

DISERTASI

**Desain Koordinasi Dan Optimisasi Pembangkit Listrik Berbasis
Energi Terbarukan Dengan Sistem Baterai
Dalam Konteks *Microgrid***

*Design Coordination and Optimization of Renewable Energy-Based
Power Plants with Battery Systems
in The Context of Microgrids*

**ASMINAR
D053201011**



**PROGRAM STUDI S3 TEKNIK ELEKTRO
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

PENGAJUAN DISERTASI

**DESAIN KOORDINASI DAN OPTIMISASI PEMBANGKIT LISTRIK
BERBASIS ENERGI TERBARUKAN DENGAN SISTEM BATERAI
DALAM KONTEKS MICROGRID**

Disertasi
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor
Program Studi Ilmu Teknik Elektro

Disusun dan diajukan oleh

Ttd

**ASMINAR
D053201011**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

DISERTASI

DESAIN KOORDINASI DAN OPTIMISASI PEMBANGKIT LISTRIK BERBASIS ENERGI TERBARUKAN DENGAN SISTEM BATERAI DALAM KONTEKS *MICROGRID*

ASMINAR
D053201011

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Disertasi yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Doktor Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 15 Februari 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,



Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, S.T., M. Eng., IPU
NIP. 197405301999031003

Co-Promotor



Prof. Dr. Ir. Ansar Suyuti, MT, IPU
NIP. 196712311992021001

Co-Promotor



Dr. Ir. Hj. Sri Mawar Said, MT
NIP. 196011061986012001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT
NIP. 197309262000121002

Ketua Program Studi
S3 Teknik Elektro



Prof. Dr. Ir. H. Andani Achmad, MT
NIP. 196012311987031022

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Asminar
Nomor mahasiswa : D053201011
Program studi : S3 Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa, disertasi berjudul “Desain Koordinasi Dan Optimisasi Pembangkit Listrik Berbasis Energi Terbarukan Dengan Sistem Baterai Dalam Konteks Microgrid” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, ST., M.Eng., IPU; Prof. Dr. Ir. Ansar Suyuti, MT. IPU dan Dr. Ir. Sri Mawar Said, MT. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di Prosiding The International Conference on Computer Science and Engineering Technology sebagai artikel dengan judul “Modelling and Simulation of Microgrid Systems for Powering Slaughterhouse” dan di Jurnal ICIC Express Letters Part B, Volume 14, Nomor 4 Bulan April 2023 sebagai artikel dengan judul “Improved Battery Efficiency with Blade Pitch Control of Wind Turbine”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 06-03-2023

Yang menyatakan


Asminar

PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya berupa nikmat kesehatan dan kekuatan sehingga penulis dapat menyelesaikan Penelitian disertasi dengan judul “Desain Koordinasi dan Optimisasi Pembangkit Listrik Berbasis Energi Terbarukan dengan Sistem Baterai dalam Konteks Microgrid”, sebagai salah satu syarat penyelesaian Pendidikan pada Program Doktor di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Banyak kendala yang dihadapi penulis selama dalam penelitian maupun dalam penyusunan disertasi ini. Alhamdulillah dengan izin Allah serta bantuan dari berbagai pihak, maka penelitian dan disertasi ini dapat diselesaikan dan dirampungkan. Dalam kesempatan ini penulis dengan tulus menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, ST., M. Eng. IPU sebagai ketua komisi penasehat (promotor) sekaligus sebagai penilai disertasi, Bapak Prof. Dr. Ir. Ansar Suyuti, MT. IPU, dan Ibu Dr. Ir. Hj. Sri Mawar Said, MT. sebagai anggota komisi penasehat (co-promotor) sekaligus sebagai penilai disertasi atas motivasi dan bimbingan yang telah diberikan sehingga penyusunan disertasi ini dapat terselesaikan. Melalui bimbingan beliau bertiga yang dibarengi kesabaran serta perhatiannya, telah memberikan pencerahan berupa saran maupun koreksi dalam proses desain, penulisan, metodologi serta penyajian isi dari disertasi ini secara keseluruhan.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Salama Manjang, M.T., Bapak Dr. Ir. Zahir Zainuddin, M. Sc., Ibu Dr. Fitriyanti Mayasari, ST. MT., dan Bapak Muhammad Bachtiar Nappu, ST., MT., M. Phil., Ph.D. selaku komisi penguji. Terima kasih telah meluangkan waktu untuk mendiskusikan segala hal yang menjadi keterbatasan dari hasil penelitian disertasi kami, serta saran dan masukan yang telah diberikan untuk memperbaiki hasil dari disertasi ini.
3. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Imam Robandi, MT., selaku penguji eksternal yang telah meluangkan waktunya sebagai penguji dalam ujian pra-promosi dan promosi kami. Terima kasih atas arahan dan masukannya semoga dapat menambah

pengetahuan pada bidang energi terbarukan khususnya sistem *microgrid hybrid* sekaligus menjadi inspirasi buat promovenda kedepannya.

4. Rektor Universitas Hasanuddin, Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc., Dekan Fakultas Teknik Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST.,M.T., serta wakil dekan, Ketua Departemen Teknik Elektro, Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T., Ketua Program Studi S3 Teknik Elektro Bapak Prof. Dr. Ir. H. Andani Achmad, M.T., dan seluruh dosen Teknik Elektro yang telah memberikan kesempatan dan bekal kepada penulis berupa ilmu dan wawasan yang sangat berarti dalam menyelesaikan studi sampai pada penyelesaian disertasi ini. Kepada seluruh staf S3 Teknik Elektro yang telah memberikan layanan pada aspek administrasi selama penulis belajar di Teknik Elektro Universitas Hasanuddin.
5. Bapak Rektor Universitas Halu Oleo (UHO) Kendari yang telah berkenan memberikan izin kepada penulis untuk melanjutkan studi. Dekan beserta wakil dekan, rekan dosen dan staf Fakultas Teknik UHO atas doa dan dukungannya selama ini.
6. Bapak Ir. H. Halim Kalla selaku Owner dan Direktur utama HAKA Group, Bapak Ir. H. Sapruddin, SE., selaku manager HAKA Energy, Zamianto, ST., M. Eng., selaku PJ. proyek PLTB Rongi, dan Syawaludin, ST selaku PJ. proyek PLTMH Winning yang telah banyak membantu terkait pengambilan data pada desa Rongi kabupaten Buton Selatan.
7. Para sahabat yang telah banyak membantu Imran Habriansyah, ST., MT., Ir. Mustarum Musaruddin, ST., M. Eng., Ph.D., Abdul Djohar, ST., MT., Ir. Isminarti, ST., MT., Deny Wiria Nugraha, ST., M. Eng., Sahabuddin Rifai, ST., MT., Dr. Tambi, ST., MT., teman seangkatan S3 elektro 2020 maupun sesama mahasiswa S3 Teknik Elektro UNHAS yang tidak sempat saya sebut satu persatu. Terima kasih atas supportnya selama ini, semoga kebersamaan kita tetap terjalin dan terjaga.

Ucapan terima kasih yang tak terhingga kepada suami tercinta Dwi Nugraha, ST, atas kasih sayang, cinta, pengertian, dukungan dan doa yang telah diberikan kepada saya. Terima kasih kepada kedua orang tua tercinta Purn. TNI Abdul Azis & Nurhayati Azis yang telah mendidik dan membesarkan kami, selalu mendukung

dan mendoakan setiap langkah kami. Terima kasih kepada kedua mertua H. Untung Haryanto, SIP., MBA, MM & Hj. Henny Haryanto atas kasih sayang, dukungan dan doa yang tiada henti. Terima kasih kepada anak-anakku tersayang Inayah Salsabila Zhafira, Adinda Sabreena Ramadani, dan Ananda Queensha Shakaela, atas pengertian dan doanya. Terima kasih kepada kakak-kakakku Romy Suryaningrat Edwin Tamburaka, ST., M. Eng., Ph.D., & Asriaty Azis, S.Sos., M.AP, Sarjito & Rini Wulantisna, S.Sos., MM., adik-adikku Asmoyo Azis, SE & Rivani, SE, Astika Sari, ST, Angga Aria Kusuma, S.ST, MM & Brigita Cerranita, SH, S.ST, MM atas dukungan dan doanya.

Akhir kata penulis sangat berharap semoga penelitian ini dapat berkontribusi pada perkembangan ilmu dan teknologi di bidang Ketenagalistrikan khususnya energi terbarukan di masa yang akan datang. Semoga kesehatan dan kesuksesan senantiasa menyertai kita semua.

Makassar, Januari 2023

Penulis

Asminar

ABSTRAK

ASMINAR. *Desain Koordinasi Dan Optimisasi Pembangkit Listrik Berbasis Energi Terbarukan Dengan Sistem Baterai Dalam Konteks Microgrid.* (dibimbing oleh Syafaruddin, Ansar Suyuti dan Sri Mawar Said).

Pemanfaatan sumber energi terbarukan lokal yang tersedia dimasing-masing wilayah menjadikan *microgrid system* sebagai solusi untuk mewujudkan daerah mandiri energi pada daerah yang tidak ada atau belum terjangkau layanan listrik PLN juga dapat digunakan sebagai solusi penggunaan energi alternatif untuk industri. Tujuan penelitian ini adalah mendesain model *microgrid hybrid* menggunakan tiga sumber energi terbarukan PLTS, PLTB, PLTBG dengan sistem baterai dan beban, mendesain model sistem *partial control* pada *microgrid hybrid* PLTS, PLTB, PLTBG dengan menggunakan *blade pitch control* pada PLTB yang dapat mengefisiensikan penggunaan baterai utama, mendesain model kendali baterai yang digunakan pada sistem utama dan sistem *backup*, mendesain sistem kendali *point of common coupling* (PCC) untuk mengatur koordinasi *microgrid hybrid* PLTS, PLTB, PLTBG dengan sistem baterai dan beban, menguji optimasi dari model koordinasi *microgrid hybrid* PLTS, PLTB, PLTBG dengan sistem baterai dan beban menggunakan kombinasi algoritma Genetika *non binary* dengan *non-dominated sorting genetic algorithm* (NSGA-II). Modeling menggunakan Matlab Simulink 2020a dengan data real yang diambil pada desa Rongi Kabupaten Buton Selatan, Sulawesi Tenggara. Desain sistem dibagi menjadi dua bagian yaitu sistem utama dan sistem *backup*. Sistem utama terdiri dari PLTS 30 kWp dan PLTB 1250 kW yang terhubung dengan baterai utama Li-Ion 183,33 kW, PCC, dan beban. Sedangkan sistem *backup* terdiri dari PLTBG 1,175 kW yang terhubung dengan baterai Li-Ion 29,17 kW dan PCC. Hasil simulasi optimasi pada beban puncak pukul 16.00 menghasilkan rekomendasi kombinasi *best crommosome percent* 95%, 93%, 67%, 5% dengan kombinasi daya PLTS = 8,88 kW; PLTB = 89,13 kW; baterai utama = 122,83 kW; dan baterai *backup* = 1,46 kW. Total daya yang dihasilkan 222,31 kW, dengan kebutuhan beban pada pukul 16.00 sebesar 222,19 kW maka masih ada *surplus* daya yang dihasilkan oleh pembangkit sebesar 0,12 kW.

Kata kunci: *Microgrid hybrid; backup system; sistem baterai; point of common coupling* (PCC); NSGA II

ABSTRACT

ASMINAR. *Design Coordination and Optimization of Renewable Energy-Based Power Plants With Battery Systems in The Context of Microgrids* (supervised by **Syafaruddin, Ansar Suyuti and Sri Mawar Said**).

