

**LAPORAN  
PENELITIAN TERAPAN  
UNIVERSITAS LAMPUNG**



**PEMODELAN MATEMATIKA SISTEM HIBRID ENERGI LISTRIK  
BERBASIS ANGIN, MATAHARI DAN MIKRO HIDRO DENGAN  
PENGENDALIAN EFISIENSI MENGGUNAKAN PHOTOCCELL DAN  
WIFI SWITCH:**

**TIM PENGUSUL**

**Drs. Tiryono, M.Sc., Ph.D. (NIDN/SINTA ID: 0004076203/6718762)  
Ir. Machudor Yusman, M.Kom (NIDN/SINTA ID: 0030035705/6680581)**

**KATEGORI  
Penelitian Terapan**

**PROGRAM STUDI MATEMATIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
2021**

HALAMAN PENGESAHAN  
PENELITIAN TERAPAN  
UNIVERSITAS LAMPUNG

- |                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| 1. Judul Penelitian               | Permodelan Matematika Sistem Hibrid Energi Listrik Berbasis Angin, Matahari, dan Mikro Hidro dengan Pengendalian Efisiensi Menggunakan Photocell dan Wifi Switch |
| 2. Kategori Penelitian            | Terapan  |
| 3. Ketua Peneliti                 |  |
| a. Nama Lengkap                   | Drs. Turyono, M.Sc., Ph.D.   |
| b. NIP/NIK                        | 19620704 198803 1 002  |
| c. NIDN                           | 0004076203   |
| d. Jabatan Fungsional             | Lektor Kepala  |
| e. Jabatan Struktural             | Kepala ipt Perustakaan   |
| f. Fakultas/Jurusan               | MIPA/Matematika  |
| g. Pusat Penelitian               | Lembaga Penelitian Universitas Lampung   |
| h. Alamat Institusi               | Jurusan Matematika FMIPA Unila, Jl. Sumantri Brojonggoro No. 1 Bandar Lampung 35145  |
| i. Telpost/Faks/E-mail            | (0721) 704625 / turyono.1962@fmipa.unila.ac.id   |
| j. Anggota Peneliti               | Ir. Machudor Yuzman, M.Kom   |
| Lama Penelitian Keseluruhan       | -  |
| Biaya yang Diusulkan ke BLU Unila | -  |
| a. Tahun pertama                  | Rp. 35.000.000,-   |
| b. Tahun kedua                    | Rp. -  |
| Biaya dari instansi lain          | Rp. -  |



Dr. Eng. Supriyo Dwi Yuwono, M.T.  
199607052000031001

Bandar Lampung, 21 September 2021

Ketua Peneliti,

Drs. Turyono, M.Sc., Ph.D.  
196207041988031002

Menyetujui,  
Ketua Lembaga Penelitian

Dr. Ir. Lianingilia Afrizani, D.E.A.  
196505101993032008

### IDENTITAS DAN URAIAN UMUM

1. Judul Penelitian : *Pemodelan Matematika Sistem Hibrid Energi Listrik Berbasis Angin, Matahari, dan Mikro Hidro dengan Pengendalian Menggunakan Photocell dan Wifi Switch*
- 

2. Tim Peneliti

No	Nama	Jabatan	BidangKeahlian	Program Studi	AlokasiWaktu (jam/minggu)
1.	<i>Tiryono</i>	<i>Ketua</i>	<i>Mateamtika Terapan</i>	<i>Matematika</i>	<i>10</i>
2.	<i>Machudor Yusman</i>	<i>Anggota 1</i>	<i>Matematika Komputasi</i>	<i>Matematika</i>	<i>10</i>
3.	<i>Srihandayani Girsang</i>	<i>Peneliti Pembantu</i>		<i>Matematika</i>	<i>10</i>
4.	<i>M. Reza Hartami</i>	<i>Peneliti Pembantu</i>		<i>Matematika</i>	<i>10</i>
5.	<i>Hanifah Puspitasari</i>	<i>Peneliti Pembantu</i>		<i>Matematika</i>	<i>10</i>
6.	<i>Atma Rahmawati</i>	<i>Peneliti Pembantu</i>		<i>Matematika</i>	<i>10</i>

3. Objek Penelitian (jenis material yang akan diteliti dan segi penelitian):  
*Pembangkit Listrik Sistem Hibrid berbasis Angin, Matahari dan Mikro-Hidro dengan Pengendalian Efisiensi Menggunakan Photocell dan Wifi Switch. Memodelkan permasalahan energi listrik yang dibutuhkan untuk penerangan jalan sekitar pondok umniyati secara efisien.*
4. Masa Pelaksanaan  
Mulai : *bulan Juni tahun 2021*  
Berakhir : *bulan September tahun 2021*
5. UsulanBiaya : *Rp.35.000.000,-*
6. Lokasi Penelitian (lab/studio/lapangan):  
*Laboratorium Matematika dan Statistika Terapan Jurusan Matematika FMIPA Unila*
7. Instansi lain yang terlibat (jika ada, dan uraikan apa kontributornya)  
.....  
..
8. Kontribusi mendasar pada suatu bidang ilmu (uraikan tidak lebih dari 50 kata, tekankan pada gagasan fundamental dan orisinal yang akan mendukung pengembangan iptek)  
*Hasil penelitian ini akan memberikan bagaimana memodelkan permasalahan pengadaan sumber listrik sistem hibrid untuk penerangan jalan sekitar pondok secara efisien. Selanjutnya menemukan strategei pengendalian efisiensi dengan*

menggunakan photocell otomatis lampu nyala disaat gelap malam hari dan lampu off saat siang hari. Menggunakan saklar ensor gerak sedemikian hingga lampu nyala jika ada objek yang bergerak disekitar jalan pondok, dan hal ini lebih efesien jika di bandingkan dengan wifi-switch. Penggunaan wifi-switch memungkinkan pemadaman lampu dari perangkat android. Keunggulan lain dengan pengendalian photocell memungkinkan lampu menyala di siang hari jika kondisi cuaca mendung dan gelap.

9. Jurnal ilmiah yang menjadi sasaran untuk setiap penerima hibah (tuliskan nama terbitan berkala ilmiah dan tahun rencana publikasi). Artikel ilmiah yang bersumber dari hasil penelitian ini dalam proses untuk dipublikasikan di Vol 16 No 1 Maret 2022 Barekeng p-ISSN: 1978-7227 e-ISSN: 2615-3017 dan Publikasi internal Unila jika dimungkinkan.

# **PEMODELAN MATEMATIKA SISTEM HIBRID ENERGI LISTRIK BERBASIS ANGIN, MATAHARI DAN MIKRO HIDRO DENGAN PENGENDALIAN EFISIENSI MENGGUNAKAN PHOTOCELL DAN WIFI SWITCH:**

oleh

Tiryono Ruby  
Machudor Yusman

Dewasa ini pengadaan sumber listrik system hybrid untuk elektrifikasi tidak hanya diterapkan di kawasan terpencil jauh dari sumber listrik Perusahaan Listrik Negara (PLN) yang telah dikenal secara luas. Akan tetapi sudah merambah menjadi trend yang menarik bahwa system hybrid energi listrik dikelola secara perumahan dengan pertimbangan ekonomi, sosial untuk penerangan jalan atau gang, penerangan kawasan pondok pesantren dan juga untuk pengembangan riset lainnya. Pengadaan sumber listrik konvensional unit genset sudah lama dikenal, namun untuk mempertahankan konsistensi suplai energi dengan cara tersebut ternyata banyak energi yang dihasilkan terbuang ketika beban listrik yang harus dipenuhi menurun. Sayangnya sistem unit genset tidak mampu menyimpan energi listrik yang tersisa sehingga banyak energi listrik yang terbuang, terutama ketika *output* dari genset melebihi beban permintaan. Padahal beban listrik yang harus disuplai pada kenyataannya fluktuatif dari waktu ke waktu, misalnya pada siang hari korbanan energi listrik yang tidak dimanfaatkan tidak sebanding dengan kapasitas yang seharusnya. Sementara itu metode sistem hybrid energi listrik dengan strategi pengendalian efisiensi menggunakan photocell dan wifi switch digunakan untuk pengadaan sumber listrik yang memiliki kemampuan menyimpan energi listrik yang tersisa dan kemampuan *switching* ketika beban yang harus dipenuhi mengalami fluktuasi naik atau turun. Oleh karena itu untuk mengakomodasi pengadaan sumber listrik yang efisien dan terbarukan atau ramah lingkungan secara bersama-sama, dari sisi terapannya sangat menarik dan menantang untuk mengkaji pengembangan model matematika sistem hybrid energi listrik berbasis angin, matahari dan mikro hidro sebagai energi alternatif untuk elektrifikasi penerangan jalan, gang, dan kawasan sekitar pondok.

Berdasarkan latar belakang tersebut di atas, penelitian ini akan mengkaji model matematika sistem hybrid energi listrik berbasis energi terbarukan dan kehandalan strategi pengendalian efisiensi secara dinamis dalam menanggapi fluktuatif beban permintaan. Dengan cara mengkombinasikan model dan strategi tersebut diharapkan dapat mengakomodasi fenomena sistem pengadaan sumber listrik dan fluktuasi beban permintaan yang harus dipenuhi secara bersama-sama sehingga kondisi optimal sesungguhnya dalam operasional sistem dapat tercapai. Dengan demikian informasi perancangan sistem yang diperoleh dari kajian ini dapat lebih akurat dan tepat sehingga dalam pengambilan keputusan pengadaan unit sistem hybrid peralatan sumber listrik yang diperlukan dapat lebih berkualitas dan lebih akurat, khususnya di era pandemik ini dengan pengendalian efisiensi menggunakan wifi os android untuk *switching*.

Secara khusus tujuan penelitian ini adalah: (1) Membuat pemodelan matematika sistem hybrid untuk kontrol sumber listrik yang aktif; (2) Perancangan strategi pengendalian

efisiensi yang berperan sebagai otomatis *switching* supaya tidak terjadi *over load*; (3) Publikasi jurnal ilmiah pada jurnal terindeks iop publisher seminar series icasmi dan deseminasi di lppm Unila; (4) Bahan ajar mata kuliah Pemodelan Matematika, Persamaan Differensial Parsial dan Pemrograman Komputer.

**Kata Kunci: Modeling, Hibrid, Otomatis, Switching**

# **DAFTAR ISI**

**ABSTRAK**

**BAB I. PENDAHULUAN**

**BAB II. TINJAUAN PUSTAKA**

**BAB III. METODE PENELITIAN**

**BAB IV. HASIL DAN LUARAN YANG DICAPAI**

**DAFTAR PUSTAKA**

**LAMPIRAN**

## **BAB I. PENDAHULUAN**

### **1. 1. LATAR BELAKANG**

Seiring dengan pertumbuhan penduduk dan perkembangan zaman, kebutuhan akan listrik dewasa ini telah meningkat menjadi suatu kebutuhan yang sangat vital dalam roda kehidupan, tidak hanya di kota-kota besar melainkan di pelosok desa, areal perkebunan atau pulau-pulau kecil-pun sangat memerlukan listrik (Harijono T., 2020). Strategi sistem unit genset dalam pengadaan sumber listrik untuk elektrifikasi telah dikenal luas. Akan tetapi untuk mempertahankan kekonsistenan suplai energi dengan cara tersebut ternyata banyak energi yang dihasilkan terbuang ketika beban yang harus dipenuhi menurun. Sayangnya sistem unit genset tidak mampu menyimpan energi listrik yang tersisa sehingga banyak energi listrik yang terbuang, terutama ketika *output* dari genset melebihi beban permintaan. Mengoperasikan unit genset pada level daya rendah untuk periode waktu lama dapat mengakibatkan pengkerakan pada silinder blok mesin genset. Kondisi tersebut memerlukan perawatan khusus dan akan memakan biaya perawatan yang lebih tinggi daripada perawatan biasa. Adapun manfaat adanya fasilitas listrik antara lain untuk penerangan, hiburan, komunikasi, informasi, industri, irigasi, transportasi, keamanan, keselamatan, pertahanan dan atau sarana pendukung riset (Harijono T., 2020).

Salah satu alternatif pengadaan sumber listrik yang efisien untuk elektrifikasi dengan biaya operasional yang relatif murah adalah dengan perancangan sistem hibrid berbasis angin, matahari dan mikro hidro dengan strategi operasional pengendalian efisiensi menggunakan photocell dan wifi os android. Sistem tersebut digunakan untuk pengadaan sumber listrik yang memiliki kemampuan menyimpan energi listrik yang tersisa dan kemampuan *switching* ketika beban yang harus dipenuhi mengalami fluktuasi naik atau turun. Oleh karena itu untuk mengakomodasi pengadaan sumber listrik yang efisien dan terbarukan atau ramah lingkungan secara bersama-sama, dari sisi terapan sangat menarik dan menantang untuk mengkaji pengembangan model matematika sistem hibrid energi listrik berbasis angin, matahari dan mikro hidro sebagai energi alternatif untuk elektrifikasi, bersamaan dengan kondisi situasi pandemik maka penggunaan wifi os android untuk pengendalian efisiensi sangat relevan untuk di terapan sebagai satu sikap menjaga protokol kesehatan.

