

**PEMANFAATAN AIR *BUANGAN* TURBIN PEMBANGKIT  
LISTRIK TENAGA *MINI-HYDRO* DENGAN MODEL DESAIN  
INTEGRASI *POWERHOUSE* BERBASIS  
*ANT COLONY OPTIMIZATION***

**MUHAMMAD KHAIDIR**



**PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR**

**2020**

**PEMANFAATAN AIR *BUANGAN* TURBIN PEMBANGKIT  
LISTRIK TENAGA *MINI-HYDRO* DENGAN MODEL DESAIN  
INTEGRASI *POWERHOUSE* BERBASIS  
*ANT COLONY OPTIMIZATION***

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi

Teknik Elektro

Disusun dan diajukan oleh

**MUHAMMAD KHAIDIR**

**Kepada**

**PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2020**

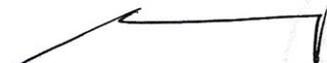
**TESIS**  
**PEMANFAATAN AIR BUANGAN TURBIN PEMBANGKIT**  
**LISTRIK TENAGA *MINI-HYDRO* DENGAN MODEL DESAIN**  
**INTEGRASI *POWERHOUSE* BERBASIS**  
***ANT COLONY OPTIMIZATION***

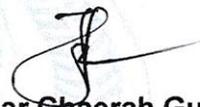
Disusun dan diajukan oleh :

**MUHAMMAD KHAIDIR**  
**Nomor Pokok D032172005**

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Tesis  
Pada Tanggal 4 Maret 2020  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui  
Komisi Penasehat

  
**Yusri Syam Akil, ST.,MT.,Ph.D**  
Ketua

  
**Dr. Indar Chaerah Gunadin, ST.,MT**  
Anggota

Ketua Program Studi S2  
Teknik Elektro

  
**Prof. Dr. Eng. Syafaruddin, ST.,M.Eng**  
Nip.1974053019990310003

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin,



  
**Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT**  
Nip.1960123119860910001

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Muhammad Khaidir

Nomor Pokok : D032172005

Program Studi : Teknik Elektro

Konsentrasi : Teknik Energi Listrik

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 4 Maret 2020

Yang menyatakan,



Muhammad Khaidir

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena hanya kemurahanNya sehingga Penulis dapat menyelesaikan laporan hasil penelitian yang berjudul :**“Pemanfaatan Air Buangan Turbin Pembangkit Listrik Tenaga Mini-hydro Dengan Model Desain Integrasi *Powerhouse* Berbasis *Ant Colony Optimization*”**.

Tesis ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan magister di program studi Teknik Elektro Konsentrasi Teknik Energi, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa hormat dan ucapan terima kasih kepada beberapa pihak yang telah berkontribusi dalam penyelesaian tesis ini, yakni kepada:

1. Ayahanda tercinta, Muhammad Husein (Almarhum) dan ibunda, Kunu yang selalu segar dengan kasih sayang, doa, dan memberi semangat. Tak lupa dalam pengorbanan materiil. Pengorbanan yang tidak akan mampu digantikan oleh apapun.
2. Istri tersayang Jusnawati, S.Sos, M.Si atas motivasi dan pengorbanannya semoga terus dialiri keberkahan, dan putri sulung penulis Nabila Azmya Aira yang masih berusia 11 bulan, tangis dan tawa yang menyertai dalam penyusunan tesis ini akan lekat menjadi kenangan indah.
3. Yusri Syam Akil, ST, MT, Phd selaku pembimbing 1 dan Dr. Indar Chaira Gunadin, ST, MT yang diamanahkan sebagai pembimbing 2.

Keduanya telah banyak meluangkan waktu dan pikiran untuk memberi pengarahan sekaligus saran dalam perbaikan dan penyempurnaan tesis ini. Tidak luput pula, motivasi yang diberikan kepada penulis agar terus bangkit, menepis kelelahan yang kerap menjarah.

4. Prof. Dr. Ir. Salama Manjang, MT, Prof. Dr. Eng. Syafaruddin, ST., M.Eng, Dr. Ir. Hj. Sri Mawar Said, MT. Masing-masing diamanahkan sebagai penguji dalam sidang tesis ini. Penulis menyadari bahwa tesis ini tentu tidak luput dari beberapa kekurangan, karena itu pula beragam saran dan kritik yang konstuktif dari penguji membuka jalan kemudahan bagi penulis untuk terus memperkaya isi tesis ini.
5. Prof. Dr. Ir. Salama Manjang, MT, sebagai kepala departemen Teknik Elektro yang telah menyediakan waktu dan pengarahan untuk kelancaran penyelesaian tesis penulis.
6. Prof. Dr. Eng. Syafaruddin, ST., M.Eng selaku ketua prodi pascasarjana teknik elektro, yang juga telah memberikan arahan dan menyediakan waktu dengan sikap yang ramah untuk mendukung kelancaran penyelesaian tesis ini.
7. Para dosen pengajar di Pascasarjana Teknik Elektro yang telah bersedia memberikan ilmu dan perhatiannya.
8. Segenap staf administrasi di Fakultas Teknik yang dengan keramahan dan keterbukaan pelayanan menghadapi penulis.
9. Teman kelas seperjuangan dan seluruh mahasiswa pascasarjana Teknik Elektro angkatan 2017, yang telah menjadi teman curah

pendapat, yang saling memotivasi dalam mengarungi proses perkuliahan. Semoga selalu dalam ikatan batin *Electro For All and Electro Never Day*.

10. kakanda, sahabat, adik-adik HPMM Komisariat Poltek, adik-adik HMI Komisariat Poltek, LISAN Cabang Makassar, atas memotivasi, membantu secara teknis dan menjadi teman untuk bertukar pikiran. Semoga tetap dalam solidaritas yang kuat.

11. Ayahanda Drs. KH. Masrur Makmur La Tanro, S.Pd.I., M.Pd.I dan ayahanda ketua HIKMA Sulsel Ir. H. Anshar Mangopo, M. Si, terima kasih yang tak terhingga atas bantuan materiil kepada penulis sehingga penulis bisa berada di titik ini. Semoga menjadi ladang amal jariah.

12. Terakhir, kepada semua saudara kandung dan keluarga yang telah *mensupport* baik secara materiil maupun non materiil kepada penulis. Semoga persembahkan karya sederhana dan pencapaian ini dapat memberi kebahagiaan dan keberkahan.

Akhir kata, dengan segala keterbatasan dan kerendahan hati, penulis mempersembahkan tesis ini kepada khalayak pembaca. Semoga karya sederhana ini memberi kontribusi dalam menambah khazanah pengetahuan, serta bermanfaat dalam perbaikan sumber daya manusia dan pemenuhan kebutuhan manusia terkhusus pada kebutuhan listrik.

Makassar, 28 Februari 2020

**Muhammad Khaidir**

## ABSTRAK

**Muhammad Khaidir.** Pemanfaatan Air Buangan Pembangkit Listrik Tenaga *Mini-Hydro* Dengan Model Desain Integrasi *Powerhouse* Berbasis Ant Colony Optimization (dibimbing oleh Yusri Syam Akil dan Indar Chaerah Gunadin)

Salah satu masalah yang sering terjadi dalam pengembangan pembangkit listrik tenaga *mini-hydro* adalah terbatasnya lokasi pembangunan pembangkit. Metode baru optimalisasi pada level desain dapat menjadi solusi permasalahan ini. Tujuannya untuk mengoptimalkan penggunaan air. Model yang ditawarkan adalah model integrasi dua *powerhouse*, memanfaatkan air buangan turbin *powerhouse* pertama dialirkan ke *powerhouse* kedua. Fokus penelitian menghitung setiap nilai parameter penempatan optimal *powerhouse* kedua. Penelitian dilakukan di pembangkit listrik tenaga *mini-hydro* Bungin 1, Desa Baruka, Kecamatan Bungin, Kabupaten Enrekang, Sulawesi Selatan, Indonesia. Kapasitas daya terpasang 2 x 1,5 MW. Metode analisa penentuan letak optimal adalah metode *ant coloni optimization* (ACO), digambarkan secara topografis menggunakan *Geographic Information Sistem* (GIS). Hasil penempatan optimal *powerhouse* kedua berada di koordinat 3°30'50.87"S dan 119°55'31.36"E, dengan *head* 43 meter. Debit andalan air buangan turbin 4,515 m<sup>3</sup>/s. *Output* daya efektif perencanaan *powerhouse* kedua 1,771 MW. Daya total efektif dua *powerhouse* terintegrasi 4,771 MW.