The utilization of local renewable energy sources available in each region makes the microgrid system a solution for creating energy independent areas in places which is not or has not yet been reached by PLN electricity services. It can also be used as alternative energy solution for the industry. The aim of this study is to design a hybrid microgrid model using three renewable energy sources PLTS, PLTB, PLTBG with battery and load system, to design a partial control system model on a hybrid microgrid PLTS, PLTB, PLTBG using a blade pitch control on a PLTB that can make efficient use of the main battery, to design a battery control model used in the main system and the backup system, to design a point of common coupling (PCC) control system to regulate hybrid microgrid coordination PLTS, PLTB, PLTBG with battery and load system, to test the optimization of the model hybrid microgrid coordination PLTS, PLTB, PLTBG with battery and load system using a combination of non-binary genetic algorithms with non-dominated genetic sorting algorithm (NSGA-II). The modeling uses Matlab Simulink 2020a with actual data taken from Rongi Village, South Buton Regency, Southeast Sulawesi. The system design is divided into two parts; the main system and the backup system. The main system consists of a 30 kWp PLTS and a 1250 kW PLTB connected to a 183.33 kW Li-Ion main battery, PCC, and load. Meanwhile, the backup system consists of a 1.175 kW PLTBG connected to a 29.17 kW Li-Ion battery and PCC. The results of optimization simulation at peak load at 16.00 shows recommended combination for best chromosome percent 95%, 93%, 67%, 5% with a combination of PLTS power = 8.88 kW; PLTB = 89.13 kW; main battery = 122.83 kW; and battery backup = 1.46 kW. The total power generated is 222.31 kW, with a load requirement at 16.00 of 222.19 kW, there is still a surplus of power generated by the generator of 0.12 kW accordingly.

Keywords: Microgrid hybrid; backup system; battery system; Point of Common Coupling (PCC); NSGA II.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PRAKATA	iii
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	6
C. Tujuan Penelitian	7
D. Manfaat Penelitian	8
E. Batasan Masalah	8
F. Kebaruan Penelitian (<i>Novelty</i>)	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	10
A. Landasan Teori	10
1. <i>Microgrid</i>	10
2. Energi Terbarukan	12
3. Sistem Tenaga Surya	14
4. Sistem Tenaga Angin	18
5. Sistem Tenaga Biogas	22
6. Sistem <i>Hybrid Microgrid</i>	25
7. Generator AC	27
8. Sistem Baterai	28
9. <i>Intermittent</i>	28
10. Algoritma Genetika	29
B. Penelitian Terkait	32
C. Kerangka Konsep Penelitian	37
BAB III METODE PENELITIAN	38
A. Tahapan Penelitian	38
B. Waktu Dan Lokasi Penelitian	39
C. Jenis Penelitian	39
D. Rancangan Sistem	39
E. Teknik Pengumpulan, Pengolahan, dan Validasi Data	67
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	69
A. Hasil Penelitian	69
B. Pembahasan	100
	viii

BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	115
	A. Kesimpulan	115
	B. Saran	117
DAFTAR PUSTAKA		118
LAMPIRAN		121

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Arsitektur <i>microgrid</i>	12
Gambar 2. Sumber energi terbarukan	13
Gambar 3. Panel / PV <i>module</i>	17
Gambar 4. Skema Pemanfaatan Biogas dan Kotoran Ternak	24
Gambar 5. <i>Biogas Power Generator Flow Chart</i>	25
Gambar 6. Topologi <i>Microgrid hybrid AC DC</i>	26
Gambar 7. Kerangka Konsep Penelitian	37
Gambar 8. Tahapan Penelitian	38
Gambar 9. Desain Model <i>Microgrid Hybrid PLTS, PLTB, PLTBG</i> Dengan Sistem Baterai dan Beban	40
Gambar 10. Desain model PLTS step 1	42
Gambar 11. Desain Model PLTS step 2	42
Gambar 12. Desain Model PLTS step 3	43
Gambar 13. Kendali <i>Blade Pitch</i> Pada Generator PLTB	45
Gambar 14. Desain Model PLTB	46
Gambar 15. Desain Model Matematis PLTBG	48
Gambar 16. Desain Sistem <i>Backup</i>	50
Gambar 17. Blok Parameter Baterai Utama	51
Gambar 18. Blok Parameter Baterai Utama Kondisi <i>Discharge</i>	52
Gambar 19. Blok Parameter Baterai <i>Backup</i>	53
Gambar 20. Blok Parameter Baterai <i>Backup</i> Kondisi <i>Discharge</i>	53
Gambar 21. Peta Lokasi Desa Sandang Pangan (Rongi)	55
Gambar 22. Peta Desa Sandang Pangan (Rongi)	56
Gambar 23. Kurva Beban Harian Desa Rongi	58
Gambar 24. Kurva Beban Residensial, Fasilitas Kesehatan dan Fasilitas Umum Desa Rongi	59
Gambar 25. Desain Model Kendali <i>Point of Common Coupling (PCC)</i>	60
Gambar 26. <i>Flowchart</i> Kendali Poin of Common Coupling (PCC)	62
Gambar 27. Desain Model <i>Microgrid Hybrid PLTS, PLTB, PLTBG</i> Dengan Sistem Baterai dan Beban	64

Gambar 28. <i>Flowchart</i> Model NSGA	63
Gambar 29. Monitoring Input Radiasi Dan Suhu	69
Gambar 30. Monitoring Input Kecepatan Angin	70
Gambar 31. Monitoring Beban	71
Gambar 32. Monitoring Output Daya PLTS, PLTB, Baterai Utama, Baterai <i>Backup</i> terhadap beban	72
Gambar 33. <i>Flowchart</i> Skenario <i>blade pitch control</i> pada PLTB	74
Gambar 34. Karakteristik PLTB	74
Gambar 35. Kendali <i>Discharging</i> Baterai Utama	75
Gambar 36. Kendali <i>Charging</i> Baterai Utama	76
Gambar 37. Kendali <i>Discharging</i> Baterai <i>Backup</i>	77
Gambar 38. Kendali <i>Charging</i> Baterai <i>Backup</i>	78
Gambar 39. <i>Flowchart</i> Model Koordinasi <i>Microgrid Hybrid</i> PLTS, PLTB, PLTBG Dengan Sistem Baterai dan Beban	80
Gambar 40. <i>Flowchart</i> Kondisi Pengisian Baterai <i>Backup</i>	51
Gambar 41. Alokasi Daya dari PLTS, PLTB, Baterai Utama, dan Baterai <i>Backup</i> ke Beban Sesuai Kebutuhan Beban	83
Gambar 42. Hasil Optimasi Terbaik Pukul 00.00	85
Gambar 43. Hasil Optimasi Terbaik Pukul 06.00	89
Gambar 44. Hasil Optimasi Terbaik Pukul 12.00	93
Gambar 45. Hasil Optimasi Terbaik Pukul 18.00	97
Gambar 46. Kapasitas Baterai Tanpa <i>Blade Pitch Control</i>	104
Gambar 47. Kapasitas Baterai Dengan <i>Blade Pitch Control</i>	105
Gambar 48. Output Daya PLTB Tanpa <i>Blade Pitch Control</i>	106
Gambar 49. Output Daya PLTB Dengan <i>Blade Pitch Control</i>	107
Gambar 50. Total Output Daya <i>Microgrid</i> Tanpa <i>Blade Pitch Control</i>	107
Gambar 51. Total Output Daya <i>Microgrid</i> Dengan <i>Blade Pitch Control</i>	108
Gambar 52. <i>Surplus</i> Daya Yang Dihasilkan	114

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Parameter PLTS	44
Tabel 2. Data beban harian Desa Rongi	57
Tabel 3. Data beban residensial, fasilitas Kesehatan dan fasilitas umum	58
Tabel 4. Data radiasi, suhu, kecepatan angin, dan beban Desa rongi	67
Tabel 5. Hasil simulasi <i>output</i> daya maksimum PLTS, PLTB, baterai utama, baterai <i>backup</i> terhadap kebutuhan daya beban	71
Tabel 6. Alokasi daya PLTS, PLTB, baterai utama, baterai <i>backup</i> sesuai kebutuhan beban	82
Tabel 7. Rekomendasi kombinasi terbaik pada pukul 00.00	86
Tabel 8. Rekomendasi kombinasi terbaik pada pukul 06.00	90
Tabel 9. Rekomendasi kombinasi terbaik pada pukul 12.00	94
Tabel 10. Rekomendasi kombinasi terbaik pada pukul 18.00	98
Tabel 11. Rekomendasi kombinasi hasil simulasi optimasi NSGA-II	112
Tabel 12. Selisih daya yang dihasilkan terhadap beban	113

DAFTAR LAMPIRAN

1. Data Beban Harian Residensial, Fasilitas Kesehatan, dan Fasilitas Umum	121
2. Data Kecepatan Angin Desa Rongi	122
3. Data Global Wind Atlas	128
4. Single Line diagram Sistem BauBau - Raha - Ereke	131
5. Single Line Diagram Trafo Feeder Batauga	132
6. Listing GA dan NSGA	133

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Polusi dan emisi gas rumah kaca menyebabkan pergeseran penggunaan dan ketergantungan dari sumber energi tak terbarukan ke energi terbarukan dalam membangun pembangkit listrik baru ataupun memperluas jaringan listrik yang sudah ada (Bui et al., 2021). Energi terbarukan merupakan sumber energi alternatif yang penting dalam pemenuhan kebutuhan daya listrik. Agar sistem dapat berfungsi dengan baik, evaluasi pengembangan perangkat lunak energi terbarukan masih terus dilakukan. Saat beroperasi, pembangkit listrik energi terbarukan dapat berjalan secara mandiri (*stand-alone*) atau bersamaan dengan sejumlah sumber energi lain (*hybrid*). Selain itu, sumber energi terbarukan dapat dihubungkan ke jaringan utilitas (*on grid*), dioperasikan secara terpisah dari jaringan utilitas (*stand-alone/off grid*).

Akhir-akhir ini terjadi pergeseran penggunaan dan ketergantungan yang cepat dari sumber energi tak terbarukan ke energi terbarukan di seluruh dunia. Dari semua sumber energi yang tersedia, sumber energi terbarukan digunakan hampir 8–10% pada skala dunia untuk kondisi saat ini (Hadian & Madani, 2013). Beberapa negara telah membuat kebijakan prioritas dan mengambil langkah-langkah efektif untuk meningkatkan kapasitas terpasang dari sumber energi terbarukan (Lian et al., 2019),(2013 THIS REPORT HAS BEEN PRODUCED IN COLLABORATION WITH: REPORT Meeting Renewable Energy Targets: Global Lessons from the Road to Implementation, n.d.)(ABOUT THE WORLD ENERGY COUNCIL ABOUT

THE REPORT, 2019). Komitmen dunia untuk menurunkan emisi gas rumah kaca dan penurunan produksi bahan bakar fosil khususnya minyak bumi, mendorong pemerintah Indonesia untuk terus meningkatkan penggunaan energi baru dan terbarukan sebagai upaya menjaga ketahanan dan kemandirian energi. Sesuai PP No. 79 Tahun 2014 tentang kebijakan energi nasional, target bauran sumber energi baru dan terbarukan minimal 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050 (Secretariat General of the National Energy Council, 2019).

