind Farm*

Biaya langsung *wind farm* adalah linear dengan daya yang dihasilkan oleh *wind farm* dan variabel biayanya dapat dinyatakan seperti pada Persamaan 20.

$$C_{d,j} = d_j \cdot W_j \quad (20)$$

di mana d_j adalah koefisien biaya langsung dari *wind farm*, dan W_j adalah luaran daya dari *wind farm* yang dibangkitkan.

5.2. Biaya Penalti (C_p) *Wind Farm*

Biaya penalti terjadi karena rendahnya perkiraan luaran dari daya *wind farm* sehingga daya yang dihasilkan oleh *wind farm* melebihi dari yang diharapkan atau tidak menggunakan semua daya dari *wind farm* yang tersedia yang dapat dituliskan seperti pada Persamaan 22 [58,66].

$$C_{p,j} = k_{p,j}(W_{j,a} - W_j) \quad (21)$$

$$C_{p,j} = k_{p,j} \int_{w_j}^{w_{r,j}} (w - w_j) f_w(w) dw \quad (22)$$

di mana $k_{p,j}$ adalah koefisien biaya penalti dari *wind farm*-i, $W_{j,a}$ adalah daya yang dibangkitkan oleh *wind farm*, dan $f_w(w)$ adalah variabel kerapatan probabilitas dari luaran daya *wind farm*. Untuk satu *wind farm*, biaya penaltinya dapat dinyatakan seperti pada Persamaan 23 [61].

$$C_{pw,j} = k_{p,j}(W_1 - w_1) = s_1 + s_2 \quad (23)$$

$$\begin{aligned} s_1 &= w_1 P(W_1 = w_r) \\ &= w_1 \left\{ \exp\left(-\left(\frac{v_i}{c}\right)^k\right) - \exp\left(-\left(\frac{v_o}{c}\right)^k\right) \right\} \end{aligned} \quad (24)$$

$$s_2 = \int_{w_1}^{w_r} (w - w_1) f_w(w) dw \quad (25)$$

Sedangkan, variabel kerapatan probabilitas $f_w(w)$ dari luaran daya *wind farm* dapat dituliskan seperti pada Persamaan 26.

$$f_w(w) = \frac{khv_i}{w_r c} \left(\frac{(1+\frac{hw}{w_r})v_i}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{(1+\frac{hw}{w_r})v_i}{c} \right)^k \right) \quad (26)$$

di mana $h = \left(\frac{v_r}{v_i} - 1 \right)$ adalah rasio rentang linear kecepatan angin terhadap kecepatan angin *cut-in*, c adalah faktor skala, (*scale factor*), k adalah faktor bentuk (*shape factor*), v_r adalah kecepatan angin (m/s), v_i adalah kecepatan angin *cut-in* (m/s), v_o adalah kecepatan angin *cut-out* (m/s).

5.3. Biaya Layanan (C_r) *Wind Farm*

Biaya cadangan terjadi karena kurangnya daya yang dihasilkan dari *wind farm* yang diakibatkan oleh kurangnya kecepatan angin dari yang diperkirakan sehingga operator utilitas perlu memberikan daya kepada konsumen. Perumusan biaya layanan untuk *wind farm* dapat dinyatakan seperti pada Persamaan 27.

$$\begin{aligned} C_{r,j} &= k_{r,j}(W_j - W_{j,a}) \\ &= k_{r,j} \int_0^{W_1} (w_j - w) f_w(w) dw \end{aligned} \quad (27)$$

di mana $k_{r,j}$ adalah koefisien biaya layanan dari *wind farm*-j. Sedangkan, untuk satu *wind farm*, maka biaya layanan dari *wind farm*nya dapat dirumuskan seperti pada Persamaan 28 [68].

$$C_{rw} = k_r(w_1 - W_1) = s_3 + s_4 \quad (28)$$

$$s_3 = w_1 P(W_1 = 0)$$

$$= w_1 \left\{ 1 - \exp\left(-\left(\frac{v_i}{c}\right)^k\right) + \exp\left(-\left(\frac{v_o}{c}\right)^k\right) \right\} \quad (29)$$

$$s_4 = \int_0^{w_1} (w_1 - w) f_w(w) dw \quad (30)$$

F. Variabel Biaya Integrasi Thermal-Wind

Komponen biaya untuk integrasi *thermal-wind* terdiri atas biaya bahan bakar untuk unit pembangkit listrik tenaga termal dan biaya untuk pembangkit listrik tenaga angin (*wind farm*) yang terdiri atas biaya langsung, biaya penalti, dan biaya layanan yang dapat dituliskan seperti pada Persamaan 31.

$$C(T, W) = \sum_{i=1}^M FC + \sum_{j=1}^N WC \quad (31)$$

$$FC = a_i + b_i \cdot P_i + c_i \cdot P_i^2 \quad (32)$$

$$WC = C_{d,j} + C_{p,j} + C_{r,j} \quad (33)$$

di mana $C(T, W)$ adalah total biaya dari unit pembangkit termal dan wind farm, FC adalah biaya bahan bakar unit pembangkit termal, WC adalah biaya dari wind farm, dan a_i, b_i, c_i koefisien biaya dari generator pembangkit termal.

G. Analisis Aliran Daya dan Klasifikasi Bus

Analisis aliran daya ialah analisis tentang penentuan atau perhitungan tegangan, arus, daya, faktor daya dan daya reaktif yang terdapat pada berbagai titik dalam suatu jaringan listrik pada keadaan pengoperasian normal, baik yang sedang berjalan maupun yang diharapkan akan terjadi di masa yang akan datang. Dengan analisis aliran daya akan diperoleh informasi yang penting dalam merencanakan

atau mendesain pengembangan sistem tenaga maupun untuk menentukan kondisi operasi terbaik dari suatu sistem tenaga listrik yang sudah ada, karena pengoperasian yang baik dari sistem tersebut banyak tergantung pada diketahuinya efek-efek interkoneksi dengan sistem tenaga yang lain, dari beban-beban yang baru, serta saluran-saluran transmisi baru, sebelum semuanya itu dipasang.

Kondisi operasi sistem sangat dipengaruhi oleh perilaku beban dan keadaan komponen-komponen yang membentuk sistem, seperti kesiapan unit pembangkit, transformator, jaringan transmisi dan peralatan lainnya. Keadaan tersebut dari waktu ke waktu selalu berubah, sehingga pada saat-saat tertentu bisa jadi sistem tidak dalam kondisi aman atau tidak memenuhi kualitas pelayanan tenaga listrik. Periode yang perlu mendapat perhatian ialah ketika sistem mengalami pembebanan berat (beban puncak) akibat sebagian elemen sistem tidak bisa beroperasi atau ketika sistem dalam pembebanan ringan (beban dasar).

Tujuan dari analisis aliran daya dimaksudkan untuk :

1. Mendapatkan besar dan sudut tegangan masing-masing bus sehingga dapat diketahui tingkat pemenuhan batas-batas operasi yang diperbolehkan.
2. Mendapatkan besar arus (daya) yang disalurkan lewat jaringan, sehingga bisa diidentifikasi tingkat pembebanannya.