Berdasarkan latar belakang tersebut di atas, penelitian ini akan mengkaji model matematika sistem hibrid energi listrik berbasis energi terbarukan dan kehandalan strategi pengendalian efisiensi *switching* secara dinamis dalam menanggapi fluktuatif beban permintaan. Dengan cara mengkombinasikan model dan strategi tersebut diharapkan dapat mengakomodasi fenomena sistem pengadaan sumber listrik dan fluktuasi beban permintaan yang harus dipenuhi secara bersama-sama sehingga kondisi optimal sesungguhnya dalam operasional sistem dapat tercapai. Dengan demikian informasi perancangan sistem yang diperoleh dari kajian ini dapat lebih akurat dan tepat sehingga dalam pengambilan keputusan pengadaan unit sistem peralatan pengadaan sumber listrik yang diperlukan dapat lebih berkualitas dan lebih akurat.

## **1.2. Tujuan Khusus (Luaran)**

Secara khusus tujuan penelitian ini adalah:

1. Membuat pemodelan matematika sistem hibrid untuk kontrol sumber listrik yang aktif.
2. Perancangan strategi pengendalian efisiensi menggunakan photocell dan wifi os android yang berperan sebagai *switching* supaya tidak terjadi over load.
3. Publikasi jurnal ilmiah pada Journal of Phisics, seminar series icasmi dan desiminasi yang diselenggarakan di LPPM Universitas Lampung;
4. Bahan ajar mata kuliah Pemodelan Matematika, Persamaan Differensial Parsial dan Pemrograman.

## **1.3. Urgensi (Keutamaan) Penelitian**

Perangkat pengadaan listrik yang sudah lama dikenal adalah sistem disel genset tunggal (*stand-alone DGS*). Sistem DGS merupakan sistem pengadaan sumber listrik yang biasa digunakan di daerah yang belum terjangkau jaringan listrik Perusahaan Listrik Negara (Harijono T., 2020.). Pertimbangannya, perangkat yang diperlukan untuk membuat sistem tersebut mudah didapat, murah harganya, dan mudah diinstalasi. Selain itu, disel genset diandalkan untuk dapat memberikan suplai energi listrik yang relatif konsisten. Akan

tetapi, untuk mempertahankan kekonsistenan suplai energi listrik tersebut akan berakibat semakin membengkaknya biaya operasional, terutama untuk pengeluaran biaya bahan bakar yang harus disediakan untuk menjaga tetap beroperasinya genset. Kondisi ini diperburuk lagi dengan tingginya harga bahan bakar di lokasi terpencil/perkebunan atau pulau-pulau kecil, karena bahan bakar harus didatangkan dari luar daerah yang cukup jauh jaraknya.

Kelemahan lain dari sistem DGS adalah tingkat efisiensinya yang rendah. Sistem ini tidak mampu menyimpan energi listrik yang tersisa sehingga banyak energi listrik yang terbuang, terutama ketika *output* dari genset melebihi beban permintaan. Bila DGS dioperasikan pada tingkat *output* lebih rendah 40% dari kapasitas maksimum, misalnya pada saat siang hari, mungkin akan menurunkan banyaknya bahan bakar yang digunakan. Akan tetapi dengan mengoperasikan DGS lebih rendah dari kapasitas maksimum, banyak energi listrik yang tidak dapat diproduksi dari yang seharusnya. Korban energi listrik yang tidak diproduksi sebagai akibat tidak dimanfaatkannya secara maksimal dari suatu sistem DGS tidak sebanding dengan penurunan jumlah bahan bakar yang digunakan. Kenyataannya, beban permintaan pada sistem berfluktuasi sehingga DGS jarang sekali beroperasi pada kapasitas daya maksimum untuk periode waktu yang cukup lama.

Masalah lain dalam penggunaan sistem DGS adalah dalam hal biaya perawatan. Secara garis besar, biaya perawatan tergantung pada bagaimana diesel genset dioperasikan. Kerusakan genset umumnya terjadi pada fase pemanasan, ketika genset distarter dari kondisi dingin. Seringnya menghidupkan dan mematikan genset harus dihindari, dan sekali genset dihidupkan maka harus mencapai temperatur standar operasional dan menjaga kondisi tersebut selama mungkin. Padahal cara tersebut seringkali dilakukan untuk menyesuaikan tingkat *output* atau lamanya waktu operasi dari DGS sesuai dengan beban permintaan. Mengoperasikan genset pada level daya rendah untuk periode waktu lama dapat mengakibatkan pengkerakan pada silinder blok mesin genset. Kondisi tersebut memerlukan perawatan khusus dan akan memakan biaya perawatan yang lebih tinggi daripada perawatan biasa.

Salah satu alternatif solusi pengadaan listrik atau elektrifikasi yang efisien untuk mengatasi masalah kebutuhan energi listrik di lingkungan atau komunitas baik areal perkebunan

kelapa sawit, pulau-pulau kecil dengan hutan bakau atau untuk penerangan jalan, gang, sekitar pondok pesantren di desa maupun di kota adalah dengan menggunakan model sistem hibrid. Model tersebut dilengkapi dinamo listrik yang sumber penggeraknya energi kinetik angin dan mikro hidro, kincir angin type vertikal yang dimodifikasi dengan roda pejal dirancang untuk memberikan putaran mekanis yang memiliki tenaga/power yang kuat. Kincir type ini dapat beroperasi dengan angin dari segala arah, cocok untuk kawasan tropis yang memiliki sumber daya angin kategori sedang. Melalui perangkat kincir angin type vertikal yang dimodifikasi, energi listrik yang diproduksi praktis tanpa memerlukan biaya operasional, dengan demikian dari sisi ini sudah memberikan manfaat besar dalam hal menekan biaya dalam mengatasi masalah elektrifikasi. Tidak terlepas dari perubahan kondisi alam (kecepatan angin) dapat mengakibatkan pengaruh yang nyata terhadap keluaran yang dihasilkan generator kincir angin.

Melalui strategi seting kemiringan sudut elevasi, panel surya akan mampu menghasilkan sejumlah energi listrik yang lebih besar dibanding dengan pemasangan biasa (permanen) dalam hal menyerap radiasi matahari. Panel surya (*solar photovoltaic PV arrays*) dirakit dari sekumpulan sel surya yang masing-masing dibuat dari bahan semi konduktor dan dapat merubah secara langsung sinar matahari menjadi energi listrik. Ketika radiasi Matahari menimpa bahan semi konduktor tersebut, panel surya langsung membuat/menghasilkan arus listrik DC (*direct current*). Panel surya khususnya sangat berguna ketika keluaran yang dihasilkannya langsung dipergunakan untuk mensuplai kebutuhan listrik, atau energi listrik yang dihasilkannya dapat digunakan untuk mengecas (*recharge*) baterai sistem hibrid tersebut. Tidak terlepas dari perubahan siang dan malam, atau perubahan kondisi cuaca (awan) dapat mengakibatkan pengaruh yang nyata terhadap keluaran yang dihasilkan generator panel surya.

Jenis alat penyimpan energi listrik yang sudah dikenal adalah baterai/Accu, penyusunan unit baterai berdasarkan paralel-seri disesuaikan dengan kebutuhan sistem hibrid. Baterai type basah ( lead acid ) telah digunakan sejak lama sekalipun tidak lagi efisien, namun baterai lead acid type gel tertutup menjadi populer penggunaannya karena tidak memerlukan perawatan rutin. Baterai type lithium telah tersedia secara luas dan memiliki tingkat efisiensi yang jauh lebih baik. Melalui unit inverter keluaran atau output sistem

disesuaikan dengan kebutuhan peralatan listrik yang digunakan lingkungan atau komunitas (tegangan 220 volt).

Rancang bangun model sistem hibrid sebagai sumber energi listrik dapat menekan kelemahan-kelemahan yang ada pada sistem tradisional diesel genset tunggal (*stand-alone* DGS) dalam hal kemampuan menekan biaya operational sistem dan menyimpan energi listrik. Bersamaan dengan permasalahan bahan bakar minyak dewasa ini maka keberadaan sistem ini sangat relevan menjadi pemicu perlunya membangun sistem elektrifikasi yang biaya operasionalnya efisien dan ramah lingkungan. Perkembangan zaman dewasa ini menuntut adaptif dengan kondisi pandemik menuntut kesadaran hindari kerumunan, jaga jarak, cuci tangan, basuh muka dengan air mengalir tanpa menyentuh kran, mematikan dan menghidupkan listrik tanpa menyentuh saklar, maka pengendalian efisiensi menggunakan photocell dan wifi os android sangat relevan untuk diterapkan di masa pandemik yang entah kapan kondisi ini pulih sediakala.

## BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. *State of the Art*

Pengadaan energi listrik secara tradisional menggunakan disel genset masih banyak digunakan di segala penjuru Dunia ini, khususnya di lingkungan atau komunitas yang jauh dari sumber pembangkit listrik utama. Alternatif pemilihan disel genset ini adalah biaya awal relatif murah dan mudah diinstalasi, padahal dalam kenyataannya sistem ini memerlukan biaya perawatan yang tinggi. Pada banyak sistem disel genset tunggal (*stand-alone* DGS), hari-hari tertentu bisa terjadi genset beroperasi hanya 30% saja dari kapasitasnya (Ashari, 1999., Harijono T., 2020) dikarenakan beban permintaan yang fluktuatif. Situasi seperti ini dapat diatasi dengan kombinasi dari dua genset yang berkapasitas besar dan kecil, genset berkapasitas kecil dapat dioperasikan dengan daya optimal pada saat beban permintaan rendah (Nayar dkk., 1993., Harijono T., 2020). Meskipun dengan solusi ini, operasi keseluruhan sistem disel genset *stand-alone* masih dikategorikan tidak efisien karena masih ada energi sisa yang terbuang. Selain itu, genset umumnya hanya memiliki pilihan tingkat *output* atau mode dalam jumlah yang terbatas. Dengan keterbatasan pilihan, energi listrik yang dihasilkan DGS seringkali melebihi beban permintaan, dan kelebihan energi atau energi yang tersisa tidak dapat disimpan, akan terbuang. Oleh karena itu, sistem DGS bukanlah sistem yang terefisien dalam hal penggunaan bahan bakar dalam kaitannya dengan energi listrik yang dihasilkan dalam memenuhi fluktuasi beban permintaan sistem. Kondisi ini diperburuk lagi dengan tingginya harga bahan bakar di pulau-pulau kecil yang terhampar diseberang lautan, karena bahan bakar harus didatangkan dari luar daerah yang cukup jauh jaraknya.

Berdasarkan permasalahan di atas, perancangan sistem panel surya dan kincir angin merupakan alternatif yang rasional dan penggunaannya terus meningkat dari waktu ke waktu (Mohammad dan Nayar, 1999; Manthos dan David, 2000; Panickar dkk., 1998; Siddhartha dan Kumar, 2000; Wichert dan Lawrance, 1998). Pembangkit listrik dengan sistem ini, panel surya dan kincir angin berperan sebagai generator listrik dan baterai sebagai penyimpan energi listrik. Beberapa jenis baterai yang dapat digunakan adalah baterai *lead-acid* type cair dan gel, serta *lithium-ion* yang lebih efisien (Mayer dkk., 1997; Sasaki dkk., 1999; Wang dan Reimers, 1998; Yano dkk., 2000). Penggunaan baterai *lead-acid* type ‘gel tertutup’ tidak memerlukan perawatan. Energi yang dihasilkan komponen

generator ketika melebihi beban permintaan maka energi sisa digunakan untuk mengecras (*recharge*) baterai. Sedangkan energi yang tersimpan pada baterai digunakan (*discharge*) untuk mensuplai atau menambah daya pada saat beban permintaan melebihi daya keluaran yang dihasilkan komponen generator.

Panel surya adalah perangkat lempengan sel-sel semi konduktor yang mampu mengubah sinar matahari menjadi energi listrik secara langsung (Sathiaraj dan Kefa, 2000; Siddhartha dan Kumar, 2000; Tiwari dkk., 2001). Dua dekade terakhir telah mengalami penurunan harga secara nyata (Uchida dan Yamada, 2000). Semakin besar perangkat generator listrik panel surya yang digunakan, semakin tinggi keluaran energi listrik yang dapat disimpan pada baterai. Pada rencana penelitian ini akan dilakukan strategi *set point* sudut elevasi panel surya dalam mengoptimalkan pemanfaatan radiasi matahari.

Dinamo kincir angin adalah generator listrik yang digerakkan dengan menggunakan sumber tenaga angin (Panickar dkk. 1998). Pada rencana penelitian ini akan dirancang kincir angin type vertikal yang dimodifikasi roda pejal. Type ini dirancang terdiri dari tiga sayap terpasang permanen di atas menara dengan sayap kincir mampu berputar akibat dorongan angin dari segala arah. Putaran mekanis sayap kincir jenis vertikal adalah sentripugal vertikal (Paul, 2004). Semakin besar perangkat dinamo kincir angin yang digunakan, semakin tinggi energi listrik yang dapat diproduksi. Tidak terlepas dari perubahan kondisi alam (kecepatan angin) dapat mengakibatkan pengaruh yang nyata terhadap keluaran yang dihasilkan generator kincir angin.

