



TUGAS AKHIR - TE 141599

ECONOMIC DISPATCH UNTUK GRID MIKRO
HIBRIDA DENGAN *DISTRIBUTED ENERGY*
STORAGE BERBASIS METODE *QUADRATIC*
PROGRAMMING

Kemas Robby Firmansyah
NRP 2212100030

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TE 141599

ECONOMIC DISPATCH OF HYBRID MICROGRID
WITH DISTRIBUTED ENERGY STORAGE USING
QUADRATIC PROGRAMMING

Kemas Robby Firmansyah
NRP 2212100030

Supervisors
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

***ECONOMIC DISPATCH UNTUK GRID MIKRO
HIBRIDA DENGAN DISTRIBUTED ENERGY STORAGE
BERBASIS METODE QUADRATIC PROGRAMMING***

TUGAS AKHIR

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagai Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I,

Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
NIP: 197411292000121001

Dosen Pembimbing II,

Prof. Dr. Ir. Adi Soepriyanto, M.T.
NIP: 196404051990021001



Economic Dispatch Untuk Grid Mikro Hibrida Dengan Distributed Energy Storage Berbasis Metode Quadratic Programming

Nama Mahasiswa : Kemas Robby Firmansyah
NRP : 2212100030
Pembimbing I : Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
NIP : 197411292000121001
Pembimbing II : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
NIP : 196404051990021001

Abstrak:

Kebutuhan daya listrik saat ini meningkat pesat dengan perkembangan teknologi. Peningkatan kebutuhan daya listrik bertolak belakang dengan ketersediaan sumber energi tak terbarukan. Permasalahan ini akan berdampak pada ketahanan listrik nasional, untuk memenuhi kebutuhan daya listrik yang besar dengan wilayah yang luas diperlukan pembangkit –pembangkit tersebar dengan skala kecil. Pembangkit tersebar diupayakan bersumber pada energi terbarukan untuk meminimalkan pemakaian sumber energi tak terbarukan. Selain itu diperlukan adanya *energy storage*, *energy storage* diperlukan untuk menyimpan kelebihan energi yang dihasilkan oleh pembangkit lainnya. Dengan adanya pembangkit tersebar dan *energy storage* yang dihubungkan dengan *grid* utama Perusahaan Listrik Negara melalui *grid* mikro, maka penting untuk menentukan optimisasi besarnya pembangkit daya listrik untuk masing-masing pembangkit yang sesuai dengan kebutuhan daya listrik. Optimisasi ini dikenal dengan istilah *economic dispatch*. Metode yang diterapkan untuk optimisasi *economic dispatch* adalah dengan menggunakan *quadratic programming*. Simulasi dilakukan pada sistem IEEE 14 bus menggunakan software MATLAB. Hasil simulasi dan analisis menunjukkan bahwa program dapat memenuhi batasan yang ditentukan dan biaya pembangkitan tenaga listrik untuk pengoperasian *grid* mikro hibrida adalah 25,53 \$.

Kata kunci: *Energy Storage, Economic Dispatch, Grid Mikro Hibrida, Quadratic Programming.*

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

Economic Dispatch of Hybrid Microgrid With Distributed Energy Storage Using Quadratic Programming

Name : Kemas Robby Firmansyah
NRP : 2212100030
Supervisor I : Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
NIP : 197411292000121001
Supervisor II : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
NIP : 196404051990021001

Abstract:

Electrical power requirements increase rapidly with the development of technology. Increased of electrical power is contrast to the availability of non-renewable energy sources. This problem will have an impact on the national electrical security, to meet the needs of a large electric power of a large area required small scales of distributed generation. Distributed generation pursued renewable energy sources in order to minimize the use of non-renewable energy sources. In addition it is necessary to add energy storage, energy storage is needed to store excess energy generated by plants. With the distributed generation and energy storage which is connected to the main grid through microgrid, it is important to determine the size optimization of electrical power generation for each plant according to power requirements. This optimization is known as economic dispatch. Optimization methods of economic dispatch is using the quadratic programming. IEEE 14 bus system used as test system using MATLAB software. The result of simulation and analysis show that the approach satisfies all of constraint considered and cost of generation to operate hybrid microgrid is 25.53 \$.

Keywords: Energy Storage, Economic Dispatch, Hybrid Microgrid, Quadratic Programming.

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR KEASLIAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK.....	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xi
NOMENKLATUR.....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan	3
1.5 Metode Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
1.7 Relevansi.....	5
BAB 2 ECONOMIC DISPATCH PADA SISTEM KELISTRIKAN GRID MIKRO HIBRIDA	7
2.1 Sistem Kelistrikan <i>Grid</i> Mikro Hibrida	7
2.1.1 <i>Islanded</i>	7
2.1.2 <i>Grid-connected</i>	7
2.1.3 <i>Sel Surya</i>	8
2.1.4 <i>Turbin Mikro</i>	9
2.1.5 <i>Generator Diesel</i>	10
2.1.6 <i>Energy Storage</i>	10
2.1.7 <i>Perusahaan Listrik Negara</i>	11
2.2 <i>Economic Dispatch</i>	11
2.2.1 <i>Constraint</i>	12
BAB 3 ECONOMIC DISPATCH UNTUK GRID MIKRO HIBRIDA DENGAN DISTRIBUTED ENERGY	

STORAGE BERBASIS METODE QUADRATIC PROGRAMMING.....	15
3.1 <i>Quadratic Programming</i>	15
3.2 Algoritma Pelaksanaan Tugas Akhir.....	16
3.3 Penerapan <i>Quadratic Programming MATLAB</i> pada <i>Economic Dispatch</i>	18
3.3.1 <i>Variabel Input dan Output pada Quadratic Programming Menggunakan qps_mathpower</i>	18
3.3.2 <i>Sintaks Quadratic Programming pada Mathpower</i>	20
3.3.3 <i>Penerapan Quadratic Programming MATLAB pada Economic Dispatch</i>	21
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS	29
4.1 Variabel Analisis	29
4.2 Simulasi dan Analisis Sistem <i>IEEE 14 Bus</i> Sebagai <i>Grid</i> Mikro Hibrida.....	29
4.3 Analisis Keadaan Energi <i>Energy Storage</i>	33
4.4 Biaya Pembangunan Tenaga Listrik.....	35
BAB 5 PENUTUP	37
5.1 Kesimpulan.....	37
5.2 Saran.....	37
LAMPIRAN	39
INDEKS	41
DAFTAR PUSTAKA.....	47
BIOGRAFI PENULIS.....	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Tipe grid mikro <i>islanded</i>	7
Gambar 2.2	Tipe grid mikro <i>grid-connected</i>	8
Gambar 3.1	Algoritma penyelesaian tugas akhir.....	16
Gambar 3.2	Contoh sistem kelistrikan sederhana.....	22
Gambar 4.1	Profil beban dinamis yang digunakan dalam simulasi <i>grid</i> mikro hibrida.....	30
Gambar 4.2	Daya yang dibangkitkan pada <i>grid</i> mikro hibrida.....	32
Gambar 4.3	Fluktuasi daya <i>energy storage</i>	34
Gambar 4.4	Fluktuasi energi <i>energy storage</i>	34

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Spesifikasi unit pembangkit	14
Tabel 4.1	Daya aktif yang dibangkitkan oleh masing-masing unit pembangkit	30
Tabel 4.2	Keadaan <i>energy storage</i>	32
Tabel 4.3	Biaya pembangkitan tenaga listrik.....	35

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

NOMENKLATUR

Formulasi

A	<i>Linear constraint.</i>
a	Konstanta biaya pembangkitan.
b	Koefisien orde satu biaya pembangkitan.
C	Koefisien orde satu <i>quadratic programming</i> .
CF	<i>Cost Function.</i>
c	Koefisien orde dua biaya pembangkitan.
E	Energi.
F	Function <i>quadratic programming</i> .
f	Konstanta <i>quadratic programming</i> .
G	Radiasi.
H	Koefisien orde dua <i>quadratic programming</i> .
K	Konstanta konversi.
l	Biaya listrik.
lb	<i>Lower constraint.</i>
M	Jumlah modul.
P	Daya.
PCC	Point of Common Coupling.
PLN	Perusahaan Listrik Negara.
SOC	<i>State of Charge.</i>
STC	Standard Test Condition.
T	Waktu optimasi.
t	Waktu.
ub	<i>Upper Constraint.</i>
x	Nilai optimasi

Subscripts

ch	<i>Charging.</i>
DG	Generator diesel.
ds	Discharging.
ES	<i>Energy storage.</i>
ING	Radiasi aktual
i	<i>Number of generator.</i>

L	Beban.
MT	Turbin mikro.
max	Nilai maksimum.
min	Nilai minimum.
PV	Sel surya.
r	Refrensi.
T	Koefisien <i>quadratic programming</i> .

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi merupakan sumber daya yang digunakan oleh manusia untuk melakukan suatu kegiatan dengan tujuan tertentu. Dengan adanya energi yang terdapat di bumi ini manusia dapat mengolah dan memanfaatkannya untuk kehidupan. Energi ini adalah energi listrik yang sekarang ini menjadi kebutuhan vital umat manusia tanpa terkecuali. Sejak revolusi industri, kebutuhan energi listrik meningkat tajam [1]. Memperoleh energi listrik untuk digunakan dalam kehidupan diperlukan sumber daya alam tak terbarukan yang sangat banyak contohnya batu bara, gas alam, uranium, dan minyak bumi. Namun, seiring bertambahnya waktu sumber daya alam tak terbarukan akan habis. Untuk mengatasinya diperlukan manajemen energi agar energi listrik yang diproduksi dapat didistribusikan secara maksimal dengan biaya serendah-rendahnya. Dengan biaya serendah-rendahnya otomatis penggunaan sumber daya alam tak terbarukan dilakukan secara hemat.

Sebagai bentuk yang baik dalam membangkitkan daya yang besar dengan cakupan wilayah yang luas, sistem pembangkitan tersebar (*grid* mikro) menjadi penting untuk memenuhi permintaan beban, menaikkan keandalan, dan sebagainya [2,3]. Sumber energi terbarukan contohnya adalah *photovoltaic wind turbin*, dan mikrohidro. Pembangkit tersebut menjadi terkenal karena tak menghasilkan emisi gas buang sehingga aman untuk lingkungan dan menggunakan sumber energi terbarukan. Adapun *energy storage*, sejak penemuan listrik telah dicari metode yang efektif untuk menyimpan energi yang dapat digunakan saat dibutuhkan. *Energy storage* memiliki *dynamic power* dan *energy formulations* tersendiri. Tentu saja manajemen energi yang digunakan berbeda dengan manajemen energi listrik yang lama, karena manajemen energi baru dengan sumber energi terbarukan dan *energy storage* memiliki formulasi optimasi yang berbeda dengan sumber energi konvensional [4]. Secara umum penggunaan *photovoltaic*, *wind turbin*, dan mikrohidro digunakan pada level jaring distribusi. Pada level jaring distribusi atau skala kecil atau disebut *grid* mikro dapat mengurangi rugi-rugi ekonomi yang cukup besar. Keuntungan lain yang diperoleh dari *grid* mikro adalah keunggulan dalam pengaturan terhadap dirinya

sendiri, sehingga apabila terjadi gangguan pada sistem utama, *grid* mikro masih dapat menjalankan fungsi pembangkitan dan penyaluran sendiri untuk melayani bebannya [5]. Banyak penelitian telah mengembangkan strategi optimasi yang luas untuk operasi ekonomi *grid* mikro. Referensi [6]-[9] menyajikan formulasi optimasi statis, karena mereka tidak menganggap adanya *distributed storage systems*. Dengan adanya *energy storage*, akan mempengaruhi keseluruhan manajemen energi dan kontrol dari *grid* mikro [10]. Meskipun beberapa studi telah mengembangkan strategi optimasi yang efektif untuk *grid* mikro, namun tidak mempertimbangkan variabel stokastik. Variabel stokastik dalam hal ini adalah adanya beban dan sumber terbarukan, dan variabel stokastik ini memiliki *short-term scheduling*, karena peramalan beban dan pembangkitan energi terbarukan lebih akurat untuk *short-time intervals* [11]. Metode yang digunakan untuk perhitungan biaya pembangkitan dari sebuah *grid* mikro hibrida dengan *distributed energy storage* adalah quadratic programming. *Quadratic programming* dipilih karena adanya objective function dari *grid* mikro dan untuk mengatasi adanya fenomena non-linier saat perhitungan biaya pembangkitan, fenomena non-linier ini dapat berupa berubah-ubahnya beban disetiap waktu [12].