Potensi energi terbarukan di Indonesia antara lain panas bumi, air dan mikro-mini hidro, bioenergi, surya, angin, dan gelombang laut sebesar 443 GW. Lebih dari 207 MW energi potensial Indonesia berasal dari matahari, dengan air dan angin menempati urutan kedua dan ketiga (*LKj DITJEN EBTKE / 2018*, n.d.). Meskipun memiliki potensi energi terbarukan yang sangat besar dan bervariasi, namun pemanfaatannya saat ini masih rendah. Dibandingkan dengan negara-negara G20 yang bergerak menuju ekonomi rendah karbon dalam upaya memenuhi target *Paris Agreement*, pengembangan energi baru terbarukan Indonesia masih tertinggal (Nasional, 2019).

Pemanfaatan energi terbarukan dan implementasi konservasi energi yang juga belum optimal mendorong dikembangkannya sistem pembangkit listrik berbasis energi terbarukan untuk memenuhi kebutuhan masyarakat akan energi dan sesuai dengan kebijakan-kebijakan pemerintah. Sistem *microgrid* sebagai solusi membangun kawasan mandiri energi untuk kawasan yang belum ada atau belum terjangkau oleh layanan listrik PLN dengan menggunakan sumber energi

terbarukan lokal yang tersedia di setiap kawasan. *Microgrid* juga dapat digunakan di sektor industri sebagai energi alternatif.

Sistem energi terbarukan yang tidak terkendali dan tidak terprediksi seperti kecepatan angin dan radiasi matahari menyebabkan ketidakseimbangan daya (Handini et al., 2015),(Alam & Bhattacharyya, 2016). Pembangkit listrik energi terbarukan bersifat *intermittent*, maka sistem penyimpanan energi baterai dan reservoir lainnya seperti sumber energi biogas memiliki potensi untuk diintegrasikan dengan sumber energi terbarukan untuk memastikan akses berkelanjutan dan keamanan energi (Secretariat General of the National Energy Council, 2019). Listrik dari biomassa, terutama dari biogas, dapat diproduksi secara mandiri pada siang atau malam hari, dalam kondisi cuaca yang berbeda, sehingga memungkinkan untuk menyesuaikan pasokan energi untuk memenuhi kebutuhan beban (Bär et al., 2020).

Beberapa penelitian terdahulu terkait *microgrid hybrid* biogas dengan sumber energi terbarukan lainnya (Agyenim et al., 2020),(Tamoor et al., 2020), membahas *hybrid renewable energy systems (HRES) solar-biogas* yang aman dan efisien dalam menyediakan energi untuk sistem *on grid* ataupun *off grid*. Penelitian terdahulu terkait *microgrid hybrid* biogas (Ahmad et al., 2018),(Shahzad et al., 2017)(Ganthia et al., 2018), melakukan penelitian terkait kelayakan teknis dan analisis secara ekonomi dari sistem *hybrid*, hasil penelitian menunjukkan sistem *hybrid* biogas lebih menguntungkan secara ekonomi daripada solusi lain. Berdasarkan *review* penelitian terdahulu terkait kombinasi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS), pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) dan pembangkit

listrik tenaga biogas (PLTBG) belum ada penelitian yang melakukan sistem kendali koordinasi dan optimasi dari ketiga sumber energi terbarukan tersebut dengan menggunakan dua sistem baterai sebagai sistem penyimpanan energi yaitu baterai pada sistem utama dan baterai pada sistem *backup* untuk memastikan akses berkelanjutan dan keamanan energi pada sistem *microgrid hybrid*.

Hal ini yang menarik dan menjadi latar belakang penulis untuk melakukan penelitian dengan judul “Desain Koordinasi Dan Optimisasi Pembangkit Listrik Berbasis Energi Terbarukan Dengan Sistem Baterai Dalam Konteks *Microgrid*”. Penelitian ini menggunakan data *real* yang diambil pada desa Rongi Kabupaten Buton Selatan Sulawesi Tenggara. Desa Rongi dipilih sebagai lokasi penelitian karena desa Rongi tersebut memiliki radiasi, suhu dan kecepatan angin yang cukup tinggi sehingga berpotensi untuk pembangunan PLTS dan PLTB. Selain itu desa Rongi memiliki potensi biogas dari produksi kotoran sapi yang dihasilkan oleh peternakan pada desa tersebut, sehingga dapat dimanfaatkan untuk PLTBG.

Penelitian ini mendesain model *microgrid hybrid* yang menggunakan tiga sumber energi terbarukan yaitu PLTS, PLTB, PLTBG dengan sistem baterai dan beban, mendesain model sistem *partial control* pada *microgrid hybrid* PLTS, PLTB, PLTBG dengan menggunakan *blade pitch control* pada PLTB yang berdampak pada efisiensi penggunaan baterai utama, mendesain model kendali baterai yang akan digunakan pada sistem utama dan sistem *backup*, mendesain model sistem kendali *point of common coupling* (PCC) untuk mengatur koordinasi *microgrid hybrid* PLTS, PLTB, PLTBG dengan sistem baterai dan beban, menguji

optimasi dari model koordinasi *microgrid hybrid* PLTS, PLTB, PLTBG dengan sistem baterai dan beban menggunakan kombinasi *Genetic Algorithm (GA) non binary* dengan *non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II)*.

Sistem utama terdiri dari pembangkit PLTS dan pembangkit PLTB yang terhubung secara paralel dengan sistem baterai utama dan beban. Sistem *backup* terdiri dari PLTBG yang terhubung dengan sistem baterai *backup* yang akan bekerja sebagai *backup* sistem utama. Kendali PCC didesain untuk mengontrol koordinasi distribusi daya dari PLTS dan PLTB langsung ke beban, dari PLTS dan PLTB ke sistem baterai utama, dari baterai utama ke beban, dan dari baterai *backup* ke beban.

Dilakukan optimisasi sistem koordinasi untuk mengatur manajemen energi pada sistem dengan menggunakan kombinasi algoritma *GA non binary* dengan *non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II)* yang menghasilkan rekomendasi kombinasi daya terbaik. Algoritma genetika dipilih sebagai metode karena dapat menyelesaikan masalah optimasi yang terbatas maupun yang tidak terbatas. Algoritma genetika memodifikasi populasi individu secara berulang hingga menemukan daftar solusi yang optimal. *Non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II)* adalah kombinasi dari algoritma genetika (GA) dan algoritma genetika multi-objektif. Algoritma NSGA-II digunakan untuk masalah optimisasi multi-objektif dengan mencari solusi yang mendekati optimal pareto.

Pada penelitian ini dilakukan kombinasi *GA non binary* dan NSGA-II untuk menyelesaikan permasalahan optimasi sistem koordinasi antara pembangkit listrik dengan sistem baterai dan beban, dimana optimasi akan menghasilkan beberapa

rekomendasi kombinasi daya yang akan disuplai dari pembangkit dan sistem baterai ke beban. Beberapa parameter NSGA-II digunakan antara lain ukuran populasi, jumlah generasi, probabilitas *crossover* dan probabilitas mutasi. Hasil akhir dari penerapan NSGA-II ini berupa kombinasi terbaik selanjutnya dilakukan seleksi ulang berdasarkan kondisi beban *real* dengan menggunakan GA *non binary* sehingga diperoleh rekomendasi kombinasi terbaik sesuai kondisi *real* berdasarkan grafik beban pada desa Rongi.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas maka rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Mendesain model *microgrid hybrid* menggunakan tiga sumber energi terbarukan PLTS, PLTB, PLTBG dengan sistem baterai dan beban.
2. Mendesain model sistem *partial control* pada *microgrid hybrid* PLTS, PLTB, PLTBG dengan menggunakan *blade pitch control* pada PLTB yang dapat mengefisienkan penggunaan baterai utama.
3. Mendesain model kendali baterai yang akan digunakan pada sistem utama dan sistem *backup*.
4. Mendesain model sistem kendali *point of common coupling* (PCC) untuk mengatur koordinasi *microgrid hybrid* PLTS, PLTB, PLTBG dengan sistem baterai dan beban.
5. Menguji optimasi dari model koordinasi *microgrid hybrid* PLTS, PLTB, PLTBG dengan sistem baterai dan beban menggunakan kombinasi algoritma

genetika *non binary* dengan *non-dominated sorting genetic algorithm* (NSGA-II).

C. Tujuan Penelitian

Beberapa tujuan yang akan dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Desain model *microgrid hybrid* menggunakan tiga sumber energi terbarukan PLTS, PLTB, PLTBG dengan sistem baterai dan beban.
2. Desain model sistem *partial control* pada *microgrid hybrid* PLTS, PLTB, PLTBG dengan menggunakan *blade pitch control* pada PLTB yang dapat mengefisiensikan penggunaan baterai utama.
3. Desain model sistem baterai yang akan digunakan pada sistem utama dan sistem *backup*.
4. Desain model sistem kendali *point of common coupling* (PCC) untuk mengatur koordinasi *microgrid hybrid* PLTS, PLTB, PLTBG dengan sistem baterai dan beban.
5. Pengujian optimasi dari model koordinasi *microgrid hybrid* PLTS, PLTB, PLTBG dengan sistem baterai dan beban menggunakan kombinasi algoritma genetika *non binary* dengan *non-dominated sorting genetic algorithm* (NSGA-II).

D. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Dari hasil desain model koordinasi *microgrid hybrid* PLTS, PLTB, PLTBG dengan sistem baterai dan beban diperoleh model kendali PCC yang bekerja mengatur manajemen energi pada sistem sehingga kontinuitas penyaluran energi terjaga.
2. Diperoleh analisis kendali koordinasi pada model *microgrid hybrid* PLTS, PLTB, PLTBG dengan sistem baterai dan beban yang dioptimisasi menggunakan kombinasi algoritma genetika *non-binary* dan NSGA II sehingga menghasilkan kombinasi terbaik untuk suplai daya ke beban.
3. Menjadi bahan rujukan model untuk proyek PLTB dan PLTS pada PT. HAKA Energy di desa Rongi Kabupaten Buton Selatan, Sulawesi Tenggara.

E. Batasan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka batasan masalah pada penelitian adalah:

1. Desain model koordinasi pembangkit listrik berbasis energi terbarukan dalam konteks *microgrid* bersumber pada *hybrid* tiga sumber energi terbarukan yaitu PLTS, PLTB dan PLTBG.
2. PLTBG digunakan sebagai sistem *backup*.
3. Menggunakan dua baterai yaitu baterai pada sistem utama dan baterai pada sistem *backup* dengan jenis baterai Lithium-ion.

4. Sistem kendali yang didesain hanya sebatas model dan tidak mendesain *hardware*.
5. Data pemodelan menggunakan data harian yang diambil secara *real* pada desa Rongi Kabupaten Buton Selatan Sulawesi Tenggara.