Dinamo kincir mikro hidro adalah generator listrik yang digerakkan dengan menggunakan sumber tenaga aliran air (Harijono T., 2020). Pada penelitian ini akan dirancang dinamo kincir yang mampu menghasilkan listrik untuk disimpan pada baterai/accu atau digunakan langsung jika diperlukan dari sumber air yang mengalir melalui pralon instalasi air perumahan, dengan demikian satu sisi mesin pompa air nyedor air dari sumur memerlukan listrik untuk mengisi tower air, disisi lain bersamaan air yang keluar untuk mengisi tower air dipasang dinamo kincir mikro hidro sehingga dapat menghasilkan energi listrik yang dapat disimpan di baterai/accu atau dapat digunakan langsung jika diperlukan (Harijono T., 2020)

Inverter adalah komponen yang dapat merubah arus AC menjadi arus DC dan sebaliknya (Nayar dkk., 1993; Loxton dkk., 2009). Perangkat inverter diperlukan jika terdapat peralatan listrik yang khusus memerlukan listrik ber-arus DC sementara sumber pengadaan listrik ber-arus AC, demikian juga sebaliknya. Sejumlah pustaka memberikan beberapa pendekatan perancangan sistem. Salah satu pendekatan yang digunakan Panickar dkk. (1998), yaitu optimisasi penggunaan turbin/kincir angin skala besar dengan generator diesel. (Iyer dkk. 1988, Ashari dan Nayar, 1999) membahas sistem gabungan panel surya-baterai-disel genset dengan pendekatan *fuzzy logic* untuk membangun strategi kontrol yang efisien melalui penekanan biaya operasi yang diperoleh dari kontrol generator terhadap prediksi beban permintaan dan radiasi Matahari.

Rencana penelitian ini, pendekatan yang digunakan adalah memodelkan sistem hibrid yang mencakup kincir angin, panel surya dan propeler mekanis turbin mikro hidro sebagai suatu sistem dinamis. Sasaran pendekatan ini untuk menunjukkan bahwa strategi optimal kontrol dapat memecahkan model sistem dinamis pada pembangkit energi listrik sistem tersebut. Faktor utama model optimal kontrol yang dibangun adalah model dinamis kapasitas energi listrik yang tersimpan pada baterai dan fungsi biaya. Model tersebut dioperasikan dalam interval waktu  $[0, T]$ , khususnya untuk periode waktu 24 jam (Lee dkk., 1997; Lee dkk. 1999; Lee dkk., 2008). Misal  $P_P(t)$  energi yang dihasilkan panel surya pada saat  $t$ ,  $P_K(t)$  energi yang dihasilkan kincir angin pada saat  $t$ ,  $P_G(t)$  energi yang dihasilkan propeler mekanis mikro hidro pada saat  $t$ , dan  $P_B(t)$  adalah neto energi listrik pada baterai pada saat  $t$ . Selanjutnya  $P_L(t)$  adalah beban permintaan, masalah ini tidak membahas *forecasting* beban permintaan, yang jelas setiap harinya mengalami fluktuasi. Energi listrik yang diproduksi oleh komponen propeler mikro hidro adalah sebagai fungsi kontrol,  $P_G(t)$ . Untuk merumuskan permasalahan di atas, didefinisikan sejumlah komponen sistem terdiri dari  $M$  sistem dinamis  $(\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \dots, \Omega_M)$  dengan masing-masing sistem,  $\Omega_i$ , dapat aktif pada subinterval waktu operasional  $[0, t_f]$ . Untuk  $i = 1, 2, \dots, M$ , kandidat sistem ke- $i$  didefinisikan sebagai himpunan persamaan diferensial biasa (ODEs),

$$\dot{x}(t) = f^i(t, x(t)), \quad t \in [0, t_f],$$

dengan  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in R^n$  adalah variabel *state* sistem dan  $f^i = [f_1^i, f_2^i, \dots, f_n^i]^T \in R^n$  adalah kontinu dan diferensiabel dimana-mana. Sedangkan himpunan seluruh sistem dinamis ditulis sebagai:  $\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \dots, \Omega_M\}$ .

Untuk menempatkan kandidat sistem yang aktif, dilakukan partisi terhadap interval waktu

$$\text{asli } [0, t_f]: \quad T_\kappa = \left\{ \{t_1, t_2, \dots, t_{\kappa-1}\}^T \in R^{\kappa-1}; 0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_{\kappa-1} \leq t_f \right\},$$

dengan  $\kappa$  adalah bilangan integer lebih besar sama dengan satu dan setiap

$\tau_\kappa = \{t_1, t_2, \dots, t_{\kappa-1}\}^T \in T_\kappa$  adalah sekuen waktu *switching* yang dimungkinkan sepanjang  $\kappa$ .

Dengan asumsi  $M$  adalah banyaknya sistem dinamis pada unit tersebut, selanjutnya dapat didefinisikan :

$$V_\kappa = \left\{ \{v_1, v_2, \dots, v_\kappa\}^T \in R^\kappa; v_i \in \{1, 2, \dots, M\}, i = 1, 2, \dots, \kappa \right\},$$

dengan setiap  $v_\kappa = \{v_1, v_2, \dots, v_{\kappa-1}\}^T \in V_\kappa$  adalah indeks sekuen sepanjang  $\kappa$ . Sehingga  $T_\kappa \times V_\kappa$

adalah himpunan sekuen waktu *switching* yang dimungkinkan sepanjang  $\kappa$ . Berkenaan

dengan korespondensi setiap  $\kappa$  dan setiap sekuen waktu *switching*  $(\tau_\kappa, v_\kappa) \in T_\kappa \times V_\kappa$ , serta

definisi sistem dinamis terhadap interval waktu dengan  $t_0 = 0$  dan  $t_K = t_f$ , model dinamis

sistem dapat dituliskan sebagai berikut

$$\dot{x}(t) = f^{v_i}(t, x(t)), \quad t \in [t_{i-1}, t_i), \quad i = 1, \dots, K, \quad (1)$$

$$x(0) = x_0, \quad (2)$$

$$x(t_i) = x(t_i - 0), \quad i = 1, \dots, K-1, \quad (3)$$

dengan  $x_0 \in R^n$  kondisi awal sistem dan menggunakan notasi  $x(t - 0) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} x(t + \varepsilon)$ ,

solusi sistem (1) – (3) berkaitan dengan  $(\tau_K, v_K) \in T_K \times V_K$  dinyatakan dengan  $x(t|\tau_K, v_K)$ .

Untuk setiap  $\kappa$  dan setiap  $(\tau_\kappa, v_\kappa) \in T_\kappa \times V_\kappa$  didefinisikan fungsi tujuan sebagai berikut:

$$J(K, \tau_\kappa, v_\kappa) = \Phi_0(x(t_f)) + \int_0^{t_f} g(t, x(t|\tau_\kappa, v_\kappa)) dt \quad (4)$$

dengan  $\Phi_0(x)$  adalah nilai awal sistem dan  $g(x)$  adalah nilai akhir operasional sistem. Jika

komponen sistem dinamis  $\Omega_i \in \Omega$  dipertimbangkan sebagai bagian dari unit sistem yang

mampu menyimpan energi maka kapasitas  $\Omega_i$  menjadi fungsi yang tergantung pada

komponen sistem lainnya dan beban sistem. Selanjutnya permasalahan di atas adalah

meliputi masalah optimal kontrol waktu, masalah optimal kontrol nilai diskrit (daya

komponen) dan masalah optimal kontrol *switching* yang dinyatakan sebagai berikut:

Masalah (P): Mencari sekuen waktu *switching* dan indeks sekuen ( $\kappa$  dan  $(\tau_\kappa, v_\kappa) \in T_\kappa \times V_\kappa$ )

yang meminimumkan fungsi biaya (4) dengan kendala sistem dinamis (1)–(3).

Aspek penting pada bagian ini adalah melakukan pemodelan dinamis *recharge* dan *discharge* baterai yaitu dengan melakukan pendekatan sebagai berikut: misal  $C(t)$  adalah kapasitas baterai pada saat  $t$ , diukur dalam satuan Wh. Model dinamis baterai diberikan sebagai berikut:

$$\dot{C}(t) = R(t) + D(t)$$

dengan  $R(t)$  = laju *recharge* dan  $D(t)$  = laju *discharge*. Misal  $P_B(t)$  adalah neto energi yang tersedia untuk baterai, dengan pengertian  $P_B(t) > 0$  berarti siklus *recharge* sedang berlangsung dan  $P_B(t) < 0$  adalah siklus *discharge* sedang berlangsung.

Laju *recharge* diberikan model sebagai berikut:

$$R(t) = \begin{cases} \frac{K_1 P_B(t)}{K_1 + C(t)}, & \text{jika } P_B(t) \geq 0, \\ 0, & \text{jika } P_B(t) < 0. \end{cases}$$

dengan  $K_1 > 0$  adalah konstanta efisiensi laju *recharge*. Sebagai contoh, misalkan kapasitas maksimum baterai adalah 100 Wh, nilai  $K_1=250$  berarti efisiensi laju *recharge* hanya sekitar 70% saat mendekati kondisi kapasitas penuh jika dibandingkan dengan kondisi saat kapasitas mendekati kondisi kapasitas kosong. Model laju *discharge* sebagai berikut:

$$D(t) = \begin{cases} K_2 P_B(t), & \text{jika } P_B(t) < 0, \\ 0, & \text{jika } P_B(t) \geq 0. \end{cases}$$

dengan  $K_2$  adalah faktor resiko, operasional di lapangan nilai  $K_2 \approx 1.4$  yang berarti hanya sekitar 70% energi yang tersimpan dalam baterai dapat digunakan untuk mensuplai beban sistem. Catatan bahwa  $K_1$  dan  $K_2$  diasumsikan menggunakan baterai *lead-acid*. Jika baterai dipertimbangkan sebagai bagian dari sistem maka  $P_B(t)$  menjadi fungsi yang tergantung pada komponen sistem lainnya dan beban sistem, dalam hal ini berapa besar kapasitas panel surya, dinamo kincir angin dan propeler mikro hidro yang digunakan serta berapa besar beban lampu penerangan yang digunakan sehingga tercapai biaya operasional sistem yang efisien. Misal  $P_B(t)$  neto energi listrik pada baterai,  $P_R(t)$  energi yang dihasilkan panel surya,  $P_K(t)$  energi yang dihasilkan kincir,  $P_G(t)$  energi yang dihasilkan propeller

mikro hidro dan  $P_L(t)$  adalah beban permintaan. Selanjutnya ke tiga pilihan operasi di atas dapat dimodelkan secara matematis sebagai berikut:

$$P_B(t) = \begin{cases} (P_R(t) + P_K(t) + P_G(t) - P_L(t))K_3, & \text{jika } P_G(t) \geq P_L(t), \\ K_3(P_R(t) + P_K(t) + P_G(t) - P_L(t)), & \text{jika } P_G(t) + K_3(P_R(t) + P_K(t)) \geq P_L(t), \\ P_R(t) + P_K(t) - \frac{P_L(t) - P_G(t)}{K_3}, & \text{jika } P_G(t) + K_3(P_R(t) + P_K(t)) < P_L(t), \end{cases}$$

dengan  $K_3$  adalah konstanta efisiensi *inverter*.

$P_B(t)$  positif

$$\text{Jika } P_L(t) \leq P_G(t) + K_3(P_R(t) + P_K(t))$$

dan  $P_B(t)$  negatif

$$\text{Jika } P_L(t) > P_G(t) + K_3(P_R(t) + P_K(t))$$

dengan model dinamis sistem tersebut, yaitu dinamis *recharge* dan *discharge* baterai, tidak ada energi yang terbuang. Selanjutnya menggabungkan ekspresi  $P_B(t)$  dengan *charge* dinamis baterai diperoleh model dinamis keseluruhan sistem gabungan, yaitu:

$$C(t) = \begin{cases} \frac{K_1 K_3 (P_R(t) + P_K(t) + P_G(t) - P_L(t))}{K_1 + C(t)}, & \text{jika } P_G(t) \geq P_L(t), \\ \frac{K_1 (K_3 (P_R(t) + P_K(t) + P_G(t) - P_L(t)))}{K_1 + C(t)}, & \text{jika } P_G(t) + K_3 (P_R(t) + P_K(t)) \geq P_L(t) \\ K_2 \left( P_R(t) + P_K(t) - \frac{(P_L(t) - P_G(t))}{K_3} \right), & \text{jika } P_G(t) + K_3 (P_R(t) + P_K(t)) < P_L(t). \end{cases}$$

dalam prakteknya propeler mikro hidro dapat dioperasikan pada salah satu level output yang jumlahnya terbatas, untuk simulasi numerik, diasumsikan bahwa propeler mikro hidro dapat dioperasikan pada level *output* 0% (*off*), 40% (*low*), 60% (*medium*), 80% (*high*) dan 100% (*maximum*) dari kapasitas maksimum.

Fungsi tujuan (4) yang diajukan terdiri dari tiga faktor biaya. Secara matematis, dapat dimodelkan sebagai berikut:

1. Biaya operational propeler mikro hidro diberikan dengan model

$$\int_0^{t_f} P_G(t) g_1(5P_G(t)) dt$$

dengan  $P_G(t)$  = level output propeler mikro hidro pada saat  $t$ ,

$$0 \leq P_G(t) \in \{0\%, 40\%, 60\%, 80\%, 100\% \} \leq T_{max}.$$

$g_1(P_G(t)) =$  fungsi efisiensi biaya propeler mikro hidro pada saat  $t$ ,

$$g_1(x) = 2((0.2x + 0.5)^{0.4} - (0.5)^{0.4})e^{-0.1x} + 0.15(1 - e^{-0.1x}). \text{ (Gambar 1.)}$$

2. Biaya *recharge* dan *discharge* baterai diberikan dengan model

$$\int_0^{t_f} (C(t) - K)^2 dt$$

Dengan  $C(t) =$  kapasitas baterai pada saat  $t$ .