Kata kunci : Pembangkit listrik tenaga *mini-hydro*, integrasi *powerhouse*, ACO, GIS

## ABSTRACT

**Muhammad Khaidir.** Utilization Of Turbine Wastewater Of Mini-HydropowerPlant With Powerhouses Integration Design Model Using Ant Colony Optimization (supervised by Yusri Syam Akil and Indar Chaerah Gunadin)

One problem that often occurs in the development of mini-hydropower plants is the limited location of the power plant construction. New methods of optimization at the design level can be the solution to this problem. This study aims to develop a model that optimizes the use of water. The model offered is an integration of two powerhouses, utilizing the wastewater discharged of the first powerhouse turbine to the second powerhouse. The focus of this study is to calculate each parameter value of the optimal placement of the second powerhouse. The study conducted at the Bungin1 mini-hydropower plant, Baruka Village, Bungin District, Enrekang Regency, South Sulawesi, Indonesia. The installed power capacity is 2 x 1.5 MW. The analysis method for determining the optimal location is the ant coloni optimization (ACO) method, illustrated topographically using the Geographic Information System (GIS).The result shows that the optimal placement of the second powerhouse is at coordinates 3° 30'50.87"S and 119° 55'31.36" E, with a head of 43 meters. Mainstay discharge of turbine wastewater is 4,515 m<sup>3</sup>/s. The effective power output of the second powerhouse planning is 1,771 MW. The total effective power of two integrated powerhouses is 4,771 MW.

Keywords : Mini-Hydro, Powerhouse Integration, ACO, GIS

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGANTAR	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	7
C. Tujuan Penelitian	7
D. Manfaat Penelitian	7
E. Ruang Lingkup Penelitian	8
F. Penelitian Terkait	8
G. Sistematika Penulisan	14
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	16
A. Teknologi Sumber Daya Energi Air	16
B. Dasar Hukum PLTA	18
C. Konseptualisasi PLTM	19
D. Komponen PLTM	21
E. Identifikasi Lokasi	24
F. Debit Air dan Model Pengukurannya	28
G. Perhitungan Daya Listrik	33
H. Perencanaan Pemilihan Turbin PLTM	34
I. Perencanaan Pemilihan Generator Pembangkit	36

J. Optimalisasi Sistem Tenaga Listrik	37
K. <i>Ant Colony Optimization</i> (ACO)	40
L. Kerangka Fikir	42
 BAB III METODE PENELITIAN	 43
A. Jenis Penelitian	43
B. Waktu dan Lokasi Penelitian	43
C. Metode Pengumpulan Data	45
D. Metode Analisa Data	46
E. Desain Perancangan Sistem	69
F. Sumber Data	70
 BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	 71
A. Profil Kecamatan Bungin	71
B. Profil PLTM Bungin 1	77
C. Analisa beban Kecamatan Bungin	78
D. Debit air	80
E. <i>Head</i> Potensial	88
F. Kondisi Geologi dan Aksestabilitas	89
G. Daya rancangan	92
H. Rugi-rugi daya	93
I. <i>Output</i> Daya Total Dua <i>Powerhouse</i> Terintegrasi	95
J. Letak Optimal <i>Powerhouse</i>	97
K. Peta Topografis Letak Optimal Menggunakan GIS	100
 BAB V PENUTUP	 104
A. Kesimpulan	104
B. Saran	104
 DAFTAR PUSTAKA	 105
 LAMPIRAN	 108

## DAFTAR TABEL

	<b>Halaman</b>
Tabel 1.1 <i>State of the art</i>	8
Tabel 2.1 Pengolompokan kapasitas energi tenaga air	18
Tabel 2.2. Daerah operasi, batasan dan efisiensi turbin	35
Tabel 2.3 <i>Run-away speed Turbin</i> , N maks/N	35
Tabel 2.4 Klasifikasi efisiensi generator	37
Tabel 3.1 Nilai skor potensi <i>head</i>	56
Tabel 3.2 Nilai <i>skoring</i> jarak dari <i>powerhouse</i>	57
Tabel 3.3 Nilai <i>skoring</i> jarak ke jaringan PLN	58
Tabel 3.4 Nilai <i>skoring</i> kondisi hutan	60
Tabel 3.5 Nilai <i>skoring</i> akseptabilitas jalan raya	61
Tabel 3.6 Skor kemiringan tanah	63
Tabel 3.7 Nilai <i>skoring</i> tekstur tanah	65
Tabel 3.8 Nilai <i>skoring</i> untuk rugi-rugi daya	65
Tabel 4.1 Luas lokasi Kecamatan di Kabupaten Enrekang	73
Tabel 4.2 Profil Singkat Kecamatan Bungin	75
Tabel 4.3 Data Jumlah KK per Desa	76
Tabel 4.4 Data Infrastruktur Kecamatan Bungin di setiap Desa	76
Tabel 4.5 Tabel Ketinggian Sungai	77
Tebel 4.6 Profil PLTM Bungin 1	78
Tabel 4.7 Kebutuhan listrik rumah tangga kecamatan Bungin	79
Tabel 4.8 Penerangan infrastruktur kecamatan Bungin	80

Tabel 4.9	Penerangan listrik lainnya	80
Tabel 4.10	Total kebutuhan listrik Kecamatan Bungin	80
Tabel 4.11	Curah hujan di sekitar area sungai Tabang	81
Tabel 4.12	Nilai koefisien Limpasa	83
Tabel 4.13	Debit banjir maksimum selama lima tahun	83
Tabel 4.14	Data histori <i>debit inflow</i> PLTM Bungin 1	84
Tabel 4.15	Hasil pengukuran kecepatan air	86
Tabel 4.16	Hasil perhitungan debit air dengan optimasi ACO	87
Tabel 4.17	Hasil pengukuran elevasi dan <i>head</i>	89
Tabel 4.18	Jarak titik skenario <i>head</i> ke <i>powerhouse</i> terpasang, jalan raya, dan ke jaringan PLN	91
Tabel 4.19	Kondisi Topografis disekitar titik <i>head</i>	92
Tabel 4.20	Tabel hasil perhitungan daya <i>output</i> disetiap titik <i>head</i>	93
Tabel 4.21	Rugi daya disetiap titik skenario	96
Tabel 4.22.	<i>Output</i> daya total	97
Tabel 4.23	Tabulasi nilai skor setiap titik skenario	100
Tabel 4.24	Profil lokasi optimal	101

## DAFTAR GAMBAR

	<b>Halaman</b>
Gambar 2.1 Garis besar skema PLTM	21
Gambar 2.2` Ilustrasi terjadinya debit air	31
Gambar 2.3 Alat ukur <i>current meter</i>	33
Gambar 2.4 Kerangka Pikir Penelitian	42
Gambar 3.1 Peta Lokasi PLTM (Makassar ke PLTM Bungin 1	44
Gambar 3. 2 Peta Kabupaten Enrekang	44
Gambar 3.3 Peta Letak Lokasi PLTM	44
Gambar 3.4 Peta Aliran Sungai Tabang	45
Gambar 3.5 Bagan PLTM dengan <i>powerhouse</i> tunggal	46
Gambar 3.6 Bagan PLTM dengan model integrasi dua <i>powerhouse</i>	46
Gambar 3.7 Peta Kecamatan Bungin	68
Gambar 3.8 Desain Rancangan Sistem	69
Gambar 4.1 Grafik curah hujan tahunan kecamatan Bungin	81
Gambar 4.2 Luas penampang kolam air buangan turbin	84
Gambar 4.3 Grafik Hubungan kecepatan air dengan debit air	87
Gambar 4.4 Perbandingan <i>debit inflow</i> dan <i>outflow</i>	88
Gambar 4.6 Diagram satu garis skenario penyambungan jaringan ke PLN	94
Gambar 4.7 Grafik <i>output</i> daya total integrasi <i>powerhouse</i>	97
Gambar 4.8 <i>Distance Graph Pheramon</i>	98
Gambar 4.9 Grafik <i>all rute</i> dan <i>best rute</i>	99