1.2 Permasalahan

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan di atas, maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana metode *Quadratic Programming* diterapkan dalam *Economic Dispatch* Untuk *Grid* Mikro Hibrida dengan *Distributed Energy Storage*?
2. Bagaimana menentukan pembebanan optimal untuk setiap unit pembangkit sehingga kebutuhan beban dapat terpenuhi?
3. Bagaimana keadaan *Energy Storage* saat terjadi pembebanan sehingga memenuhi persyaratan?

1.3 Batasan Masalah

Untuk mendapatkan hasil penelitian yang terarah dan tidak menyimpang, masalah yang dibahas dalam tugas akhir ini dibatasi dengan:

1. Ketersediaan bahan bakar tidak terbatas.
2. Rugi pada saluran transmisi diabaikan.
3. Aliran daya setiap saluran diabaikan.

4. Sistem kelistrikan dalam keadaan stabil.
5. Tidak ada proses penjualan ke pihak Perusahaan Listrik Negara.
6. Perhitungan *Unit Commitment* tidak disertakan.
7. Model sistem *Grid* mikro yang digunakan berdasarkan *IEEE case 14 bus*.
8. Simulasi menggunakan *software Matlab*.

1.4 Tujuan

Pada penulisan tugas akhir ini ditujukan untuk:

1. Dapat menerapkan metode *Quadratic Programming* dalam *Economic Dispatch* Untuk *Grid* Mikro Hibrida dengan *Distributed Energy Storage*.
2. Mendapatkan pembebanan optimal untuk setiap unit pembangkit sehingga kebutuhan beban dapat terpenuhi.
3. Mendapatkan keadaan *Energy Storage* saat terjadi pembebanan sehingga memenuhi persyaratan.

1.5 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini antara lain:

1. Studi Literatur
Studi literatur dilakukan dengan membaca buku dan paper yang berkaitan dengan *economic dispatch*, *grid* mikro, *energy storage*, dan *quadratic programming*.
2. Pengumpulan Data
Data yang dikumpulkan meliputi data parameter masing-masing unit pembangkit, unit pembangkit ini terdiri atas *energy storage*, generator diesel, turbin mikro, sel surya, dan Perusahaan Listrik Negara sebagai *main grid*, kurva pembebanan, dimana diambil berdasarkan profil pembebanan sistem kelistrikan jawa-bali, dan biaya pembangkitan masing-masing unit pembangkit untuk sistem kelistrikan *grid* mikro hibrida.
3. Programming
Melakukan pemodelan terhadap sistem kelistrikan *case IEEE 14 bus* agar sesuai dengan sistem kelistrikan *grid* mikro hibrida. Selanjutnya modifikasi program yang sesuai dengan *constraint grid* mikro hibrida.
4. Simulasi dan Analisis

Melakukan simulasi program *economic dispatch* untuk *grid* mikro hibrida dengan *distributed energy storage* menggunakan metode *Quadratic Programming* dan melakukan analisis terhadap hasil simulasi yang terdiri atas daya yang terbangkitkan, *energy storage*, dan jumlah biaya operasi pembangkitan *grid* mikro hibrida.

5. Penyusunan Laporan

Penyusunan laporan dilakukan sebagai penggambaran kesimpulan dari tugas akhir. Kesimpulan merupakan jawaban dari permasalahan yang dianalisis, selain itu juga akan diberikan saran sebagai masukan untuk penelitian yang akan dilakukan di masa depan.

1.6 Sistematika Penulisan

Tugas akhir ini disusun dengan sistematika sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Penjelasan tentang latar belakang masalah, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, dan kontribusi penelitian.

BAB 2 *ECONOMIC DISPATCH* PADA SISTEM KELISTRIKAN *GRID* MIKRO HIBRIDA

Penjelasan mengenai sistem kelistrikan *grid* mikro hibrida, masing-masing unit pembangkit yang digunakan pada *grid* mikro hibrida, dan *economic dispatch*.

BAB 3 *ECONOMIC DISPATCH* UNTUK *GRID* MIKRO HIBRIDA DENGAN *DISTRIBUTED ENERGY STORAGE* BERBASIS METODE *QUADRATIC PROGRAMMING*

Penjelasan mengenai *quadratic programming*, dan penerapan *quadratic programming* pada permasalahan *economic dispatch*.

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

Menganalisis hasil optimisasi permasalahan *economic dispatch grid* mikro hibrida dengan *distributed energy storage* menggunakan metode *quadratic programming*.

BAB 5 PENUTUP

Bab terakhir dalam buku ini berisi kesimpulan dan saran. Kesimpulan adalah jawaban dari permasalahan yang dianalisis dan saran adalah masukan untuk penelitian berikutnya.

1.7 Relevansi

Penulisan tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Sebagai acuan untuk menentukan daya listrik terbangkitkan oleh masing-masing pembangkit dalam sistem kelistrikan *grid* mikro.
2. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil masalah yang serupa untuk tugas akhir.
3. Dapat menjadi referensi penelitian untuk mengembangkan metode optimasi yang lebih handal.

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

BAB 2

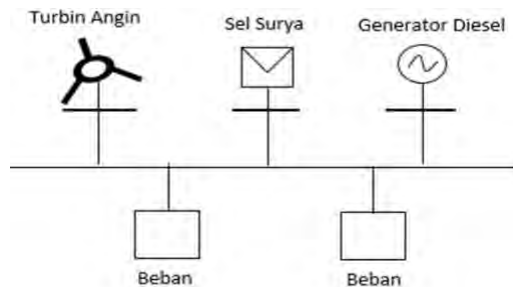
ECONOMIC DISPATCH PADA SISTEM KELISTRIKAN GRID MIKRO HIBRIDA

2.1 Sistem Kelistrikan *Grid* Mikro Hibrida

Dalam sistem *grid* mikro terdapat beberapa pembangkit diantaranya sumber *renewable energy* seperti *photovoltaic*, *wind turbine*, baterai, dan *fuel cell*. Kemudian ada pembangkit konvensional yang digunakan di sistem *grid* mikro seperti turbin mikro, dan generator diesel. Dengan menggunakan pembangkit tersebar berskala kecil, energi listrik dibangkitkan dekat dengan beban untuk meningkatkan keandalan dan mengurangi rugi jaringan. Terdapat dua mode operasi manajemen energi *grid* mikro yaitu *islanded* dan *grid-connected*.

2.1.1 *Islanded*

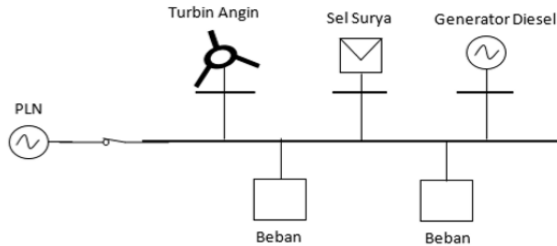
Mode operasi *Islanded* merupakan mode operasi dimana sistem tidak terhubung ke *main grid*. Pembangkit yang ada beroperasi secara mandiri dalam memenuhi kebutuhan sistem. Mode operasi ini menekankan pada stabilitas sistem terutama frekuensi dan tegangan.



Gambar 2. 1 Tipe *grid* mikro *islanded*

2.1.2 *Grid-connected*

Mode operasi *grid-connected* merupakan mode operasi dimana sistem terhubung ke *main grid*. Pembangkit yang ada beroperasi bersama dengan *main grid* untuk memenuhi kebutuhan sistem. Mode operasi ini menekankan pada minimisasi harga *import* dari PCC (*Point of Common Coupling*), meningkatkan *power factor* di PCC, dan optimisasi profil tegangan sistem.



Gambar 2. 2 Tipe *grid* mikro *grid-connected*

Dalam tugas akhir ini, tipe operasi sistem *grid* mikro hibrida yang digunakan adalah *grid-connected*. Dengan tipe operasi ini, Perusahaan Listrik Negara diintegrasikan dengan sistem *grid* mikro sehingga pembangkit tersebar yang terpasang tidak secara mandiri menanggung semua beban sistem. Beberapa sumber energi listrik yang dimodelkan dalam sistem *grid* mikro hibrida yaitu turbin mikro, generator diesel, sel surya, dan *energy storage*.

2.1.3 Sel Surya

Pembangkit sel surya merupakan sistem yang mengubah cahaya matahari secara langsung menjadi energi listrik. Karakteristik dari sel surya saat beroperasi berbeda dengan kondisi standar (1000 W/m^2 , suhu sel 25°C) maka pengaruh radiasi dan suhu pada karakteristik sel surya dimodelkan. Pengaruh intensitas matahari dimodelkan dengan mempertimbangkan output daya dari modul sel surya yang akan sebanding dengan radiasinya. Modul sel surya diuji dalam *Standard Test Condition (STC)*. Daya keluaran dari modul sel surya dapat dihitung dengan persamaan :

$$P_{pv} = M \left(P_{stc} \frac{G_{ing}}{G_{stc}} + (1 + k(T_c - T_r)) \right) \quad (2.1)$$

Dimana:

1. P_{pv} adalah daya keluaran dari modul saat radiasi (W).
2. P_{STC} adalah daya maksimum modul saat STC dalam (W)
3. G_{ING} adalah radiasi aktual dalam (W/m^2)
4. G_{STC} adalah radiasi saat STC (1000 W/m^2)
5. M adalah jumlah modul sel surya
6. k adalah koefisien suhu untuk daya modul dalam ($\%/^\circ\text{C}$)
7. T_c adalah suhu sel dalam ($^\circ\text{C}$)

8. T_r adalah referensi suhu (25°C)

Dalam tugas akhir ini, digunakan modul sel surya SOLAREX MSX-83. Karakteristik dari modul ini yaitu :

1. Daya maksimum saat *STC* (*P_{STC}*) = 83 W
2. Tegangan saat daya maksimum = 17.1 V
3. Arus saat daya maksimum = 4.85 A
4. Arus *short-circuit* saat *STC* = 5.27 A
5. Tegangan *open-circuit* saat *STC* = 21.2 V
6. Koefisien suhu untuk daya (k) = $-0.5 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$

Biaya operasi untuk sel surya adalah sebagai berikut:

$$CF(P_{PV}) = bP_{PV} \quad (2.2)$$

Dimana:

1. $CF(P_{PV})$ adalah total biaya operasi sel surya dalam \$/h.
2. b adalah koefisien sel surya, dengan masing-masing nilai $b=0,55$.
3. P_{PV} adalah keluaran daya dari sel surya dalam *mW*.