$K =$  konstanta, menjaga kapasitas baterai 80% dari kapasitas maksimum,

3. Biaya denda propeler mikro hidro untuk tidak beroperasi pada interval waktu pendek diberikan model:

$$\int_0^{t_f} g_2 dt, \quad g_2(x) = ((x + 0.01)^{0.25} - (0.01)^{0.25}) e^{-5x}, \text{ (Gambar 2.)}$$

dan batasan maksimum dan minimum kapasitas energi pada baterai

$C_{min} \leq C(t) \leq C_{max}, \forall t \in [0, t_f]$  dan energi yang tersimpan pada akhir periode untuk kesiapan operasional hari berikutnya  $C(t_f) = C_f$ , dengan  $C_f =$  kapasitas baterai diakhir interval waktu.

## 2.2. Hasil Penelitian Terdahulu

Hasil sebelumnya menunjukkan bentuk kurva normal dijadikan sebagai model matematika radiasi matahari dari pagi hingga sore hari. Pemodelan matematika kurva tersebut sebagai fungsi power  $P_R(t) = P_K(t) = P_{max}/108 [(t-6)^3 - 4(t-9)^3 + 6(t-12)^3 - 4(t-15)^3 + (t-18)^3]$ . Dengan  $P_K(t)$  adalah besarnya daya yang dihasilkan panel surya saat  $t$ ,  $t$  adalah waktu dari mulai pagi hingga sore atau malam hari dan  $P_{max}$  adalah daya maksimum panel surya yang optimal (pada waktu tengah hari dengan kondisi cuaca cerah). Pada penelitian ini akan dilakukan strategi set point sudut elevasi panel surya untuk mempertahankan kondisi optimal agar tercapai tidak hanya di tengah hari saja melainkan baik di pagi hari maupun sore hari.



Perolehan data intensitas matahari dari dataloger seringkali dilakukan dengan menentukan terlebih dulu selang waktu antara data akibatnya kurva yang dihasilkan akan memiliki ujung-ujung yang lancip (spike), untuk menghaluskan ujung lancip kurva agar tampak halus diperlukan algoritma interpolasi data (*smoothing*). Adapun untuk maksud tersebut berikut adalah program interpolasi data *cube B-spline* baik untuk data intensitas matahari maupun kecepatan angin:

```

c Some simple code to produce the coefficients
c for a smooth cubic B-spline interpolation of solar radiation or windspeeds data.
c We're assuming that the time points for the data are equally
c spaced at 15 minute intervals (optional) and the entire time domain is
c a 24 hour period (optional).
c
integer i,j,inpoint(97)
real*8 cdata(97),Ainv(97,97),coeff(97),bloc(98),temp,x
real*8 phi,temp1,temp2,dphidx
character*10 infile,outfile
c _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____ 5 _____ 6 _____
7__
c Reading input and output file names.
print *,'Enter name of input file.'
read(*,'(A)')infile
print *,'Enter name of output file.'
read(*,'(A)')outfile
open(unit=10,file=infile)
open(unit=11,file=outfile)
c _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____ 5 _____ 6 _____
7__
c Setting up data from file. First read the lot, then pick out the
c required column.
do 10, i=1,97
read(10,*) inpoint(i),cdata(i)
10 continue
c _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____ 5 _____ 6 _____
7__
c Now to calculating the spline coefficients. First need to determine
c the inverse of the 'A' matrix.
bloc(1)=1.0d0
bloc(2)=4.0d0
do 20, i=1,96
bloc(i+2)=4.0d0*bloc(i+1)-bloc(i)
20 continue
do 50, i=1,97
do 40, j=1,97
if(i.lt.j)then
Ainv(i,j)=(-1.0d0)**(i+j)*bloc(i)*bloc(97-j+1)
elseif(i.eq.j)then

```

```

        Ainv(i,j)=bloc(i)*bloc(97-i+1)
    else
        Ainv(i,j)=Ainv(j,i)
    endif
40  continue
50  continue
c _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____ 5 _____ 6 _____
7__
c Now to calculate the spline coefficients.
    do 70, i=1,97
        temp=0.0d0
        do 60, j=1,97
            temp=temp+4.0d0*Ainv(i,j)*cdata(j)/bloc(98)
        60  continue
        coeff(i)=temp
    70  continue
c Printing them out to a file to be read by MISER.
c   do 100,i=1,97
c     write(11,'(f10.6)')coeff(i)
c 100 continue
c _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____ 5 _____ 6 _____
7__
c Checking whether this actually works...
    x=0.0d0
    do 200, i=1,8001
        temp1=0.0d0
        temp2=0.0d0
        do 150, j=1,97
            temp1=temp1+coeff(j)*phi(j,x)
            temp2=temp2+coeff(j)*dphidx(j,x)
        150  continue
        write(11,'(f10.6,2x,f14.6,2x,f14.6)')x,temp1,temp2
        x=x+0.003d0
    200  continue
    end
c _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____ 5 _____ 6 _____
7__

```

```

doubleprecision function phi(i,x)
integer i
real*8 x,stepsize,temp
stepsize=0.25d0
if(x.le.(stepsize*dble(i-3)))then
    temp=0.0d0
elseif(x.le.(stepsize*dble(i-2)))then
    temp=(x-(stepsize*dble(i-3)))**3
elseif(x.le.(stepsize*dble(i-1)))then
    temp=((x-(stepsize*dble(i-3)))**3
&      -4.0d0*(x-(stepsize*dble(i-2)))**3)

```

```

elseif(x.le.(stepsize*dble(i)))then
  temp=((x-(stepsize*dble(i-3)))**3
&      -4.0d0*(x-(stepsize*dble(i-2)))**3
&      +6.0d0*(x-(stepsize*dble(i-1)))**3)
elseif(x.le.(stepsize*dble(i+1)))then
  temp=((x-(stepsize*dble(i-3)))**3
&      -4.0d0*(x-(stepsize*dble(i-2)))**3
&      +6.0d0*(x-(stepsize*dble(i-1)))**3
&      -4.0d0*(x-(stepsize*dble(i)))**3)
else
  temp=0.0d0
endif
phi=0.25d0*temp/(stepsize**3)
return
end

```

c \_\_\_\_\_ 1 \_\_\_\_\_ 2 \_\_\_\_\_ 3 \_\_\_\_\_ 4 \_\_\_\_\_ 5 \_\_\_\_\_ 6 \_\_\_\_\_  
7\_\_

```

doubleprecision function dphidx(i,x)
integer i
real*8 x,stepsize,temp

```

c \_\_\_\_\_ 1 \_\_\_\_\_ 2 \_\_\_\_\_ 3 \_\_\_\_\_ 4 \_\_\_\_\_ 5 \_\_\_\_\_ 6 \_\_\_\_\_  
7\_\_

```

stepsize=0.25d0
if(x.le.stepsize*dble(i-3))then
  temp=0.0d0
elseif(x.le.stepsize*dble(i-2))then
  temp=(x-stepsize*dble(i-3))**2
elseif(x.le.stepsize*dble(i-1))then
  temp=((x-stepsize*dble(i-3))**2
&      -4.0d0*(x-stepsize*dble(i-2)))**2)
elseif(x.le.stepsize*dble(i))then
  temp=((x-stepsize*dble(i-3))**2
&      -4.0d0*(x-stepsize*dble(i-2)))**2
&      +6.0d0*(x-stepsize*dble(i-1)))**2)
elseif(x.le.stepsize*dble(i+1))then
  temp=((x-stepsize*dble(i-3))**2
&      -4.0d0*(x-stepsize*dble(i-2)))**2
&      +6.0d0*(x-stepsize*dble(i-1)))**2
&      -4.0d0*(x-stepsize*dble(i)))**2)
else
  temp=0.0d0
endif
dphidx=0.75d0*temp/(stepsize**3)
return
end

```

Perancangan kincir angin yang akan dipilih dalam pemanfaatan sumber daya angin kelompok sedang (wilayah tropis) adalah jenis vertikal yang dimodifikasi dengan roda pejal untuk memberikan putaran kincir yang memiliki power yang besar sehingga mampu memutar dynamo listrik dengan daya yang direkomendasikan.

Tabel Aproksimasi unit sistem kapasitas baterai dan dinamo kincir angin (12 Volt)

Amper Baterai/Accu	Maksimum Kapasitas Baterai	Maksimum Kapasitas Dinamo kincir angin
6 Ampere	72 Watt-jam	7 Watt-jam
10 Ampere	120 Watt-jam	12 Watt-jam
20 Ampere	240 Watt-jam	24 Watt-jam
60 Ampere	720 Watt-jam	72 Watt-jam

### 2.3. Renstra Dan Peta Jalan Penelitian Perguruan Tinggi Universitas Lampung

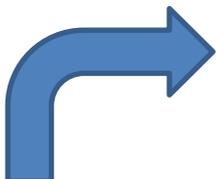
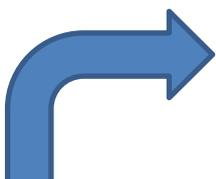
Berpedoman kepada RIP LPPM Universitas Lampung periode 2016-2021, fokus riset pengembangan TIK secara umum dan pengembangan sistem TIK untuk optimasi dan integrasi proses sistem hibrid yang secara eksplisit/implisit akan melibatkan aliran listrik. Untuk model-model matematis seperti ini, upaya menyelesaikan model adalah penting. Oleh karena itu, aplikasi metode numeris untuk mendapatkan solusi. Dengan keadaan ini, penelitian yang diajukan dapat digunakan sebagai referensi dalam mengkaji keadaan yang dapat diselesaikan dengan metode analitik dan numerik.

Berdasarkan informasi di atas, penelitian yang diajukan ini merupakan bagian dari penguatan ilmu-ilmu dasar untuk pengembangan ilmu-ilmu terapan. Hasil penelitian ini dapat berupa Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (Iptek) unggulan/baru Universitas Lampung yang terpublikasikan pada jurnal terakreditasi di luar negeri. Luaran hasil penelitian ini sangat mungkin dapat memenuhi sasaran yang ditetapkan pada Renstra LPPM Universitas Lampung periode 2016-2020 terutama diarahkan pada daya saing institusi, jumlah publikasi internasional bereputasi dan buku referensi, serta dapat dikembangkan oleh kelompok masyarakat (mahasiswa KKN tematik Unila, misalnya) yang menerapkan ipteks sebagai bagian dalam pengabdian kepada masyarakat.

Dengan kata lain, penelitian yang akan dilakukan ini dapat:

1. Meningkatkan kemampuan dan keterampilan dosen Unila dalam meneliti dan mempublikasikan karya ilmiah di tingkat nasional dan internasional.

2. Meningkatkan jumlah penelitian, kualitas karya ilmiah dan publikasi ilmiah, termasuk di antaranya buku ajar dan referensi.
3. Menambah jumlah dan frekuensi dosen Unila sebagai pemakalah/pembicara utama/undangan maupun sebagai dosen tamu/*visiting lecturer*/professor yang mempresentasikan hasil pemikirannya dalam forum ilmiah bermutu baik pada tingkat lokal, nasional, regional maupun internasional.

	Jangka Pendek (April-Mei 2021)	Jangka Menengah (Juni-Agustus 2021)	Jangka Panjang (September 2021)
Tahap Lanjut			<i>Menyelesaikan model sistem hibrid dengan pengendalian efisiensi menggunakan photocell, sensor-grak dan atau wifi switch.</i>
Tahap Pengembangan		<i>Pembuatan model sistem hibrid berbasis Angin, Matahari dan mikro hidro.</i>	
Tahap Inisiasi	<i>Studi dan Observasi model sistem hibrid.</i>		

Gambar 1. *Road Map* Penelitian yang dilakukan dalam penelitian yang direncanakan.

## **BAB III. METODE PENELITIAN**

### **3.1. Tempat dan Waktu**

Penelitian akan dilakukan di Jurusan Matematika dan Laboratorium Matematika dan Statistika Terapan Jurusan Matematika FMIPA Universitas Lampung. Lamanya waktu yang diperlukan adalah 1 (satu) tahun pada tahun anggaran **2021**.

### **3.2. Bahan dan Alat**

Bahan penelitian adalah buku dan jurnal matematika, analisis numerik, dan komputasi. Sedangkan alat yang digunakan (dipersiapkan untuk proses komputasi dan simulasi menggunakan program komputer) adalah seperangkat komputer *Notebook Core i5* yang berisikan *software* MATHEMATICA versi 9. Instalasi sistem hibrid di daerah prospek untuk penerangan jalan sekitar pondok umniyati.

### **3.3. Metode Penelitian**

Penelitian ini menggunakan metode pendekatan studi literatur terhadap persoalan yang akan di selesaikan. Artikel (jurnal dan/atau prosiding), buku teks, pendapat pakar yang resmi dan legal dijadikan sebagai bahan penelitian. Sedangkan alat yang digunakan dalam penelitian disertasi ini adalah seperangkat komputer PC dengan perangkat lunak MATHEMATICA.