Gambar 4.10 Peta Kecamatan Bungin	101
Gambar 4.11 Peta desa Baruka	102
Gambar 4.12 Lokasi citra lokasi	102
Gambar 4.13 Lokasi kandidat penempatan <i>powerhouse</i> kedua	103
Gambar 4.14 Lokasi optimal penempatan <i>powerhouse</i> kedua	103

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **A. Latar Belakang**

Permintaan energi listrik saat ini, akan terus meningkat seiring dengan semakin meningkatnya pertumbuhan penduduk, kondisi perekonomian, dan pembangunan. Konsekuensi dari adanya peningkatan tersebut, maka pembangunan di sektor infrastruktur adalah sebuah keniscayaan yang akan terus mengalami peningkatan, baik itu infrastruktur di bidang industri maupun di bidang perumahan, dan perkantoran. Seiring dengan hal tersebut, maka permintaan energi listrik pun akan mengalami peningkatan. Terbatasnya jumlah pembangkit listrik ternyata tidak mampu mengimbangi atmosfer pertumbuhan industri, maupun kondisi perekonomian masyarakat. Tahun 2025 diprediksi kebutuhan listrik mengalami peningkatan sebesar 8,4 % per tahun [1]. Sedangkan disaat bersamaan infrastruktur adalah prasyarat utama investasi yang akan dan sementara digalakkan oleh pemerintah pusat, maupun daerah. Pada aspek yang lain, pemenuhan pembangunan pembangkit listrik untuk masyarakat umum terkhusus di pedesaan masih sangat rendah, sehingga salah satu upaya dalam pemecahan masalah tersebut adalah pembangunan listrik pedesaan yang sumbernya dari Perusahaan Listrik Negara (PLN), pihak swasta, maupun NGO.

Sebagai langkah strategis dalam mewujudkan ketahanan energi nasional dan harus menjadi aspek prioritas, adalah dengan maksimalisasi

pembangunan energi baru terbarukan (EBT) untuk pembangkit listrik, selain itu penerapan EBT juga akan mampu mengurangi tingkat karbondioksida (CO<sub>2</sub>). Dalam hal ini pemerintah telah mendorong beberapa regulasi dalam mewujudkan penerapan EBT, diantaranya adalah program pencanangan 35.000 MW, dengan target capaian 2019. Selain itu sebagai wujud keseriusan pemerintah, sektor tenaga listrik masuk dalam prioritas pembangunan nasional dalam RPJM tahun 2015-2019, dan merupakan bagian dari dimensi pembangunan nasional [1]. Dukungan EBT termaktub dalam peraturan presiden nomor 4 tahun 2016 tentang percepatan pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan dengan prioritas sumber energi listrik berbasis EBT [2].

Kondisi melimpahnya ketersediaan sumber EBT di pedesaan, untuk ketersediaan energi, khususnya sumber energi air merupakan peluang besar, dan sekaligus tantangan untuk penerapan dan pengembangan pembangkit-pembangkit listrik di desa, dengan skala besar (PLTA), *mini* (PLTM) maupun *mikro* (PLTMH). Peluang terbesar pula dengan hadirnya kebijakan kementerian ESDM tentang pemanfaatan sumber energi terbarukan untuk penyediaan tenaga listrik No. 12 Tahun 2017. Kebijakan tersebut memberikan peluang pembangunan PLTM/PLTMH dan sumber energi baru terbarukan lainnya, terintegrasi (terkoneksi) dengan jaringan PLN dalam bentuk usaha penjualan energi listrik [3]. Oleh sebab itu, PLTM/PLTMH tidak hanya berada pada ruang lingkup pembangunan

daerah terpencil, akan tetapi telah menjadi bagian dari peluang investasi untuk daerah yang telah dibangun infrastruktur sistem jaringan PLN.

Dengan adanya potensi tersebut, maka perencanaan PLTM memerlukan perhatian lebih, dalam rangka upaya pengoptimalan sebuah lokasi potensial untuk pembangunan PLTM. Pada umumnya PLTM menggunakan *recervoir* (waduk) untuk menampung atau membelokkan air dari aliran sungai. Air dari *recervoir* kemudian dialirkan melalui pipa *penstock* untuk menuju *powerhouse* kemudian memutar turbin yang selanjutnya turbin akan memutar generator untuk pembangkitan daya listrik [4][5][6].

Perancangan *output* daya pada PLTM sangat dipengaruhi oleh dua parameter utama yaitu debit air ( $Q$ ) dan tinggi jatuhnya air (*head*) [6][7]. Beberapa kendala yang sering ditemukan terkait kedua parameter tersebut dalam kaitannya dengan lokasi potensial PLTM adalah terkadang potensi sungai dengan debit air yang besar tidak berbanding lurus dengan potensi tinggi jatuhnya air, dan sebaliknya potensi tinggi jatuhnya air memadai, akan tetapi kapasitas debit air sungai kecil [8].

Selain faktor di atas, dalam proses pengoperasian PLTM sering terdapat pula kendala yang diakibatkan oleh kendala volume air yang ada di *recervoir* (waduk) yang sering mengalami kekurangan air akibat adanya pendangkalan waduk, sehingga berpengaruh pada kecepatan dan debit air yang masuk turbin generator yang berdampak pada *output* daya listrik yang dihasilkan oleh PLTM.

Kondisi geologi dan topografis juga menjadi bagian dari parameter yang dipertimbangkan dalam desain rancangan PLTM. Tekstur dan kemiringan lereng akan berpengaruh pada kualitas serta keandalan gedung dan bangunan, biaya operasional pembangkit, begitu pun dengan kondisi hutan, sehingga dalam kondisi ini analisis spasial menjadi tahapan penting dalam desain perancangan PLTM [9].

Sehubungan dengan masalah yang telah diuraikan di atas, beberapa penelitian yang sudah dilakukan terkait pengoptimalan penggunaan air pada PLTM. Diantaranya penelitian yang dilakukan oleh Lani Rohaini, dkk dengan judul penelitian : "*Penerapan Algoritma Genetika Untuk Optimasi Debit Air Pada Pembangkit Listrik Tenaga Air Studi Kasus : Waduk Situ Cileunca, Jawa Barat.*" Penelitian ini menggunakan *algoritma genetik* dalam memecahkan masalah optimasi di waduk Situ Cileunca, dalam penelitian ini penjadwalan air diatur melalui *outflow* pada waduk, dan *inflow* pada *powerhouse* [10]. Penelitian yang identik juga dilakukan oleh Shenglian Guo dkk, dengan judul *Optimal Operation Of Cascade Hydro Power Plant.* meneliti tentang desain integrasi antar waduk di Jepang, dengan metode *partical swarm optimization* dalam merumuskan hasil optimalisasi air di waduk tersebut [11]. Penelitian ini mencoba mengintegrasikan antar waduk sehingga di diperoleh jumlah volume air optimal. Penelitian berbeda dilakukan oleh Sabastian Braun dari Jerman dengan judul penelitian : "*Intraday Optimization Of Pumped Hydro Power Plants In The Jerman Electricity Market* dengan tujuan untuk

mengoptimalkan pengaturan pompa *hydro* untuk penyaluran pembangkit energi listrik secara optimal di pasar listrik Jerman [12].

Penelitian yang telah diuraikan di atas berfokus pada pemaksimalan penggunaan air, namun tetap saja mengalami kendala karena adanya faktor-faktor lain yang mempengaruhi seperti lumpur, sampah, dan lain-lain. sehingga perlu ada model baru dalam desain PLTM untuk memaksimalkan penggunaan air dan pemanfaatan lokasi PLTM. Hal ini sangat penting mengingat ketersediaan lokasi potensial PLTM sudah mulai menurun (langka) akibat pembangunan DAM dan waduk untuk irigasi sawah, pun sumber mata air sudah mulai berkurang karena adanya erosi akibat semakin liarnya penebangan pohon dan berkurangnya hutan lindung yang menjadi faktor utama dalam menjaga ketersediaan sumber mata air.