2.1.4 Turbin Mikro

Turbin mikro merupakan generator turbin gas kecepatan tinggi bertenaga mulai 25-500 *kW*. Turbin mikro mempunyai sistem yang mengubah energi mekanik menjadi energy listrik. Frekuensinya berada pada rentang 1.4-4 *kHz*. Frekuensi tinggi ini diubah ke frekuensi yang diinginkan 50/60 *Hz* menggunakan konverter.

Dalam tugas akhir ini, digunakan 200 *kW Capstone Micro Turbine*. Biaya operasi yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

$$CF(P_{MT}) = a + bP_{MT} + cP_{MT}^2 \quad (2.3)$$

Dimana:

1. $CF(P_{MT})$ adalah total biaya operasi turbin mikro dalam \$/h.
2. a , b , dan c adalah koefisien turbin mikro, dengan masing-masing nilai $a=9$, $b=0,3$, dan $c=0,000315$.
3. P_{MT} adalah keluaran daya dari turbin mikro dalam *mW*.

2.1.5 Generator Diesel

Generator diesel sudah dikembangkan lebih dari 100 tahun yang lalu. Teknologi ini merupakan yang pertama digunakan dalam sistem pembangkit tersebar. Generator Diesel ini banyak digunakan di

berbagai sektor ekonomi dengan skala yang berbeda mulai dari 1 kW hingga berpuluh-puluh mW. Pembangkit ini banyak digunakan karena memiliki efisiensi dan keandalan yang tinggi.

Generator diesel adalah jenis yang paling umum digunakan dalam teknologi *grid* mikro saat ini. Biaya operasi dari sistem dapat dinyatakan sebagai fungsi daya keluaran dan dapat dimodelkan dengan polinomial kuadrat. Biaya operasi untuk generator diesel adalah sebagai berikut :

$$CF(P_{DG}) = a + bP_{DG} + cP_{DG}^2 \quad (2.4)$$

Dimana:

1. $CF(P_{DG})$ adalah total biaya operasi generator diesel dalam \$/h.
2. a , b , dan c adalah koefisien generator diesel, dengan masing-masing nilai $a=14,88$, $b=0,3$, dan $c=0,0004351$.
3. P_{DG} adalah keluaran daya dari generator diesel dalam mW.

Dalam tugas akhir ini, digunakan 250-kW diesel generator set (*Generac Industrial Power*) model SD250 60/50 Hz.

2.1.6 Energy Storage

Energy storage mempunyai batas teknis keadaan energi maksimum dan minimum, dan juga daya saat *charging* dan *discharging*. Batasan ini dapat dianggap fungsi waktu untuk memodelkan monitoring kesehatan dan keandalan dari *energy storage* [13]. Batasan teknis dapat diekspresikan dibawah ini:

$$-P_{ES,ch,max}(t) \leq P_{ES}(t) \leq P_{ES,ds,max}(t) \quad (2.5)$$

$$E_{ES,min} \leq E_{ES}(t) \leq E_{ES,max} \quad (2.6)$$

$$E_{ES}(t) = E_{ES}(t-1) - P_{ES}(t) * K \quad (2.7)$$

$$t = 1, 2, \dots, T \quad (2.8)$$

Dimana:

1. $-P_{ES,ch,max}(t)$, batas daya terbangkitkan *energy storage* saat keadaan *charging*.
2. $P_{ES}(t)$, daya terbangkitkan *energy storage*.
3. $P_{ES,ds,max}(t)$, batas daya terbangkitkan *energy storage* saat keadaan *discharging*.
4. $E_{ES,min}(t)$, batas bawah keadaan energi *energy storage*.
5. $E_{ES}(t)$, keadaan energi *energy storage*.

6. $E_{ES,max}(t)$, batas atas keadaan energi *energy storage*.
7. $E_{ES}(t - 1)$, keadaan awal *energy storage*.
8. K , konstanta konversi watt ke joule yang bernilai 3600.
9. t , waktu optimasi.

Biaya operasi dari *energy storage* adalah [14]:

$$CF(P_{ES}) = bP \quad (2.9)$$

Dimana:

1. $CF(P_{ES})$ adalah total biaya operasi *energy storage* dalam \$/h.
2. b adalah koefisien *energy storage*, dengan masing-masing nilai $b=0,119$.
3. P_{ES} adalah keluaran daya dari *energy storage* dalam mW.

2.1.7 Perusahaan Listrik Negara

Perusahaan Listrik Negara adalah perusahaan yang melayani aspek kelistrikan di Indonesia. Dalam sistem *grid-connected* ini, Perusahaan Listrik Negara diintegrasikan ke *grid* mikro hibrida. Perusahaan Listrik Negara diasumsikan mempunyai daya yang terbatas, karena Perusahaan Listrik Negara memiliki *cost function* tersendiri. Berikut perhitungan *cost function* dari Perusahaan Listrik Negara (PLN):

$$\begin{aligned} \text{Harga listrik per kwh (l) [15]} & : \text{Rp. 1.342,98} \\ \text{Kurs IDR ke USD (K)} & : \text{Rp. 13.333,33} \\ \text{Cost Function (CF(P}_{PLN}))} & : \frac{l}{K \times 1000} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Dimana:

1. $CF(P_{PLN})$ adalah total biaya operasi PLN dalam \$/h.
2. P_{PLN} adalah keluaran daya dari PLN dalam mW.

2.2 Economic Dispatch

Economic Dispatch merupakan pembagian pembebanan pada pembangkit untuk beroperasi secara ekonomis pada kondisi beban tertentu. Fungsi total biaya dari masing-masing pembangkit dimodelkan dengan persamaan:

$$CF(P) = CF(P_{ES}) + CF(P_{DG}) + CF(P_{MT}) + CF(P_{PV}) + CF(P_{PLN}) \quad (2.11)$$

Dimana:

1. $CF(P)$, total biaya operasi pembangkitan.
2. $CF(P_{ES})$, biaya operasi pembangkit *energy storage*.

3. $CF(P_{DG})$, biaya operasi pembangkit generator diesel.
4. $CF(P_{MT})$, biaya operasi pembangkit turbin mikro.
5. $CF(P_{PV})$, biaya operasi dan investasi sel surya.
6. $CF(P_{PLN})$, biaya pembelian daya dari Perusahaan Listrik Negara.

2.2.1 Constraint

Terdapat beberapa constraint yang perlu dipertimbangkan dalam operasi *economic dispatch* yaitu:

1. Keseimbangan Daya

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_L \quad (2.12)$$

Dimana:

- a. P_L , total beban sistem.
 - b. P_i , total pembangkitan.
2. Kapasitas Pembangkit

$$P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{max} \quad (2.13)$$

Dimana:

- a. P_i^{min} , daya operasi pembangkitan *minimum* dari unit- i .
- b. P_i , daya operasi pembangkitan dari unit- i .
- c. P_i^{max} , daya operasi pembangkitan *maximum* dari unit- i .

Pengerjaan tugas akhir ini terdapat dua *constraint* yang digunakan yaitu *equality constraint* dan *inequality constraint*. *Constraint* ini ada sebagai batasan dan syarat untuk sistem beroperasi.

2.2.1.1 Equality Constraint

Equality constraint merupakan batasan yang merepresantikan keseimbangan daya dalam sistem. sistem *grid* mikro hibrida terdapat lima pembangkit yang terdiri dari *energy storage*, generator diesel, turbin mikro, sel surya, dan PLN. Kemudian, beban *grid* mikro hibrida nantinya akan dioptimasi oleh kelima pembangkit. Sehingga fungsi persamaan dinyatakan sebagai berikut:

$$P_{load} = P_{ES} + P_{DG} + P_{MT} + P_{PV} + P_{PLN} \quad (2.14)$$

Dimana:

1. P_{load} , total beban *grid* mikro hibrida.
2. P_{ES} , daya pembangkitan *energy storage*.
3. P_{DG} , daya pembangkitan generator diesel.

4. P_{MT} , daya pembangkitan turbin mikro.
5. P_{PV} , daya pembangkitan sel surya.
6. P_{PLN} , daya pembangkitan Perusahaan Listrik Negara.

2.2.1.2 Inequality Constraint

Inequality constraint merupakan batasan yang merepresentasikan kapasitas daya dari unit pembangkit. Terdapat lima pembangkit yang mendukung operasi sistem *grid* mikro hibrida. Pembangkit tersebut mempunyai kapasitas daya yang berbeda. Fungsi pertidaksamaannya adalah sebagai berikut:

$$-P_{ES,ch,max} \leq P_{ES} \leq P_{ES,ds,max} \quad (2.15)$$

$$P_{DG,min} \leq P_{DG} \leq P_{DG,max} \quad (2.16)$$

$$P_{MT,min} \leq P_{MT} \leq P_{MT,max} \quad (2.17)$$

$$P_{PV,min} \leq P_{PV} \leq P_{PV,max} \quad (2.18)$$

$$P_{PLN,min} \leq P_{PLN} \leq P_{PLN,max} \quad (2.19)$$

Dimana:

1. $P_{ES,ch,max}$, daya operasi maksimum *energy storage* saat *charging*.
2. $P_{ES,ds,max}$, daya operasi maksimum *energy storage* saat *discharging*.
3. $P_{DG,min}$, daya operasi minimum generator diesel.
4. $P_{DG,max}$, daya operasi maksimum generator diesel.
5. $P_{MT,min}$, daya operasi minimum turbin mikro.
6. $P_{MT,max}$, daya operasi maksimum turbin mikro.
7. $P_{PV,min}$, daya operasi minimum sel surya.
8. $P_{PV,max}$, daya operasi maksimum sel surya.
9. $P_{PLN,min}$, daya operasi minimum PLN.
10. $P_{PLN,max}$, daya operasi maksimum PLN.

Energy storage memiliki *constraint* sendiri, sehingga memiliki fungsi sebagai berikut:

$$E_{ES,min} \leq E_{ES}(t) \leq E_{ES,max} \quad (2.20)$$

$$E_{ES}(t) = E_{ES}(t - 1) - P_{ES}(t) * K \quad (2.21)$$

$$t = 1, 2, \dots, T \quad (2.22)$$

Dimana:

1. $E_{ES,min}(t)$, batas bawah energi *energy storage*.
2. $E_{ES}(t)$, keadaan energi *energy storage*.
3. $E_{ES,max}(t)$, batas atas energi *energy storage*.
4. $E_{ES}(t - 1)$, keadaan awal energi *energy storage*
5. P_{ES} , daya terbangkitkan *energy storage*.
6. K , konstanta konversi *watt* ke *joule* yang bernilai 3600.
7. t , waktu optimasi.