Perhitungan aliran daya biasanya menggunakan admitansi bus dan representasi saluran transmisi jarak menengah π -nominal. Rangkaian ekuivalen saluran transmisi jarak menengah π -nominal per fasa ditunjukkan pada Gambar 2-4. Impedansi antara node (bus) i dan j terdiri dari impedansi seri (Z) dan admitansi paralel Y_{sh} . Admitansi paralel Y_{sh} ini disebut dengan admitansi pemuatan saluran

(line charging). Berdasarkan dengan arah arus I maka bus i dianggap sebagai ujung pengirim (sending end) dan bus j dianggap sebagai ujung penerima (receiving end) dan admitansi paralel terbagi dua antara bus i dan bus j . Besar impedansi total antara kedua bus ialah :

$$Z_{ij} = Z + Z_{sh} \quad (34)$$

dengan

$$Z_{sh} = \frac{1}{Y_{sh}}$$

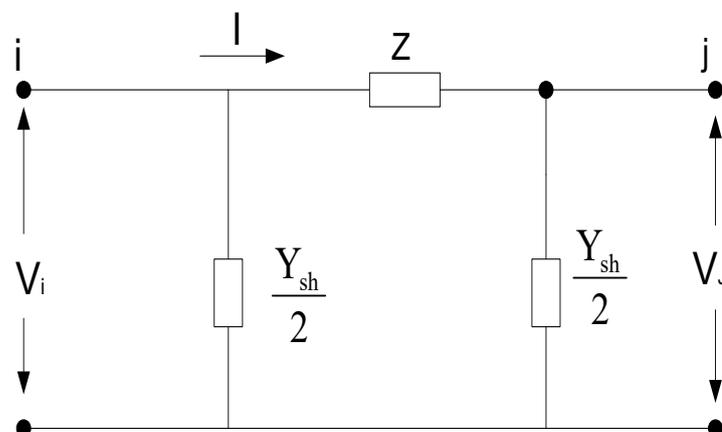
Admitansi total antara kedua bus ialah:

$$Y_{ij} = \frac{1}{Z_{ij}} \quad (35)$$

atau

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + j |Y_{ij}| \sin \theta_{ij} = G_{ij} + B_{ij} \quad (36)$$

di mana G_{ij} dan B_{ij} masing-masing menyatakan konduktansi total dan suseptansi total antara bus i dan bus j dan θ_{ij} menyatakan sudut yang dibentuk oleh vektor tegangan antara bus i dan bus j , V_{ij} dengan arus I .



Gambar 2.4. Rangkaian π nominal suatu saluran transmisi jarak menengah

Tegangan pada bus i atau node i dari sistem dalam koordinat polar:

$$V_i = |V_i| \angle \theta = |V_i| (\cos \delta_i + j \sin \delta_i) \quad (37)$$

dan tegangan pada bus j ditulis serupa dengan merubah subskrip i dengan j . Arus bersih yang diinjeksikan ke jaringan pada bus i ialah penjumlahan dari:

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{iN}V_N = \sum_{n=1}^N Y_{in}V_n \quad (38)$$

Ada empat kuantitas penting dalam perhitungan analisis aliran daya yang berhubungan pada tiap bus yaitu; daya aktif (P), daya reaktif (Q), magnituda tegangan (V), dan sudut tegangan (δ). Pada tiap bus dua dari empat kuantitas di atas ditentukan dan dua yang lain dihitung. Dengan demikian, jenis-jenis bus tersebut sebagai berikut:

1. Bus generator (di mana tegangan dikontrol) yang juga dikenal sebagai (bus PV). Daya aktif dan magnituda tegangan diketahui pada bus ini. Sebagai tambahan, batas-batas daya reaktif yang diketahui bergantung pada karakteristik peralatan, contohnya, condenser sinkron, dan SVC. Kuantitas yang dihitung ialah daya reaktif dan sudut tegangan.
2. Bus beban (PQ). Daya aktif dan reaktif diketahui. Biasanya beban dianggap mempunyai daya konstan. Kuantitas yang dihitung ialah magnituda tegangan dan sudut tegangan.
3. Bus slack (bus berayun). Magnituda tegangan dan sudut fase tegangan diketahui. Biasanya bus 1 dianggap sebagai slack bus, tetapi sebaiknya bus dengan kapasitas pembangkit terbesar dipilih sebagai slack bus oleh karena pada bus ini bervariasi mencatu rugi-rugi dan kekurangan daya pada

jaringan. Sudut tegangan dari slack bus merupakan referensi untuk sudut tegangan semua bus yang lainnya.

Ketiga jenis bus tersebut dapat diklasifikasi dalam bentuk tabel seperti ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5. Klasifikasi jenis bus dan besaran

Jenis bus	Besaran yang diketahui	Besaran yang tidak diketahui
Slack bus	V, δ	P, Q
Bus Generator (Bus PV)	P, V	Q, δ
Bus beban (Bus PQ)	P, Q	$V, \delta = 0$

H. Metode Newton–Raphson

Metode Newton–Raphson menurut [77] ialah suatu teknik yang berulang–ulang untuk menyelesaikan persamaan non linier. Metode Newton Raphson memiliki perhitungan yang lebih baik untuk sistem tenaga yang lebih besar dan tidak linier karena lebih efisien dan praktis. Metode Newton Raphson memiliki kurva konvergensi yang lebih baik dari metode Gauss-Seidel. Uraian deret Taylor untuk suatu variabel dengan dua atau lebih ialah dasar dari metode Newton–Raphson dalam penyelesaian aliran daya. Misalkan persamaan suatu variabel dengan dua variabel X_1 dan X_2 yang dinyatakan sebagai:

$$f_1(x_1, x_2) = K_1$$

$$f_2(x_1, x_2) = K_2 \tag{39}$$

di mana K_1 dan K_2 ialah suatu konstanta.

Penyelesaian dari persamaan di atas diketahui sebagai $x_1^{(0)}$ dan $x_2^{(0)}$, dan untuk mendapatkan penyelesaian yang benar maka ditambahkan $\Delta x_1^{(0)}$ dan $\Delta x_2^{(0)}$ pada $x_1^{(0)}$ dan $x_2^{(0)}$, sehingga nilai dari K_1 dan K_2 ialah:

$$K_1 = f_1(x_1, x_2) = f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}) \quad (40)$$

$$K_2 = f_2(x_1, x_2) = f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}) \quad (41)$$

Ekspansi deret Taylor dari persamaan (40) dan (41) di atas akan menghasilkan:

$$K_1 = f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) + \Delta x_1^{(0)} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_{(0)} + \dots \quad (42)$$

$$K_2 = f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) + \Delta x_1^{(0)} \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_{(0)} + \dots \quad (43)$$

Bilamana turunan-turunan parsial dengan orde lebih dari satu diabaikan maka persamaan (42) dan (43) di atas dapat dituliskan dalam bentuk matriks menjadi:

$$\begin{bmatrix} K_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) \\ K_2 - f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_{(0)} & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_{(0)} \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_{(0)} & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \end{bmatrix} \quad (44)$$

matriks bujur sangkar turunan-turunan parsial di atas disebut J (Jacobian) atau dalam hal ini $J^{(0)}$, di mana K_1 ialah nilai yang ditetapkan sedangkan $f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) = K_1$ ialah nilai yang dihitung. Jika ditentukan $\Delta K_1^{(0)} = K_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$ dan $\Delta K_2^{(0)} = K_2 - f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$, sehingga persamaan (44) dapat dituliskan dalam bentuk:

$$\begin{bmatrix} \Delta K_1^{(0)} \\ \Delta K_2^{(0)} \end{bmatrix} = J^{(0)} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \end{bmatrix} \quad (45)$$

Penambahan $\Delta x_1^{(0)}$, $\Delta x_2^{(0)}$ pada $x_1^{(0)}$ dan $x_2^{(0)}$ belum memberikan hasil yang akurat, sehingga diperlukan perkiraan-perkiraan baru $x_1^{(1)}$ dan $x_2^{(1)}$ dan proses diulang kembali untuk mendapatkan hasil yang lebih teliti. Penerapan metode Newton-Raphson pada penyelesaian aliran daya dapat dipilih dengan menyatakan tegangan-tegangan bus dan admitansi-admitansi saluran dalam bentuk polar atau bentuk siku-siku.

$$V_k = |V_k| \angle \delta_k \quad V_n = |V_n| \angle \delta_n \quad \text{dan} \quad Y_{kn} = |Y_{kn}| \angle \theta_{kn}$$

$$P_k - jQ_k = \sum_{n=1}^N |V_k V_n Y_{kn}| \angle \theta_{kn} + \delta_n - \delta_k \quad (46)$$

di mana:

$$P_k = \sum_{n=1}^N |V_k V_n Y_{kn}| \cos(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad (47)$$

$$Q_k = \sum_{n=1}^N |V_k V_n Y_{kn}| \sin(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad (48)$$

Persamaan (47) dan (48) merupakan persamaan non-linier yang memiliki variabel bebas berupa tegangan (pu) dan sudut (radian). Sedangkan, daya yang dihasilkan pada persamaan (47) dan (48) disebut sebagai *calculated power*.