Berdasarkan uraian di atas maka peneliti tertarik dan menganggap penting untuk melakukan penelitian yang berkaitan dengan masalah tersebut, dengan mengangkat judul penelitian "*Pemanfaatan Air Buangan Turbin Pembangkit Listrik Tenaga Mini-Hydro dengan Model Desain Integrasi Powerhouse Berbasis Ant Colony Optimization*".

Model yang kami tawarkan adalah dengan memanfaatkan air buangan turbin PLTM untuk digunakan sebagai penggerak turbin generator selanjutnya. Hal ini dilakukan untuk memanfaatkan, memaksimalkan, dan mengefisienkan penggunaan air pada satu titik lokasi PLTM agar tidak

terbuang begitu saja. Efeknya adalah dalam satu titik lokasi PLTM dapat dibangun beberapa PLTM yang terintegrasi.

Hipotesa yang lahir adalah air buangan pada turbin generator memiliki debit air yang nilainya masih cukup besar untuk dimanfaatkan menjadi penggerak turbin generator. Indikatornya adalah kecepatan aliran air buangan ( $v$ ), debit aliran air buangan ( $Q$ ), dan tinggi jatuhnya air (*head*) ( $H$ ). Dalam penelitian ini menggunakan metode optimasi *Ant Colony Optimization* (ACO), untuk menghitung dan menentukan jalur dan letak optimal penempatan letak PLTM kedua yang dintegrasikan dengan PLTM pertama dengan menggunakan air buangan turbin generator turbin PLTM pertama. Metode ACO terinspirasi dari pola kerja semut yang tergabung dalam satu kesatuan *colony* yang bergerak pada jalur pencarian makanan. Dalam proses tersebut semut akan menentukan jalur terbaik untuk dilalui [13]. Olehnya itu, metode ACO ini akan efektif diterapkan dalam pencarian jalur optimal dalam penentuan kecepatan air buangan, debit air buangan, dan tinggi jatuhnya air buangan untuk penentuan lokasi optimal PLTM kedua.

Lokasi penelitian akan kami lakukan pada PLTM Bungin 1, dengan kapasitas  $2 \times 1,5$  MW. Letak lokasi berada di kecamatan Bungin Kabupaten Enrekang. Kecamatan Bungin memiliki topografi daerah pegunungan dan perbukitan dengan curah hujan yang tinggi, dan suhu rata-rata berkisar antara  $18^{\circ}\text{C}$  sampai dengan  $25^{\circ}\text{C}$ . Selain itu memiliki

sumber air yang mencukupi, sehingga memiliki potensi pengembangan berbagai macam komoditi pertanian dan perkebunan.

## **B. Rumusan Masalah**

Dari penelaahan latar belakang di atas, dapat kami rumuskan masalah sebagai berikut dan menjadi lokus penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana nilai debit air buangan turbin generator PLTM Bungin 1 ?
2. Bagaimana penentuan letak optimal *powerhouse* kedua pada PLTM Bungin 1, untuk skema desain *powerhouse* terintegrasi menggunakan metode ACO ?
3. Bagaimana nilai *output* daya total dari dua *powerhouse* terintegrasi pada PLTM Bungin 1 ?

## **C. Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan yang akan dicapai dari penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui debit air buangan turbin generator PLTM Bungin.
2. Untuk menentukan letak optimal *powerhouse* kedua pada PLTM Bungin 1, untuk skema desain *powerhouse* terintegrasi menggunakan metode ACO.
3. Untuk mengetahui nilai *output* daya total dari dua *powerhouse* terintegrasi pada PLTM Bungin 1.

## **D. Manfaat Penelitian**

Manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini adalah :

1. Dapat menjadi *prototype* metode dan model desain PLTM.
2. Menjadi bahan rujukan efisiensi penggunaan sumber energi air.

3. Sebagai bahan kepustakaan terkait dengan sistem pembangkit PLTM.

### E. Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini memiliki ruang lingkup sebagai berikut :

1. Perhitungan debit air buangan *powerhouse* PLTM Bungin 1, perhitungan output daya listrik setiap titik skenario penempatan lokasi *powerhouse* kedua dengan desain model integrasi dua *powerhouse*.
2. Penentuan dan analisa parameter yang menjadi dasar penentuan letak optimal *powerhouse* kedua.
3. Besaran yang akan menjadi lokus perhitungan adalah daya listrik (P), debit air (Q), kecepatan air (V), Tinggi jatuhnya air (h), luas penampang air (A), rugi-rugi daya dan formulasi ACO.

### F. Penelitian Terkait

Ada beberapa penelitian terkait yang menjadi rujukan untuk melakukan penelitian ini yaitu ;

Tabel 1.1 State of the art

No	Judul	Penulis	Rumusan Masalah	Tujuan	Methodologi	Hasil
1	Penerapan Algoritma Genetika Untuk Optimasi Debit Air Pada Pembangkit Listrik Tenaga Air Studi Kasus : Waduk Situ Cileunca, Jawa Barat	Lani Rohaeni, dkk	1. Bagaimana mengatur outflow waduk ke PLTA Plengan supaya dapat menghasilkan listrik semaksimal 2. Bagaimana metode pengptimalan waduk PLTA Plengan	1. untuk mengoptimasi outflow waduk ke PLTA Plengan 2. Untuk mengetahui metode pengptimalan waduk PLTA Plengan	Menggunakan metode Algoritma genetik untuk mengetahui optimal outflow waduk ke PLTA Plengan	Outflow waduk yang telah dioptimasi akan memberikan Gambaran listrik dan kekurangan waduk. Setelah dioptimasi menggunakan GA diperoleh produksi listrik yang sama data

						eksisting yaitu sebesar 13.619.115 kW/tahun dan kekurangan lebih rendah yaitu 0 m <sup>3</sup> /tahun.
2	Optimasi Pola Operasi Waduk Untuk Memenuhi Kebutuhan Energi Pembangkit Listrik Tenaga Air (Studi Kasus Waduk Wonogiri)	Cahaya Santoso Samosir, dkk	<p>1. Bagaimana mengatasi adanya penurunan fungsi pelayanan waduk akibat sedimentasi</p> <p>2. Bagaimana pengaturan, perencanaan dan pengoperasian air waduk yang optimal sehingga didapatkan manfaat yang sebesarbesarnya.</p>	<p>1. Untuk mengatasi adanya penurunan fungsi pelayanan waduk akibat sedimentasi</p> <p>2. Untuk mengetahui pola pengaturan, perencanaan dan pengoperasian air waduk yang optimal sehingga didapatkan manfaat yang sebesarbesarnya</p>	Menerapkan simulasi pola operasi waduk model stokastik dengan bantuan program <i>solver evolutionary</i> .	Penerapan optimasi model stokastik memiliki hasil produksi listrik yang lebih baik bila dibandingkan dengan pola operasi waduk eksisting. Produksi rata-rata tahunan mengalami peningkatan sebesar 22.98% dari 33.820 MWh/15hari menjadi 41.593 MWh/15hari. Evaluasi kinerja menunjukkan bahwa waduk memiliki keandalan 100% dalam memenuhi kebutuhan lepasan PLTA dan pemenuhan air di hilir waduk.
3	Optimisasi Biaya Pembangkit anpada Sistem 500 Kv Jawa-Bali Menggunakan Metode <i>Ant Colony Optimization</i>	Wahyu Ridhani, dkk	Bagaimana menghasilkan daya output yang maksimal dengan meminimalisasi biaya operasi pembangkit.	Untuk menghasilkan daya output yang maksimal dengan meminimalisasi biaya operasi pembangkit	Metode Ant Colony Optimization (ACO) pada pembangkit listrik yang terhubung dalam sistem interkoneksi	Hasil pengujian menunjukkan bahwa optimisasi menggunakan metode ACO memberikan hasil yang