Tabel 2.1 Spesifikasi unit pembangkit

	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5
Jumlah Modul	1	1	1	37	1
P_{max} (mW)	0,01	0,25	0,2	0,1	0,1
P_{min} (mW)	-0,01	0,05	0,05	0	0
c (\$/mW ² H)	-	0,000435	0,000315	-	-
b (\$/mWH)	0,119	0,3	0,3	0,545	0,00013
a (\$/H)	-	14,88	9	-	-
Kapasitas (mWH)	0,2	-	-	-	-
SOC_{max} (mWH)	0,16	-	-	-	-
SOC_{min} (mWH)	0,04	-	-	-	-

BAB 3

ECONOMIC DISPATCH UNTUK GRID MIKRO HIBRIDA DENGAN DISTRIBUTED ENERGY STORAGE BERBASIS METODE QUADRATIC PROGRAMMING

3.1 *Quadratic Programming*

Model *linear programming* merupakan sebuah model yang sangat handal untuk digunakan dalam analisis berbagai permasalahan *sains*, industri, *engineering* dan bisnis. Namun, model ini memiliki keterbatasan karena tidak semua permasalahan berbentuk *linear*. Selain itu, model *linear* hanya memberikan hasil terbaik pada permasalahan dengan orde pertama. Model yang berada satu tingkat di atas model ini adalah *quadratic programming*. *Quadratic programming* menyelesaikan permasalahan *non linear* dan memodelkannya ke dalam sebuah fungsi objektif. *Quadratic programming* merupakan sebuah metode optimasi yang meminimalkan atau memaksimalkan sebuah fungsi objektif bilangan berhingga untuk menghasilkan nilai suatu variabel yang dioptimasi (x) dengan memenuhi batasan persamaan (*equality constraint*) dan batasan pertidaksamaan (*inequality constraint*) yang *linear* [16]. Fungsi objektif yang merupakan persamaan standar pada *quadratic programming* adalah sebagai berikut:

1. Fungsi objektif :

$$F(x) = f + C^T x + \frac{1}{2} x^T H x \quad (3.1)$$

2. *Inequality constraint*:

$$lb \leq Ax \leq ub \quad (3.2)$$

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad (3.3)$$

3. *Equality constraints*:

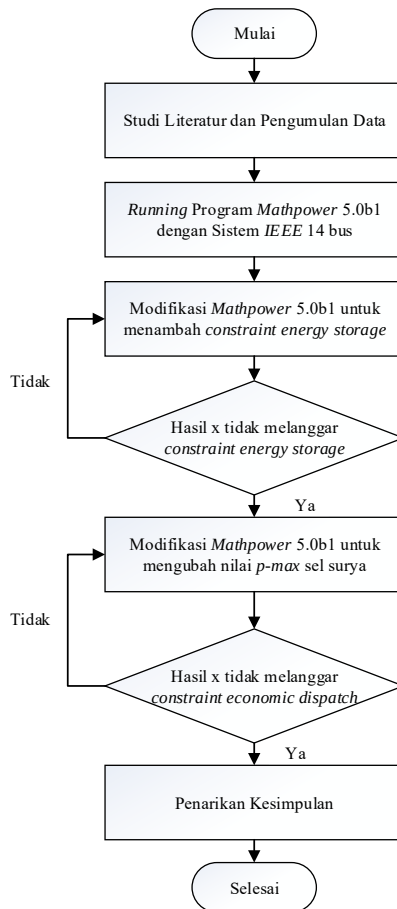
$$lb = ub = b_{eq} \quad (3.4)$$

$$Ax = b_{eq} \quad (3.5)$$

Hasil perhitungan *quadratic programming* yaitu menentukan nilai x yang menghasilkan fungsi objektif dengan nilai minimum.

3.2 Algoritma Pelaksanaan Tugas Akhir

Economic dispatch grid mikro hibrida dengan *distributed energy storage* dalam tugas akhir ini diselesaikan dengan menggunakan *quadratic programming*. Metode dan sistem kelistrikan dimodelkan dalam bentuk *m file* dengan menggunakan *MATLAB*. Simulasi dan analisis program dilakukan sesuai dengan teori dan variabel yang ada. Berikut adalah algoritma pelaksanaan tugas akhir ini.



Gambar 3. 1 Algoritma penyelesaian tugas akhir

Output dari tugas akhir ini adalah data yang menyajikan *economic dispatch grid* untuk mikro hibrida dengan *distributed energy storage*. Dalam praktiknya *energy storage* akan terjadi fluktuasi daya yang dihasilkan atau saat *discharging* dan daya yang dibutuhkan atau saat *charging*. Kemudian dengan adanya pembangkit listrik sel surya, tentunya pembangkit ini hanya beroperasi di waktu yang terbatas. Sehingga diperlukannya sebuah program yang dapat menangani masalah tersebut.

Pembuatan program diawali dengan studi literatur tentang *economic dispatch*, metode *quadratic programming*, dan batasan yang harus diperhatikan. Sehingga hasil *output* dari studi literatur adalah *cost function*, data untuk masing-masing unit pembangkit, dan data beban. *Cost function* dan data untuk masing-masing unit pembangkit kemudian diimplementasikan ke dalam *case IEEE 14 bus*. Data beban dalam *case IEEE 14 bus* kemudian direduksi agar dapat diasumsikan menjadi sebuah sistem *grid* mikrod hibrida dengan lima unit pembangkit listrik, yaitu *energy storage*, generator diesel, turbin mikro, sel surya, dan PLN. Kemudian *running* program *mathpower 5.0b1* untuk membuktikan implementasi dapat berjalan dan mendapatkan data yang konvergen.

Langkah berikutnya yaitu dengan modifikasi program untuk waktu selama t sehingga didapatkan data pembangkitan daya listrik selama 24 jam. Hal ini diperlukan untuk menyesuaikan dengan adanya unit pembangkit *energy storage* dan sel surya. Setelah modifikasi program selesai dengan didapatkan data yang konvergen, langkah selanjutnya adalah dengan menambah *constraint* dari *energy storage*. *Constraint* ini diperlukan agar sesuai dengan keadaan di lapangan, karena *energy storage* dalam praktiknya tidak akan *discharge* secara terus menerus sampai melebihi batas *SOC minimum energy storage*. Kemudian saat *energy storage* dalam keadaan *charging*, *energy storage* tidak mungkin akan selalu *charging* secara terus menerus sampai melebihi batas *SOC maksimum energy storage*. Modifikasi program ini dinilai selesai apabila data yang dihasilkan dari *running* program tidak melanggar *constraint energy storage* dan data yang dihasilkan harus konvergen.

Langkah terakhir adalah dengan modifikasi program untuk mengganti nilai p -max dari unit pembangkit listrik sel surya. Hal ini perlu diperhatikan karena pembangkit listrik sel surya hanya beroperasi dalam waktu terbatas. Dalam waktu terbatas ini, daya yang

dihasilkan dari pembangkit sel surya berbeda-beda untuk tiap waktunya. Hal ini diperlukan untuk menyesuaikan dengan keadaan yang ada di lapangan. Modifikasi program *mathpower* dinyatakan selesai apabila *constraint energy storage* tidak dilanggar, *p-max* dari unit pembangkit sel surya dapat beroperasi, dan data hasil *running* program yang konvergen.

Kesimpulan yang dituliskan berupa besarnya daya yang terbangkitkan oleh masing-masing unit pembangkit listrik dan besarnya biaya yang harus dikeluarkan untuk sistem *grid* mikro hibrida dengan *distributed energy storage*.

3.3 Penerapan *Quadratic Programming MATLAB* pada *Economic Dispatch*

Quadratic programming merupakan sebuah fungsi dalam *MATLAB* untuk meminimalkan sebuah fungsi objektif berupa persamaan kuadrat sehingga akan didapatkan nilai paling optimal dari variabel yang ingin dicari. Implementasi dari *quadratic programming* pada *economic dispatch* menggunakan fungsi biaya pembangkitan sebagai fungsi objektif yang diminimalkan dan daya aktif yang dibangkitkan oleh setiap unit pembangkit (P_G) sebagai variabel yang dicari. Fungsi *quadratic programming* dalam *MATLAB* dituliskan dalam fungsi *quadprog* dan disempurnakan pada *mathpower 5.0b1* menjadi *qps_mathpower*. *Qps_mathpower* menggunakan *linear constraint* yang spesifik yang berupa A , l , dan u . Berikut adalah sintaks optimasi menggunakan *qps_mathpower*:

$$\min \frac{1}{2} x^T H x + C^T x \quad (3.6)$$

Dengan *linear constraint* dan batasan variabel berupa:

$$l \leq A * x \leq u \quad (3.7)$$

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad (3.8)$$

3.3.1 Variabel Input dan Output pada *Quadratic Programming* Menggunakan *qps_mathpower*

Sintaks program dalam penyelesaian masalah *quadratic programming* membutuhkan nilai *input* berupa komponen pembentuk fungsi objektif yang diminimalkan dengan batasan dari fungsi tersebut. Berikut adalah variabel *input* tersebut:

1. H , matriks yang berisi koefisien kuadrat dari fungsi objektif yang diminimalkan. Dalam *economic dispatch*, matriks H berisi koefisien kuadrat fungsi biaya untuk setiap unit pembangkit.
2. C , matriks yang berisi koefisien linier fungsi objektif yang diminimalkan. Dalam *economic dispatch*, matriks C berisi koefisien linear fungsi biaya untuk setiap unit pembangkit.
3. A , variabel matriks yang mendefinisikan *linear constraint* yang digunakan, berupa persamaan (*equality constraint*) dan pertidaksamaan (*inequality constraint*).
4. l dan u , adalah batas bawah dan batas atas dari *linear constraint* yang digunakan (A) sebagaimana persamaan $l \leq A * x \leq u$. l dan u memiliki nilai *default* sebesar $-\inf$ dan $\inf$.
5. x_{min} dan x_{max} , adalah batas bawah dan batas atas variabel x . Nilai x_{min} dan x_{max} memiliki nilai *default* sebesar $-\inf$ dan $\inf$.
6. x_0 , adalah nilai awal pada optimasi variabel yang dicari (x). Nilai x_0 ini dapat disesuaikan dan diabaikan apabila tidak terdapat nilai inisiasi dalam sistem.
7. opt , adalah fungsi pada *qps_mathpower* yang berisi tentang pengaturan beberapa variabel dan fungsi yang digunakan dalam proses optimasi. opt berisi antara lain algoritma penyelesaian optimasi fungsi objektif, pengaturan tampilan hasil optimasi dan beberapa pengaturan spesifik untuk tiap algoritma optimasi yang digunakan.

Variabel *input* di atas kemudian diproses dengan *sintaks qps_mathpower* dan menghasilkan *output* hasil optimasi fungsi objektif yang diminimalkan. Berikut adalah variabel *output* yang dihasilkan:

1. x , adalah matriks yang berisi nilai variabel optimasi yang dicari dari proses meminimalisasikan fungsi objektif. Pada *economic dispatch*, x tersusun atas nilai sudut tegangan (θ_i) dan daya optimal yang dibangkitkan oleh masing-masing unit pembangkit (P_G).
2. f , nilai total dari fungsi objektif yang diminimalkan. Nilai f didapatkan dari substitusi nilai x optimal yang didapatkan ke dalam fungsi kuadrat yang diminimalkan. Pada *economic*

- dispatch*, f adalah biaya total pembangkitan dari seluruh unit pembangkitan.
3. *exitflag*, kode yang menunjukkan status hasil proses optimasi yang dilakukan. *exitflag* akan bernilai 1 jika proses optimasi menghasilkan nilai konvergen dan bernilai 0 atau negatif apabila proses optimasi mengalami kegagalan (tidak konvergen).
 4. *output*, keterangan yang berisi rincian algoritma yang digunakan dalam proses optimasi.
 5. *lambda*, keluaran yang berisi koefisien panggil *lagrange* dan *kuhn tucker* yang dihasilkan berdasarkan *constraint* yang digunakan.