Dalam penelitian yang diusulkan ini, kami akan melakukan tahapan-tahapan penelitian sebagaimana diilustrasikan dalam Gambar 3. Secara deskriptif, alur penelitian dalam Gambar 3. dijelaskan sebagai berikut ini:

- **Tahap Pertama.**

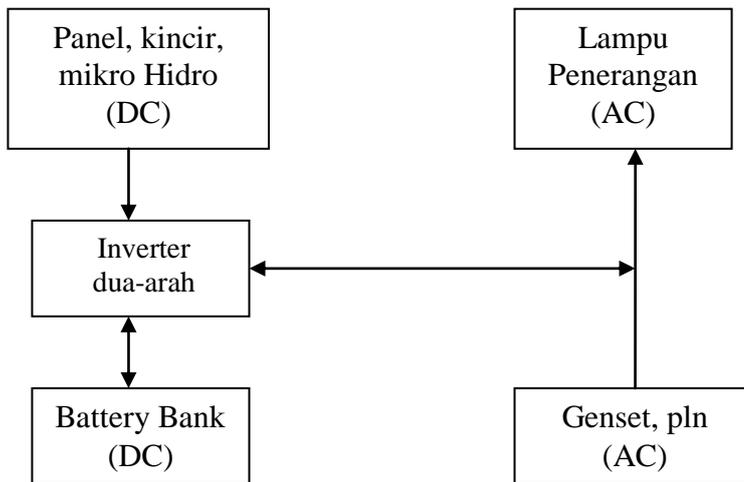
Dalam tahapan ini dilakukan pengumpulan bahan pustaka/referensi berupa hasil-hasil penelitian yang dipaparkan pada jurnal-jurnal internasional terdahulu untuk kemudian dikaji dan diobservasi bentuk umum sistem hibrid.

- **Tahap Kedua.**

Dalam tahapan kedua ini, akan formulasikan model sistem hibrid pembangkit listrik berbasis angin, matahari dan mikro hidro berikut strategi pengendalian efisiensinya.

- **Tahap Ketiga.**

Dalam tahapan ketiga ini, kajian penyelesaian pengadaan listrik unrtuk penerangan jalan daerah prospek sekitar pondok secara hibrid dengan pengendalian optimal sehingga tercapai biaya minimal.



Gambar 2. Skema Sistem Hibrid

Langkah-langkah transformasi tersebut adalah: Model sistem dinamis yang telah dibangun “Masalah (P)” selanjutnya ditransformasi ke dalam model bentuk standar melalui teknik control parameter sehingga permasalahan dapat diselesaikan dengan cara pendekatan standar kontrol sebagai parameter (Kamien dan Schwartz, 1991; Ahmed, 1988; Cecari, 1983; Craven, 1978; Craven, 1995; Fisher dan Vincent, 1990; Gruver dan Sachs, 1981; Kaya dan Noakes, 2001b; Miele, 1987; Miele dan Wang, 1986; Rehbock dkk., 1999; Schwartz, 1996; Teo, Goh dan Wong, 1991; Tiryono dkk., 2004; Tiryono dan Rehbock 2005; Tiryono dan Rehbock 2006; Tiryono R. 2006; Dian K. dan Tiryono R., 2006; Tiryono R. 2007; Tiryono dkk., 2008; Tiryono dan Rehbock 2010), untuk maksud tersebut fungsi *enhancing* kontrol ( $u_{enh}(\tau)$ ) perlu ditentukan terlebih dahulu. Langkah awal untuk menentukan fungsi *enhancing* kontrol ( $u_{enh}(\tau)$ ) adalah dengan menggunakan teknik KONTROL, pertama dengan mengasumsikan  $N$  adalah jumlah maksimum *switching*. Agar dimungkinkan semua kombinasi sistem dalam  $\Omega$  dapat terjadi, misal  $L=M(N + 1)$  dan set indeks sekuen tetap  $w_L = [w_1, w_2, \dots, w_L]^T \in V_L$  dengan  $w_j = ((j-1) \text{ mod } M) + 1, j = 1, 2, \dots, L$ . Dengan demikian diperoleh:

$$w_L = [1, 2, \dots, M, 1, 2, \dots, M, 1, 2, \dots, M],$$

sekuen terurut  $[1, 2, \dots, M]$  berulang sebanyak  $N + 1$  kali dalam  $w_L$ . Kemudian dihadapkan pada proses operasional dalam interval waktu  $[0, t_f]$ , diperoleh model sistem dinamis sebagai,

$$\dot{x}(t) = f^{w_j}(t, x(t)), \quad t \in [\tau_{j-1}, \tau_j), \quad j = 1, 2, \dots, L, \quad (5)$$

$$x(0) = x_0, \quad (6)$$

$$x(\tau_j) = x(\tau_j - 0), \quad j = 1, 2, \dots, L-1, \quad (7)$$

dimana  $\tau_L = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{L-1}]^T \in T_L$  harus sesuai dengan

$$0 = \tau_0 \leq \tau_1 \leq \tau_2 \leq \dots \leq \tau_{L-2} \leq \tau_{L-1} \leq \tau_L = t_f \quad (8)$$

maka permasalahan menjadi:

**Masalah ( $P^N$ ):** Dengan memberikan sejumlah  $N$  *switching*, untuk  $L=M(N+1)$ , cari  $\tau_L \in T_L$  (sesuai (8)) sehingga fungsi tujuan  $J(L, \tau_L, w_L)$  yang ditentukan pada (4) adalah minimum dengan kendala sistem dinamis (5) – (7).

Selanjutnya diperkenalkan variabel waktu baru  $s \in [0, L]$ . Misalkan  $U$  fungsi skalar / konstan pada  $[0, L]$  dengan titik *switching* ditetapkan terletak pada  $\{1, 2, \dots, L-1\}$ .

Transformasi (KONTROL) dari  $t \in [0, t_f]$  ke  $s \in [0, L]$  didefinisikan dengan

$$\frac{dt}{ds} = u(s), \quad t(0) = 0 \quad (9)$$

dengan fungsi skalar  $u \in U$ ,  $u_{enh}(s) = \tau_j - \tau_{j-1}$  untuk  $s \in [j-1, j)$ , disebut *enhancing* kontrol, hal tersebut harus sesuai

$$\int_0^L u_{enh}(s) ds = t_f \quad (10)$$

Alternatif lain dapat menggantikan (10) dengan menekankan pembatas

$$t(L) = t_f \quad (11)$$

dengan melakukan KONTROL pada **Masalah ( $P^N$ )** dalam skala waktu baru, sistem dinamis ditulis kembali sebagai

$$\dot{\bar{x}}(s) = u(s) \bar{f}^j(s, \bar{x}(s)), \quad s \in [j-1, j), \quad j = 1, \dots, L \quad (12)$$

$$\bar{x}(0) = x_0 \quad (13)$$

$$\bar{x}(j) = \bar{x}(j-0), \quad j = 1, \dots, L-1 \quad (14)$$

dengan  $\bar{x}(s) = x(t(s))$ ,  $\bar{f}^j(s, \bar{x}(s)) = f^j(t(s), x(t(s)))$  dan  $t(s)$  adalah solusi dari  $u_{enh}(s)$ , *enhancing* kontrol (9). Demikian juga fungsi tujuan (4) ditransformasi, menjadi:

$$\bar{j}(u) = \phi(\bar{x}(L)) + \int_0^L u_{enh}(s) \bar{g}(s, \bar{x}(s)) ds, \quad (15)$$

dengan  $\bar{g}(s, \bar{x}(s)) = g(t(s), x(t(s)))$ .

Selanjutnya masalah yang telah ditransformasi dinyatakan sebagai berikut:

**Masalah ( $P_e^N$ ):** Mencari *enhancing* kontrol, ( $u_{enh}(s)$ ), sedemikian hingga meminimumkan fungsi tujuan (15) dengan kendala sistem dinamis (9), (12)-(14) dan syarat batas pada skala waktu baru (11).

Dalam skala waktu baru, model dinamis sistem yang telah dibangun kemudian ditransformasi, yaitu:

$$\begin{aligned} \dot{C}(t) \text{ menjadi } \dot{C}(s) \\ i(s) = u_{enh}(s), \quad \bar{C}(0) = C_0, \quad t(0) = 0. \\ \bar{C}(N) = C_f \end{aligned}$$

Demikian juga dengan fungsi biaya pembobotan propeler mikro hidro dan operasi baterai ditransformasi, yaitu:

$$\int_0^N U_G(s) g_1(5U_G(s)) u_{enh}(s) ds$$

dan

$$\int_0^N (\bar{C}(s) - K_4)^2 u_{enh}(s) ds.$$

dan untuk biaya denda generator tidak beroperasi pada interval pendek adalah:

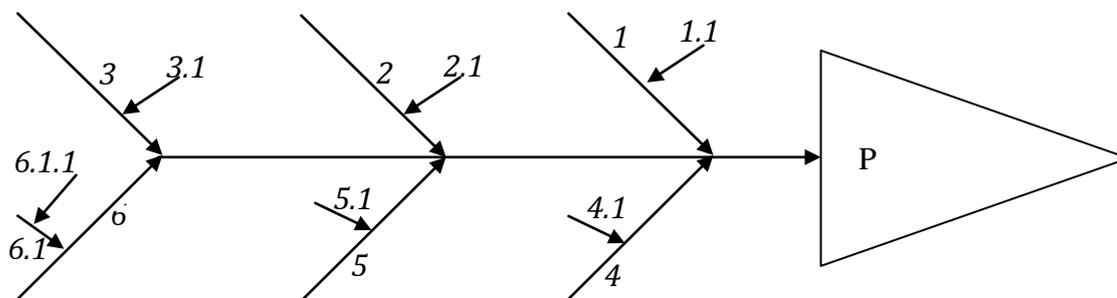
$$\int_0^N g_2(u_{enh}(s)) ds$$

Selanjutnya untuk mendapatkan solusi dari masalah optimal kontrol yang telah ditransformasi adalah mencari *enhancing* kontrol,  $u_{enh}(s)$ , sedemikian rupa sehingga fungsi biaya

$$\int_0^N \{ \alpha U_G(s) g_1(5U_G(s)) u_{enh}(s) + \beta (\bar{C}(s) - K_4)^2 u_{enh}(s) + \gamma g_2(u_{enh}(s)) \} ds$$

menjadi minimum, dengan kendala dinamis sistem dan syarat batasan lainnya. Dalam hal ini berturut-turut  $\alpha$ ,  $\beta$  dan  $\gamma$  adalah koefisien bobot untuk biaya bahan bakar, *charge* baterai dan biaya denda *switching*. Dengan demikian masalah yang telah ditransformasi memiliki fungsi kontrol yang konstan, yang telah ditentukan pada partisi yang teratur dalam interval waktu  $[0, L]$ . Kemudian dapat diselesaikan dengan bantuan *software* optimal kontrol yang cocok dengan metoda tersebut (Jennings dkk, 1991; Jennings dkk., 1996), dengan jumlah maksimum *switching* propeler mekanis mikro hidro ditentukan terlebih dahulu (Feng dkk., 2008; Lee dkk., 1997; Lee dkk. 1999; Lee

dkk., 2008). Selanjutnya, untuk menuju pengembangan sistem pemantauan pengelolaan pengadaan energi listrik alternatif yang efisien, langkah awal yang dilakukan adalah dengan membuat program transfer data dan konversi data loger radiasi matahari, kecepatan angin, kapasitas baterai, dan beban sistem yang diperoleh dari alat-alat pengambil data menjadi sebuah database.



Gambar 3. Diagram *Fishbone* (*cause-effect diagram*) Penelitian yang Direncanakan  
Keterangan:

P: Kajian model sistem hibrid dan bagaimana keadaan sistem tersebut, misalnya keadaan di sekitar titik tetap/*equilibrium* untuk jangka waktu yang lama,.

1. Mengidentifikasi semua besaran yang terlibat
  - 1.1. Penegasan lambang pada semua lambang yang terlibat
  - 1.2. Menentukan satuan besaran yang terlibat
2. Menentukan satuan besaran yang terlibat
  - 2.1 Membedakan antara besaran yang merupakan konstanta maupun variabel,.
3. Menentukan hukum yang mengendalikan,
4. Memanfaatkan asumsi – asumsi dan teori yang ada untuk mendapatkan persamaan.
5. Menentukan hubungan konstanta dan variabel sehingga dapat disusun menjadi model matematika.
6. Menyelesaikan persamaan yang telah dimodelkan dengan menggunakan optimisasi sehingga ditemukan suatu solusi.
  - 6.1. Simulasi model dengan menggunakan program Mathematica
    - 6.1.1 Perbandingan solusi analitik dan numerik.