Nilai-nilai dari magnituda tegangan dan sudut tegangan bersesuaian dengan nilai-nilai perkiraan untuk X_1 dan X_2 dalam persamaan (41). Nilai-nilai perkiraan ini digunakan untuk menghitung nilai-nilai P_k dan Q_k dari persamaan (47) dan (48) dan mendefinisikan:

$$\Delta P_k = P_{k,schedule} - P_{k,cal} \quad (49)$$

$$\Delta Q_k = Q_{k,schedule} - Q_{k,cal} \quad (50)$$

Penyederhanaan untuk sistem yang mempunyai n bus dapat disederhanakan seperti pada persamaan (51). Bus 1 dipilih sebagai bus berayun (slack), sehingga

perhitungan dimulai dari bus 2 karena besar magnituda tegangan dan sudut tegangan sudah ditentukan pada bus berayun dan dalam bentuk matriks dituliskan:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \vdots \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & \vdots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & J_{11} & \vdots & \vdots & \vdots & J_{12} & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \vdots & \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \vdots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & J_{22} & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \vdots & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \vdots \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (51)$$

Persamaan (49) di atas dapat dinyatakan dalam bentuk yang sederhana menjadi:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (52)$$

di mana J_1, J_2, J_3, J_4 ialah elemen-elemen dari matriks Jacobian.

Adapun nilai-nilai dari keempat elemen diagonal matriks Jacobian dapat dituliskan sebagai berikut:

Elemen J_1 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_k}{\partial \delta_n} &= \sum_{n=1}^N |V_k V_n Y_{kn}| \sin(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \\ \frac{\partial P_k}{\partial \delta_n} &= -|V_k V_n Y_{kn}| \sin(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k), k \neq n \end{aligned} \quad (53)$$

Elemen J_2 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_k}{\partial |V_n|} &= 2|V_k| |Y_{kk}| \cos \theta_{kk} \sum_{n=1}^N |V_n| |Y_{kn}| \cos(\theta_{kn} - \delta_n - \delta_k) \\ \frac{\partial P_k}{\partial |V_n|} &= |V_k| |Y_{kn}| \cos(\theta_{kn} - \delta_n - \delta_k), k \neq n \end{aligned} \quad (54)$$

Elemen J_3 :

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_n} = \sum_{n=1}^N |V_k V_n Y_{kn}| \cos(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_n} = -|V_k V_n Y_{kn}| \cos(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k), k \neq n \quad (55)$$

Elemen J4:

$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_n|} = 2|V_k| |Y_{kn}| \sin \theta_{kn} \sum_{n=1}^N |V_n| |Y_{kn}| \sin(\theta_{kn} - \delta_n - \delta_k)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_n|} = -|V_k| |Y_{kn}| \sin(\theta_{kn} - \delta_n - \delta_k), k \neq n \quad (56)$$

Nilai tegangan $|V_k^{(a+1)}|$ dan sudut $(\theta_k^{(a+1)})$ yang baru dapat diperoleh dengan jalan menambahkan $\Delta|V_k|$ dan $\Delta\theta_k$ pada nilai sebelumnya, sehingga akan diperoleh nilai tegangan dan sudut yang baru sebagai berikut:

$$|V_k^{(a+1)}| = |V_k^{(a)}| - \Delta|V_k^{(a)}| \quad (57)$$

$$\theta_k^{(a+1)} = \theta_k^{(a)} - \Delta\theta_k^{(a)} \quad (58)$$

Berdasarkan persamaan-persamaan di atas maka penyelesaian aliran daya dengan metode Newton Raphson mengikuti langkah-langkah berikut:

1. Ubah semua nilai ke dalam besaran per unit (pu)
2. Kemudian menyusun matriks admitansi (Y matrix)
3. Identifikasi nilai-nilai yang diketahui dan yang tidak diketahui
4. Tentukan *slack bus/reference bus*, bus generator (PV), dan bus beban (PQ)
5. Jika tegangan di suatu bus tidak diketahui, asumsikan tegangannya $1 + j0$ pu. Asumsi ini sering disebut sebagai *flat start*. Hal ini disebabkan, biasanya besar tegangan suatu bus tidak akan jauh dari 1 pu.
6. Untuk bus beban, tegangan dan sudut fase di atur ke $|V_k^{(0)}| = 1.0 \text{ pu}$ dan $\delta_k^{(0)} = 0$.
0. Untuk bus generator, sudut fase di atur ke $\delta_k^{(0)} = 0$.

7. Hitung turunan parsial untuk elemen-elemen *Jacobian Matrix* (J_1, J_2, J_3, J_4) berdasarkan persamaan (53), (54), (55), dan (56).
8. Proses optimasi dilakukan dengan menggunakan persamaan (50)
9. Penentuan nilai baru dari tegangan $V_k^{(a+1)}$ dan sudut fase $\theta_k^{(a+1)}$ diselesaikan dengan persamaan (55) dan (56)
10. Proses terus berlansung hingga diperoleh nilai ΔP_k persamaan (49) dan ΔQ_k persamaan (50) lebih kecil nilainya dari indeks yang ditetapkan. Jika proses tersebut terpenuhi maka proses iterasi telah dicapai atau telah konvergen.

I. Tinjauan Stabilitas Tegangan

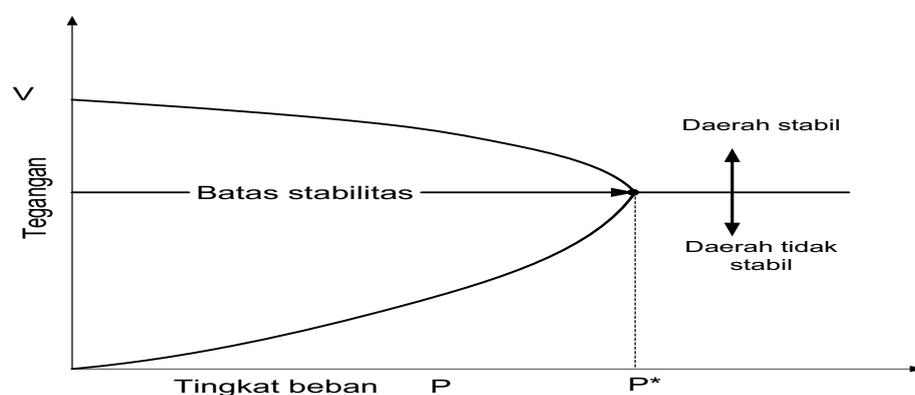
Daya yang ditransfer di antara pembangkit dan pusat-pusat beban selalu disertai dengan jatuh tegangan melalui jaringan transmisi. Jatuh tegangan ini selama kondisi operasi normal persentasenya sedikit, tetapi dibawah pembebanan yang berat atau kondisi yang tertekan, sebuah perubahan besar dalam jatuh tegangan yang akan mempengaruhi kualitas dan keandalan suplai daya.

Tantangan yang penting untuk perencana sistem tenaga dan operator ialah untuk mempertahankan tegangan dalam level yang dapat diterima. Studi stabilitas tegangan pada sistem tenaga listrik bertujuan untuk mengatasi dan menjaga agar fluktuasi tegangan sistem berada dalam margin yang diisinkan.

Kriteria kestabilan tegangan ialah sebuah kondisi operasi sistem tenaga di mana besar tegangan setiap bus meningkat bersamaan dengan bertambahnya injeksi daya reaktif pada bus yang sama. Sebuah sistem dikatakan bertegangan tidak stabil bila sedikitnya sebuah bus mengalami penurunan tegangan yang bersamaan dengan

bertambahnya injeksi daya reaktif pada bus yang sama. Fenomena stabilitas tegangan ini terjadi pada kondisi sistem yang dibebani berat.