3.3.2 Sintaks Quadratic Programming pada Mathpower

Terdapat beberapa model perintah (*sintaks*) yang dapat digunakan dalam pemanggilan fungsi *quadratic programming* menggunakan *qps_mathpower*. Hal ini dikarenakan tidak semua batasan dari *quadratic programming* digunakan untuk menyelesaikan optimasi sebuah fungsi objektif. Permasalahan dengan batasan yang berbeda, akan menggunakan *sintaks* yang berbeda pula. Berikut adalah beberapa *sintaks* yang digunakan untuk memanggil perintah fungsi *quadratic programming* menggunakan *qps_mathpower*:

1. $(x, f, \text{exitflag}, \text{output}, \text{lambda}) = \text{qps_mathpower}(H, C, A, l, u)$
Sintaks ini digunakan untuk mendapatkan nilai variabel yang dicari (x) dengan meminimalkan fungsi $\frac{1}{2}x^THx + C^Tx$ dengan memperhatikan seluruh *linear constraint* yang ada, yaitu A, l, u .
2. $(x, f, \text{exitflag}, \text{output}, \text{lambda}) = \text{qps_mathpower}(H, C, A, l, u, x_{\min}, x_{\max})$
Menyelesaikan permasalahan optimasi fungsi kuadrat sebagaimana disebutkan sebelumnya dengan tambahan *constraint* berupa batas minimum dan maksimum nilai variabel yang dicari dalam variabel l dan u .
3. $(x, f, \text{exitflag}, \text{output}, \text{lambda}) = \text{qps_mathpower}(H, C, A, l, u, x_{\min}, x_{\max}, x_0)$
Menyelesaikan permasalahan optimasi fungsi kuadrat di atas dimulai dengan inisiasi menggunakan nilai dalam matriks x_0 .

Jika tidak terdapat batas minimal dan maksimal variabel yang dicari, maka *sintaks* dituliskan $x_{min} = []$ dan $x_{max} = []$.

4. $(x, f, exitflag, output, lambda) = qps_mathpower (H, C, A, l, u, x_{min}, x_{max}, x_0, opt)$

Menyelesaikan optimasi fungsi objektif dengan pilihan pengaturan optimasi tertentu yang telah disediakan oleh *MATLAB*. Apabila tidak terdapat pengaturan khusus pada program yang digunakan, maka *opt* dapat diabaikan atau dituliskan $[]$.

3.3.3 Penerapan Quadratic Programming MATLAB pada Economic Dispatch

3.3.3.1 Penyusunan Koefisien Kuadrat Fungsi Biaya Pembangkitan

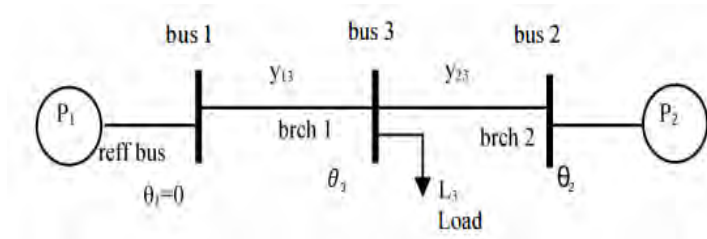
Variabel H adalah koefisien kuadrat dari fungsi objektif pada *quadratic programming*. Pada *economic dispatch grid* mikro hibrida dengan *distributed energy storage* menggunakan *quadratic programming*, matriks H adalah matriks simetris yang berisi koefisien kuadrat fungsi biaya pembangkitan untuk masing-masing unit pembangkit dalam kurun waktu t (a_{it}). Matriks H berukuran:

$$[(nb + ng : nb + ng) * t] \quad (3.9)$$

Dimana:

1. nb adalah jumlah bus sistem.
2. ng adalah jumlah unit pembangkit.
3. t adalah waktu operasi sistem.

Koefisien kuadrat pada fungsi biaya pembangkitan pada waktu t (a_{it}) berada pada kolom pembangkit secara diagonal mulai dari $nb + 1$ hingga ng . Untuk menggambarkan pembentukan matriks H dan variabel-variabel lain yang dibutuhkan dalam penyelesaian *economic dispatch* untuk *grid* mikro hibrida dengan *distributed energy storage* menggunakan *quadratic programming*, digunakan asumsi sebuah sistem kelistrikan sederhana dengan 3 bus, 2 saluran transmisi, dan 2 unit pembangkit. Kedua unit pembangkit ini berturut turut adalah *energy storage* dan sel surya. Sistem kelistrikan ini diasumsikan beroperasi selama 2 jam.



Gambar 3.2 Contoh sistem kelistrikan sederhana

Dengan sisitem di atas dimana pembangkit satu adalah *energy storage*, dan pembangkit dua adalah sel surya, matriks H yang dibentuk adalah sebagai berikut:

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{22} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Keterangan:

1. c_{12} , koefisien orde 2 fungsi biaya pembangkitan pembangkit 1 pukul 2.

3.3.3.2 *Penyusunan Koefisien Linear fungsi Biaya Pembangkitan*

Koefisien *linear* pada fungsi biaya pembangkitan untuk masing-masing unit pembangkit (b_{it}) selanjutnya menjadi komponen dari matriks C . Matriks C memiliki ukuran:

$$[(nb + ng): 1] \quad (3.11)$$

Koefisien b_{it} berada pada kolom $nb + 1$ sampai dengan ng . Untuk beban yang dinamis dalam kurun waktu t , matriks C dikalikan sesuai dengan jumlah waktu t , sehingga ukuran matrik C menjadi:

$$[(nb + ng): 1] * t \quad (3.12)$$

Bentuk matriks C yang dihasilkan dari sistem kelistrikan sederhana adalah:

$$C = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_{11} \\ b_{21} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_{12} \\ b_{22} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Keterangan:

1. b_{11} , adalah koefisien orde satu fungsi biaya pembangkitan pembangkit 1 pukul 1.

3.3.3.3 Variabel Optimasi (x)

Variabel optimasi (x) merupakan nilai yang dihasilkan dari proses optimasi. Nilai ini berisi sudut tegangan tiap bus dan daya aktif yang dibangkitkan oleh pembangkit untuk tiap waktu tertentu. Matriks ini disusun sejumlah waktu operasi sistem (t), sehingga matriks x memiliki ukuran:

$$[[nb + ng] * t] \quad (3.14)$$

Bentuk matriks x yang dihasilkan adalah sebagai berikut:

$$x = \begin{bmatrix} \theta_{11} \\ \theta_{21} \\ \theta_{31} \\ P_{11} \\ P_{21} \\ \theta_{12} \\ \theta_{22} \\ \theta_{32} \\ P_{12} \\ P_{22} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Keterangan:

1. θ_{12} , sudut tegangan pada bus 1 pukul 2.

2. P_{12} , daya aktif yang dibangkitkan oleh unit pembangkit 1 pada pukul 2.

3.3.3.4 Penyusunan Batasan (Constraint)

Batasan permasalahan *economic dispatch grid* mikro hibrida dengan *distributed energy storage* direpresentasikan dengan matriks A . Matriks A tersusun atas $[A_{eq}]$ untuk *equality constraint* dan $[A_{ineq}]$ untuk *inequality constraint*. $[A_{eq}]$ tersusun atas matriks yang berisi batasan *power balance* $[PG]$ dengan ukuran:

$$[[nb: (nb + ng)] * t] \quad (3.16)$$

Constraint energy storage $[ES]$ berukuran:

$$[[1: (nb + ng)] * t] \quad (3.17)$$

Constraint sel surya $[PV]$ berukuran:

$$[[1: (nb + ng)] * t] \quad (3.18)$$

Constraint energy storage diperlukan agar *energy storage* tidak bekerja *charging* secara terus menerus melebihi kemampuan SOC_{max} atau bekerja *discharging* secara terus-menerus melebihi kemampuan SOC_{min} . Kemudian *constraint sel surya* diperlukan untuk mengubah nilai $p\text{-max}$ dari sel surya untuk tiap waktu yang telah ditentukan, karena sel surya tidak mungkin bekerja selama waktu 24 jam. Matriks $[ES]$ dan $[PV]$ masing masing berjumlah t untuk sistem kelistrikan yang dioptimasi selama waktu t . Bentuk matriks $[A_{eq}]$, $[ES]$, dan $[PV]$ yang dibentuk adalah sebagai berikut:

$$PG = \begin{bmatrix} y_{13} & 0 & -y_{13} & -1 & 0 \\ 0 & y_{23} & -y_{23} & 0 & -1 \\ -y_{31} & -y_{32} & y_{33} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$ES = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$PV = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Keterangan:

1. y_{13} , admitansi antara bus 1 dan bus 3.

Pada matriks $[ES]$ dan $[PV]$, baris pertama menyatakan jam ke-1 dan baris kedua menyatakan jam ke-2. Matriks $[A_{ineq}]$ berisi batasan saluran transmisi $[P_{INi}]$. Matriks ini berukuran:

$$[(2 * nbr) : (nb + ng)] * t \quad (3.22)$$

Kemudian matriks ini disusun sesuai dengan jumlah waktu t yang ditentukan. Bentuk matriks A_{ineq} yang dibentuk adalah sebagai berikut:

$$PINi = \begin{bmatrix} y_{13} & 0 & -y_{13} & 0 & 0 \\ 0 & y_{23} & -y_{23} & 0 & 0 \\ -y_{13} & 0 & y_{13} & 0 & 0 \\ 0 & -y_{23} & y_{23} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Keterangan:

1. y_{13} , admitansi antara bus 1 dan bus 3.

Kedua matriks $[A_{eq}]$ dan $[A_{ineq}]$ kemudian digabungkan menjadi matriks $[A]$. Sementara matriks $[ES]$ dan $[PV]$ diletakkan pada bagian paling bawah. Bentuk matriks $[A]$ yang dibentuk adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & P_G & & & & & & & & \\ & P_{INi} & & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & P_G & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & P_{INi} & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

3.3.3.5 Penyusunan Batas Bawah dan Batas Atas Constraint

Matriks l dan u adalah batas bawah dan batas atas untuk membatasi hasil perkalian matriks $[A]$ dengan $[x]$ dengan memenuhi persamaan *constraint*:

$$l \leq A * x \leq u \quad (3.25)$$

Persamaan *constraint* tersebut kemudian menghasilkan matriks [Z]. Bentuk matriks [Z] yang dibentuk dari hasil perkalian antara matriks [A] dan matriks [x] adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix}
 & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & P_G & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & P_{INI} & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & P_G & & \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & P_{INI} & & \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \theta_{11} \\ \theta_{21} \\ \theta_{31} \\ P_{11} \\ P_{21} \\ \theta_{12} \\ \theta_{22} \\ \theta_{32} \\ P_{12} \\ P_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{13}\theta_{11} - y_{13}\theta_{31} - P_{11} \\ y_{23}\theta_{21} - y_{23}\theta_{31} - P_{23} \\ -y_{31}\theta_{11} - y_{32}\theta_{21} + y_{33}\theta_{31} \\ y_{13}\theta_{11} - y_{13}\theta_{31} \\ y_{23}\theta_{21} - y_{23}\theta_{31} \\ -y_{13}\theta_{11} + y_{13}\theta_{31} \\ -y_{23}\theta_{21} + y_{23}\theta_{31} \\ y_{13}\theta_{12} - y_{13}\theta_{32} - P_{12} \\ y_{23}\theta_{22} - y_{23}\theta_{32} - P_{22} \\ -y_{31}\theta_{12} - y_{32}\theta_{22} + y_{33}\theta_{32} \\ y_{13}\theta_{12} - y_{13}\theta_{32} \\ y_{23}\theta_{22} - y_{23}\theta_{32} \\ -y_{13}\theta_{12} + y_{13}\theta_{32} \\ -y_{23}\theta_{22} + y_{23}\theta_{32} \\ P_{11} \\ P_{11} + P_{12} \\ P_{21} \\ P_{22} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Matriks [Z] kemudian dibatasi dengan *l* dan *u* yang sesuai dengan *constraint* yang telah ditentukan, bentuk matriks [*l*], [*Z*], dan [*u*] menjadi:

$$\begin{bmatrix} P_{L11} \\ P_{L21} \\ P_{L31} \\ P_{min13} \\ P_{min23} \\ P_{min13} \\ P_{min23} \\ P_{L12} \\ P_{L22} \\ P_{L32} \\ P_{min13} \\ P_{min23} \\ P_{min13} \\ P_{min23} \\ P_{min1} \\ P_{min1} \\ P_{min2} \\ P_{min2} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} y_{13}\theta_{11} - y_{13}\theta_{31} - P_{11} \\ y_{23}\theta_{21} - y_{23}\theta_{31} - P_{23} \\ -y_{31}\theta_{11} - y_{32}\theta_{21} + y_{33}\theta_{31} \\ y_{13}\theta_{11} - y_{13}\theta_{31} \\ y_{23}\theta_{21} - y_{23}\theta_{31} \\ -y_{13}\theta_{11} + y_{13}\theta_{31} \\ -y_{23}\theta_{21} + y_{23}\theta_{31} \\ y_{13}\theta_{12} - y_{13}\theta_{32} - P_{12} \\ y_{23}\theta_{22} - y_{23}\theta_{32} - P_{22} \\ -y_{31}\theta_{12} - y_{32}\theta_{22} + y_{33}\theta_{32} \\ y_{13}\theta_{12} - y_{13}\theta_{32} \\ y_{23}\theta_{22} - y_{23}\theta_{32} \\ -y_{13}\theta_{12} + y_{13}\theta_{32} \\ -y_{23}\theta_{22} + y_{23}\theta_{32} \\ P_{11} \\ P_{11} + P_{12} \\ P_{21} \\ P_{22} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} P_{L11} \\ P_{L21} \\ P_{L31} \\ P_{max13} \\ P_{max23} \\ P_{max13} \\ P_{max23} \\ P_{L12} \\ P_{L22} \\ P_{L32} \\ P_{max13} \\ P_{max23} \\ P_{max13} \\ P_{max23} \\ P_{max1} \\ P_{max1} \\ P_{max2} \\ P_{max2} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

3.3.3.6 Penyusunan Variabel Optimasi Awal (X_0) dan Batas Tiap Variabel

Nilai dari variabel x harus diinisiasi, sehingga penentuan hasil nilai x akan lebih mudah dan cepat menuju titik himpunan penyelesaian karena memiliki nilai awal. Nilai x_0 adalah berupa nilai awal yang dapat diubah-ubah. Jika dalam program tidak dilakukan inisiasi, program akan memberikan nilai x_0 awal *default* dalam penyelesaian masalah *economic dispatch*. Nilai x_0 berupa matriks dengan jumlah baris sesuai dengan jumlah baris sesuai dengan jumlah variabel x yang dioptimasi [17]. Berikut matriks $[x_0]$ yang dibentuk:

$$x_0 = \begin{bmatrix} \theta_{11} \\ \theta_{21} \\ \theta_{31} \\ P_{11} \\ P_{21} \\ \theta_{12} \\ \theta_{22} \\ \theta_{32} \\ P_{12} \\ P_{22} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Nilai x yang dioptimasi harus memenuhi *constraint* yang digunakan. Nilai x terdiri atas sudut tegangan (θ_{it}) dan daya aktif yang dibangkitkan oleh masing-masing unit pembangkit (P_{Gi}). Dalam batasan sudut tegangan tidak ada batasan spesifik untuk tiap bus, tetapi terdapat batasan daya aktif yang dibangkitkan oleh masing-masing unit pembangkit. Batasan ini terdiri atas batas minimum daya terbangkitkan dan batas atas daya terbangkitkan oleh masing-masing unit pembangkit. Variabel yang dioptimasi berdasarkan persamaan berikut:

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad (3.29)$$

Dari persamaan tersebut, matriks yang dapat dibentuk untuk sistem kelistrikan sederhana adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} -inf \\ -inf \\ -inf \\ P_{1min} \\ P_{2min} \\ -inf \\ -inf \\ -inf \\ P_{1min} \\ P_{2min} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \theta_{11} \\ \theta_{21} \\ \theta_{31} \\ P_{11} \\ P_{21} \\ \theta_{12} \\ \theta_{22} \\ \theta_{32} \\ P_{12} \\ P_{22} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} inf \\ inf \\ inf \\ P_{1max} \\ P_{2max} \\ inf \\ inf \\ inf \\ P_{1max} \\ P_{2max} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

4.1 Variabel Analisis

Program *mathpower 5.0b1* yang telah dibentuk dalam *m file* kemudian disimulasikan dengan menggunakan sistem *IEEE 14 bus* yang telah dimodelkan dalam bentuk *case file*. Analisis dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

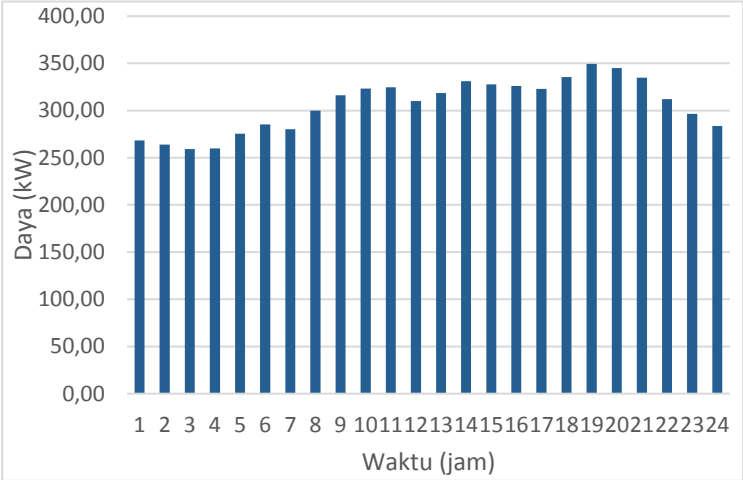
1. Analisis hasil *running* variabel yang dioptimasi [x]
Variabel yang dioptimasi berupa matriks [x] yang tersusun atas sudut tegangan tiap bus (θ_i) dan daya aktif yang dibangkitkan oleh masing-masing unit pembangkit (P_{Gi}) dianalisis sesuai dengan batasan yang telah ditentukan. Sudut tegangan tiap bus (θ_i) tidak terdapat batas tertentu, sehingga secara default akan memiliki nilai ($-\inf \leq \theta \leq \inf$). Daya terbangkitkan oleh masing-masing unit pembangkit dibatasi oleh masing-masing kapasitas unit pembangkit. Selain itu, total daya aktif yang dibangkitkan oleh masing-masing unit pembangkit untuk kurun waktu yang telah ditentukan dibatasi dengan nilai beban yang diminta.
2. Analisis keadaan energi *energy storage*
Keadaan energi *energy storage* perlu dianalisis untuk memenuhi *constraint energy storage* dalam kurun waktu yang telah ditentukan.
3. Biaya pembangkitan tenaga listrik
Biaya pembangkitan kemudian dihitung untuk mengetahui besarnya biaya operasi yang digunakan untuk memenuhi permintaan beban.

4.2 Simulasi dan Analisis Sistem *IEEE 14 Bus* Sebagai *Grid Mikro Hibrida*

Sistem terdiri atas 14 bus, 5 unit pembangkit, dan 20 saluran transmisi. **Gambar 1** pada **Lampiran** menunjukkan gambar ilustrasi sistem *IEEE 14 bus* yang digunakan sebagai *grid* mikro hibrida.

Pada operasi sistem yang dinamis, beban berubah-ubah untuk setiap satuan waktu. Dalam simulasi *grid* mikro hibrida, periode simulasi adalah 24 jam dengan perubahan beban yang terjadi tiap jamnya. Pada *case file* simulasi, beban terdapat pada bus 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, dan 14, masing-masing beban tersebut memiliki

nilai sebesar 21,7 kW, 94,2 kW, 47,8 kW, 7,6 kW, 11,2 kW, 29,5 kW, 9 kW, 3,5 kW, 6,1 kW, 13,5 kW, dan 14,9 kW. Beban terendah bernilai 259 kW yang terjadi pada pukul ke-3 dan beban puncak bernilai 349,37 kW yang terjadi pada pukul ke-19. Data beban yang digunakan secara lengkap terdapat pada **Tabel Lampiran 1**.



Gambar 4.1 Profil beban dinamis yang digunakan dalam simulasi *grid* mikro hibrida

Simulasi dilakukan dengan data pembangkit dan beban di atas, hasil yang didapatkan adalah sebagai berikut:

Tabel 4.1 Daya aktif yang dibangkitkan oleh masing-masing unit pembangkit

T	Unit 1 (kW)	Unit 2 (kW)	Unit 3 (kW)	Unit 4 (kW)	Unit 5 (kW)
1	5,96	80,53	81,82	0,00	100,00
2	5,68	78,68	79,67	0,00	100,00
3	5,39	75,77	77,84	0,00	100,00
4	5,39	76,07	78,27	0,00	100,00
5	6,23	83,32	85,85	0,00	100,00

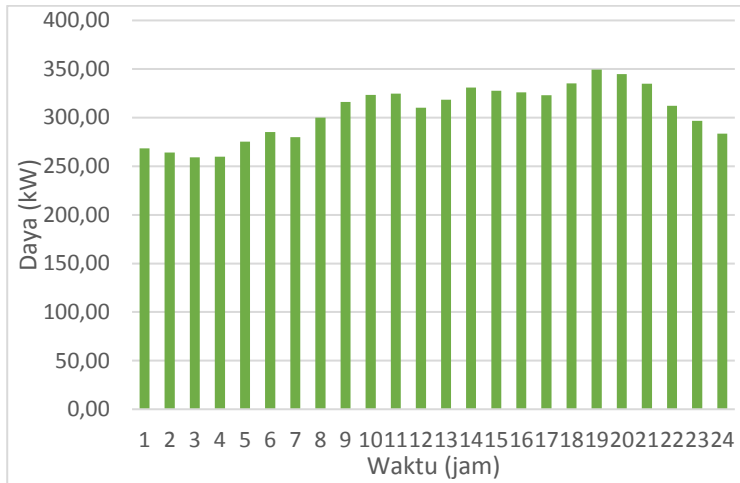
6	6,75	88,58	89,91	0,00	100,00
7	-10,00	72,12	80,00	37,91	99,99
8	-10,00	71,92	79,38	58,63	99,99
9	-10,00	72,02	79,95	74,17	99,99
10	-10,00	72,99	83,50	76,77	99,99
11	-10,00	70,00	77,59	87,13	99,99
12	-10,00	60,01	60,11	99,99	99,99
13	-10,00	71,78	79,98	76,77	99,99
14	-10,00	87,31	89,98	63,81	99,99
15	-10,00	86,96	89,56	61,22	99,99
16	-2,56	89,96	92,95	45,68	100,00
17	8,03	100,79	114,24	0,00	100,00
18	8,91	101,79	124,69	0,00	100,00
19	9,72	109,78	129,87	0,00	100,00
20	9,42	107,71	127,67	0,00	100,00
21	8,91	101,79	124,13	0,00	100,00
22	8,03	100,79	103,29	0,00	100,00
23	7,36	94,26	94,94	0,00	100,00
24	6,75	87,78	89,07	0,00	100,00

Keterangan:

1. Unit 1 : Energy storage
2. Unit 2 : Generator diesel
3. Unit 3 : Turbin Mikro
4. Unit 4 : Sel surya
5. Unit 5 : PLN

Hasil simulasi pada tabel menunjukkan jumlah daya aktif yang terbangkitkan oleh masing-masing unit pembangkit dalam satuan *kilo Watt*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa jumlah daya aktif yang terbangkitkan oleh masing-masing unit pembangkit selama 24 jam adalah 7349,02 kW dan sesuai dengan jumlah daya beban yang dibutuhkan yaitu 7349,02 kW (*power balance*). Selain itu, daya yang

dibangkitkan oleh masing-masing unit pembangkit memenuhi batas daya aktif yang mampu dibangkitkan ($P_{G,i,min} \leq P_{G,i} \leq P_{G,i,max}$) yang berarti program mampu memenuhi kapasitas pembangkit.