	(Aco)				500 kV Jawa-Bali dengan batasan <i>equality</i> dan <i>inequality</i> .	lebih baik dibandingkan hasil perhitungan sebelum menerapkan ACO, yaitu 0.86% lebih rendah untuk total daya yang dibangkitkan, 33.5% lebih rendah untuk rugi-rugi daya, 12% lebih ekonomis untuk total biaya pembangkitan. Biaya pembangkitan termurah pada saat beban puncak adalah sebesar Rp.5.226.483.927,-.
4	Optimization Of Hydro Power Plant Operation Using Linear Programming With Constraint Of Water Availability	Winasis, dkk	Bagaimana memaksimalkan sumber daya air yang tersedia untuk mendapatkan pembangkitan daya yang optimal	Untuk memaksimalkan sumber daya air yang tersedia untuk mendapatkan pembangkitan daya yang optimal	Model <i>Linear Programming</i> , dimana metode ini merupakan model umum yang digunakan untuk memecahkan permasalahan optimasi pada pembangkit hidro.	Hasil simulasi pada PLTA Ketenger Baturaden dengan menggunakan data debit pada tanggal 1 Juni 2013 menunjukkan bahwa metode ini dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi operasi PLTA dengan baik.. Pada simulasi operasi PLTA dengan periode

						operasi 24 jam (1 hari), energi listrik total yang dihasilkan adalah 96121,55 kWh, lebih besar 1427 kWh (1,51%) dibanding kondisi real jika dibandingkan dengan kondisi real pembangkitan energi PLTA Ketenger pada 1 Juni 2013 sebesar 94694 kWh.
5	Analisis Ism Dalam Meningkatkan Tata Kelola PLTA. (Studi Kasus Plta Bendungan Bili-Bili	Masmian Mahida, dkk	1. Bagaimana mengoptimalkan produksi listrik pada bendungan eksisting, Waduk Bili-bili 2. Bagaimana sedimentasi di waduk yang melebihi kapasitas tampung.	1. Bagaimana mengoptimalkan produksi listrik pada bendungan eksisting, Waduk Bili-bili 2. Bagaimana sedimentasi di waduk yang melebihi kapasitas tampung.	Metode penelitian dengan pendekatan analisis pengambilan keputusan menggunakan ISM ( <i>Interpretative Structural Modelling</i> ).	Hasil penelitian menunjukkan bahwa dibutuhkan langkah prioritas yakni perlu adanya komitmen pemerintah dalam penyediaan anggaran pada kegiatan konservasi DAS dan operasi pemeliharaan waduk dan bendungannya, sehingga permasalahan sedimentasi dapat diatasi dan langkah prioritas berikutnya perlu peningkatan SDM pengelola waduk, peningkatan koordinasi dan sinergi

						antar stakeholders, dukungan tokoh masyarakat, masyarakat sekitar waduk, pengelola bendungan, dan pemerintah daerah.
6	Modifikasi ACO untuk Penentuan Rute Terpendek ke Kabupaten/Kota di Jawa	Ahmad Jufri, dkk	Bagaimana mendapatkan kinerja yang lebih baik dengan memodifikasi Algoritma Ant Colony Optimization (ACO), khususnya dalam hal kecepatan komputasi dengan tetap menjaga kualitas solusi.	Untuk mendapatkan kinerja yang lebih baik dengan memodifikasi Algoritma Ant Colony Optimization (ACO), khususnya dalam hal kecepatan komputasi dengan tetap menjaga kualitas solusi.	Modifikasi yang dilakukan dalam penelitian ini adalah perhitungan probabilitas pemilihan Kota berikutnya yang akan dikunjungi, perhitungan intensitas jejak Semut, dan modifikasi jumlah Semut mengikuti ukuran permasalahan.	Memodifikasi probabilitas pemilihan Kota berikutnya dan intensitas jejak Semut dapat menjaga kualitas solusi yang dihasilkan dengan prosentase 99,8% walaupun jumlah Semut yang digunakan 35% dari ukuran masalah
7	Model Optimisasi Stokastik Untuk Penjadwalan Hidro Thermal Jangka Panjang Secara Terperinci Menggunakan Simulasi Skenario-Tree	Gheirwerland, dkk	Bagaimana membandingkan dua model penjadwalan hidro termal yaitu dengan model NORDIC dan EMPS dalam menentukan optimalisasi energi listrik.	Untuk membandingkan dua model penjadwalan hidro termal yaitu dengan model NORDIC dan EMPS dalam menentukan optimalisasi energi listrik	Menggunakan model EMPS	untuk memberikan pemanfaatan yang lebih baik dalam sistem dengan pembagian besar daya hidro, peningkatan yang lebih besar berdasarkan pada pengoptimalan formal
8	Optimisasi Operasi	.Johni custer,	Bagaimana mengoptimalkan	Untuk mengoptimalkan	Menggunakan Modified	Generator dapat

	Sistem Tenaga Listrik dengan Konstrain Kapabilitas Operasi Generator dan Kestabilan Steady State Global	dkk	n perubahan daya pada beban yang mengakibatkan terjadi perubahan daya pada generator	an perubahan daya pada beban yang mengakibatkan terjadi perubahan daya pada generator	Improved Particle Swarm Optimization (MIPSO) dengan mempertimbangan batasan kemampuan operasi generator dan batasan kestabilan steady state yang menerapkan metoda REI (Radial Equivalent Independent) Dimo.	beroperasi pada batas titik operasi generator sehingga kondisi operasi paling ekonomis dan aman dapat dicapai. Simulasi dilakukan pada sistem 500 kV Jawa Bali yang terdiri dari 8 generator dan 23 bus.
9	Intraday Optimization Of Pumped Hydro Power Plants In The Jerman Electricity Market	Sabastian Braun, dkk	Bagaimana Mengoptimalkan pengaturan pompa hydro untuk penyaluran pembangkit energi listrik secara optimal di pasar listrik Jerman	Untuk mengoptimalkan pengaturan pompa hydro untuk penyaluran pembangkit energi listrik secara optimal di pasar listrik Jerman	Model algoritma optimasi Intraday	Menyiapkan algoritma pengoptimalan multistage yang efektif untuk pembangkit listrik tenaga air yang dipompa setiap hari mempertimbangkan batas reservoir, harga seperempat jam, biaya ketersediaan jaringan.
10	Economic Analisis And Power Manajment of a Smalt Auotonomous Hibryd Power Sistem (SAHPS) Using Biographiy Based Optimization (BBO) Algoritm	Ajai Kumar bangsal, dkk	Bagaimana memprediksi ukuran optimal koefisien Small Autonomus Hybrid Power System (SAHPS) di daerah terpencil.	Biogeography Based Optimization (BBO) algoritma dikembangkan untuk memprediksi ukuran optimal koefisien Small Autonomus Hybrid Power System (SAHPS) di daerah	Biogeography Based Optimization (BBO)	Memiliki konvergensi yang sangat baikdapat meghemat waktu komputasi dan dapat menghindari kelemahan konvergensi prematur teknik optimasi lain untuk mendapatkan solusi yang lebih baik

				terpencil.		
11	Multiple Ant Colonies Optimization for Load Balancing in Distributed Systems	Al dahoud Ali, dkk	Bagaimana menjaga keseimbangan beban pada gardu distribusi dengan penjadwalan optimal	Untuk menentukan pola optimal dalam menjaga keseimbangan beban pada gardu distribusi dengan penjadwalan optimal	Menggunakan metode ACO untuk penentuan jalur penjadwalan	Di dapatkan hasil metode ACO mampu mengakurasi jalur penjadwalan dengan efektif dalam menjaga keseimbangan beban pada sistem distribusi
12	Optimal Operation of Cascade Hydropower Plants	Shengli an Gu, dkk	Bagaimana menghubungkan tiga waduk untuk memperbaiki debit air pada reservoir.	Untuk menghubungkan tiga waduk dalam memperbaiki debit air pada reservoir	Menggunakan metode optimasi Particel swarm Optimization (PSO) dengan desain cascade reservoir.	Mengoptimalkan pemakaian air dan out flow mengalami peningkatan debit air dan energi listrik sebesar 2,77 %

## G. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan disesuaikan dengan penulisan tesis yang dibuat, sesuai dengan urutan-urutan penelitian yang akan dilakukan sebagai berikut :

### Bab I. Pendahuluan

Pada bab ini berisi latar belakang sehingga penelitian tersebut dilakukan, merumuskan masalah yang menjadi pokok permasalahan, tujuan penelitian yang ingin dicapai serta manfaat penelitian, juga berisi ruang lingkup penelitian dan penelitian-penelitian sebelumnya yang terkait dengan yang akan dilakukan dalam penelitian ini.