Suatu penambahan beban di luar perhitungan kondisi sistem transmisi, kompensator, karakteristik dan kemampuan pembangkit, akan dapat mempengaruhi pergeseran stabilitas tegangan pada seluruh sistem. Untuk itu perlu dikembangkan keterkaitan antara penambahan beban terhadap perubahan besar tegangan dan sudut fasa tegangan melalui matriks Jacobian yang terbentuk dari persamaan aliran daya. Di dalam stabilitas tegangan statik, perubahan-perubahan yang lambat dalam sistem tenaga kadang-kadang menyebabkan sistem dalam situasi yang tidak stabil dengan berkurangnya tegangan dan kekurangan daya reaktif. Hal ini bisa diamati dari analisis kurva V-P seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-5, di mana itu menunjukkan variasi besar tegangan beban dengan pembebanan P. Untuk nilai-nilai pembebanan yang rendah, ada dua titik keseimbangan atau solusi, satu dengan tegangan tinggi dan satu dengan tegangan rendah. Tegangan tinggi mempunyai arus rendah dan tegangan rendah mempunyai arus tinggi. Ketika pembebanan secara perlahan meningkat, dua titik keseimbangan ini mendekati satu sama lain dan bersatu pada titik kritis P^* .



Gambar 2-5. Kurva V-P.

Stabilitas tegangan didefinisikan sebagai "kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan tegangan yang dapat diterima pada semua bus di dalam sistem setelah terjadinya gangguan dari suatu kondisi sistem tenaga yang sedang beroperasi". Tegangan kolaps (*voltage collapse*) ialah situasi yang muncul ketika suatu urutan kejadian yang disertai oleh ketidakstabilan tegangan menghasilkan kegagalan total atau sebagian dari sistem tenaga. Dari proses urutan kejadian tersebut yang disertai oleh ketidakstabilan tegangan dapat menghasilkan pemadaman total atau dengan tidak normalnya tegangan rendah pada bagian sistem tenaga yang penting.

J. Pendekatan Indeks L Stabilitas Tegangan

Anggap suatu sistem mempunyai n total jumlah bus dengan $i=1,2,\dots,g$ bus generator, $j=g+1, g+2,\dots, n$ bus beban. Aliran beban yang dipakai untuk menghitung indeks L stabilitas menurut "D Thukaram, dan Garng M.Huang" sebagai berikut:

$$L_j = \left| 1 - \sum_{i=1}^{i=g} F_{ji} \left(\frac{V_i}{V_j} \right) \right| = \frac{S_j}{Y_{jj} V_j^2} \quad (59)$$

di mana $j = g+1, \dots, n$ dan semua besaran yang ada dalam Σ pada persamaan (59) merupakan kuantitas kompleks. Selanjutnya nilai F_{ji} diperoleh dari matriks bus Y , yaitu:

$$\begin{bmatrix} I^G \\ I^L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y^{GG} & Y^{GL} \\ Y^{LG} & Y^{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^G \\ V^L \end{bmatrix} \quad (60)$$

di mana I^G , I^L , V^G , V^L dinyatakan sebagai arus dan tegangan pada bus generator dan bus beban. Persamaan (60) di atas dapat diturunkan menjadi:

$$\begin{aligned} I^G &= Y^{GG} V^G + Y^{GL} V^L \\ I^L &= Y^{LG} V^G + Y^{LL} V^L \end{aligned} \quad (61)$$

Oleh karena itu, nilai V^L dapat diperoleh sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V^L &= [Y^{LL}]^{-1} I^L - [Y^{LL}]^{-1} Y^{LG} V^G \\ I^G &= Y^{GL} V^L + Y^{GG} V^G \\ &= [Y^{LL}]^{-1} Y^{GL} I^L + (Y^{GG} - [Y^{LL}]^{-1} Y_{GL} Y_{LG}) V^G \end{aligned} \quad (62)$$

Jika persamaan (62) ditransfer ke dalam bentuk matriks akan diperoleh:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V^L \\ I^G \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \left(Y^{LL} \right)^{-1} & - \left(Y^{LL} \right)^{-1} Y^{LG} \\ \left(Y^{LL} \right)^{-1} Y^{GL} & \left(Y^{GG} - Y^{LL}{}^{-1} Y_{GL} Y_{LG} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^L \\ V^G \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} V^L \\ I^G \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Z^{LL} & F^{LG} \\ K^{GL} & Y^{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^L \\ V^G \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (63)$$

Nilai F_{LG} pada persamaan (63) merupakan nilai F_{ji} yang dikehendaki, yaitu $F_{ji} = F_{LG} = - [Y_{LL}]^{-1} [Y_{LG}]$. Indeks L untuk kondisi beban yang diberikan dihitung untuk semua bus-bus beban.

Indeks L stabilitas ini ialah salah satu metode untuk menentukan stabil atau tidak stabilnya suatu sistem tenaga. Nilai L ini berupa nilai skalar dari 0 sampai 1, di mana nilai 0 diartikan sebagai sistem yang tidak dibebani dan nilai 1 diartikan sebagai sistem yang mengalami tegangan kolaps.

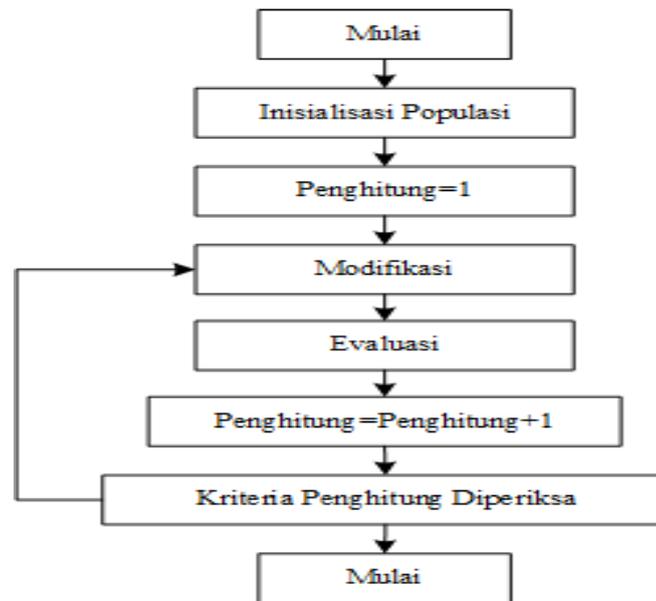
Bus yang mempunyai nilai indeks L yang tertinggi akan menjadi bus yang paling kritis dalam suatu sistem. Oleh karena itu, indeks L stabilitas ini dapat

dipakai untuk mengidentifikasi bus–bus yang kritis yang memerlukan suplai daya reaktif.

K. Metode Optimasi

Optimasi adalah suatu proses untuk mencapai hasil yang ideal atau nilai efektif yang dapat dicapai atau proses mencari solusi terbaik atau nilai optimal. Optimasi dapat diartikan sebagai suatu bentuk mengoptimalkan sesuatu hal yang sudah ada.