Gambar 4.2 Daya yang dibangkitkan pada *grid* mikro hibrida

4.3 Analisis Keadaan Energi *Energy Storage*

Analisis perlu untuk dilakukan karena *constraint* dari *energy storage* memiliki nilai. *Constraint energy storage* yang harus dipenuhi adalah sebagai berikut:

$$144000 \text{ kJ} \leq E_{ES} \leq 576000 \text{ kJ} \quad (4.1)$$

Seperti yang telah dijelaskan pada **Bab 2**, *energy storage* memiliki *constraint* tersendiri. *Energy storage* tidak boleh melanggar *constraint* agar sistem dapat berjalan, sehingga hasil simulasi adalah sebagai berikut:

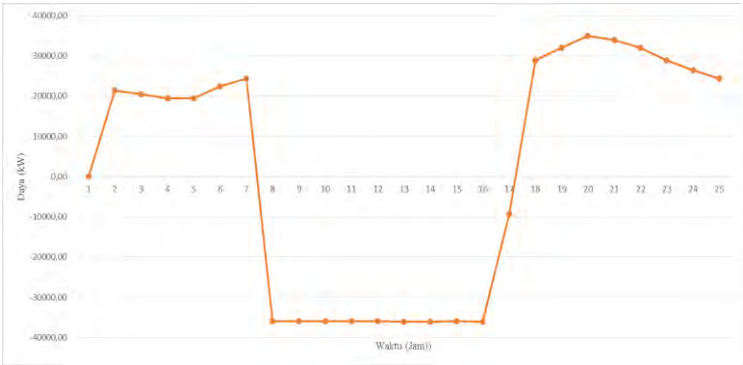
Tabel 4.2 Keadaan *energy storage*

T	<i>Energy Storage</i> (kW)	<i>Energy Storage</i> (kJ)	<i>Energy Storage</i> (kJ)
0	0,00	0,00	360000,00
1	5,96	21445,13	338554,87

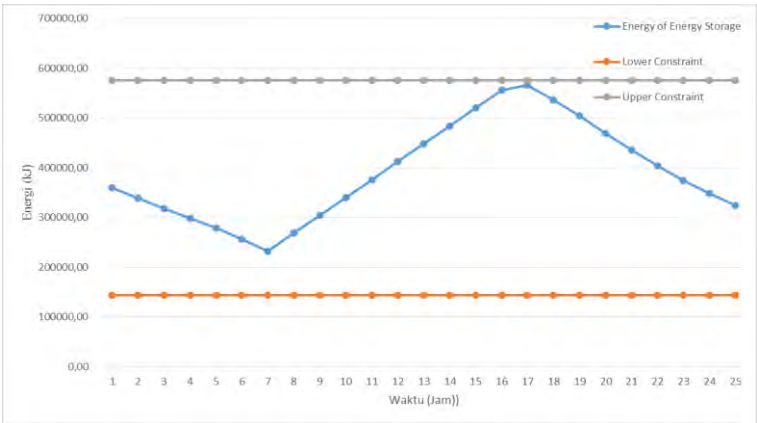
2	5,68	20433,35	318121,52
3	5,39	19402,77	298718,75
4	5,39	19402,77	279315,98
5	6,23	22431,32	256884,66
6	6,75	24313,90	232570,76
7	-10,00	-35986,04	268556,80
8	-10,00	-35986,04	304542,85
9	-10,00	-35985,81	340528,66
10	-10,00	-35986,74	376515,40
11	-10,00	-35987,50	412502,90
12	-10,00	-35990,01	448492,91
13	-10,00	-35989,28	484482,19
14	-10,00	-35987,12	520469,31
15	-10,00	-36000,04	556469,35
16	-2,56	-9219,49	565688,85
17	8,03	28903,52	536785,33
18	8,91	32075,76	504709,58
19	9,72	34991,71	469717,87
20	9,42	33916,66	435801,21
21	8,91	32075,76	403725,45
22	8,03	28903,52	374821,94
23	7,36	26494,12	348327,82
24	6,75	24313,90	324013,91
	Min Value (kJ)		232570,76
	Max Value (kJ)		565688,85

Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem *grid* mikro hibrida keadaan energi *energy storage* mengalami fluktuasi. **Tabel 4.2** menunjukkan adanya *discharging* energi *energy storage* dari pukul ke-1 sampai pukul ke-6 dengan nilai akhir 232570,76 *kJoule*, kemudian dari pukul ke-7 sampai pukul ke-16 *energy storage*

mengalami proses *charging* sampai keadaan akhirnya mencapai 565688,85 *kJoule*. Sisa waktu dari pukul ke-17 sampai pukul ke-24, *energy storage* mengalami proses *discharging* hingga nilai *energy storage* adalah 324013,91 *kJoule*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa selama pembangkitan, fluktuasi energi *energy storage* tidak melanggar *constraint energy storage*, hal ini dibuktikan dengan nilai minimum energi *energy storage* adalah 232570,76 *kJoule* yang terjadi pada pukul ke-6 dan nilai maksimum energi *energy storage* adalah 565688,85 *kJoule* yang terjadi pada pukul ke-16.



Gambar 4.3 Fluktuasi daya *energy storage*



Gambar 4.4 Fluktuasi energi *energy storage*

4.4 Biaya Pembangkitan Tenaga Listrik

Biaya pembangkitan tenaga listrik perlu dihitung untuk mengetahui besarnya biaya pengoperasian masing-masing unit pembangkit. Biaya pembangkitan tenaga listrik didapatkan dengan mensubstitusikan nilai daya aktif yang dibangkitkan oleh masing-masing unit pembangkit ke dalam persamaan biaya pembangkitan (*cost function*) masing-masing unit pembangkit. Hasil biaya pembangkitan tenaga listrik adalah sebagai berikut:

Tabel 4.3 Biaya pembangkitan tenaga listrik

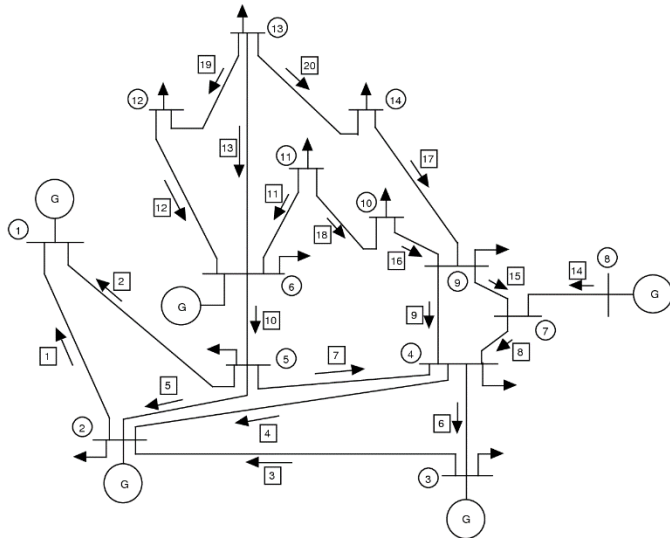
No.	Unit Pembangkit	Biaya (\$)
1	Energy Storage	0,00119
2	Generator Diesel	15,49464
3	Mikro Turbin	9,66583
4	Sel Surya	0,37174
5	PLN	0,00031
	Total (\$)	25,53371

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa biaya pembangkitan masing-masing unit pembangkit pada *grid* mikro hibrida berjumlah 25,534 \$.

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

LAMPIRAN

1. IEEE 14 Bus



Gambar Lampiran 1 Single line diagram sistem IEEE 14 bus

Tabel Lampiran 1 Beban daya aktif pada sistem IEEE 14 bus yang digunakan sebagai simulasi

Waktu (Jam)	Beban (kW)
1	268,31
2	264,03
3	259,00
4	259,73
5	275,40
6	285,25
7	280,03
8	299,93
9	316,14
10	323,26
11	324,72

12	310,10
13	318,53
14	331,10
15	327,73
16	326,03
17	323,06
18	335,39
19	349,37
20	344,80
21	334,83
22	312,11
23	296,56
24	283,61

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari simulasi dan analisis yang telah dilakukan di **Bab 4**, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. *Quadratic programming* dapat digunakan untuk optimasi *economic dispatch* untuk *grid* mikro hibrida dengan *distributed energy storage*.
2. Pada optimasi *economic dispatch* untuk *grid* mikro hibrida dengan *distributed energy storage*, pembangkit yang dioperasikan untuk menghasilkan daya yang dibangkitkan sebesar 7349,02 kW dan sesuai dengan jumlah permintaan daya beban yang dibutuhkan yaitu 7349,02 kW.
3. Selama operasi pembangkitan, fluktuasi energi *energy storage* tidak melanggar *constraint energy storage*, hal ini dibuktikan dengan nilai minimum energi *energy storage* adalah 232570,76 kJoule dan nilai maksimum energi *energy storage* adalah 565688,85 kJoule.
4. Biaya pembangkitan tenaga listrik masing-masing unit pembangkit untuk mengoperasikan *grid* mikro hibrida berjumlah 25,534 \$.
5. *Quadratic programming* adalah metode untuk menyelesaikan persamaan matematis yang bersifat *linear* dan *non-linear*, sehingga nilai yang dihasilkan bersifat mutlak.

5.2 Saran

Demi pengembangan penelitian ini menjadi lebih baik untuk di bidang yang sama, saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Perlu dikembangkan penelitian lebih lanjut dengan melibatkan adanya penjualan ke pihak *grid* (PLN) dan rugi transmisi, sehingga semakin mendekati keadaan *real* sistem.
2. Perlu dikembangkan penelitian lebih lanjut dengan melibatkan *Optimal Power Flow (OPF)* sehingga dapat diketahui aliran daya untuk setiap saluran transmisi dengan batasan yang telah didefinisikan.