## Bab II. Tinjauan Pustaka

Pada tinjauan pustaka berisi literatur yang berkaitan secara langsung dengan penelitian yang dilakukan.

## Bab III. Metode Penelitian

Metode penelitian berisi, tahapan penelitian, waktu dan lokasi penelitian.

## Bab IV. Hasil Penelitian

Bab hasil penelitian berisi tentang penjelasan data penelitian, perhitungan penelitian dan hasil penelitian.

## Bab V Kesimpulan

Bab ini berisikan tentang kesimpulan akhir dari penelitian yang mewakili secara keseluruhan dari hasil penelitian.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### A. Teknologi Sumber Energi Air

Kebutuhan energi di Indonesia saat ini masih dipenuhi oleh sumber energi berbasis bahan bakar fosil, seperti minyak bumi dan batu bara. Kerugian dari bahan bakar fosil adalah sifatnya yang tidak ramah lingkungan, karena hasil pembakaran bahan bakar fosil adalah CO<sub>2</sub> yang menimbulkan efek gas rumah kaca. Selain itu bahan bakar fosil merupakan energi yang tak terbarukan, sehingga jika dieksploitasi terus, maka cadangan bahan bakar fosil akan habis. Oleh sebab, itu perlu dikembangkan sumber energi alternatif yang dapat menggantikan sumber energi berbasis fosil yang tidak ramah lingkungan tersebut dan bersifat terbarukan [14].

Setelah dilakukan pengkajian, ternyata Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang cukup besar, antara lain energi surya, energi angin, energi biomassa, dan *mini-hydro*. Selain potensinya yang besar, pembangkit listrik *mini-hydro* juga sangat cocok untuk diterapkan di Indonesia. Menurut data Badan Pusat Statistik (BPS) pada tahun 2000, sekitar 60% penduduk Indonesia tinggal di desa terpencil. Jumlah desa di Indonesia sebanyak 58.545 desa, sampai akhir Desember 2000 yang telah memiliki listrik sebanyak 49.155 desa. Oleh sebab itu, perlu proyek pembangunan *mini-hydro* ditujukan untuk daerah-daerah terpencil yang belum dilalui oleh jaringan listrik PLN. Pembangkitan oleh *mini-hydro* pada

desa-desa terpencil dilakukan dengan memanfaatkan aliran air dari anak-anak sungai yang kecil atau dari saluran irigasi [15][16].

Pembangkitan energi listrik yang berasal dari tenaga air secara umum diperoleh secara alamiah dari siklus air global. Air terus bergerak melalui siklus global yang luas, menguap dari danau dan lautan, membentuk awan, pengendapan sebagai hujan atau salju, kemudian mengalir kembali ke laut. Energi siklus air yang didorong oleh matahari ini, dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik atau untuk tugas-tugas mekanik seperti penggilingan biji-bijian. PLTA menggunakan bahan bakar air yang tidak berkurang selama dalam proses. Karena siklus air merupakan sistem yang tak berujung, pengisian secara kontinyu, sehingga tenaga air dianggap sebagai energi terbarukan [16].

Prinsip perubahan energi potensial air menjadi suatu energi berguna secara matematis berdasarkan persamaan berikut ini:

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h \quad (1)$$

dengan P adalah potensi daya hidrolik air (Watt), g adalah nilai gravitasi, Q adalah debit air(m/s), dan h adalah tinggi jatuhnya air (m).

Berdasarkan daya yang dibangkitkan, pembangkit energi tenaga air dikelompokkan dalam tiga ukuran, yaitu PLTA dibagi menjadi tiga, yaitu *mikro-hydro* antara 0–300 kW, *mini-hydro* antara 300-10.000 kW, dan PLTA dengan daya listrik di atas 10.000 kW. Dapat dilihat seperti pada Tabel berikut:

Tabel 2.1 Pengelompokan kapasitas energi tenaga air

No	Ukuran	Kapasitas Pembangkit Energi Listrik (MW)
1	Mikro < 0,1	< 0,1
2	Mini 0,1 – 30	0,1 – 30
3	PLTA >30	>30

Sumber : Doe Hydropower (2002)

Sumber tenaga air secara teratur dibangkitkan kembali karena pemanasan lautan oleh penyinaran matahari, sehingga merupakan sumber tenaga yang bisa dipengaruhi. Oleh karena itu tenaga air disebut sebagai sumber daya energi terbarukan.

Penggunaan sumber tenaga air pada umumnya merupakan pemanfaatan multiguna karena sering dikaitkan dengan irigasi, pengendalian banjir, rekreasi, navigasi, dan sering terjadi bahwa pembangkitan tenaga listrik hanya merupakan manfaat sampingan.

#### A. Dasar Hukum PLTA

Banyak perusahaan swasta telah memulai usaha di bidang PLTA terutama di bidang *mini-hydro* saat ini. Hal ini didorong terutama karena adanya Permen ESDM (Peraturan Menteri Energi Sumber Daya Mineral) No. 31 tahun 2009 dimana tertulis pada pasal 1 bahwa, “PT. PLN (Persero) wajib membeli tenaga listrik dari energi yang terbarukan skala kecil sampai menengah hingga 10 MW, dari Badan Usaha Milik Negara (BUMN), milik swasta, koperasi ataupun swadaya masyarakat”. Energi terbarukan adalah energi yang berasal dari sumber daya yang tidak akan habis dan tidak terbatas, contohnya energi angin, matahari, tenaga air,

sampah atau buangan dari hasil pertanian atau industri, sampah kota, dan sumber panas dari tumbuh–tumbuhan atau panas bumi [18]

## **B. Konseptualisasi PLTM**

Pembangkit listrik tenaga *mini-hydro* (PLTM) adalah suatu pembangkit listrik skala kecil yang menggunakan tenaga air saluran irigasi, sungai, atau air terjun alam, dengan cara memanfaatkan tinggi terjunnya (head, dalam satuan meter) dan jumlah debit airnya (dalam m<sup>3</sup>/detik). Pemanfaatan energi potensial tenaga air dilakukan dengan mengalirkan sejumlah air dari sebuah reservoir melalui pipa pesat (penstock) untuk memutar turbin air. Energi mekanik putaran poros turbin akan diubah menjadi energi tenaga listrik oleh generator.

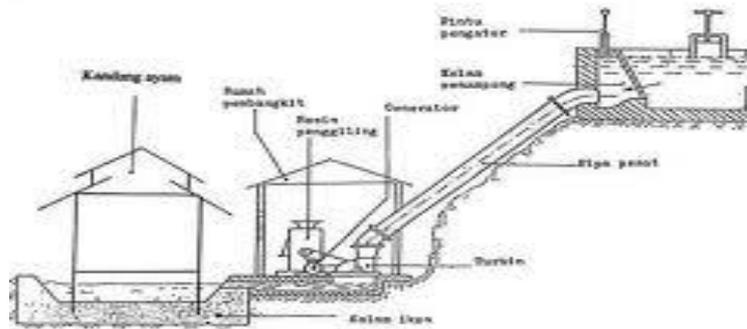
Pembangkit listrik tenaga *mini-hydro* adalah istilah yang digunakan untuk instalasi pembangkit listrik yang menggunakan energi air. Kondisi air yang bisa dimanfaatkan sebagai sumber daya (*resources*) penghasil listrik, adalah memiliki kapasitas aliran dan ketinggian tertentu dan instalasi terbatas. Semakin besar kapasitas aliran maupun ketinggiannya dari instalasi maka semakin besar energi yang bisa dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik.