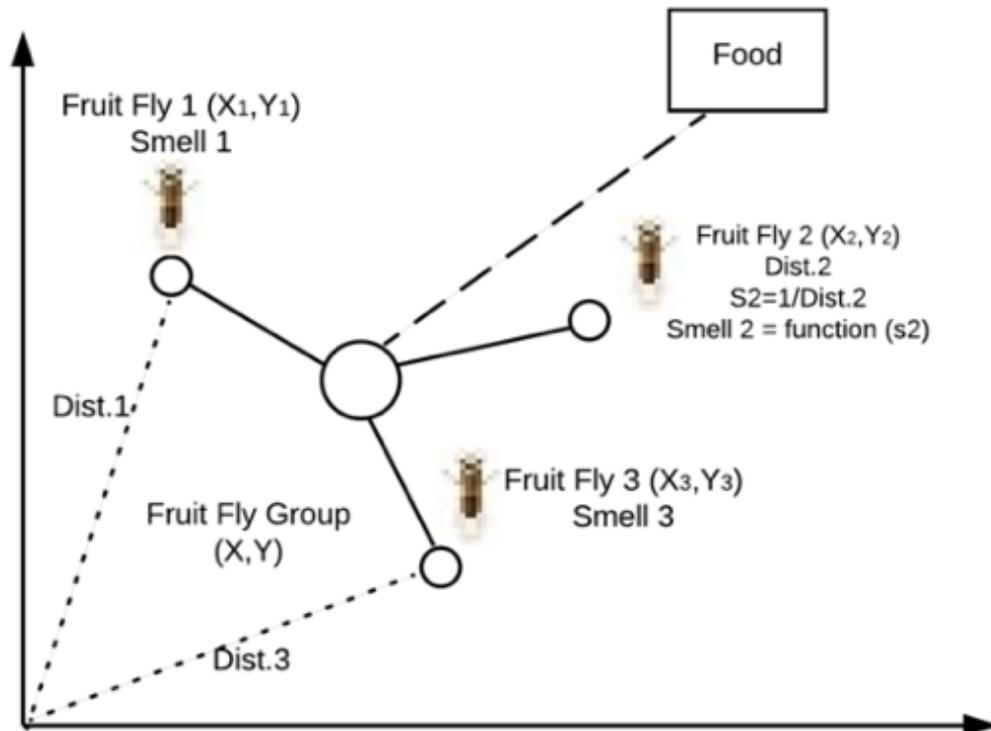
Metode yang digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi dapat dibagi dalam dua kategori, yaitu metode klasik dan metode heuristik. Sebagian besar metode klasik adalah teknik berbasis gradien sehingga tidak cocok untuk masalah pengoptimalan dengan skala besar. Metode heuristik terinspirasi oleh alam. Konsep dasar dari teknik ini dijelaskan pada Gambar 2.6. Pada setiap metode heuristik dihasilkan populasi acak awal, dan dicoba untuk memperbaikinya dengan menggunakan beberapa operator yang memodifikasi populasi (solusi). Cara setiap metode memodifikasi populasi membedakan metode tersebut dari teknik lainnya, misalnya algoritma genetika (GA), PSO, FOA, dan ABC, dan lain-lain. Metode heuristik juga disebut teknik iteratif. Jumlah iterasi yang dibutuhkan untuk mengoptimalkan variabel tujuan memiliki hubungan terbalik dengan jumlah populasi. Jika jumlah populasi bertambah, maka ruang solusi dapat dieksplorasi dengan lebih baik, akan tetapi dibutuhkan lebih banyak waktu untuk menjalankannya [78].



Gambar 2.6. Struktur teknik optimasi heuristik

1. Metode Lalat Buah (FOA)

Metode FOA diperkenalkan oleh Wen-Tsao Pan pada tahun 2012 [79], yang mendeskripsikan bahwa indera penciuman dan penglihatan lalat buah dapat mengumpulkan aroma dan sumber makanan dari udara meskipun jarak sumber makanan tersebut mencapai 40 km. Ilustrasi lalat buah mencari dan menemukan sumber makanannya ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Skema pencarian makanan dari kawanan lalat buah [79]

Metode FOA merupakan salah satu metode heuristik yang digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi, yaitu metode pencarian berdasarkan intuisi atau aturan empiris untuk mendapatkan solusi yang lebih baik dari solusi yang dicapai sebelumnya. Algoritma optimasi lalat buah memiliki kelebihan dalam hal proses komputasi yang sederhana dan kemudahan dalam mentransformasikan konsep menjadi kode program. Algoritma optimasi FOA diwakili dalam langkah-langkah berikut:

- a. Tentukan posisi awal dari kawanan lalat buah

$$X_{axis} ; Y_{axis} \quad (64)$$

- b. Cari arah dan jarak sumber makanan secara acak dengan menggunakan indera penciuman dari lalat buah

$$X_i = X_{axis} + \text{random value} \quad (65)$$

$$Y_i = Y_{axis} + \text{random value} \quad (66)$$

- c. Prediksi jarak asal lalat buah (Dist) karena tidak diketahui lokasi makanan dengan menghitung nilai konsentrasi bau (S)

$$\text{Dist}_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} \quad (67)$$

$$S_i = \frac{1}{\text{Dist}_i} \quad (68)$$

- d. Substitusi nilai konsentrasi penciuman (S) ke variabel konsentrasi penciuman (Smell)

$$\text{Smell}_i = \text{function}(S_i) \quad (69)$$

- e. Tentukan konsentrasi penciuman maksimum di antara kawanan lalat buah

$$[\text{bestSmell}, \text{bestIndex}] = \max(\text{Smell}) \quad (70)$$

- f. Pertahankan nilai koordinat X, Y, dan konsentrasi penciuman terbaik

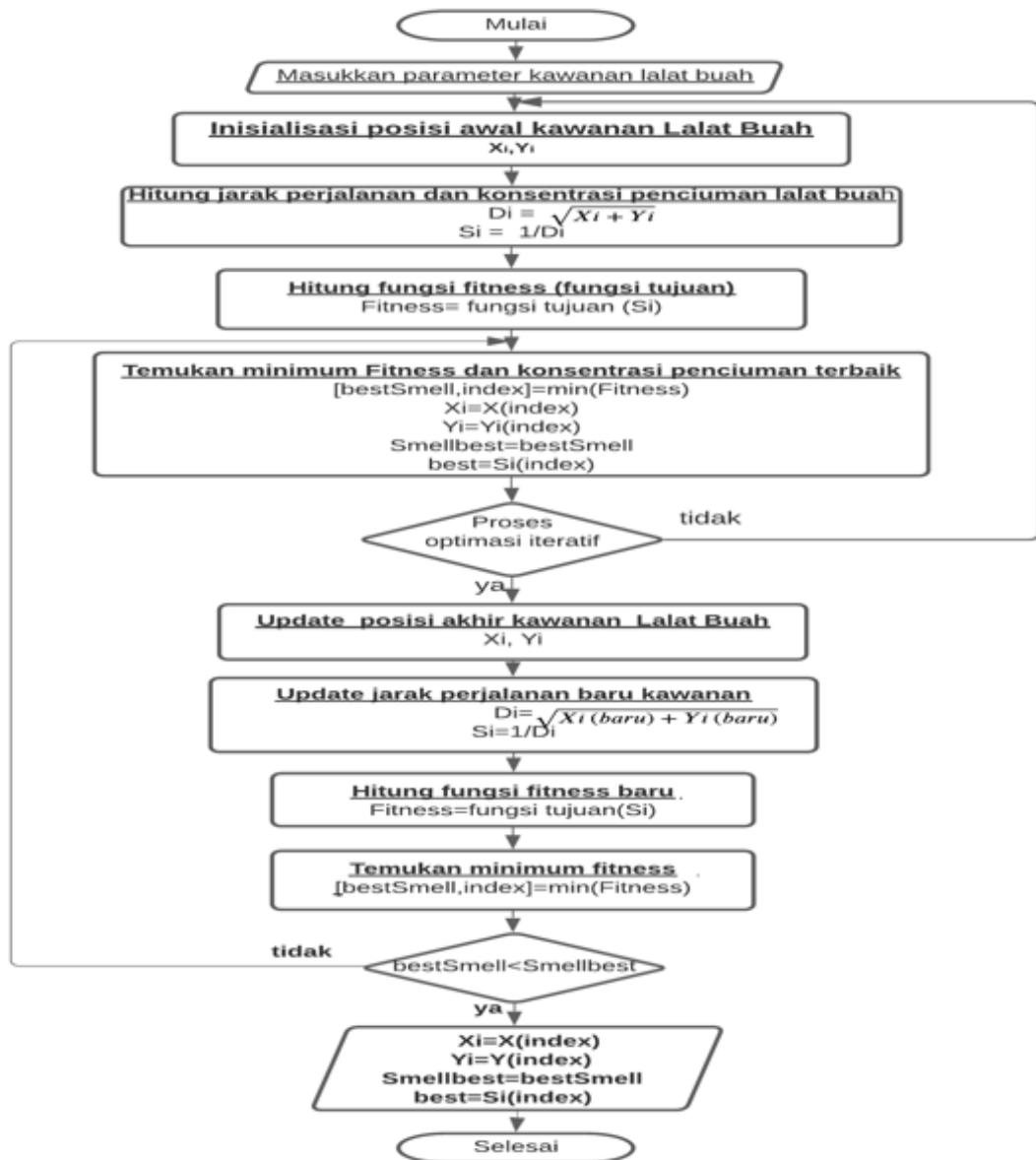
$$X_{axis} = X(\text{bestIndex}) \quad (71)$$

$$Y_{axis} = Y(\text{bestIndex}) \quad (72)$$

$$\text{Smellbest} = \text{bestSmell} \quad (73)$$

- g. Masuk ke optimasi perulangan, dan lakukan pengulangan langkah b hingga e dan lihat ketika konsentrasi *Smell* saat ini lebih baik daripada konsentrasi *Smell* sebelumnya, jika itu benar, maka jalankan langkah f.