F. Kebaruan Penelitian (Novelty)

Berdasarkan *review* penelitian terkait sebelumnya maka penelitian ini dengan judul “Desain Koordinasi dan Optimisasi Pembangkit Listrik Berbasis Energi Terbarukan Dengan Sistem Baterai Dalam Konteks Microgrid” melakukan desain model *microgrid hybrid* menggunakan tiga sumber energi terbarukan yaitu PLTS, PLTB, PLTBG dengan sistem baterai dan beban. Pada PLTB didesain model sistem *partial control* dengan menggunakan *blade pitch control* yang dapat mengefisiensikan penggunaan baterai utama. Kemudian dilakukan desain model sistem baterai yang akan digunakan pada sistem utama dan sistem *backup*. Untuk mengatur koordinasi *microgrid hybrid* PLTS, PLTB, PLTBG dengan sistem baterai dan beban maka didesain model sistem kendali *point of common coupling* (PCC) yang dioptimisasi menggunakan kombinasi GA *non binary* dan NSGA-II yang menghasilkan rekomendasi kombinasi terbaik untuk aliran daya ke beban. Sehingga kebaruan dari penelitian ini adalah desain model sistem kendali *microgrid hybrid* dengan mengkoordinasikan daya output pada PLTS, PLTB, baterai utama, dan baterai *backup* untuk memenuhi kebutuhan daya pada beban di desa Rongi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Landasan Teori

Tinjauan pustaka pada bab 2 berdasarkan studi literatur dengan melakukan *review* terhadap beberapa jurnal internasional, prosiding, buku, *book chapter*, jurnal dan artikel majalah dan situs resmi pemerintah yang mendukung serta relevan dengan penelitian.

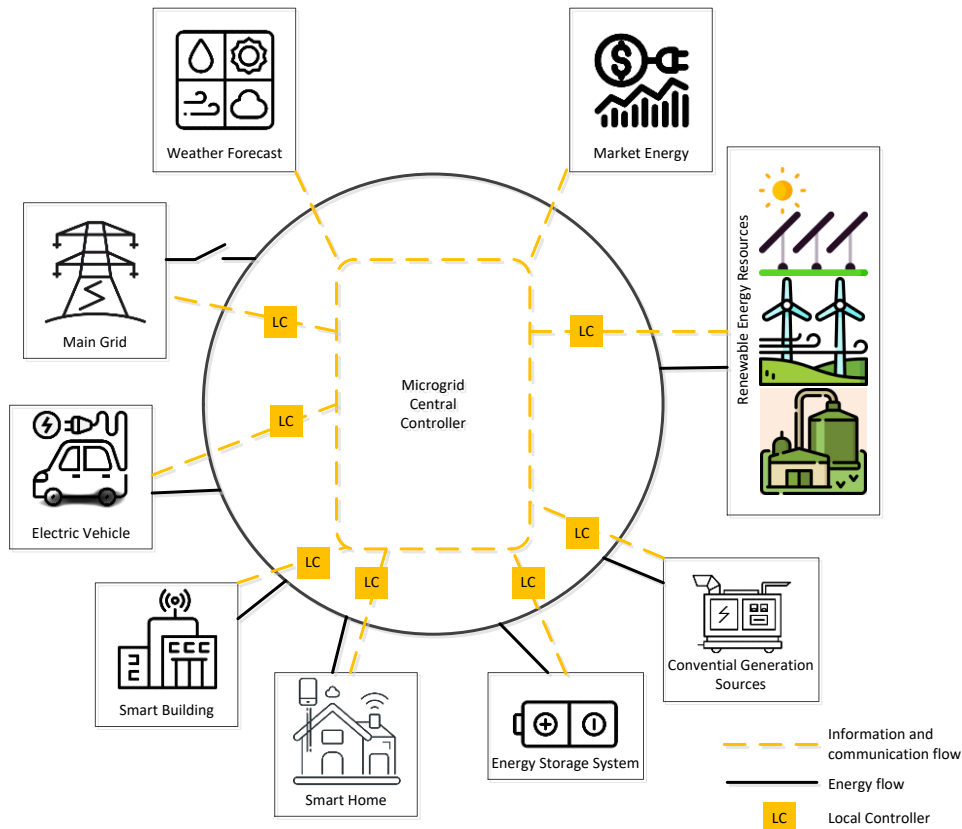
1. *Microgrid*

Microgrid adalah sistem tenaga listrik yang terintegrasi antara generator distribusi yang dipasang dekat konsumen. Beberapa keunggulan dari *microgrid* seperti kemandirian, stabilitas, fleksibilitas, kompatibilitas, skalabilitas, efisiensi yang lebih tinggi, dan manfaat ekonomis (Jirdehi et al., 2020). *Microgrid* digunakan sebagai cadangan untuk mendistribusikan listrik ke masyarakat yang lebih luas atau sebagai sistem yang berdiri sendiri untuk menyediakan listrik di lokasi yang jauh yang tidak terhubung ke jaringan (*on-grid*). *Microgrid* beroperasi dalam mode *stand-alone (off grid)* dimana sistem kelistrikannya tidak tersambung ke jaringan utama (utilitas tenaga listrik). Generator pada sistem *microgrid* secara independen menyuplai kebutuhan energi pada sistem. Pada mode *microgrid* terhubung (*on-grid*), generator bekerja bersama-sama dengan utilitas tenaga listrik (PLN) untuk memenuhi kebutuhan sistem. Mode operasi ini digunakan untuk meningkatkan *power factor* di PCC (*Point of Common Coupling*) dan optimisasi profil tegangan sistem (Pratama, 2018a).

Ketidakpastian dan fluktuasi sumber energi terbarukan mengakibatkan daya yang dihasilkan akan berubah seiring waktu. Pada sisi konsumen (permintaan), tegangan dan stabilitas frekuensi diantisipasi akan dipertahankan sehingga diperlukan sistem kontrol yang handa (Yunando & Sutriyatna, 2018). Diperlukan sumber energi lain seperti pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) atau pembangkit listrik biogas yang diparalel atau biasa disebut *hybrid power generation* untuk mengatasi *intermittent* daya (*power*) yang dihasilkan oleh pembangkit listrik energi terbarukan. Berdasarkan pemanfaatannya, *microgrid* dapat diklasifikasikan menjadi *microgrid* rumahan dan *microgrid mobile* (Pratama, 2018b). *Microgrid* adalah jenis sistem energi terdistribusi yang dapat beroperasi sendiri atau paralel dengan sistem interkoneksi yang lebih besar. Komponen *microgrid* terdiri dari *distributed generation (micro source)*, *load*, *intermediate storage*, *point of common coupling (PCC)* (Yunando & Sutriyatna, 2018)

Arsitektur *microgrid* seperti pada Gambar 1 menampilkan sistem *microgrid* yang terdiri dari berbagai *distributed energy resources (DER)*, beban responsif, dan beban kritis. *Microgrid* terhubung ke jaringan utama (PLN) melalui *point of common coupling (PCC)* (Davis, 2003). Untuk menjaga stabilitas sistem, *microgrid* mengalihkan operasinya ke mode pulau jika terjadi gangguan atau kerusakan pada jaringan utama. Mode pulau secara efektif mengintegrasikan fungsi *distributed energy resources (DER)*, *demand response (DR)*, dan pelepasan beban untuk memastikan pasokan berkelanjutan ke beban. Seluruh operasi pada *microgrid* dikendalikan dan dikoordinasikan oleh *micro grid central controller (MGCC)* dan

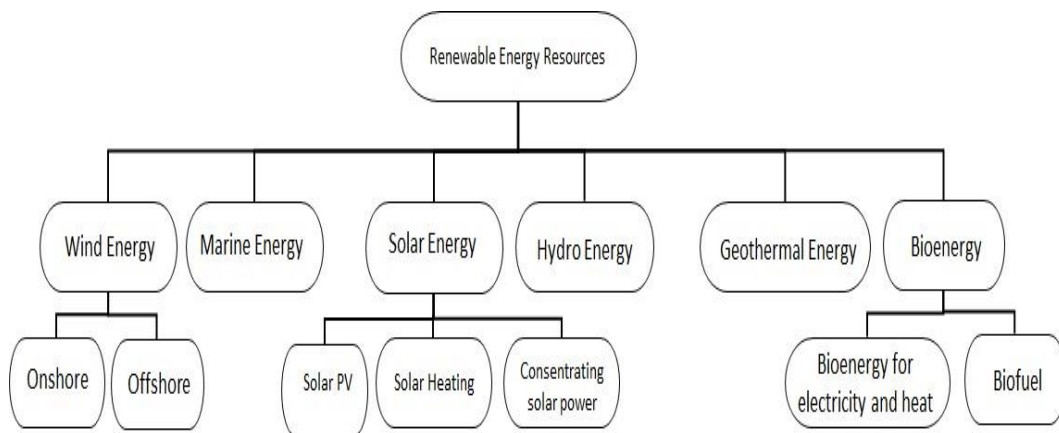
local controller (LC). Manajemen dan koordinasi DER yang efektif pada *microgrid* menghasilkan peningkatan kinerja sistem dan pembangunan berkelanjutan.



Gambar 1. Arsitektur *microgrid* (Zia et al., 2018)

2. Energi Terbarukan

Energi terbarukan merupakan bentuk sumber energi yang dapat diisi ulang oleh alam. Beberapa diantaranya adalah energi matahari, energi angin, biomassa dan energi kayu, energi panas bumi, energi pasang surut, dan energi laut. Representasi grafis dari jenis sumber energi terbarukan di tunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Sumber energi terbarukan (Ellabban et al., 2014).

Sumber energi tak terbarukan merupakan sumber energi yang dikumpulkan oleh alam untuk waktu yang sangat lama, dan jika habis, tidak ada yang dapat diisi ulang dalam skala waktu manusia. Contoh sumber energi tidak terbarukan ini adalah bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak bumi, gas alam, dan lain-lain yang jumlahnya terbatas. Sumber energi tak terbarukan ini digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi. Sesuai skenario sumber energi saat ini, sumber energi tak terbarukan terbatas dan berada pada tahap depresiasi, yang mengarah ke kelelahan total ditahun-tahun mendatang. Oleh karena itu, perlu adanya beberapa jenis sumber energi alternatif lain yang dapat memenuhi kebutuhan energi saat ini serta ramah lingkungan. Sumber energi terbarukan digunakan untuk mengatasi masalah krisis energi karena energi ini ramah lingkungan dan hampir tidak terbatas. Akhir-akhir ini terlihat bahwa terjadi pergeseran penggunaan dan ketergantungan yang cepat dari sumber energi tak terbarukan ke energi terbarukan diseluruh dunia (Dixit, 2020).

Skenario energi dunia menunjukkan bahwa dari semua sumber energi yang tersedia, sumber energi terbarukan digunakan sebesar 10% pada skala dunia untuk tahun 2019 dan diperkirakan meningkat sebesar 15% pada tahun 2030 (Hosseini, 2020a). Sementara itu, kapasitas pembangkit listrik Indonesia meningkat 3% dari tahun 2017 menjadi 64,5 GW pada tahun 2018 (Hosseini, 2020b). Pembangkit listrik berbahan bakar batu bara menyumbang 50% dari kapasitas terpasang pembangkit listrik pada tahun 2018, diikuti oleh gas alam (29 %), bahan bakar minyak (7%) dan sumber energi terbarukan (14%) (McDonald, 2016).