Biasanya PLTM dibangun berdasarkan kenyataan bahwa adanya air yang mengalir di suatu daerah dengan kapasitas dan ketinggian yang memadai. Istilah kapasitas mengacu kepada jumlah volume aliran air persatuan waktu (*flow capacity*) sedangkan beda ketinggian daerah aliran sampai ke instalasi dikenal dengan istilah *head*. PLTM juga dikenal

sebagai *the white resources energy* dengan terjemahan bebas bisa dikatakan "sumber energi putih". Dikatakan demikian karena instalasi pembangkit listrik seperti ini menggunakan sumber daya yang telah disediakan oleh alam dan ramah lingkungan. Suatu kenyataan bahwa alam memiliki air terjun atau jenis lainnya yang menjadi tempat air mengalir.

Dengan menggunakan teknologi sekarang maka energi aliran air beserta energi perbedaan ketinggiannya dengan daerah tertentu (tempat instalasi akan dibangun) dapat diubah menjadi energi listrik. Seperti yang telah dijelaskan di atas, *mini-hydro* hanyalah sebuah istilah, *mini* artinya kecil sedangkan *hydro* artinya air. Dalam prakteknya, istilah ini tidak merupakan sesuatu yang baku namun bisa dibayangkan bahwa *mini-hydro* pasti menggunakan air sebagai sumber energinya. Perbedaan antara istilah *mikro-hydro* dengan *mini-hydro* adalah *output* daya yang dihasilkan. *Mikro-hydro* menghasilkan daya lebih rendah dari 100 W, sedangkan untuk *mini-hydro* daya keluarannya berkisar antara 100 sampai 5000 W. Secara teknis, *mini-hydro* memiliki tiga komponen utama yaitu air (sumber energi), turbin dan generator [3].

Secara garis besar prinsip kerja dan skema PLTM dapat dilihat melalui Gambar berikut :



Sumber : JICA, Panduan Untuk Pembangunan PLTM, 2003

Gambar 2.1 Garis besar skema PLTM

### C. Komponen PLTM

Komponen PLTM terdiri dari beberapa bagian sebagai berikut :

1. *Deversion weir* dan *intake* (DAM / Bendungan Pengalih dan *Intake*)

*Deversion weir* dan *intake* berfungsi untuk menaikkan level muka air, sebagai pengalihan aliran air (pengarah air), sebagai tempat pengambilan air awal dan penyaringan dasar.

2. *Settling Basin* (Bak Pengendap)

*Settling Basin* berfungsi untuk menghilangkan partikel-partikel pasir di air. Fungsi dari bak pengendap adalah sangat penting untuk melindungi komponen-komponen berikutnya dari pasir.

3. *Head Race* (saluran pembawa)

*Head Race* berfungsi untuk mengalirkan air dari *settling basin* ke *head tank* dengan *slope* 1/1000 m dan Kecepatan Air < 0,8 m/s.

#### 4. *Head Tank* (Bak penenang)

*Head tank* berfungsi mengendapkan lumpur serta menenangkan gelombang air sebelum masuk ke pipa penstock (pipa pesat), Melimpaskan air jika kebutuhan air lebih kecil dari air yang masuk.

#### 5. Pipa Pesat

Pipa pesat berfungsi Menyalurkan air bertekanan ke dalam turbin dengan kecepatan  $< 5$  m/s. Biasanya dari pipa besi atau pipa paralon.

#### 6. *Powerhouse* (rumah Turbin + Generator)

*Powerhouse* berfungsi sebagai lokasi sistem pembangkitan yang isinya adalah generator dan turbin, serta beberapa peralatan elektrik dari PLTM (Panel distribusi dan Panel kontrol)

#### 7. *Tail Race* (Saluran Pembuang)

*Tail race* berfungsi sebagai pembuangan air. Pada PLTM menggunakan turbin *Open Flow*, bagian ini mempunyai pengaruh dalam menentukan kapasitas energi yang dibangkitkan dari sistem pembangkit PLTM, dimana disini akan diukur head (tinggi jatuhnya air), serta akan mempengaruhi daya isap ke pemutaran turbin.

#### 8. Generator PLTM

Generator berfungsi untuk mengubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik. Ada dua jenis generator yang sering dipakai yaitu generator sinkron dan generator asinkron. Dalam proses pembuatan PLTM ada dua model mesin yaitu model generator dengan sistem *cross flow* dan model sistem *open flow*.

## 9. Turbin Pembangkit PLTM

Turbin berfungsi untuk mengubah energi gerak air menjadi energi gerak mekanis yang kemudian akan mengonfersi dan memutar generator pembangkit. Turbin ini ada dua model yakni turbin *open flow* dan turbin *cross flow*.

## 10. *Ballast Load*

*Ballast Load* berfungsi sebagai penyeimbang beban digunakan *ballast load air heater* atau *water heater*. Kapasitas *ballast load* didesain berlebih (over) sebesar minimum 20%. Sebagai pengaman, sistem ketenagalistrikan (*electrical system*) PLTM diproteksi dengan penggunaan *lightning arrester* dan sistem peng-arde-an.

## 11. Sistem Kontrol-pengukuran dan Proteksi

Sistem kontrol bertugas mengatur kompensasi beban untuk menyeimbangkan beban dengan daya *output* generator. Sistem ini melindungi generator dan turbin dari *run away speed* apabila terjadi beban putus atau *drop*. Sistem kontrol yang digunakan adalah *Electronic Load Control* (ELC) dengan rating 120% dari rating daya *output* turbin. Sistem kontrol ini menyatu dengan panel kontrol listrik dan bekerja secara otomatis.

## 12. Jaringan Listrik JTR/JTM

Permukiman penduduk desa umumnya terpusat dengan sebaran yang cukup teratur. Jika Lokasi rumah pembangkit PLTM terletak cukup jauh

dari pinggiran desa, maka daya listrik disalurkan dengan tegangan menengah atau Jaringan Tegangan Menengah (JTM). Untuk mendistribusikan jaringan ke rumah-rumah (JTR) PLTM Rekismai Jaya menggunakan kabel Twisted Al  $3 \times 70\text{mm}^2 + 50 \text{mm}^2$  yang dikombinasi dengan Twisted Al  $3 \times 35 \text{mm}^2 + 25 \text{mm}^2$ . Penyambungan kabel dari jaringan tegangan rendah ke rumah (SR) menggunakan Twisted Al  $2 \times 10 \text{mm}^2$ . Untuk pengamanan pada ujung jaringan dan percabangan dilengkapi dengan pentanahan. Instalasi rumah (house wiring) dilakukan sesuai standar instalasi listrik PLN dan SNI; terutama dalam mempergunakan material konduktor dan kelengkapannya. Kabel instalasi rumah menggunakan tipe NYM  $3 \times 1.5$  dan NYM  $2 \times 1.5$ .

#### **D. Identifikasi Lokasi PLTM**

Tujuan dari identifikasi lokasi untuk *mini-hydro* adalah untuk menyelidiki lokasi lokasi pembangkit, dan wilayah suplai dalam rangka untuk mengevaluasi kelayakan dari proyek-proyek, dan mendapatkan informasi untuk rencana pelistrikan. Satu dari kegiatan-kegiatan yang terpenting dalam identifikasi lokasi adalah, untuk mengukur debit air dan *head* yang dapat digunakan untuk pembangkit listrik *mini-hydro*.

Penyelidikan tentang lokasi *intake*, rute saluran air, lokasi rumah pembangkit dan jalur transmisi dan lain-lain, adalah juga melakukan penilaian kelayakan dari lokasi-lokasi proyek. Survei permintaan daya adalah juga penting dalam perencanaan dari sistem kelistrikan. Data sosial ekonomi seperti jumlah rumah tangga dan fasilitas umum pada

lokasi yang akan disuplai, industri-industri lokal yang tersedia yang akan menggunakan listrik, kesanggupan masyarakat lokal untuk membayar listrik dan kemampuan masyarakat lokal, untuk menerima skema kelistrikan dicari selama survei identifikasi.

Pertama kali identifikasi lokasi, sebuah survei dilakukan pada hal-hal berikut di lokasi dari fasilitas pembangkit dan sekitar wilayah permintaan daya.