Adapun urutan langkah-langkah logis tersebut dapat diperlihatkan dalam bentuk flowchart seperti diperlihatkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Flowchart metode optimasi FOA

2. Metode Koloni Lebah Buatan (ABC)

Algoritma ABC diperkenalkan oleh D. Karaboga untuk memberikan solusi permasalahan optimasi dengan batasan optimasi yang kompleks [22]. Pada algoritma ABC, koloni dari lebah terdiri dari tiga kelompok lebah, yaitu lebah

pekerja, lebah penonton dan lebah pencari. Paruh pertama dari koloni terdiri dari lebah pekerja dan paruh kedua adalah penonton. Untuk setiap sumber makanan, hanya ada satu lebah pekerja. Dengan kata lain, jumlah lebah pekerja sama dengan jumlah sumber makanan di sekitar sarang. Tiga parameter kontrol yang digunakan dalam algoritma ABC [80], yaitu:

1. Jumlah sumber makanan yang sama dengan jumlah lebah pekerja atau lebah penonton (SN), menentukan banyaknya calon solusi daya yang diperhitungkan dalam satu iterasi
2. Nilai batas, merupakan nilai batas eksplorasi nilai daya solusi baru, dan
3. Jumlah siklus maksimum, merupakan nilai banyak perulangan untuk mendapatkan nilai solusi minimal.

Algoritma ABC menyatakan bahwa posisi sumber makanan merupakan solusi yang mungkin untuk masalah optimasi dan jumlah nektar dari sumber makanan sesuai dengan kualitas (*fitness*) dari solusi yang terkait. Jumlah lebah pekerja atau lebah penonton sama dengan jumlah solusi dalam populasi. Pada langkah pertama, algoritma ABC menghasilkan populasi awal acak P ($G = 0$) dari solusi SN (posisi sumber makanan), di mana SN menunjukkan ukuran populasi. Setiap solusi X_i ($i = 1, 2, \dots, SN$) adalah suatu vektor dimensi D , di mana D adalah jumlah parameter optimasi.

Setelah inisialisasi, populasi posisi (solusi) siklusnya diulangi, $C = 1, 2, \dots$, MCN dari proses pencarian lebah pekerja, lebah penonton dan lebah pencari. Lebah pekerja menghasilkan modifikasi pada posisi (solusi) dalam memorinya tergantung pada informasi lokal (informasi visual) dan menguji jumlah nektar (*fitness value*)

dari sumber baru (solusi baru). Asalkan jumlah nektar dari yang baru lebih tinggi dari yang sebelumnya, lebah mengingat posisi baru dan melupakan yang lama. Jika tidak, dia akan mempertahankan posisi yang sebelumnya dalam memorinya. Setelah semua lebah pekerja menyelesaikan proses pencarian, mereka berbagi informasi nektar dari sumber makanan dan informasi posisi mereka dengan lebah penonton di areanya. Lebah penonton mengevaluasi informasi nektar yang diambil dari semua lebah pekerja dan memilih sumber makanan dengan probabilitas yang terkait dengan jumlah nektarnya. Seperti dalam kasus lebah pekerja, ia menghasilkan modifikasi pada posisi dalam memorinya dan memeriksa jumlah nektar dari sumber kandidat. Memberikan bahwa nektarnya lebih tinggi dari yang sebelumnya, lebah mengingat posisi baru dan melupakan yang lama.

Lebah penonton memilih sumber makanan bergantung pada nilai probabilitas yang terkait dengan sumber makanan P_i yang dihitung dengan menggunakan Persamaan 74.

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{n=1}^{SN} fit_n} \quad (74)$$

di mana fit_i adalah nilai *fitness* dari solusi i yang sebanding dengan jumlah nektar dari sumber makanan pada posisi i dan SN adalah jumlah sumber makanan yang sama dengan jumlah lebah pekerja (BN).

Posisi makanan kandidat dari yang lama dalam memori akan dihasilkan di mana algoritma ABC yang digunakan sesuai dengan Persamaan 75.

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (75)$$

di mana $k \in \{1, 2, \dots, SN\}$ dan $j \in \{1, 2, \dots, D\}$ adalah indeks terpilih secara acak. Meskipun k ditentukan secara acak tetapi berbeda dari i . ϕ_{ij} adalah jumlah acak di antara $[-1, 1]$. Ini mengontrol produksi sumber makanan tetangga di sekitar $x_{i,j}$ dan mewakili perbandingan dua posisi makanan secara visual oleh lebah. Seperti yang diperlihatkan pada Persamaan 75, karena adanya perbedaan antara parameter $x_{i,j}$ dan x_{kj} menurun, gangguan pada posisi $x_{i,j}$ akan berkurang juga.

Pencarian yang mendekati solusi optimal di ruang pencarian maka panjang langkah akan dikurangi secara adaptif. Jika nilai parameter yang dihasilkan oleh operasi ini melebihi batas yang telah ditentukan, parameter dapat diatur ke nilai yang dapat diterima. Nilai parameter yang melebihi batasnya diatur ke nilai batasnya.

Sumber makanan di mana nektar ditinggalkan oleh lebah diganti dengan sumber makanan baru oleh para lebah pencari. Di algoritma ABC, ini disimulasikan dengan memproduksi posisi secara acak dan menggantinya dengan yang ditinggalkan. Di algoritma ABC, dengan ketentuan bahwa suatu posisi tidak dapat ditingkatkan lebih lanjut melalui sejumlah siklus yang telah ditentukan, maka sumber makanan tersebut dianggap ditinggalkan. Nilai jumlah siklus yang telah ditentukan adalah parameter kontrol penting dari algoritma ABC, yang disebut "batas" untuk ditinggalkan. Asumsikan bahwa sumber yang ditinggalkan adalah x_i dan $j \in \{1, 2, \dots, D\}$, maka lebah pencari menemukan sumber makanan baru untuk diganti dengan x_i . Operasi ini dapat dituliskan seperti pada Persamaan 76.