3. Sistem Tenaga Surya

Sistem tenaga surya adalah sesuatu sistem yang tersusun atas komponen-komponen pengubah tenaga berupa tenaga matahari jadi tenaga listrik. Sistem tenaga surya terdiri dari sistem penyusunnya, yaitu:

a. Energi Surya

Energi matahari adalah panas dan radiasi yang dipancarkan matahari. Peristiwa fusi nuklir yang terjadi di inti matahari menyebabkannya menjadi bola gas yang sangat panas yang dikenal sebagai matahari. Setelah reaksi nuklir, energi dilepaskan ke segala arah. Satu-satunya bentuk energi matahari yang diterima bumi adalah radiasi, yang bergerak melalui atmosfer untuk mencapai permukaan planet hanya dengan 800 hingga 1000 W/m². Pemanfaatan energi matahari bukanlah konsep baru. Ketika krisis energi global tahun 1970-an terjadi, pemanfaatan energi matahari mulai meningkat secara signifikan. Pemanfaatan energi ini sangat menguntungkan di banyak industri, mulai dari teknologi hingga pertanian,

transportasi, pangan, dan kesehatan. Energi matahari diubah menjadi energi listrik dalam industri teknologi memanfaatkan sistem *photovoltaic*. (Pratama, 2018b)

b. Intensitas Radiasi Surya

Konstanta matahari merupakan banyaknya tenaga matahari yang bisa diserap oleh sesuatu permukaan per satuan waktu per satuan luas, pada jarak rata-rata antara bumi serta matahari, pada permukaan datar serta tegak lurus cahaya matahari. Di luar atmosfer bumi, besar konstanta matahari adalah 1,94 kalori/ cm². menit, dan di permukaan bumi besarnya adalah 1,37 kalori/ cm². menit.

Intensitas radiasi matahari langsung, intensitas matahari difus, dan intensitas matahari pantul merupakan komponen utama dari intensitas radiasi matahari yang mengenai permukaan bumi. Besarnya radiasi matahari langsung yang mengenai permukaan bumi merupakan radiasi yang tidak bergeser arah. Jumlah energi matahari yang mencapai permukaan bumi setelah berubah arah akibat pantulan dan hamburan oleh atmosfer dikenal dengan intensitas radiasi matahari difus. Jumlah radiasi matahari yang dipantulkan oleh lingkungan menentukan intensitas radiasi.

c. *Photovoltaic System*

Photovoltaic (PV) merupakan perangkat yang berperan mengkonversi energi cahaya radiasi matahari ke tenaga listrik. Komponen PV terdiri dari komponen P-N junction ataupun batasan pertemuan antara kedua bahan semikonduktor jenis P (positif) serta jenis N (negatif). Didalam kedua buah semikonduktor tersebut ada bermacam berbagai komposisi bahan yang sangat peka terhadap sinar antara lain: silicon monokristalin, *silicon polikristalin*, *silicon amorphous*, *gallium arsenide*, *indium phosphide* serta *cadmium/ tembaga sulfide*, namun pada umumnya digunakan

bubuk silicon, sebagai bahan semikonduktor. Setiap bahan memiliki efisiensi yang berbeda serta dipengaruhi oleh temperatur selnya. Efisiensi akan menurun pada temperatur yang tinggi. (*Design and Control of PV Hybrid System in Practice*, n.d.)

PV terdiri dari beberapa *solar cell*, yang tiap sel-selnya terhubung secara seri atau paralel untuk membentuk deretan PV yang secara umum disebut PV modules. Dalam pengoperasiannya, PV sangat bergantung pada iklim dan cuaca terutama kondisi sinar radiasi yang dipaparkan oleh matahari, sehingga ketika iklim dan cuaca tidak mendukung PV beroperasi, dapat menyebabkan perubahan tegangan dan arus output, sehingga berdampak pada kestabilan sistem. Untuk mengatasi ketidakstabilan yang terjadi, sistem yang saat ini diterapkan pada PV untuk mendapatkan jumlah energi dari sinar radiasi matahari agar mendapatkan efisiensi maksimum yaitu dengan mengaplikasikan sistem *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) pada PV string.

Penggunaan sistem PV module dapat memberikan efek lebih baik ke sistem, sehingga penyaluran daya akan lebih optimal. Kombinasi PV dengan peralatan konversi daya berupa inverter yang mengkonversikan listrik dari DC-AC untuk mensuplai beban pada jaringan. Pada perencanaan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dengan berbagai macam *level* pembangkitan tergantung dari kebutuhan beban, perencanaan dapat dilakukan dengan merangkai modul surya dengan kapasitas tertentu sesuai besaran output yang diinginkan. Adapun cara untuk menentukan kapasitas array photovoltaic yaitu dengan persamaan berikut:

$$C = A \times 1000 \times ME \times PF \quad (2.1)$$

Keterangan: C = Kapasitas array photovoltaic (Watt)

A = Luas permukaan modul (m^2)

ME = Efisiensi modul

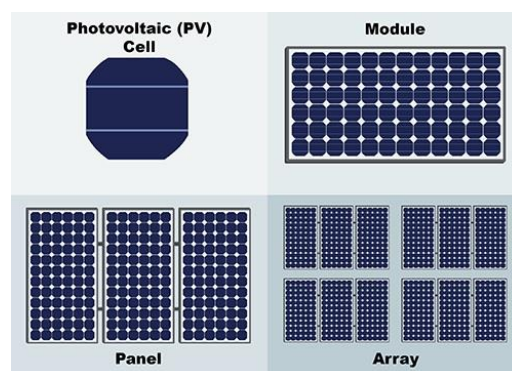
PF = Faktor packing

d. Komponen Photovoltaic

PV terdiri dari beberapa komponen penyusun yang mempunyai fungsinya masing-masing. Adapun komponen penyusun PV terdiri dari:

1) *PV Modules*

PV modules adalah komponen dari PV yang berfungsi sebagai tempat terjadinya proses konversi energi dari energi panas akibat sinar radiasi matahari yang diserap ke sistem menjadi energi listrik DC melalui proses kimia yang terdapat pada sel-sel pada modul tersebut. Pada umumnya modul PV terdiri dari beberapa komponen penyusunnya diantaranya dapat dilihat pada Gambar 3 di bawah ini:



Gambar 3. Panel/ PV *module*

2) Inverter

Inverter berfungsi mengkonversi listrik dari DC – AC. Inverter mengambil sinyal arus rendah dan tegangan tinggi dari panel PV kemudian mengkonversikan tegangan menjadi 120 VAC (240 VAC) yang secara langsung kompatibel dengan *power grid*.

3) PV Strings

PV strings digunakan untuk menempatkan panel surya pada lokasi yang terkena radiasi sinar matahari maksimal dengan posisi yang sesuai.

4) Disconnecting Switch

Saklar pemisah yang digunakan untuk memutuskan aliran daya dari PV modules ke inverter berupa DC *disconnect switch* dan inverter ke beban berupa AC *disconnect switch*.

4. Sistem Tenaga Angin

Pembangkit listrik tenaga angin merupakan sistem yang terdiri dari komponen konversi energi berupa energi angin yang diubah menjadi energi mekanik berupa putaran *blade* dan kemudian menghasilkan energi listrik. Komponen penyusun untuk dapat menghasilkan energi listrik, mulai dari energi primer berupa angin, turbin, generator dan juga beberapa komponen *power converter* yang tersusun didalamnya. Pada sektor teknologi energi angin sama seperti energi surya, yaitu dimanfaatkan sebagai konversi energi listrik dengan perantara berupa turbin angin sebagai energi mekanik. Persamaan berikut menunjukkan besar daya yang dihasilkan oleh *wind*.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (2.2)$$

(Mubarak, 2013a).

Keterangan:

P_w = Daya wind (Watt)

C_p = Koefisien daya turbin angin

ρ = Kerapatan udara (kg/m^3)

A = Area yang dilalui angin (m^2)

V = Kecepatan angin (m/s)

Proses konversi energi menjadi energi listrik sistem tenaga angin membutuhkan komponen pendukung yang berfungsi untuk mengubah energi yang awalnya berupa energi angin menjadi energi listrik, berikut ini komponen penyusun sistem tenaga angin: (Pratama, 2018b)

a) Turbin Angin

Turbin angin merupakan komponen dari sistem tenaga angin yang berupa kincir yang berfungsi menghasilkan energi mekanik berupa putaran dari energi angin yang tersedia. Dalam konstruksinya turbin angin memiliki 2 jenis konstruksi, yaitu turbin angin horizontal dan vertikal. Turbin angin horizontal memiliki konstruksi sumbu kincir yang terpasang pada ujung menara konstruksi sistem tenaga angin dengan arah horizontal. Konstruksi dari turbin angin horizontal cenderung membutuhkan menara yang tinggi untuk mendapatkan akses angin yang lebih kuat sehingga mendapat energi mekanik atau putaran yang efektif sehingga menghasilkan energi listrik yang lebih stabil. Untuk turbin angin horizontal putaran dari turbin bergantung pada arah angin dan kecepatan angin yang melawan posisi

dari turbin. Turbin angin vertikal memiliki konstruksi sumbu kincir yang tegak lurus, biasanya ditempatkan pada bagian dasar pada menara. Konstruksi dari sumbu vertikal membuat turbin angin tipe vertikal tidak bergantung dari arah angin, sehingga untuk jenis turbin ini dapat ditempatkan pada area yang arah anginya bervariasi. Untuk desain dari turbin angin tipe vertikal mempunyai desain *blade* yang berbeda dengan tipe horizontal, turbin angin tipe vertikal lebih memiliki banyak lekukan dan juga bentuk *blade* bervariasi tidak seperti halnya turbin angin tipe horizontal

b) *Nacelle Housing*

Nacelle Housing merupakan tempat dimana part atau komponen internal rakitan sistem tenaga angin ditempatkan, mulai dari *break system, gear box, low speed shaft, high speed shaft, yaw drive, yaw motor, generator* dan *controller*.

c) *Hub*

Hub merupakan bagian yang berfungsi sebagai tempat terpasangnya *blade* turbin angin dan juga sebagai bantalan *blade* turbin angin saat berputar.

d) *Pitch System*

Pitch system merupakan komponen yang berfungsi untuk melakukan pengaturan posisi sudut dari *blade* turbin angin, sehingga distribusi angin dapat efektif mengenai *blade* turbin angin sehingga menghasilkan putaran turbin yang lebih optimal. Sistem ini pada umumnya digerakan oleh sistem motor listrik dengan roda gigi ataupun sistem hidraulik dengan sensor-sensor dan peralatan kontrol yang terpasang dan juga catu daya dari masing-masing komponennya.

e) *Main Shaft*

Main Shaft merupakan komponen yang berfungsi sebagai poros dari rotor *blade* ke *gear* sebagai pengatur kecepatan putaran yang diterima dari rotor *blade*. Terdapat dua jenis *shaft* yang menyusun komponen sistem tenaga angin, yang terdekat dengan rotor *blade* adalah *low speed shaft* atau poros yang digunakan untuk melakukan pengereman kecepatan yang diterima dari rotor *blade* sebelum masuk ke *gearbox*. *High speed shaft* difungsikan sebagai poros putaran tinggi yang dihasilkan dari *gearbox*, percepatan putaran dapat mencapai 100 – 200 kali untuk turbin *blade* dengan ukuran MW.

f) *Gearbox*

Gearbox merupakan peralatan yang berfungsi untuk menghubungkan antara *low speed shaft* dengan *high speed shaft*. Berfungsi untuk melakukan kompresi rasio kecepatan yang di terima oleh *low speed shaft* dari putaran turbin *blade* kemudian output dari *gearbox* terkopel dengan *high speed shaft* yang menghasilkan percepatan putaran dari output *gearbox* 100-200 kali untuk turbin *blade* dengan skala MW untuk memutar generator.

g) *Generator*

Generator merupakan peralatan utama untuk melakukan konversi energi listrik. Generator menghasilkan energi listrik AC dengan frekuensi rata-rata 50-60 Hz. Pada umumnya komponen dari sistem tenaga angin mempunyai dua jenis generator yaitu generator sinkron dan asinkron. Sistem dari generator sinkron terdiri dari *electrically excited generator* dan *permanent magnet generator* (PMG), kemudian untuk sistem dari generator asinkron terdiri dari generator induksi dan

doubly fed induction generator (DFIG). Dari masing-masing jenis generator ini, terlihat perbedaan pada proses starting dimana untuk generator sinkron membutuhkan arus pemicu atau arus eksitasi yang pada umumnya dibantu dengan motor DC agar putaran dari rotor dapat sama dengan putaran dari putaran medan stator sehingga terjadi sinkronisasi. Sebaliknya untuk generator asinkron tipe DFIG terdiri dari generator induksi *wound rotor* dan AC/DC/AC konverter *Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)* yang dikontrol menggunakan *pulse width modulation (PWM)*, dimana rangkaian tersebut juga digunakan untuk mengatur arus eksitasi medan pada rotor dan juga mengatur *pitch control system* pada turbin angin. Dengan berkembangnya sistem pada komponen elektronika daya, sistem DFIG WTG lebih populer digunakan karena dari segi biaya lebih menguntungkan dibandingkan dengan sistem dengan generator sinkron.