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

INDEKS

A

Algoritma, 23, 29, 30
Analisis, 5, 40, 41, 45
Arus, 12

B

Batas, 14, 15, 20, 26, 28, 31, 37, 39, 40, 44
Batasan, 5, 18, 22, 25, 27, 28, 30, 35, 36, 39, 40, 51
Baterai, 9
Beban, 1, 3, 4, 9, 11, 16, 17, 18, 25, 34, 41, 42, 44, 50
Biaya, 1, 2, 4, 5, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 26, 27, 28, 29, 32, 33, 34, 41, 47, 48
Bisnis, 22
Bus, 3, 5, 25, 32, 34, 35, 36, 37, 39, 40, 41, 42

C

Case, 3, 5, 25, 40, 42
Charging, 14, 15, 19, 25, 26, 36, 46
Constraint, 5, 17, 18, 20, 22, 26, 27, 28, 30, 31, 35, 36, 37, 38, 39, 41, 45, 46, 50
Cost function, 16, 25, 48

D

Data, 4, 24, 25, 26, 42
Daya, 1, 3, 5, 6, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 24, 25, 26, 27, 29, 34, 35, 39, 40, 44, 47, 50, 51
Default, 28, 39, 41
Discharging, 14, 15, 19, 25, 36, 46
Distribusi, 2
Distributed, 3, 4
Dynamic, 2

E

Economic Dispatch, 3, 4, 16, 27, 31
Efisiensi, 13
Ekonomi, 2, 13

Emisi, 1
Energi, 1, 9, 11, 13, 14, 15, 20, 41, 45, 46, 47, 50
Energy storage, 1, 3, 4, 5, 6, 11, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 23, 24, 25, 26,
31, 32, 33, 35, 36, 41, 45, 46, 47, 48, 50
Engineering, 22
Equality, 17, 22, 28, 35

F

Fluktuasi, 24, 46, 50
Formulations, 2
Frekuensi, 9, 13
Fuel cell, 9
Fungsi, 2, 14, 16, 18, 19, 20, 22, 23, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34

G

Generator diesel, 4, 9, 11, 13, 14, 16, 18, 19, 25, 43
Grid, 1, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 13, 15, 18, 19, 23, 24, 25, 26, 31, 32, 35, 41,
42, 44, 46, 48, 50, 51
Grid mikro, 1, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 13, 16, 18, 19, 23, 26, 31, 32, 35, 41,
44, 46, 48, 50
Grid-connected, 9, 10, 16

H

Hasil, 3, 5, 6, 22, 25, 26, 29, 37, 39, 40, 42, 45, 46
Hibrida, 2, 3, 5, 6, 9, 10, 18, 19, 23, 24, 25, 26, 31, 32, 35, 41, 42, 44,
46, 48, 50

I

IEEE, 3, 5, 25, 40, 41
Implementasi, 25
Import, 10
Industri, 1, 22
Inequality, 18, 22, 28, 35
Input, 27
Islanded, 9, 10

K

Kapasitas, 17, 18, 21, 41, 44
Keandalan, 1, 9, 13, 14

Keseimbangan, 18
Kesimpulan, 5, 6
Koefisien, 12, 13, 14, 15, 28, 30, 31, 33, 34
Konvensional, 2, 9
Konvergen, 25, 26, 30
Konverter, 13

L

Linear, 22, 28, 30, 33, 50
Listrik, 1, 6, 9, 11, 13, 16, 25, 26, 41, 47, 48, 50

M

Maksimum, 11, 12, 14, 19, 20, 26, 46, 50
Manajemen, 1, 2, 9
Mandiri, 9, 11
Mathpower, 30
MATLAB, 3 23, 27, 31
Matriks, 28, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40
Metode, 2, 4, 23
Mikrohidro, 1
Minimum, 14, 17, 19, 20, 23, 26, 39, 46, 50
Model, 14, 22, 30

N

Nilai, 12, 13, 14, 15, 22, 23, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 34, 36, 39, 41, 42,
45, 46, 47, 50
Non linear, 22

O

Objektif, 22, 23, 27, 28, 29, 30, 31
Open-circuit, 12
Operasi, 2, 5, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 32, 34, 41, 50
Optimal, 3, 4, 27, 29
Optimal Power Flow, 51
Optimasi, 2, 7, 15, 20, 22, 27, 28, 29, 30, 31, 34, 50
Output, 11, 24, 25, 27, 29, 30, 31

P

Pembangkit, 3, 4, 6, 9, 11, 13, 16, 17, 18, 19, 20, 25, 26, 27, 28, 29,
32, 33, 34, 35, 39, 40, 41, 42, 44, 47, 48, 50
Pembangkitan, 1, 5, 16, 17, 18, 25, 27, 29, 32, 33, 34, 41, 46, 47, 48,
50
Persamaan, 11, 16, 18, 22, 27, 28, 37, 39, 40, 48, 50
Pertidaksamaan, 22, 28
Perusahaan Listrik Negara, 3, 4, 11, 15, 16, 17, 18
Photovoltaic, 1, 9
Point of Common Coupling, 10
Power, 2, 10, 35, 44
Profil, 4, 10
Program, 5, 23, 25, 26, 27, 31, 39, 44

Q

Qps_mathpower, 27, 29, 30, 31
Quadprog, 27
Quadratic programming, 2, 4, 6, 22, 23, 25, 27, 30, 31, 32

R

Radiasi, 11
Referensi, 12
Rugi, 3, 2, 9, 51

S

Sains, 22
Sel surya, 4, 11, 12, 13, 17, 18, 19, 20, 25, 26, 32, 33, 35, 36
Short-circuit, 12
Simulasi, 3, 5, 23, 41, 42
Sintaks, 27, 29, 30, 31
Sistem, 1, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 13, 15, 17, 18, 19, 23, 25, 26, 29, 32,
33, 34, 36, 40, 41, 46, 51
Stabilitas, 9
Standar, 11, 22
Standard Test Condition, 11
Stokastik, 2
Strategi, 2
Studi, 2, 25
Suhu, 11, 12

T

Tegangan, 9, 10, 12 29, 34, 35, 39, 40

Teknologi, 13

Terbangkitkan, 5, 6, 15, 20, 26, 39, 41, 44

Terbarukan, 1

Transmisi, 3, 32, 36, 41, 51

Tugas akhir, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 12, 13, 14, 17, 23, 24

Turbin mikro, 4, 9, 11, 13, 17, 18, 19, 25

U

Unit, 3, 4, 6, 17, 19, 20, 25, 26, 27, 28, 29, 32, 33, 35, 39, 40, 41, 42,
44, 47, 48, 50

Unit commitment, 3

V

Variabel, 2, 22, 23, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 39, 40

W

Waktu, 1, 2, 14, 15, 20, 25, 26, 32, 34, 36, 41, 46

Wind turbin, 1

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Robandi, Imam. ***“Modern Power System Control”***. Penerbit ANDI. Yogyakarta, 2009.
- [2] Wang Jiang-hai, TAI Neng-ling, Song Kai, ***“Penetration Level Permission of for DG in Distributed Network Considering Relay Protection,”*** Proceedings of the CSEE, 30 (2010), No. 22, 37-43.
- [3] Yu Kun, CAO Yijia, CHEN Xingying, ***“Dynamic Probability Power Flow of District Grid Containing Distributed Generation,”*** Proceedings of the CSEE, 31 (2011), No. 1, 20-25.
- [4] Mishel Mahmoodi, Pourya Shamsi, Babak Fahimi, ***“Economic Dispatch of A Hybrid Microgrid With Distributed Energy Storage”*** IEE Trans. On Smart Grid, vol 6, no. 6, November 2015.
- [5] Sulistijono, Primaditya. ***“Emission dan Economic Dispatch Pada Sistem Kelistrikan Micro Grid Menggunakan Multiobjective Genetic Algorithm Optimization”***. Buku TA Teknik Elektro ITS. Surabaya, 2014.
- [6] Yann Riffonneau, Seddik bacha, Franck barruel, Stephane Ploix, ***“Optimal Power Flow Management for Grid Connected PV System With Batteries”*** IEEE Trans. Suinustainable Energy, July 2011
- [7] F. A. Mohamed and H. N. Koivo, ***“Power Management Strategy for Solving Power Dispatch Problems in Microgrid for Residential Applications,”*** in Proc. 2010 IEEE Int. Energy Conf. Exhibit. (EnergyCon), Manama, Bahrain, pp. 746–751.
- [8] J. Xu, S. Tan, and S. K. Panda, ***“Optimization of Economic Load Dispatch for A Microgrid Using Evolutionary Computation,”*** in Proc. 2011 37th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (IECON), Melbourne, VIC, Australia, pp. 3192–3197.
- [9] A. Pantoja and N. Quijano, ***“A Population Dynamics Approach for The Dispatch of Distributed Generators,”*** IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 10, pp. 4559–4567, Oct. 2011.
- [10] J. M. Guerrero, P. C. Loh, T.-L. Lee, and M. Chandorkar, ***“Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids Part II: Power Quality, Energy Storage, and AC/DC Microgrids,”*** IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 4, pp. 1263–1270, Apr. 2013.

- [11] A. Sobu and G. Wu, “***Dynamic Optimal Schedule Management Method for Microgrid System Considering Forecast Errors of Renewable Power Generation***,” in Proc. 2012 Int. Conf. Power Syst. Technol. (POWERCON), Auckland, New Zealand, pp. 1–6.
- [12] Vinod M.Raj and Saurabh Chanana, “***Fuel Cost Optimization of An Islanded Microgrid Considering Environmental Impact***,” Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 4, No. 2, March 2016.
- [13] Y. Xiao, C. Lin, and B. Fahimi, “***Online State of Charge Estimation in Electrochemical Batteries: Application of Pattern Recognition Techniques***,” in Proc. 2013 28th Annu. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC), Long Beach, CA, USA, pp. 2474-2478.
- [14] R. Sundari, S. Bayne, M. Giesselmann, “***Economic Dispatch Optimization of Microgrid in Islanded Mode***”, in IESC, Texas Tech University, 2014.
- [15] PLN, “***Penetapan Penyesuaian Tarif Tenaga Listrik Bulan April 2016***”, PLN, Jakarta, 2016.
- [16] Jensen, Paul A., Bard, Jonathan F., “***Operations Research Models and Methods***”, Wiley, 2002.
- [17] L. Nani. Rony Seto. Sjamsjul Anam.”***Dynamic DC Optimal Power Flow Mempertimbangkan Kontrak Energi Listrik pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Menggunakan Skema Take or Pay***”. Buku TA Teknik Elektro ITS. Surabaya. 2015.

BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama Kemas Robby Firmansyah, dilahirkan di Klaten pada tanggal 23 Oktober 1994 oleh pasangan Tutik Winarsih dan Zulkifli Lubis. Penulis menjalani pendidikan dasar di SD Negeri 3 Cepu, kemudian lulus di SD Negeri 2 Bareng Lor, Klaten. Selanjutnya pendidikan menengah pertama dilanjutkan dan lulus di SMP Negeri 2 Cepu. Penulis melanjutkan pendidikan menengah atas dan menyelesaikannya di SMA Negeri 1 Klaten.

Pada tahun 2012, penulis memulai pendidikan di Jurusan Teknik Elektro ITS melalui jalur SNMPTN. Selama menjalani masa perkuliahan, penulis aktif di beberapa organisasi antara lain UKM Robotika ITS dan Divisi Workshop Elektro ITS.

Pada tahun 2012 dan 2013, penulis aktif dalam kegiatan Program Kreativitas Mahasiswa yang diadakan oleh Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi (Dikti). Penulis lolos menjadi finalis pada Pekan Ilmiah Mahasiswa Nasional 26 yang diadakan di Universitas Mataram. Dalam kegiatan PIMNAS 26 Universitas Mataram, penulis meraih juara 3 kategori presentasi dalam bidang Program Kreativitas Mahasiswa Pengabdian Masyarakat. Penulis dapat dihubungi melalui *kemas.robby246@gmail.com*.