$$x_i^j = x_{min}^j + rand(0,1)(x_{max}^j - x_{min}^j) \quad (76)$$

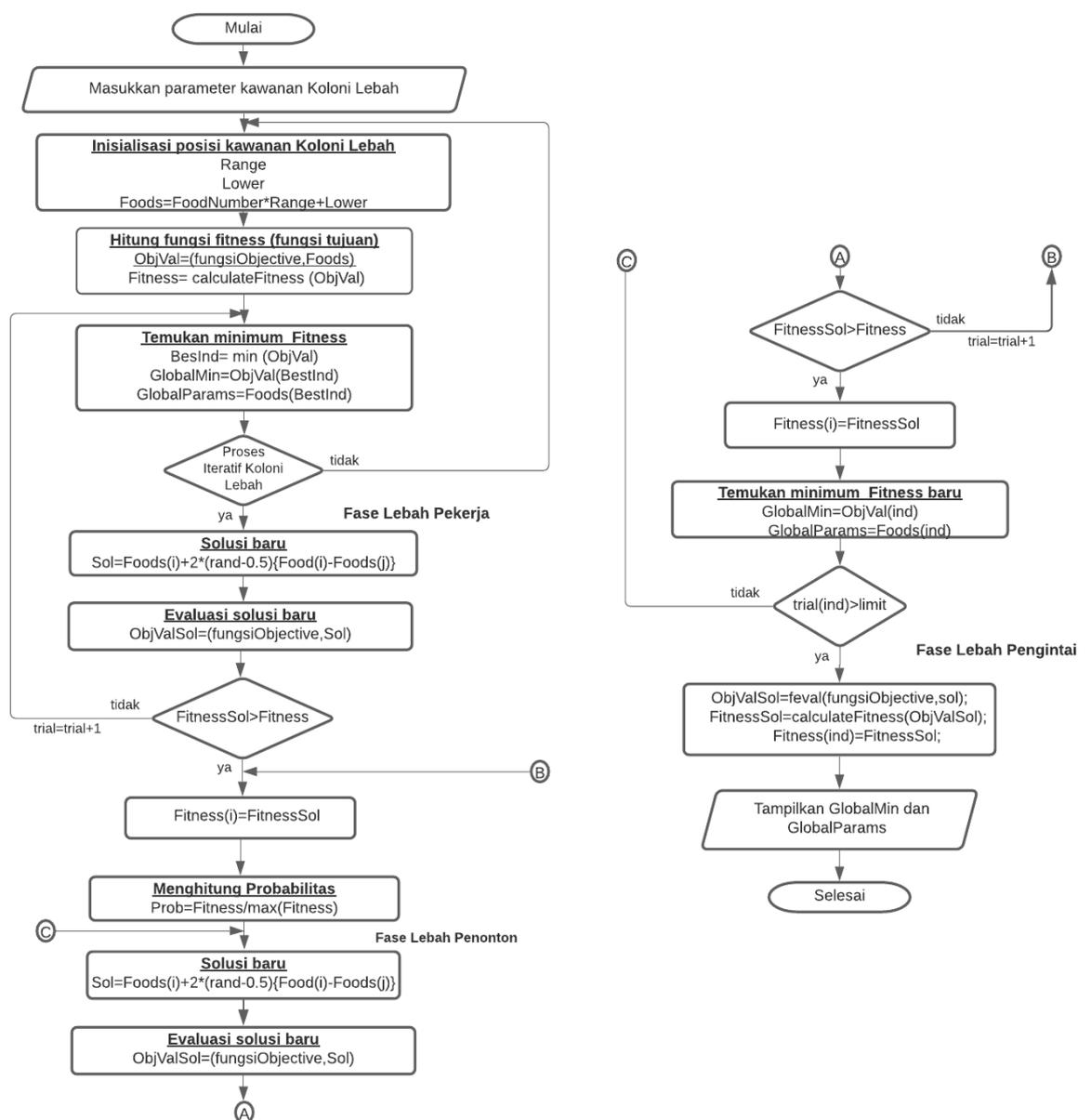
Setelah setiap posisi sumber kandidat v_{ij} diproduksi dan kemudian dievaluasi oleh lebah buatan, kinerjanya dibandingkan dengan yang lama. Jika makanan baru itu memiliki nektar yang sama atau lebih baik dari sumber lama, diganti dengan yang lama di memori. Jika tidak, yang lama disimpan dalam memori. Dengan kata lain, mekanisme seleksi *greedy* digunakan sebagai operasi seleksi antara yang lama dan kandidat. Jumlah sumber makanan adalah sama dengan jumlah lebah pekerja atau penonton (SN), nilai batas dan jumlah siklus maksimum (MCN)

Secara detail pseu-code dari algoritma ABC adalah:

1. Inisialisasi populasi solusi $x_{ij}, i = 1 \dots SN, j = 1 \dots D$
2. Evaluasi populasi
3. Siklus = 1
4. Ulangi (*repeat*)
5. Buat solusi baru v_{ij} untuk lebah pekerja dengan menggunakan Persamaan 75 dan mengevaluasinya
6. Terapkan proses seleksi *greedy* antara x_i dan v_i
7. Hitung nilai probabilitas $P_{i,j}$ untuk solusi $x_{i,j}$ dengan Persamaan 74
8. Buat solusi baru v_{ij} untuk lebah penonton dari solusi x_{ij} yang dipilih bergantung pada $P_{i,j}$ dan mengevaluasinya
9. Terapkan proses seleksi *greedy* x_i dan v_i
10. Tentukan solusi yang ditinggalkan untuk lebah pengintai jika ada dan ganti dengan solusi $x_{i,j}$ yang baru yang dihasilkan secara acak dengan menggunakan Persamaan 76

11. Ingat solusi terbaik yang dicapai sejauh ini
12. Siklus = Siklus + 1
13. Sampai (*until*) siklus = jumlah siklus maksimum (MCN)

Adapun urutan langkah-langkah logis algoritma ABC dapat diperlihatkan dalam bentuk flowchart seperti diperlihatkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Flowchart metode optimasi ABC

L. Kerangka Pikir

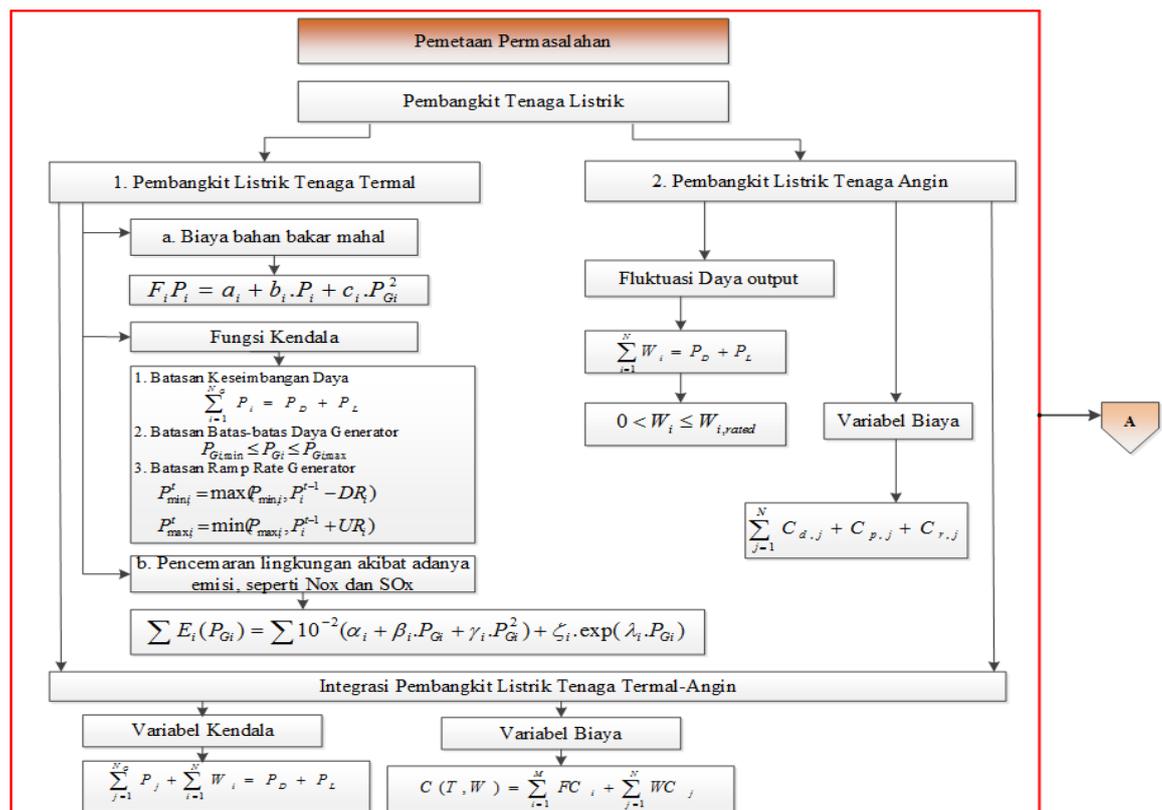
Pembangkit listrik terdiri atas pembangkit listrik energi tidak terbarukan dan pembangkit listrik energi terbarukan. Pembangkit listrik energi tidak terbarukan dalam hal ini adalah pembangkit listrik termal berupa Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) dan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD). Pembangkit listrik termal ini termasuk dalam kategori pembangkit listrik tenaga bahan bakar fosil dan merupakan penyumbang utama gas rumah kaca dan berkontribusi besar terhadap pemanasan global dan pencemaran lingkungan akibat adanya emisi, seperti NO_x, dan SO_x. Di samping itu, bahan bakar fosil saat ini mengalami eksploitasi yang sangat tinggi dan diperkirakan akan habis dalam kurun waktu 30-40 tahun ke depan. Oleh karena itu, bahan bakar fosil ini termasuk sumber energi tak terbarukan maka biaya penggunaan bahan bakar fosil tersebut relatif mahal.