### 3.4. Luaran dan Indikator Capaian Penelitian

Hasil/luaran dan indikator capaian pada penelitian ini adalah diperolehnya hasil analisa perilaku model, sehubungan dengan bervariasinya nilai-nilai parameter yang terlibat. Hasil/luaran penelitian ini antara lain telah diusulkan untuk terbit pada jurnal Barekeng Vol 16 No 1 Maret 2022. Dan publikasi internal Unila jika dimungkinkan. Luaran dan indikator capaian penelitian dapat dirinci sebagaimana diberikan dalam tabel berikut ini:

**Tabel Rencana Target Capaian Tahunan**

No	Jenis Luaran			Target Capaian 2021	
	Kategori	Sub Kategori	Wajib Tambahan		
1	Artikel ilmiah dimuat di jurnal	Internasional bereputasi	Tidak ada		
		Nasional Terakreditasi	<i>Accepted</i>	proses	√
2	Artikel ilmiah dimuat di prosiding	Internasional Terindeks	Tidak ada		
		Nasional	<i>Summited</i>		
3	<i>Invited speaker</i> dalam temu ilmiah	Internasional	draft	terdaftar	√
		Nasional	draft	terdaftar	√
4	<i>Visiting Lecturer</i>	Internasional	Tidak ada		
5	Hak Kekayaan Intelektual (HKI)	Paten	Tidak ada		
		Paten sederhana	Tidak ada		
		Hak Cipta	Tidak ada		
		Merek dagang	Tidak ada		
		Rahasia dagang	Tidak ada		
		Desain Produk Industri	Tidak ada		
		Indikasi Geografis	Tidak ada		
		Perlindungan Varietas Tanaman	Tidak ada		
		Perlindungan Topografi Sirkuit Terpadu	Tidak ada		
		6	Teknologi Tepat Guna	Tidak ada	
7	Model/Purwarupa/Desain/Karya seni/ Rekayasa	Tidak ada			
8	Buku Ajar (ISBN)	<i>Editing</i>	<i>Published</i>		
9	Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT)	1			

#### **BAB IV. HASIL DAN LUARAN YANG DICAPAI**

Sistem DGS (Diesel Genset Stand-alone) merupakan sistem pengadaan sumber listrik yang biasa digunakan di daerah yang belum terjangkau jaringan listrik PLN. Akan tetapi berdasarkan kelemahan-kelemahan pada sistem DGS yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, maka untuk mengintegrasikan kelemahan-kelemahan tersebut, salah satu alternatif pengadaan sumber listrik yang efisien untuk elektrifikasi di daerah yang belum ada jaringan PLN adalah dengan menggunakan Pembangkit Listrik Sistem Hibrid (PLSH), dimana Pembangkit Listrik Sistem Hibrid (PLSH) adalah gabungan dari beberapa jenis pembangkit listrik, salah satunya adalah pembangkit listrik tenaga diesel atau biasa disebut dengan genset. Agar sistem dapat beroperasi dengan optimal maka setiap komponen sistem harus dapat memberikan suplai energi yang optimal pula.

Untuk itu perlu ditinjau lebih jauh dari setiap komponen-komponen Pembangkit Listrik Sistem Hibrid (PLSH), pada penelitian ini akan dicari model profile genset sehingga dapat memberikan suplai energi optimum pada sistem.

Genset dipilih sebagai salah satu komponen Pembangkit Listrik Sistem Hibrid (PLSH) karena mengingat komponen-komponen yang lain (kincir angin, panel surya) terkadang memberikan suplai energi listrik yang fluktuatif. Oleh karena itu genset dipilih sebagai salah satu komponen alternatif yang dapat memberikan suplai energi untuk memenuhi beban permintaan yang fluktuatif pula. Sehingga bersama dengan komponen-komponen lain genset diharapkan dapat memenuhi beban permintaan. Namun dalam hal ini genset yang digunakan harus relevan dengan kapasitas system yang dibangun. Hal ini bertujuan untuk menghindari energi yang dihasilkan terbuang atau hilang, sehingga energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara optimal.

Genset yang digunakan dalam penelitian ini adalah genset yang berkapasitas 50 kw. Selanjutnya genset dapat dioperasikan pada salah satu level output yang jumlahnya terbatas. Pada penelitian ini setiap 1 jam genset dihidupkan pada level output yang berbeda-beda dengan mengukur jumlah bahan bakar yang terpakai.

Pertama-tama genset dalam kondisi off atau pada level output 0 % dari kapasitas maksimum, kondisi ini adalah kondisi dimana genset tidak beroperasi. Dengan memasang sebuah tabung ukur transparans pada tangki bahan bakar, maka jumlah bahan bakar yang terpakai akan dapat diukur. Selanjutnya setelah genset siap untuk dioperasikan, pasang level daya output 20 % dari kapasitas maksimumnya, dengan cara menggeser arah jarum pada mesin genset. Selama 1 jam genset dihidupkan pada level tersebut, jumlah bakar yang terpakai dapat diukur dengan mengamati tabung ukur yang telah dipasang, pada level output tersebut genset dapat menghabiskan bahan bakar sekitar 500 ml, dengan energi yang dikeluarkan 10 kw, pada level ini jumlah bahan bakar yang dikeluarkan relatif sedikit, sesuai dengan energi yang dihasilkan.

Setelah beberapa saat genset dimatikan, pasang genset pada level daya output 40 % dari kapasitas maksimum, genset dihidupkan pada level tersebut selama 1 jam, dengan melakukan cara yang sama, setelah genset berhenti beroperasi, jumlah bahan bakar yang dihabiskan dapat diukur pada tabung ukur yang telah dipasang pada tangki bahan bakar, dengan mengamati tabung ukur genset beroperasi pada level output 40 % selama 1 jam bahan bakar yang diperlukan sekitar 950 ml. Pada level ini genset hanya menghasilkan energi 20 kw, sedangkan jumlah bahan bakar yang diperlukan relatif besar.

Selanjutnya genset dihidupkan kembali pada level daya output 60 % dari kapasitas maksimum, yang berarti bahwa genset mampu menghasilkan energi sebesar 30 kw. Selama 1 jam genset beroperasi pada level daya output tersebut, jumlah bakar yang diperlukan sebesar 980 ml, dengan jumlah bahan bakar yang diperlukan relatif besar, energi yang dapat dihasilkan hanya 30 kw. Namun pada level daya output ini genset beroperasi relatif stabil.

Pada durasi yang sama, genset dioperasikan pada level daya output 80 %. Pada level ini genset beroperasi relatif stabil, energi yang dihasilkan 40 kw, dengan memerlukan jumlah bahan bakar 1000 ml, perbedaan jumlah bahan bakar yang diperlukan pada level daya output sebelumnya tidak signifikan, artinya genset dioperasikan dengan daya tinggi atau dioperasikan pada daya rendah jumlah bahan bakar yang dibutuhkan tidak mempunyai perbedaan yang jauh. Namun energi yang dihasilkan sangat signifikan.

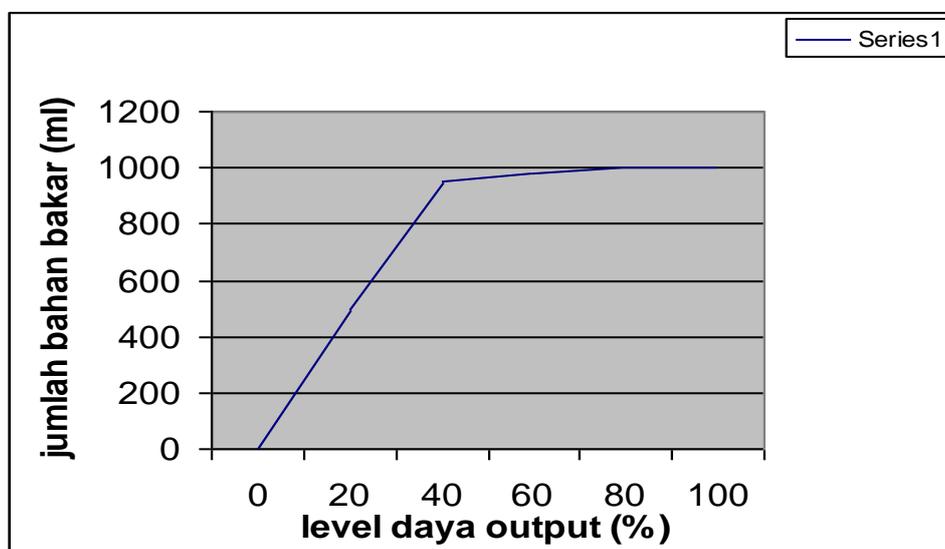
Begitu pula ketika genset dioperasikan pada level daya output maksimum jumlah bahan bakar yang dibutuhkan relatif sama ketika genset beroperasi pada level output 80 %, hal ini berarti bahwa semakin tinggi level daya output genset maka jumlah bahan bakar yang diperlukan relatif stabil.

Aproksimasi daya atau kapasitas output genset dengan jumlah bahan bakar setiap 1 jam diberikan pada tabel berikut :

Daya	Jumlah bahan bakar (ml)
0 % (off)	0
20 %	500
40 %	950
60 %	980
80 %	1000
100 %	1000

Tabel 1. Data level daya dengan jumlah bahan baker yang terpakai stiap 1 jam

Selanjutnya data yang diperoleh, diplot menggunakan perangkat lunak Microsoft excel dan diperoleh grafik sebagai berikut :

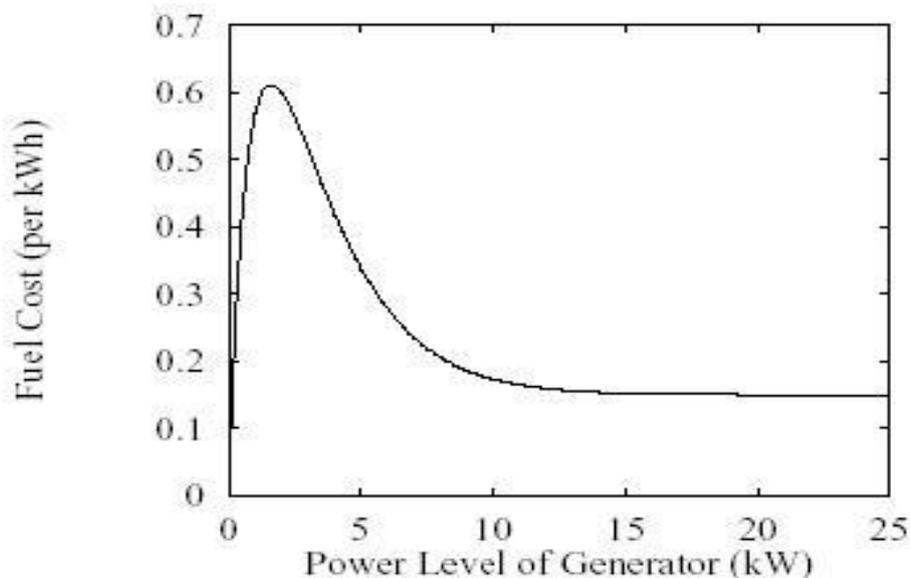


Gambar 1. Grafik daya output dengan jumlah bahan bakar.

Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa ketika genset dioperasikan pada level daya output rendah, jumlah bahan bakar yang dibutuhkan relatif sedikit, namun kondisi ini dapat dikatakan kurang efisien, karena ketika level daya output dinaikkan, jumlah bahan bakar yang diperlukan akan bertambah, dan pertambahan itu tidak sebanding dengan pertambahan jumlah energi listrik yang dihasilkan. Grafik di atas menunjukkan semakin besar level daya output dioperasikan, jumlah bahan bakar yang diperlukan semakin stabil.

Pada saat genset beroperasi dengan level output 20 %, maka daya atau energi yang dikeluarkan adalah 10 kw, jumlah bahan bakar yang terpakai sekitar 500 ml, genset beroperasi pada level output 40 % daya yang dikeluarkan adalah 20 kw, dan bahan bakar yang terpakai sekitar 950 ml, selanjutnya pada level output 60 % daya yang dikeluarkan adalah 30 kw, dengan bahan bakar yang dikeluarkan sekitar 980 ml, dan pada saat genset beroperasi pada level output 80 % dengan daya yang dikeluarkan 40 kw, genset membutuhkan bahan bakar sekitar 1000 ml, kondisi ini sama dengan ketika genset beroperasi pada level output di atas 80 % dari kapasitas maksimum.

Selanjutnya adalah pada grafik gambar 1 ditransformasi ke dalam grafik fungsi biaya, yaitu diperoleh grafik sebagai berikut :



Gambar. 2 Grafik hubungan level daya genset dengan harga bahan bakar

Genset adalah Pembangkit Listrik yang dapat memberikan suplai energi listrik yang relatif konsisten. Akan tetapi untuk mempertahankan kekonsistenan suplai energi listrik tersebut

akan berakibat semakin membengkaknya biaya operasional, terutama pengeluaran biaya bahan bakar yang harus disediakan untuk menjaga tetap beroperasinya genset. Dapat dilihat pada grafik di atas ketika genset dioperasikan pada tingkat output lebih rendah 40 % dari kapasitas maksimum, maka bahan bakar yang diperlukan akan lebih sedikit, akan tetapi dengan mengoperasikan genset lebih rendah dari kapasitas maksimumnya banyak energi listrik yang tidak dapat diproduksi dari yang seharusnya. Korban energi listrik yang tidak diproduksi sebagai akibat tidak dimanfaatkannya secara maksimal dari suatu sistem genset, tidak sebanding dengan penurunan jumlah bahan bakar yang digunakan.

Sehingga agar genset dapat digunakan secara optimal, genset harus beroperasi pada level output di atas 80 % dari kapasitas maksimumnya, kondisi ini dapat dikatakan optimal karena energi yang dikeluarkan cukup besar dengan jumlah bahan bakar yang diperlukan sesuai dan stabil, namun seringkali genset memproduksi energi lebih dari yang diperlukan oleh beban permintaan dan energi yang tidak digunakan akan terbuang atau hilang, karena genset tidak mampu menyimpan energi listrik yang tersisa terutama ketika output dari genset melebihi beban permintaan, oleh karena itu pada Pembangkit Listrik Sistem Hibrid (PLSH) salah satu komponennya adalah baterai yaitu guna untuk menyimpan energi yang tersisa. Dan dapat digunakan untuk mensuplai energi listrik ketika beban permintaan melebihi dari energi listrik yang dihasilkan dari sistem generator. Selain beberapa pertimbangan di atas, apabila genset dioperasikan pada level output kurang dari 40 % untuk periode waktu lama dapat mengakibatkan kerusakan pada genset yaitu pengkerasan pada silinder blok mesin genset, kondisi tersebut memerlukan perawatan khusus dan akan memakan biaya perawatan yang lebih tinggi dari pada perawatan biasa.