5. Sistem Tenaga Biogas

Biogas merupakan sebuah proses produksi gas bio dari material organik dengan bantuan bakteri. Proses degradasi material organik ini tanpa melibatkan oksigen disebut *anaerobic digestion* gas yang dihasilkan sebagian besar (lebih 50%) berupa metana, material organik yang terkumpul pada digester /reaktor akan diuraikan menjadi dua tahap dengan bantuan dua jenis bakteri. Tahap pertama material organik akan didegradasi menjadi asam asam lemah dengan bantuan bakteri pembentuk asam. Bakteri ini akan menguraikan sampah pada tingkat hidrolisis dan asidifikasi. Hidrolisis yaitu penguraian senyawa yang sederhana. Sedangkan asidifikasi yaitu pembentukan asam dari senyawa sederhana. Setelah material organik berubah menjadi asam asam, maka tahap kedua dari proses

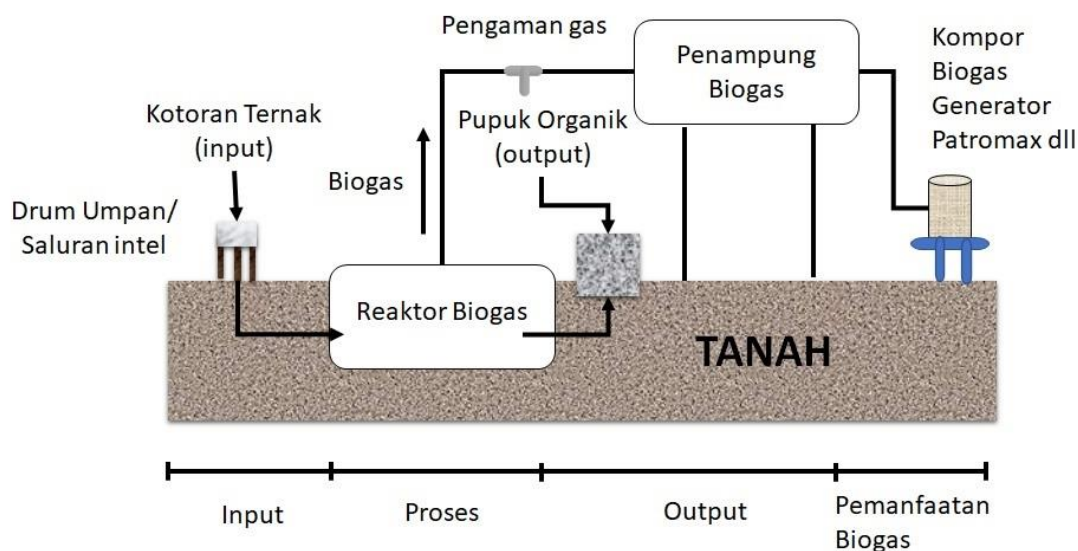
anaerobik digestion adalah pembentukan gas metana dengan bantuan bakteri pembentuk metana seperti *mathanococcus*, *methanosarcina*, *methano bacterium*.

Biogas sebagian besar mengandung gas metana (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂), dan beberapa kandungan yang jumlahnya kecil diantaranya hydrogen sulfide (H₂S) dan ammonia (NH₃) serta hydrogen dan (H₂), nitrogen sulphur, kandungan air dan karbon dioksida (CO₂). Energi yang terkandung dalam biogas tergantung dari konsentrasi metana (CH₄). Semakin tinggi kandungan metana maka semakin besar kandungan energi (nilai kalor) pada biogas, dan sebaliknya semakin kecil kandungan metana (CH₄) semakin kecil nilai kalor. Kualitas biogas dapat ditingkatkan dengan memperlakukan parameter yaitu: menghilangkan hydrogen sulphur, kandungan air dan karbon dioksida (CO₂).

Sistem Kerja Instalasi Biogas

Pada instalasi biogas, selalu terdapat reaktor atau digester. Reaktor merupakan sebuah ruang tertutup yang digunakan sebagai media penyimpanan kotoran selama beberapa hari untuk menghasilkan gas yang tersimpan bersama kotoran yang kemudian disebut biogas. Dari beberapa jenis digester biogas yang sering digunakan adalah jenis kubah tetap (*Fixed-dome*) dan jenis drum mengambang (*Floating drum*). Sistem produksi biogas dibedakan menurut cara pengisian bahan bakunya, yaitu pengisian curah dan pengisian kontinu. Yang dimaksud dengan sistem pengisian curah (SPC) adalah cara penggantian bahan yang sudah dicerna dari tangki pencerna setelah produksi biogas berhenti, dan selanjutnya dilakukan pengisian bahan baku yang baru. Sedangkan yang dimaksud dengan pengisian kontinu adalah pengisian bahan baku ke dalam tangki pencerna

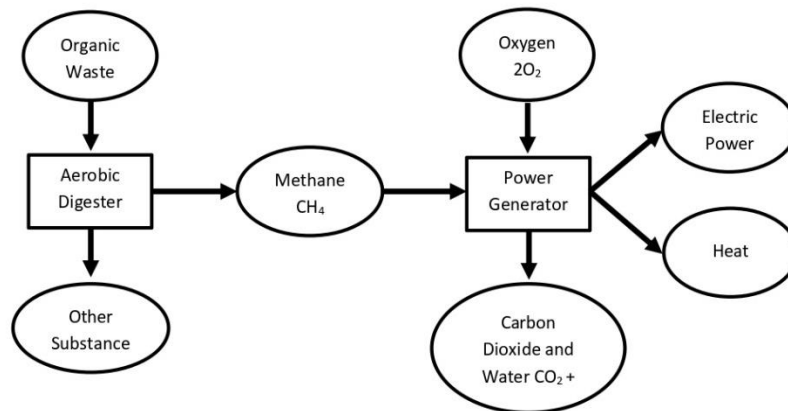
dilakukan secara kontinu (setiap hari) tiga hingga empat minggu sejak pengisian awal, tanpa harus mengeluarkan bahan yang sudah dicerna. Adapun skema pemanfaatan biogas yang berasal dari kotoran ternak ditunjukkan pada Gambar 4 berikut:



Gambar 4. Skema Pemanfaatan Biogas dari Kotoran ternak

Pada Gambar 4 ditampilkan skema proses pemanfaatan biogas dari kotoran ternak dimulai dari input kotoran ternak yang dimasukkan ke reaktor biogas melalui drum umpan/saluran intel. Kotoran ternak akan disimpan selama beberapa hari pada reaktor yang merupakan ruang tertutup untuk menghasilkan biogas. Biogas yang dihasilkan selanjutnya disimpan pada penampungan gas untuk selanjutnya dimanfaatkan untuk bahan bakar generator biogas dan sebagainya.

Skema proses pembangkitan energi listrik dari sebuah pembangkit listrik tenaga biogas mulai dari proses pengolahan kotoran sapi menjadi biogas yang disebut sebagai *anaerobic digestion*, hingga proses perubahan biogas menjadi energi listrik yang siap digunakan seperti pada Gambar 5 berikut:



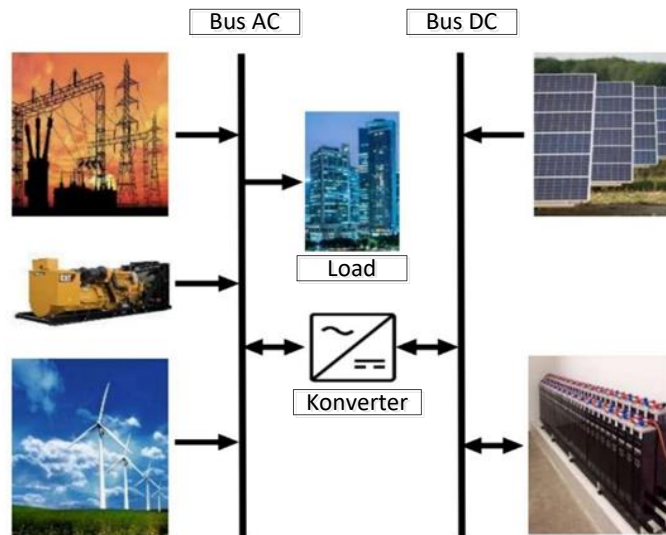
Gambar 5. *Biogas Power Generator Flow Chart*

Bahan-bahan organik dalam hal ini kotoran sapi yang ditambahkan dengan air akan menjadi bahan baku utama proses anaerobik. Dari proses anaerobik menghasilkan gas methan (CH_4) dan zat sisa. Zat sisa proses anaerobik dapat digunakan sebagai pupuk urea, sedangkan gas methan itulah yang disebut sebagai biogas. Biogas tersebut kemudian digunakan sebagai bahan bakar sebuah generator set (Genset) biogas yang terdiri dari sebuah mesin gas sebagai motor penggerak sebuah generator. Mesin gas tersebut menggunakan oksigen (dari udara bebas) dan biogas sebagai bahan bakar proses pembakaran, dan menghasilkan karbon dioksida dan uap air sebagai zat hasil pembakaran. Energi listrik yang dihasilkan oleh generator dapat segera digunakan oleh penduduk/industri.

6. Sistem Hybrid Microgrid

Sistem *hybrid microgrid* adalah sistem yang menggabungkan dua atau lebih sumber energi yang berbeda dengan rangkaian peralatan konversi energi listrik yang saling terintegrasi untuk saling mengatasi keterbatasan satu sama lain. Energi dari pembangkitan energi listrik dapat memanfaatkan sumber energi terbarukan seperti, energi panas matahari, energi angin, energi air, atau energi gelombang laut.

Sistem hibrid mikrogrid diaktifkan pada sistem untuk mensuplai kebutuhan sistem tenaga listrik dan juga untuk kebutuhan *power quality* dan profil tegangan sistem tenaga listrik yang lebih baik.



Gambar 6. Topologi *microgrid hybrid AC DC* (Mubarak, 2013a).

Pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa sistem *hybrid microgrid* salah satunya dapat terdiri dari komponen yang saling mendukung beroperasinya sistem tersebut, dari beberapa sistem hibrid mikrogrid yang dibahas diantaranya:

- a. Modul PV (*PV Array*): Serangkaian panel PV yang dirangkai secara seri atau paralel. Output yang diberikan berupa arus DC yang bergantung dari paparan radiasi sinar matahari yang mengenai komponen tersebut. Posisi dari panel sangat berpengaruh terhadap energi yang dihasilkan dari PV, oleh karena itu penting untuk dilakukan perancangan parameter dan keakuratan posisi dari panel terhadap sinar matahari agar keluaran dapat optimal.