Pembangkit listrik energi terbarukan di antaranya Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB), *Photovoltaic* (PV), Pembangkit Listrik Tenaga Tidal, Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang dan Pembangkit Listrik Tenaga Biomass. Khususnya untuk penetrasi sumber energi terbarukan dari pembangkit listrik tenaga angin dalam sistem tenaga akan menimbulkan masalah operasi ekonomis akibat dari sumber energi angin memiliki sifat *intermitten* yang disebabkan oleh kondisi cuaca yang tak dapat diprediksi yang akan menyebabkan fluktuasi daya *output* dari pembangkit tenaga angin tersebut sehingga akan memberikan tantangan untuk mempertahankan keseimbangan daya

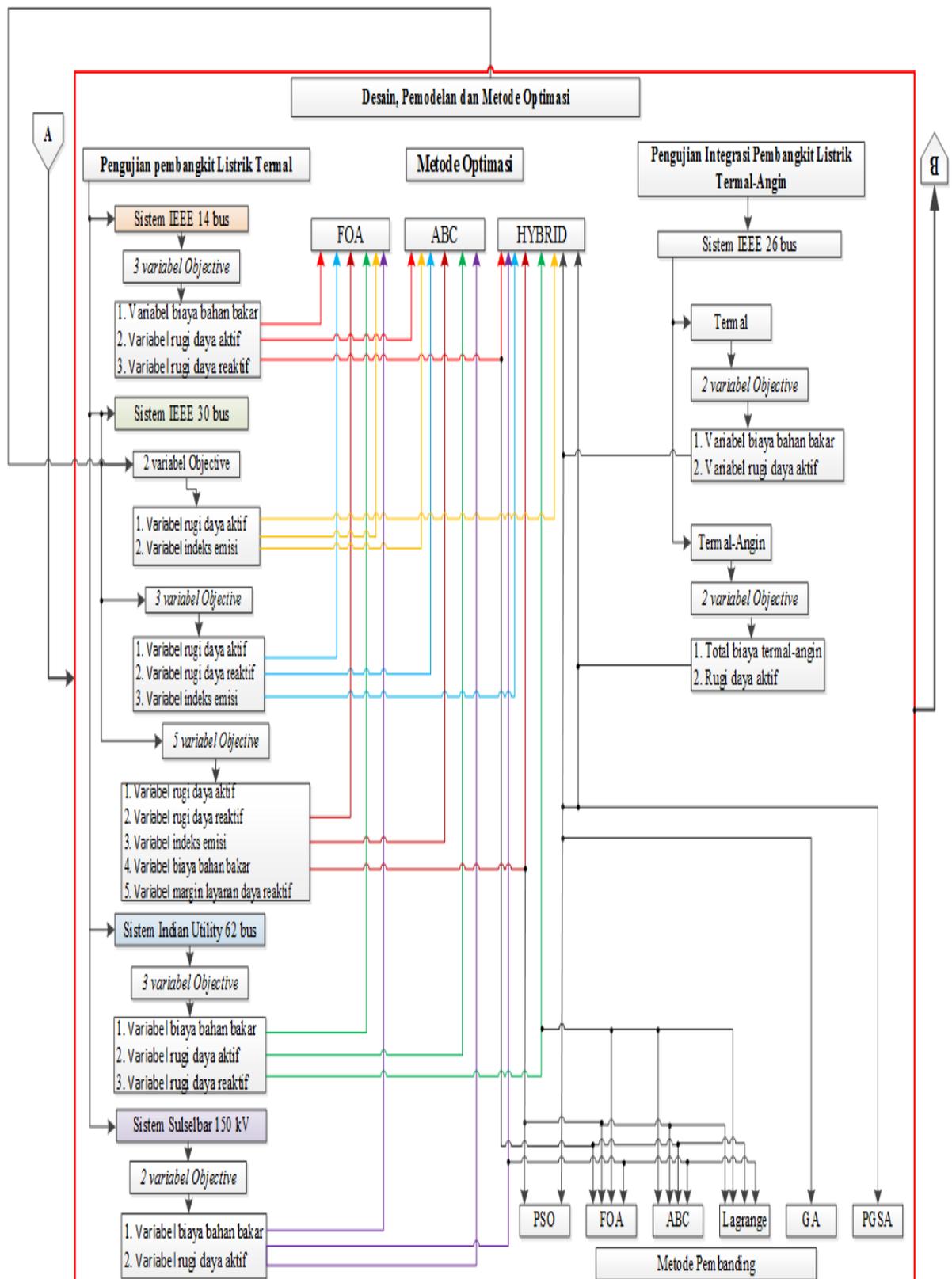
di antara pembangkit dan beban. Tetapi, integrasi antara pembangkit listrik termal-angin saat ini cukup menjanjikan untuk menekan total biaya operasi pembangkitan dari sistem tenaga listrik yang terinterkoneksi. Demikian pula halnya dengan rugi-rugi daya dalam sistem juga dapat ditekan.

Batasan-batasan kesimbangan daya, batas *ramp rate*, batas-batas daya generator, dan rugi-rugi transmisi menjadi pertimbangan penting dari interkoneksi antara pembangkit listrik termal yang ada dan energi terbarukan, khususnya pembangkit listrik tenaga angin dalam sistem ketenagalistrikan. Untuk memvalidasi metode *hybrid FOA-ABC* dan metode *hybrid MFOA-ABC* yang diusulkan maka penelitian ini dilakukan pengujian pada lima sistem yang berbeda yakni sistem IEEE 14 bus, sistem IEEE 26 bus, sistem IEEE 30 bus, sistem Indian Utility 62 bus, dan sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV. Pengujian yang dilakukan pada sistem IEEE 14 bus dilakukan dengan tiga variabel *objective* untuk satu kasus pengujian. Pengujian yang dilakukan pada sistem IEEE 26 bus dilakukan dengan dua skenario pengujian. Pada skenario pertama, pengujian sistem IEEE 26 bus dilakukan pada pembangkit *thermal* tanpa integrasi pembangkit listrik tenaga *wind* dengan dua variabel *objective* dan untuk skenario kedua, pengujian dilakukan dengan mengintegrasikan pembangkit listrik *thermal-wind* dengan dua variabel *objective*. Pengujian yang dilakukan pada pembangkit *thermal* sistem IEEE 30 bus dilakukan dengan tiga skenario pengujian. Pada skenario pertama, pengujian dilakukan dengan dua variabel *objective*. Sedangkan, untuk skenario kedua pengujian dilakukan dengan tiga variabel *objective*, dan pada skenario ketiga pengujian dilakukan dengan menggunakan lima variabel *objective*. Adapun,

pengujian sistem Indian Utility 62 bus dilakukan dengan menggunakan tiga variabel *objective* untuk satu kasus pengujian. Sementara, pengujian untuk sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV dilakukan dengan menggunakan dua variabel *objective* untuk satu kasus pengujian. Metode optimasi yang digunakan untuk mengoptimalkan lima variabel *objective* yang diuji adalah metode optimasi hybrid FOA-ABC dan metode hybrid MFOA-ABC. Hasil optimasi dari metode hybrid FOA-ABC dan metode hybrid MFOA-ABC kemudian dibandingkan dengan metode optimasi yang sudah ada sebelumnya. Selanjutnya, bagan kerangka pikir penjadwalan ekonomis pembangkit multiobjektif pada sistem tenaga listrik tanpa integrasi pembangkit listrik tenaga angin dan integrasi dengan pembangkit listrik tenaga angin diperlihatkan pada Gambar 2.10a, Gambar 2.10b, dan Gambar 2.10c.



Gambar 2.10a. Bagan kerangka pikir pemetaan permasalahan penjadwalan ekonomis dinamis pembangkit



Gambar 2.10b. Bagan kerangka pikir desain, pemodelan, dan metode optimasi penjadwalan ekonomis dinamik pembangkit