Fungsi atau model berikut merupakan model yang diperoleh dari data yang ada.

$$g1(x) = 2((0,2x + 0,5)^{0,4} - (0,5)^{0,4})e^{-0,1x} + 0,15(1 - e^{-0,1x}).$$

Dimana  $x$  adalah level daya genset (kw), dan  $g1(x)$  adalah biaya bahan bakar yang dikeluarkan. Agar sistem genset dapat memberikan suplai energi yang optimum pada Pembangkit Listrik Sistem Hibrid (PLSH), maka model atau fungsi di atas dapat digunakan untuk mencari solusi optimum pada strategi operasional dalam menjalankan sistem hibrid.

Sinar matahari sebagai sumber energi terbarukan merupakan salah satu sumber energi yang saat ini di Indonesia sangat perlu dikembangkan, mengingat kebutuhan energi listrik yang semakin meningkat, hal ini seiring dengan dengan semakin terbatasnya sumber energi dari bahan bakar fosil. Energi dari sinar matahari salah satunya digunakan untuk pembangkit tenaga listrik. Oleh karena itu pengadaan listrik untuk daerah terpencil ataupun di daerah perkotaan perlu dikembangkan secara berkelanjutan dengan sentuhan sains dan teknologi yang berwawasan ramah lingkungan. Perangkat pengadaan listrik yang sudah lama dikenal adalah sistem disel genset *stand-alone* atau sendiri (DGS). Sistem ini biasanya digunakan pada daerah-daerah yang belum terjangkau PLN. Tetapi sistem DGS ini memiliki banyak kelemahan, salah satunya adalah tingkat efisiensinya yang rendah, karena itu perlu dicari alternative sistem pembangkit listrik lain yang lebih efisien dan dapat menghasilkan energi listrik yang besar dan stabil, yaitu Pembangkit Listrik Sistem Hibrid (PLSH). Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada Bab 2 bahwa PLSH merupakan pembangkit listrik yang komponennya terdiri dari panel surya-kincir angin-genset yang berperan sebagai generator listrik dan baterai sebagai penyimpan energi listrik.

Pada penelitian ini akan membahas salah satu komponen PLSH yang berfungsi sebagai generator listrik yaitu panel surya (*Photovoltaic arrays*). Panel surya diraki dari sekumpulan sel-sel surya (*Solar Cells*) yang masing-masing sel dibuat dari bahan semikonduktor yang dapat langsung menghasilkan arus listrik DC (*Direct Current*). Data yang diambil adalah data jumlah daya keluaran (*output*) panel surya pada selang waktu tertentu dari matahari terbit sampai terbenam ( $\pm$  selama 12 jam), yang bertujuan untuk mendapatkan nilai optimal kontrol panel surya dari model sistem yang dibangun sedemikian sehingga memberikan daya dan masa pakai maksimum. Dengan daya maksimum pada panel surya maka bersama dengan pembangkit listrik lain yaitu kincir angin dan genset akan mengecras baterai untuk memenuhi beban permintaan secara efisien. Selain itu adanya model optimal kontrol pada panel surya tersebut dipertimbangkan untuk menghindari *recharge* baterai/*accu* berlebihan yang dapat mengakibatkan kerusakan atau penurunan masa pakai.

Hal pertama yang dilakukan pada penelitian ini adalah menghimpun unit sirkuit paralel-seri panel surya. Dengan menyusun panel surya secara campuran paralel seri maka akan menghasilkan atau memberikan daya ataupun arus yang maksimum. Hal ini diperlukan

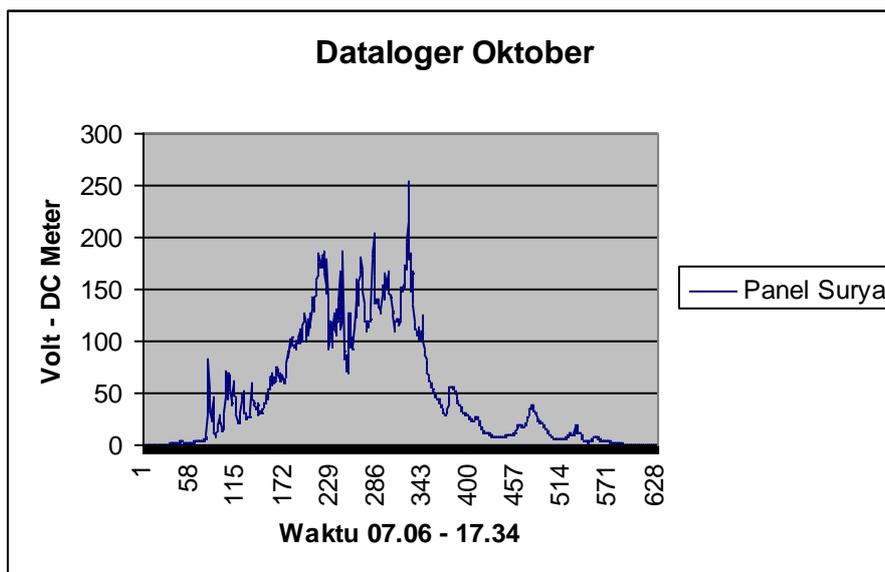
untuk membuat panel surya dengan sel-sel yang mempunyai perbedaan tegangan dan karakteristiknya dan bagian lain dari sistem hybrid. Dengan menyusun sel-sel surya secara parallel dan seri, maka tegangan dapat menjadi sesuai yang secara typical dipilih untuk disesuaikan dengan tegangan baterai. Dalam prakteknya, panel surya tidak selalu terdiri dari sel-sel yang identik, karena mungkin terdiri dari sel yang waktu dan tempat pembuatannya berbeda. Dapat juga tipe yang sama dari sel yang diinginkan, namun kesalahan pembuatan juga dapat mengakibatkan output yang dihasilkan berbeda karena permukaan sel yang rusak. Dengan kata lain jika sel-sel surya disusun secara parallel atau seri saja maka jika ada salah satu sel yang rusak atau bermasalah bias menyebabkan terputusnya aliran arus atau dapat juga menyebabkan arus yang dihasilkan tidak maksimal atau berkurang bila dibandingkan dengan susunan sel surya secara seri dan parallel.

Yang kedua hal yang dilakukan adalah memasang panel secara horizontal sehingga tersinari oleh matahari. Jika memasang panel surya secara vertikal memang tersinari oleh matahari tetapi sinar matahari yang mengenai permukaan panel surya tidak maksimal. Dengan semakin berkemabangnya teknologi panel surya dalam skala besar biasanya dibuat dengan menggunakan tiang penyangga yang fleksibel bergerak sesuai dengan sudut penyinaran matahari, karena itu energi dari sinar matahari dapat terserap secara maksimal dan dapat menghasilkan arus yang lebih besar. Tetapi walau demikian besar arus listrik yang dihasilkan oleh panel surya berbeda setiap waktu.

Yang ketiga adalah menghubungkan keluaran panel surya dengan alat ukur tegangan listrik. Sel surya terbuat dari bahan semikonduktor yang secara kimiawi disediakan dalam dua bentuk yaitu tipe-p dan tipe-n. Daerah dimana kedua bentuk ini saling bertemu disebut pertemuan p-n (*p-n junction*). Dalam sel surya energi elektromagnetik dapat diubah menjadi energi listrik. Secara sederhana jika radiasi sinar matahari mengenai atau melewati pertemuan p-n maka akan langsung diubah menjadi energi listrik. Besarnya arus yang mengalir sebanding dengan perpindahan elektron yang ditentukan dengan intensitas cahayanya. Cahaya matahari terdiri dari foton-foton, jika foton jatuh pada permukaan bahan sel surya (absorber) akan diserap, dipantulkan atau dilewatkan begitu saja dan hanya foton dengan level energi tertentu yang akan membebaskan elektron dari ikatan atomnya, sehingga timbul arus listrik, yang jika dihubungkan dengan alat ukur tegangan listrik maka besarnya tegangan dapat dilihat.

Langkah berikutnya adalah mencatat data setiap selang waktu tertentu dari tegangan yang dihasilkan oleh panel surya. Pada penelitian ini penulis mengambil atau mencatat data pada alat ukur tegangan listrik setiap 1 menit sekali dari pukul 07.06 Wib sampai pukul 17.34 Wib dibulan Oktober. Dapat dilihat pada Gambar.3 bahwa pada pukul 07.06 Wib sampai pukul 07.35 Wib tegangan yang dihasilkan belum ada atau 0, karena sinar matahari belum begitu panas. Sedangkan mulai pukul 07.36 Wib sampai pukul 16.49 Wib tegangan yang dihasilkan panel surya sudah ada nilainya dan pada pukul 12.29 Wib tegangannya maksimum yaitu sebesar 253 volt karena sinar matahari sudah panas. Diatas pukul 12.30 Wib tegangan yang dihasilkan oleh panel surya mulai berkurang karena sinar matahari mulai redup. Pada pukul 16.50 Wib sampai dengan 17.34 Wib panel surya tidak menghasilkan tegangan atau tegangannya bernilai 0.

Dengan diperolehnya data jumlah tegangan yang dihasilkan panel surya setiap menitnya pada bulan Oktober, langkah selanjutnya adalah mengplot data yang diperoleh alat ukur pada koordinat kartesian menggunakan perangkat lunak microsoft excel yang ditunjukkan pada grafik berikut:



Gambar 3. Plot data intensitas matahari dari terbit–terbenam yang diperoleh pada bulan Oktober.

Hasil pengeplotan data pada bulan Oktober berupa grafik yang nilai tegangannya fluktuatif. Pada hari tersebut mungkin cuaca kurang begitu mendukung atau dengan kata lain cuacanya tidak menentu, kadang cerah dan kadang berawan. Titik puncak kurva

menunjukkan bahwa saat tengah hari intensitas sinar matahari menimpa dataloger panel surya memberikan keluaran daya yang maksimum dan kedua titik lainnya yang memotong garis horizontal berarti matahari belum terbit atau matahari telah terbenam sehingga data loger panel surya menunjukkan keluaran daya bernilai 0 (nol).

Profil daya intensitas matahari (cuaca cerah) dari dataloger yang mendekati kurva normal diambil sebagai model matematis karena kondisi tersebut menunjukkan keluaran daya pada surya yang maksimum. Karena alasan tersebut, grafik diatas kurang tepat diambil sebagai model matematika intensitas penyinaran matahari dari terbit hingga terbenam.

Sumber air mengalir dari sumur semi artesis memiliki debit 300 liter per jam dengan diameter pralon vvc ½” untuk memutar kincir generator mikro hidro, listrik yang dihasilkan dapat langsung digunakan pada malam hari dan atau disimpan atau mengcharge baterai bank. Generator mikro-hidro dapat dikonfigurasi secara paralel maupun seri, dengan demikian debit air yang ada dapat dimanfaatkan secara maksimal.

Sumber daya angin merupakan sumber energi untuk dapat menggerakkan kincir angin sebagai salah satu alat yang dapat secara langsung mensuplai kebutuhan listrik kepada masyarakat, tentunya didesain sedemikian sehingga unit dynamo kincir angin relevan dengan tipe kincir anginnya. Karena energi yang dihasilkan oleh kincir angin tidak stabil tergantung pada kondisi alam (kecepatan angin) yang dapat mengakibatkan pengaruh yang nyata terhadap keluaran yang nyata terhadap keluaran yang dihasilkan generator kincir angin sehingga Pembangkit Listrik Sistem Hibrid (PLSH) merupakan solusi yang sangat tepat dan efisien karena dapat menekan kelemahan-kelemahan yang ada pada kondisi alam yang sangat fluktuatif.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa pembangkit Listrik Sistem Hibrid merupakan pembangkit listrik yang komponennya terdiri dari panel surya-kincir angin/air-genset/pln yang berperan sebagai generator dan baterai sebagai penyimpan energi. Pada penelitian ini akan membahas salah satu komponen Pembangkit Listrik Sistem Hibrid (PLSH) yang berfungsi sebagai generator listrik yaitu kincir angin dengan tipe propeller (lift) dan safonius (drag). Kincir angin tipe propeller (lift) memiliki putaran mekanis sayap baling-baling sentrifugal vertikal sedangkan kincir angin tipe safonius (drag) memiliki putaran mekanis sayap baling-baling sentrifugal horizontal.

Unit dynamo kincir angin ini dilengkapi dengan gearbox untuk meningkatkan jumlah putaran (rpm). Putaran dari rotor sayap kincir akibat hembusan angin secara mekanis melalui gearbox dapat digunakan sebagai penggerak dynamo listrik dengan aliran DC atau AC (*Direct Current* atau *Alternating Current*).