- b. Turbin angin: Komponen yang berfungsi untuk mengubah energi kinetik dari energi angin menjadi energi listrik yang diikuti dengan komponen penyusun lainnya untuk sistem turbin angin.
- c. Baterai bank: Komponen yang digunakan untuk tempat penyimpanan energi listrik sistem DC dalam jumlah besar. Pemasangan baterai di pasang secara paralel agar dapat melakukan penyimpanan energi dengan kapasitas yang dapat diperbarui dengan tegangan yang konstan.
- d. Kontroler sistem *hybrid*: Komponen yang dirancang untuk mengintegrasikan ketiga komponen pembangkit energi listrik (PV, PLTB, baterai bank).
- e. Diesel generator: Komponen generator yang digunakan sebagai *backup*.
- f. Inverter: Komponen yang digunakan untuk pengkonversian energi dari sistem DC ke sistem AC dengan menggunakan perangkat elektronika daya yang terintegrasi didalam perangkat inverter tersebut.

7. Generator AC

Generator adalah mesin yang mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik. Prinsip kerja generator adalah rotor generator yang digerakan oleh turbin sehingga menimbulkan tenaga listrik. Sumber energi untuk penggerak turbin terdiri dari berbagai macam sumber, antara lain adalah uap, air, gas, mesin diesel dan lain-lain. Kegunaan dari generator adalah sebagai sumber tenaga listrik pada pompa air/minyak, penerangan dan lain-lain. Generator merupakan mesin elektrik yang menggunakan medan magnet sebagai media. Konstruksi generator terbagi menjadi dua yaitu bagian diam atau stator dan bagian berputar atau rotor. Pembangkitan tegangan oleh fluks hingga menghasilkan tegangan terminal pada generator dalam

hal ini generator sinkron yang bekerja berdasarkan hukum induksi Faraday yang menyatakan kuantitatif induksi tegangan oleh waktu perubahan medan magnetik.

8. Sistem Baterai

Baterai adalah media penyimpanan yang digunakan untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh pembangkit, untuk kemudian disuplai ke beban. Baterai yang digunakan pada pembangkit listrik energi terbarukan mengalami proses siklus mengisi (*charging*) dan mengosongkan (*discharging*), tergantung besarnya energi yang dihasilkan oleh pembangkit. Selama pembangkit bekerja maka akan menghasilkan energi listrik. Apabila energi listrik yang dihasilkan tersebut melebihi kebutuhan bebannya, maka energi listrik yang dihasilkan langsung di suplai ke beban dan sebagian digunakan untuk mengisi baterai. Sebaliknya jika energi yang dihasilkan oleh pembangkit kurang, maka permintaan energi listrik akan disuplai oleh baterai.

9. Intermittent

Intermittent adalah suatu kondisi dimana suatu proses terjadi pada interval yang tidak teratur, tidak secara kontinu atau stabil. Karakteristik intermiten merupakan suatu proses yang mempunyai siklus terputus-putus, di mana siklus tersebut mempunyai efek yang dapat mempengaruhi kestabilan *power quality* pada sistem. Adapun proses *intermitten* pada sistem tenaga listrik yang diketahui:

- a. *Intermitten* sumber: Proses penyaluran sistem tenaga listrik yang terjadi dengan interval yang tidak teratur (terputus-putus) diakibatkan karena faktor sistem pembangkitan yang energi primernya bergantung pada kondisi alam sehingga mengakibatkan penyaluran daya tidak stabil. Biasanya terjadi pada pembangkit

mikrogrid dengan *Renewable Energy System* (RES) dengan energi primer berupa angin atau matahari.

- b. *Intermittent* beban: Proses dimana beban menyerap daya listrik dengan fluktuatif, dimana masuknya beban menyerap daya listrik yang besar ke sistem pada interval tertentu dan hilang (terputus) pada saat beban lepas dari sistem. Contoh beban *intermittent* antara lain: proses *arc welding*, *rock crushers*, proses *charging electric vehicle*, dll.

10. Algoritma Genetika

Algoritma genetika (GA) merupakan sebuah pencarian heuristik yang meniru proses seleksi alam. Sifat heuristik ini (juga kadang disebut sebagai metaheuristik) adalah secara rutin digunakan untuk menghasilkan solusi-solusi untuk masalah optimasi dan pencarian. Algoritma genetik termasuk dalam kelas yang lebih besar yaitu algoritma-algoritma evolusi, yang menghasilkan solusi-solusi untuk masalah-masalah optimasi menggunakan teknik yang terinspirasi oleh evolusi alam, seperti misalnya penurunan, mutasi, seleksi dan persilangan. Dalam algoritma genetika, populasi solusi kandidat (disebut individu, makhluk, atau fenotipe) untuk masalah optimasi berkembang ke arah solusi yang lebih baik. Setiap solusi kandidat memiliki seperangkat sifat (kromosom atau genotipe) yang dapat bermutasi dan berubah; tradisional, solusi direpresentasikan dalam biner sebagai string dari 0 dan 1, tetapi dapat pula direpresentasikan dengan pengkodean lain. Evolusi biasanya dimulai dari populasi individu secara acak, dan merupakan proses berulang, dengan populasi di setiap iterasi yang disebut generasi. Dalam setiap generasi dilakukan evaluasi kecocokan setiap individu dalam populasi, kecocokan biasanya nilai fungsi

tujuan dalam masalah optimasi dipecahkan. Individu lebih cocok secara stokastik yang dipilih dari populasi saat ini, dan genom masing-masing individu yang dimodifikasi (digabungkan dan mungkin secara acak bermutasi) untuk membentuk generasi baru. Generasi baru dari solusi kandidat ini kemudian digunakan dalam iterasi berikutnya dari algoritma. Umumnya, algoritma berakhir ketika baik jumlah maksimum generasi telah diproduksi, atau tingkat kecocokan yang memuaskan telah tercapai (Munirah, 2017).

Sebuah algoritma genetika khas membutuhkan: representasi genetik dari domain solusi, fungsi kecocokan untuk mengevaluasi domain solusi. Sebuah representasi standar setiap solusi kandidat adalah sebagai array bit. Array jenis dan struktur lainnya dapat digunakan di dasarnya dengan cara yang sama. Properti utama yang membuat representasi genetik ini baik adalah bahwa bagian mereka dengan mudah disesuaikan karena ukurannya yang tetap, yang memudahkan operasi persilangan sederhana. Variabel panjang representasi dapat juga digunakan, tetapi implementasi persilangan lebih kompleks dalam kasus ini. Representasi seperti pohon dieksplorasi dalam genetik pemrograman dan grafik-bentuk representasi yang dieksplorasi dalam pemrograman evolusioner, campuran keduanya kromosom linear dan pohon dieksplorasi dalam pemrograman ekspresi gen. Setelah representasi genetik dan fungsi kecocokan didefinisikan, sebuah hasil GA untuk menginisialisasi populasi solusi dan kemudian memperbaikinya melalui aplikasi berulang dari operator mutasi, persilangan, inversi dan seleksi.

Komponen penting dari NSGA-II adalah gagasan dominasi, yang menyatakan bahwa, dalam masalah fungsi tujuan M , solusi $P1$ dikatakan mendominasi solusi lain $P2$ jika kedua keadaan berikut ini benar:

- a. Dalam semua tujuan, solusi $P1$ tidak kalah dengan solusi $P2$, atau
 - b. Dalam setidaknya satu tujuan, solusi $P1$ jelas lebih unggul dari solusi $P2$, atau
- Jika salah satu dari persyaratan ini salah, $P2$ tidak didominasi oleh $P1$ atau $P1$ tidak mendominasi $P2$. Jika kedua kondisi terpenuhi, solusi $P1$ atau $P2$ apa pun akan mengungguli yang lain. *Pareto Front* adalah sepasang hasil yang tidak didominasi yang membantu menjelaskan efek pengoptimalan. Dengan tujuan mencapai optimalisasi multi-tujuan yang efektif, MOGA memperlakukan GA sebagai dua teknik inovatif terpentingnya. Dua penemuan terbaru ini adalah non-dominated sorting dan crowding distance. Algoritma Genetika Penyortiran Non-dominasi-II dibuat dengan menggabungkan algoritma GA dan MOGA. Peringkat terpendek digunakan untuk memulai suatu proses, dan peringkat terkecil berikutnya digunakan untuk menerima hasil, dan seterusnya sampai proses menghasilkan solusi terbaik. Proses ini berlanjut hingga jumlah hasil populasi induk bertambah sebesar N . Operator *crossover* dan mutasi populasi digunakan untuk menentukan generasi berikutnya. Tiga faktor yang paling penting adalah proses desain, lokasi, dan kondisi cuaca (Sathishkumar et al., 2016)

B. Penelitian Terkait

Berikut ini merupakan beberapa penelitian sebelumnya yang terkait dengan desain koordinasi dan optimisasi pembangkit listrik berbasis energi terbarukan dengan sistem baterai dalam konteks *microgrid* yaitu: Penelitian dengan judul *Analysis of backup power supply for unreliable grid using hybrid solar PV/diesel/biogas system* (Sanni et al., 2021) pada tahun 2021 dengan kombinasi PV/diesel/biogas pada sistem *on grid* menggunakan aplikasi *Homer* mendesain kombinasi *hybrid* biogas yang digunakan untuk melengkapi sistem *backup* generator diesel yang ada. Diperoleh dua konfigurasi optimal berdasarkan biaya terendah.

Penelitian dengan judul *A biogas-solar based hybrid off-grid power plant with multiple storages for United States commercial buildings* (Mendecka et al., 2021) pada tahun 2021 dengan kombinasi PV/URSOFC/battery/generator diesel untuk sistem *off grid* mengusulkan sistem PV sebagai pemasok energi utama, sedangkan URISOFC, baterai dan generator diesel digunakan sebagai sistem cadangan.

Penelitian dengan judul *Optimal design and implementation of solar PV-wind-biogas-VRFB storage integrated smart hybrid microgrid for ensuring zero loss of power supply probability* (Sarkar et al., 2019) tahun 2019 dengan kombinasi PV/wind/biogas/VRFB menggunakan aplikasi *Homer* dan PSCAD. Penelitian ini mendesain *microgrid hybrid* yang terdiri dari PV 10 kWp, generator *wind* 1 kW, generator biogas 15 kVA, penyimpanan VRFB 1 kW/ 6 kWh, beban, dan jaringan lokal. Dilakukan optimasi manajemen energi dan optimalisasi kapasitas tekno-komersial dari sumber energi terbarukan dan penyimpanan VRFB, manajemen sisi

permintaan menggunakan perangkat lunak *Homer*. Studi simulasi PSCAD terbukti memvalidasi kinerja algoritma yang diusulkan dalam manajemen permintaan puncak dan kemungkinan hilangnya pasokan daya nol untuk profil beban praktis, profil pembangkitan berbagai sumber energi terbarukan, dan kondisi penyimpanan baterai.

Penelitian dengan judul *Energy management in multi-microgrids considering point of common coupling constraint* (Khavari et al., 2020) pada tahun 2020 untuk sistem *off grid* mengusulkan sebuah metode untuk manajemen energi dalam *multi-microgrids* dengan memperhitungkan kongesti jalur umum. Metode yang diusulkan memeriksa manajemen energi dalam sistem yang terdiri dari *multi-microgrids* dalam dua tingkat. Pada tingkat pertama, masing-masing *microgrid* menerapkan penjadwalan harian berdasarkan kapasitas jalur umum variabel dan membuat kurva kuantitas keuntungan yang sesuai. Ditingkat kedua, sebuah agen yang disebut agregator *microgrid* diperkenalkan untuk memaksimalkan keuntungan seluruh rangkaian *microgrid* dengan mempertimbangkan batasan PCC.

Penelitian dengan judul *Energy Management System for Small Scale Hybrid Wind Solar Battery Based Microgrid* (Kumar et al., 2020) pada tahun 2020 dengan kombinasi *Wind/solar/battery*, merancang dan mengembangkan *microgrid* berbasis energi terbarukan *wind, solar*, baterai skala kecil. Sistem manajemen energi diusulkan untuk menjaga keseimbangan daya di jaringan mikro dan menyediakan kontrol yang dapat dikonfigurasi dan fleksibel untuk berbagai skenario variasi permintaan beban dan variasi dalam sumber energi terbarukan. Sistem yang diusulkan dapat diuji secara *real time* dengan menggunakan prototipe kontrol cepat.

Eksperimen dilakukan untuk menguji efektivitas sistem manajemen energi yang diusulkan untuk variasi yang berbeda dalam sumber energi terbarukan dan variasi yang berbeda dalam permintaan beban. Sistem manajemen energi dan algoritma kontrol diimplementasikan menggunakan prototipe kontrol cepat di pengontrol DSPACE. Hasil percobaan menunjukkan bahwa sistem fleksibel dan mengakomodasi variasi yang berbeda dari sumber energi terbarukan dan beban. Kontroler memungkinkan penerapan sistem manajemen energi secara efektif.

Penelitian E.N. Nyeche, E.O. Diemuodeke, berjudul “*Modelling and Optimisation of a Hybrid PV-Wind Turbine-Pumped Hydro Storage Energy System for Mini-Grid Application in Coastline Communities*” (Nyeche & Diemuodeke, 2020). Studi ini menggunakan teknologi konversi energi hibrid yang bersih, andal, dan terjangkau berbasis sinar matahari dan angin, dengan sistem penyimpanan energi berbasis hidro. Sistemnya terdiri dari susunan *Photovoltaic*, *wind turbine* (WT) dan *Pumped Hydro Energy Storage* (PHES). Dengan Algoritma genetika sistem yang dimodelkan dan diimplementasikan dalam Microsoft Excel, HOMER Pro dan MATLAB. Microsoft excel digunakan untuk penilaian permintaan energi lokasi. Algoritma genetika di MATLAB digunakan untuk meminimalkan kekurangan kapasitas. Keluaran dari penilaian energi dan parameter optimal berfungsi sebagai data masukan ke HOMER Pro platform untuk optimasi biaya.

Penelitian Mohammed Kharrich, Salah Kamel, Mohamed Abdeen, Omar Hazem Mohammed, Mohammed Akherraz, Tahir Khurshaid, And Sang-Bong Rhee, berjudul “*Developed Approach Based on Equilibrium Optimizer for Optimal Design of Hybrid PV/Wind/Diesel/Battery Microgrid in Dakhla, Morocco*”

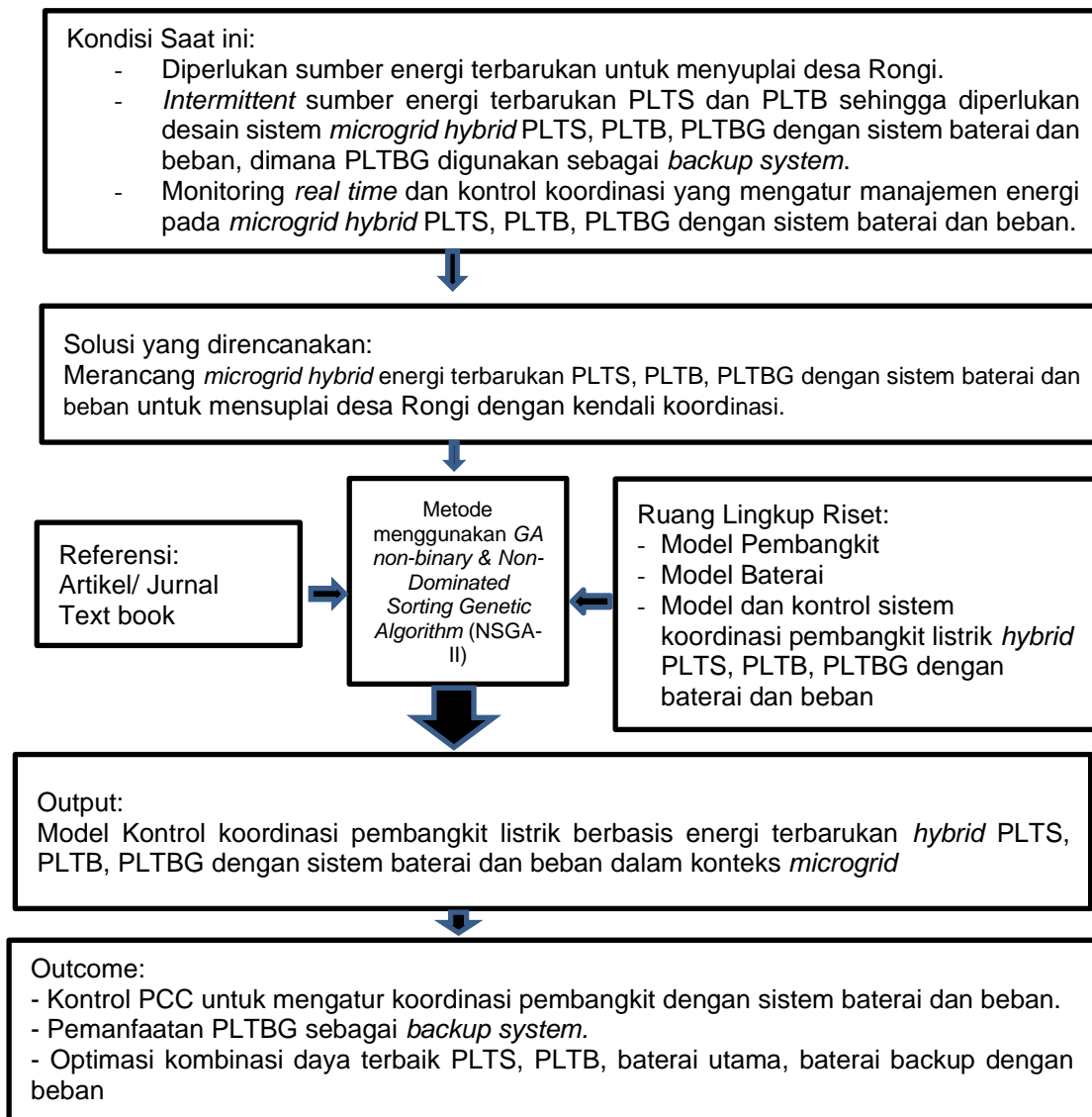
(Kharrich et al., 2021). Menggunakan metode *Equilibrium Optimizer* (EO) untuk merancang *microgrid hybrid* untuk memasok listrik ke Dakhla, Maroko. EO merancang sistem microgrid karena efektivitasnya yang tinggi dalam menentukan solusi optimal dalam waktu yang sangat singkat. EO dihadirkan untuk memilih desain sistem yang optimal yang dapat meminimalkan biaya, meningkatkan stabilitas sistem, dan menutupi beban pada kondisi iklim yang berbeda. Sistem *microgrid* terdiri dari *photovoltaik* (PV), turbin angin (WT), baterai, dan generator diesel. Fungsi tujuan yang dibahas dalam makalah ini adalah untuk meminimalkan biaya bersih saat ini (NPC), dengan memperhatikan beberapa kendala seperti keandalan, ketersediaan, dan fraksi terbarukan. Analisis sensitivitas dilakukan dalam dua tahap: Pertama, dampak kecepatan angin, radiasi matahari, suku bunga, dan solar pada NPC, dan analisis *levelized cost of energy* (LCOE). Kedua, menyelidiki pengaruh variasi ukuran *loss of power supply probability* (LPSP). Hasil yang diperoleh EO dibandingkan dengan yang diperoleh oleh algoritma optimasi metaheuristik terbaru, yaitu *Harris Hawks Optimizer* (HHO), *Artificial Electric Field Algorithm* (AEFA), *Gray Wolf Optimizer* (GWO), dan *Sooty Tern Optimization Algorithm* (STOA). Hasil menunjukkan bahwa desain sistem EO optimal, di mana sumber energi terbarukan (PV dan WT) mewakili 97% dari kontribusi tahunan dan karakteristik konvergensi cepat diperoleh oleh EO. NPC, LCOE, dan LPSP terbaik diperoleh EO masing-masing mencapai \$ 74.327, 0,0917 \$/kWh, dan 0,0489. Hasil menunjukkan bahwa desain sistem yang optimal dicapai oleh EO, di mana sumber energi terbarukan (PV dan WT) mewakili 97% dari kontribusi tahunan dan karakteristik konvergensi cepat diperoleh oleh EO. NPC,

LCOE, dan LPSP terbaik diperoleh melalui EO dengan masing-masing mencapai \$ 74.327, 0,0917 \$/kWh, dan 0,0489.

Mengacu pada kajian literatur yang telah dipaparkan, jelas bahwa sumber energi terbarukan dan sistem penyimpanan energi adalah teknologi utama untuk aplikasi jaringan cerdas dan memiliki peluang besar untuk menghilangkan karbon di daerah perkotaan, mengatur frekuensi, penyimpangan tegangan, dan merespon ketika beban melebihi pembangkitan. Dengan ketidakpastian dan intermiten yang melekat pada unit pembangkit listrik energi terbarukan maka berdampak pada sistem tenaga. Sistem penyimpanan energi seperti sistem penyimpanan energi baterai memungkinkan jaringan listrik meningkatkan penerimaan pembangkit energi terbarukan yang terputus-putus. Untuk melakukannya diperlukan koordinasi yang tepat antara unit pembangkit listrik terbarukan, sistem penyimpanan energi dan jaringan. Maka kami mengusulkan penelitian dengan judul “Desain Koordinasi dan Optimisasi Pembangkit Listrik Berbasis Energi Terbarukan Dengan Sistem Baterai Dalam Konteks *Microgrid*”. Penelitian ini mendesain model koordinasi *microgrid hybrid* PLTS, PLTB, PLTBG dengan sistem baterai dan beban dimana PLTS dan PLTB digunakan sebagai sumber pembangkit utama, sedangkan PLTBG digunakan sebagai *backup* sistem utama.

C. Kerangka Konsep Penelitian

Tujuan dari kerangka konsep penelitian adalah untuk melihat posisi dan kebaruan dari penelitian yang dilakukan. Adapun kebaruan dari penelitian ini adalah pengembangan model sistem *microgrid hybrid* dengan mengkoordinasikan daya output pada PLTS, PLTB, baterai utama, dan baterai *backup* untuk memenuhi kebutuhan daya pada beban di desa Rongi. Gambar 7 menampilkan tahapan dari kerangka konsep penelitian yang dilakukan.



Gambar 7. Kerangka Konsep Penelitian