Pada penelitian ini dirancang kincir angin segala arah terdiri dari tiga sayap sehingga mampu berputar akibat dorongan angin dari manapun, dengan daya keluaran (output) yang dihasilkan dapat maksimal. Data yang diambil adalah data kecepatan angin pada pukul 00.05.23 – 20.36.23 yang bertujuan untuk mendapatkan solusi optimal dalam pengadaan sumber listrik sistem dynamo kincir angin dari model sistem yang dibangun sedemikian sehingga memberikan daya dan masa pakai maksimum dari masing-masing kapasitas komponen sistem. Dengan daya maksimum kecepatan angin tersebut maka bersama dengan pembangkit listrik lain yaitu panel surya dan genset dapat digunakan untuk mengisi baterai sehingga beban permintaan terpenuhi secara efisien. Selain itu, adanya model optimal control pada kincir angin tersebut dipertimbangkan untuk menghindari *recharge dan discharge* baterai atau accu berlebihan yang dapat mengakibatkan kerusakan atau penurunan masa pakai. Hal pertama yang dilakukan adalah menghimpun unit dynamo listrik yang relevan dengan jenis kincir angin untuk menghasilkan atau memberikan daya ataupun arus yang maksimum. Hal ini diperlukan sehingga akan terbentuk sebaik mungkin rancangan kincir angin tipe safonus (drag) dengan tiga sayap baling-baling seperti gambar berikut:

Kincir angin tersebut kemudian dihubungkan dengan alat ukur tegangan listrik (data logger) sebagai berikut sehingga hasil keluaran atau outputnya dapat dilihat.

Kesalahan dalam merancang sistem kincir angin dengan data logger dapat mempengaruhi atau mengakibatkan output yang dihasilkan berbeda karena daya yang dihasilkan tidak dapat secara langsung diukur oleh alat ukur tegangan listrik tersebut. Dengan kata lain, kesalahan dalam menyusun unit dynamo listrik yang relevan dengan jenis kincir angin kemudian dihubungkan dengan data logger dapat menyebabkan terputusnya aliran arus atau dapat juga menyebabkan arus yang dihasilkan tidak maksimal (berkurang).

Besarnya arus yang mengalir akan sebanding dengan kecepatan angin yang ditentukan oleh banyaknya angin pada waktu tertentu. Dalam hal ini kincir angin juga dilengkapi dengan

*brake system* yang digunakan untuk menjaga putaran pada poros setelah *gearbox* agar bekerja pada titik aman saat terdapat angin yang besar. Alat ini dipasang karena generator memiliki titik kerja aman dalam pengoperasiannya. Generator akan menghasilkan energi listrik maksimal pada saat bekerja pada titik kerja yang telah ditentukan. Sehingga kehadiran angin di luar dugaan akan menyebabkan putaran yang cukup cepat pada poros generator, sehingga jika tidak diatasi maka putaran ini akan merusak generator. Dampak dari kerusakan putaran berlebih diantaranya : *over head*, *rotor break down*, kawat pada generator putus karena tidak dapat menahan arus yang cukup besar.

Langkah berikutnya adalah mencatat data dengan selang waktu yang tidak dapat ditentukan secara pasti tergantung perubahan yang sangat signifikan dari kecepatan angin yang dihasilkan. Penelitian ini dilakukan pada tanggal 30 Juli 2021 dengan mencatat data pada alat ukur tegangan listrik dari pukul 00.05.23-20.36.23 yang dapat dilihat pada grafik berikut (Gambar 4.)

Dari pukul 00.05.23-00.17.23 kecepatan angin semakin menurun dan pada pukul 01.43.46 kecepatan angin yang dihasilkan tidak ada sama sekali atau 0, hal ini disebabkan karena tidak ada angin sehingga kincir angin yang dirancang sedemikian sehingga tidak berputar atau bergerak. Fluktuasi yang dihasilkan dari kecepatan angin sangat terlihat dari pukul 01.45.55-08.06.04 yang berkisar antara 1.47-7.62 mph. meskipun tidak ada data yang terlihat dengan perbedaan yang signifikan atau mencolok pada waktu-waktu tersebut maka data kecepatan angin yang dihasilkan masih terlihat stabil. Pada pukul 08.06.04-18.49.09 terlihat bahwa kecepatan angin mulai meningkat dibandingkan dengan waktu-waktu sebelumnya. Jadi untuk selang waktu ini dapat dihasilkan energi yang cukup besar sehingga dapat digunakan untuk mengencas baterai atau secara langsung dapat mensuplai energi listrik.

Dengan diperolehnya data kecepatan angin yang dihasilkan oleh kincir angin tersebut, langkah selanjutnya adalah mengplot data yang diperoleh alat ukur pada koordinat kartesian menggunakan perangkat lunak *Microsoft excel* yang di tunjukkan pada grafik berikut:



Gambar 4. Grafik kecepatan angin bulan Juli

Hasil pengeplotan data pada bulan Juli berupa grafik yang nilai kecepatannya fluktuatif. Hal tersebut dikarenakan cuaca yang kurang mendukung atau dengan kata lain perubahan kondisi alam (kecepatan angin) dapat mengakibatkan pengaruh yang nyata terhadap keluaran yang dihasilkan generator kincir angin.

Titik puncak kurva menunjukkan bahwa pada siang hari kecepatan angin yang mengenai data loger memberikan keluaran daya yang maksimal dan kedua titik lainnya yang memotong garis horizontal berarti kincir angin tersebut tidak bergerak sehingga kecepatan angin yang dihasilkan sangat kecil.

Profil kecepatan angin dari data loger yang mendekati kurva normal diambil sebagai model matematis karena kondisi tersebut menunjukkan kecepatan angin yang maksimal. Karena alasan tersebut, grafik di atas kurang tepat diambil sebagai model matematika intensitas kecepatan angin selama satu hari.

Berdasarkan perolehan uraian di atas:

1. Model sistem hibrid berbasis angin, matahari dan mikro hidro bersama-sama sistem baterai, genset dan atau pln secara integral dapat diandalkan dalam mempertrahankan mensuplai kebutuhan listrik secara kontinu.
2. Strategi pengendalian efisiensi dengan menggunakan photocell, sensor-gerak dan atau wifi.switch sangat signifikan dalam penggunaan energi listrik secara smart.
3. Lampu penerangan sepanjang jalan sekitar pondok umniyati sebanyak 5 lampu led 18watt secara otomatis menyala dari pukul 17:55 – 05:55 setiap harinya, sejak di instalasi sistem hibrid tersebut.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ashari M. dan Nayar C.V.m 1999. An Optimal Dispatch Strategy Using Set Points for a Photovoltaic (PV)-Diesel-Battery Hybrid Power System, *Solar Energy*, **Vol. 66** No. 1., pp1-9.
- Feng, Z.G., K.L. Teo and V. Rehbock, 2008. Optimal Sensor Scheduling in Continuous Time, *Dynamic Systems and Applications*, **17(2)**, pp.331-350.
- Feng, Z.G., K.L. Teo and V. Rehbock, 2008. Hybrid Method for a General Optimal Sensor Scheduling Problem in Discrete Time, *DAutomatica*, **44(5)**, pp. 1295-1303.
- Harijono T., 2020. Menerangi Negeri: PLN 75 Tahun, Penerbit Buku Kompas PLN.
- Iyer V., Fung C.C. and Maynard C. 1998. Use of Fuzzy Logic Algorithm for the Power Generation Scheduling of a Remote Area Hybrid Energy System, Proceedings of the Fourth International Conference on Optimization: *Technique and Application (ICOTA'98)*, July 1-3, Perth, Western Australia, pp941-947.
- Jennings L.S., Fisher M.E., Teo K.L. and Goh C.J. 1991. MISER3: Solving Optimal Control Problems – An Update, *Advanced Engineering Software*, **Vol.13(4)**, pp190-196.
- Jennings, L.S., K.L. Teo, V. Rehbock and W.X. Zheng, 1996. Optimal Control of Singular Systems with a Cost of Changing Control, *Dynamics and Control*, **6**, pp. 63-89.
- Lee, H.W.J., K.L. Teo, L.S. Jennings and V. Rehbock, 1997. Control Parametrization Enhancing Technique for Time Optimal Control Problems, *Dynamic Systems and Applications*, **6(2)**, 243-261.
- Lee, H.W.J., K.L. Teo, V. Rehbock and L.S. Jennings, 1999. Control Parametrization Enhancing Technique for Discrete-Valued Control Problems, *Automatica*, **35(8)**, 1401-1407.
- Lee, W.R., L. Caccetta and V. Rehbock, 2008. Optimal Design of All-Pass Variable Fractional-Delay Digital Filters, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, **55(5)**, pp. 1248-1256.
- Loxton, R.C., K.L. Teo, V. Rehbock and W.K. Ling, 2009. Optimal Switching Instants for a Switched-Capacitor DC/DC Power Converter, *Automatica*, **45(4)**, pp. 973-980.
- Manthos Papamattheou dan David Infield. 2000. A New Model for Performance Evaluation of Hybrid Power Systems and its Application to Mykonos, *International Journal of Renewable Energy Engineering*, **Vol. 2** No. 2, pp176-183.
- Mayer S.T., Yoon H.C., Bragg C. and Lee J.H. 1997. *Low Temperature Ethylene Carbonate Based Electrolyte for Lithium-ion Batteries*, Polystor Corporation, Dublin, CA.
- Nayar C.V., Phillips S.J., James W.L., Pryor T.L. and Remmer D. 1993. Novel Wind/Diesel/Battery Hybrid Energy System, *Solar Energy*, **Vol. 51**. No 1., pp65-78.
- Panickar P., Islam S.M. and Chem V. Nayar 1998. Optimum Fuel Dispatch in a Wind-Diesel Hybrid System - A Case Study, Proceedings of the Fourth International Conference on Optimization: *Technique and Application (ICOTA'98)*, July 1-3, Perth, Western Australia, pp948-955.
- Paul G. 2004. *Wind Power Renewable Energy for Home, Farm, and Business*, Chelsea Green Publishing Company.
- Sasaki T., Imamura N., Terasaki M., Mizutani M. and Yamachi M. 1999. Studies on the Characteristics of Float-Charged Li-ion Battery [sic], *196th meeting of the Electrochemical Society*, Oct. 17-22.

- Sathiaraj T.S. and Kefa V O Rabah 2000. Solar Cells Based on Dye-sensitized Nanocrystalline TiO<sub>2</sub> Semiconductor Thin Films-A Review, *International Journal of Renewable Energy Engineering*, **Vol. 2** No. 2, pp193-199.
- Siddhartha Bhatt M. and Sudhir Kumar R. 2000. Performance Analysis Of Solar Photovoltaic Power Plant-Experimental Results, *International Journal of Renewable Energy Engineering*, **Vol. 2** No. 2, pp184-191.
- Tiryono R. and V.Rehbock 2010. Description and Modelling of Hybrid Power Systems. *Proceeding of IndoMS International Conference on IICMA 2009*. ISBN 978-602-96426-0-5, pp. 547-560.
- Tiryono R., Machudor Y, dan Dorrah A., 2008. Deskripsi dan Optimisasi Model Pembangkit Listrik Sistem Hibrid Menggunakan Teknik CPET. *Jurnal Sains MIPA*, ISSN 1978-1873 V.14 No.1 hal. 33-40.
- Tiryono, R. 2007. Optimal Control of Hybrid Power Systems. *Jurnal Sains MIPA*, ISSN 1978-1873, V.13, No.1, hal. 49-56.
- Dian K. dan Tiryono R., 2006. Data Generik untuk Pemodelan Matematika Intensitas Matahari dari Terbit – Terbenam menggunakan Dataloger Panel Surya. *Jurnal Sains dan Teknologi*, ISSN 0853-733X, Desember 2006, Vol. 12, NO. 3, Hal.: 173 -178.
- Tiryono R. 2006. Model Lokal – Global Radiasi Matahari sebagai Sumber Energi Terbarukan menggunakan Hibrid Panel Surya – Baterai. *Prosiding Seminar Hasil-hasil Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat*. BUKU II, November 2006, Hal.: 444 – 451.
- Tiryono R. and V. Rehbock 2005. “Numerical Solution of Optimal Switching Control Problems”, in Qi et al. (eds.) *Optimization and Control with Applications*, Springer, Series on Applied Optimization, Vol. 96, Chapter 21.
- Tiryono, R., W.R. Lee, and V. Rehbock 2004, “Optimal Design and Operation of Hybrid Power Systems”, *Proceedings of Industrial Optimization Symposium, Curtin University 2003*, (L. Caccetta and V. Rehbock, Editors), **1**, pp. 324-335.
- Tiwari A.N., Romeo A., Baetzner D. and Zogg H. 2001. Flexible CdTe Solar Cells on Polymer Films, *Prog. Photovolt: Res. Appl* **Vol. 9**. pp211-215.
- Uchida R. and Yamada T. 2000. Power Electronics for High-Power Applications in the 21<sup>st</sup> Century, *Conference Record of The 2000 IEEE Industry Applications Conference*, Therty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy, pp661-8661.
- Wang Y. and Reimers J. 1998. Proposed Mechanism for Cycling Fade in LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Li-ion cells, *9th Int. Meeting on Lithium Batteries*, July 12-17, Edinburgh.
- Wichert B. and Lawrance W.B. 1998. *Photovoltaic Resource and Load Demand Forecasting in Stand-alone Renewable Energy System*, 2<sup>nd</sup> World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, July, Vienna.
- Yano Research Institute Ltd. of Japan (2000). Studies of the Li-ion Battery Market-Year 1999, and MacArthur D., Blomgren G. and Powers R (2000), Lithium and Lithium Ion Batteries 2000. Power Associate 2000.