#### 1. Kondisi jalan ke lokasi

Peralatan dan mesin yang digunakan dalam konstruksi dan operasi pembangkit *mini-hydro* lebih kecil dan lebih ringan daripada yang digunakan pembangkit biasa. Peralatan dan mesin ini dalam beberapa kasus dapat dibawa dengan menggunakan kendaraan biasa atau secara manual. Pembangkit listrik skala kecil *mini-hydro* membutuhkan sebuah pertimbangan tertentu yang hati-hati, untuk menggunakan sebuah metode transportasi selain daripada penggunaan jalan atau kendaraan yang ada. Konstruksi dari sebuah akses jalan baru dapat menjadi faktor yang dapat dipertimbangkan secara ekonomi yakni, mengurangi nilai dari sebuah proyek. Lebih lanjut, pada kasus daerah pegunungan, mungkin ada hambatan jalan (sebelumnya digunakan untuk tempat pemotongan pohon, dll) dimana sulit untuk menemukan akses karena telah tertutup oleh vegetasi, dimana penting untuk mewancarai masyarakat lokal mengenai jalan yang ada tersebut.

## 2. Situasi sistem yang ada dan rencana ke depan.

Walaupun untuk sebuah lokasi proyek dimana pembangunan dari sebuah sistem mandiri diasumsikan, sebuah survei harus dilakukan pada bagian akhir lokasi, rute dan tegangan, dan lain-lain dari sistem yang ada dan juga pada keberadaan dari rencana rehabilitasi dan perluasan untuk sistem tersebut.

## 3. Situasi penggunaan air sungai

Keberadaan dari fasilitas-fasilitas yang menggunakan air sungai, volume air dan rencana ke depan lain yang relevan mengenai sebuah sungai, di mana sebuah pembangkit listrik tenaga air direncanakan akan menggunakan air tersebut harus disurvei. Bagian sungai yang airnya akan digunakan untuk pembangkit listrik harus ditentukan dengan tidak hanya mengambil asumsi bagian resesi, tetapi juga kemungkinan dari sebuah pergantian dari posisi *intake* air dan jalur air pada tahap formulasi proyek ke dalam pertimbangan. Ketika sebuah terjunan atau lembah curam digunakan untuk pembangkit listrik, maka informasi lokal tentang terjunan atau lembah yang bersangkutan harus diperoleh bersama dengan sebuah survei pada aturan legal yang relevan.

## 4. Keberadaan dari rencana-rencana pembangunan/proyek lain

Suatu survei harus dilakukan pada keberadaan dari rencana/proyek pembangunan yang lain dalam hal jalan, tanah pertanian, perumahan dan pariwisata yang kemungkinan berpengaruh pada rencana lokasi proyek dan/atau daerah sekitarnya.

5. Bangunan sipil dalam area yang berdekatan dan material yang digunakan.

Banyak bangunan sipil untuk pembangkit tenaga air skala kecil yang mirip dengan fasilitas-fasilitas irigasi dan fasilitas jalan aliran air, dimana bahan-bahan untuk proyek sering diperoleh dekat dengan lokasi proyek yang direncanakan. Penggunaan kontraktor, sumberdaya manusia dan bahan-bahan lokal dilibatkan dalam konstruksi sipil adalah penting dari sudut pandang mengurangi biaya konstruksi, kontribusi ekonomi lokal dan kepastian kemudahan perawatan dan perbaikan, sebuah survei harus dilakukan pada bangunan sipil yang mirip dalam wilayah yang berdekatan dari sebuah lokasi proyek untuk memperoleh referensi bahan material yang berguna untuk perencanaan dan desain proyek.

6. Permukaan topografi alamiah saat ini dan bangunan yang ada yang digunakan untuk pembangkit listrik.

Ketika saluran irigasi yang ada dan saluran air yang mirip digunakan (termasuk pelebaran dan/atau penguatan) sebagai sebuah jalan air untuk stasiun pembangkit, adalah perlu untuk mengecek bagian melintang, kemiringan dan volume air langsung yang lewat, dll dari sebuah saluran.

7. Keberadaan dari permukaan tanah yang penting dan tumbuhan yang ada.

Meskipun skala kecil sebuah pembangkit listrik tenaga air memerlukan beberapa perubahan pada topografi lokal. Ketika permukaan tanah dan tumbuhan penting berada di sepanjang rute yang direncanakan dari jalur

air, maka harus hati-hati dalam persetujuan dengan pemiliknya. Untuk tujuan ini, lokasi dan kondisi mereka, dll, didiskusikan terlebih dahulu dengan orang yang bersangkutan seperti pemilik tanah dan wakil dari pemerintahan setempat.

## **E. Debit Air Dan Model Pengukurannya**

### **1. Pengertian debit air**

Dalam ilmu hidrologi dikemukakan, debit air sungai adalah volume air yang mengalir melalui suatu penampang lintang pada suatu titik tertentu per satuan waktu, pada umumnya dinyatakan  $m^3/detik$ . Debit sungai diperoleh setelah mengukur kecepatan air dengan alat pengukur atau pelampung, untuk mengetahui data kecepatan aliran sungai dan kemudian mengalirkannya dengan luas melintang (luas potongan lintang sungai) pada lokasi pengukuran kecepatan tersebut. Pengukurannya dilakukan tiap hari, atau dengan pengertian yang lain debit atau aliran sungai adalah laju aliran sungai (dalam bentuk volume air ) yang melawati suatu penampang melintang sungai per satu waktu [3]. Dalam sistem satuan SI besarnya debit dinyatakan dalam satuan meter kubik per detik ( $m^3/s$ ).

Dalam laporan-laporan teknis, debit aliran biasanya ditunjukkan dalam bentuk hidrograf aliran. Hidrograf aliran adalah suatu perilaku debit sebagai respon adanya perubahan karakteristik biografistik yang berlangsung dalam suatu DAS, dan atau adanya perubahan (fluktuasi musiman atau tahunan).

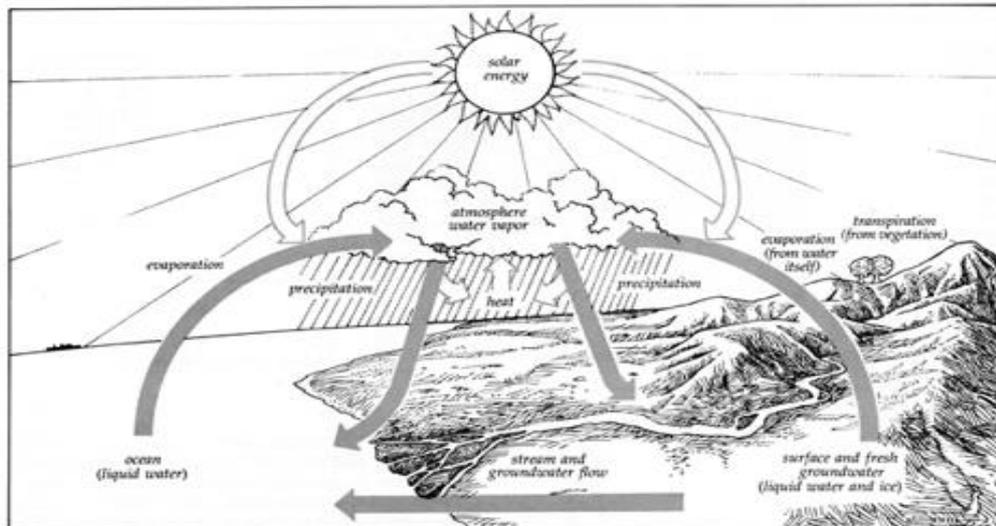
Kemampuan pengukuran debit aliran sangat diperlukan untuk mengetahui sumber daya air disuatu wilayah DAS. Debit aliran dapat dijadikan sebuah alat untuk memonitor dan mengevaluasi neraca air suatu kawasan, melalui pendekatan potensi sumber daya air permukaan yang ada.

Dari hujan yang jatuh, sebagian langsung menguap kembali, sebagian meresap ke dalam tanah dan dari sebagian yang mengalir melalui permukaan bumi, dari bagian yang tinggi ke bagian yang permukaan tanah yang lebih rendah, ada sebagian kecil tertahan dalam rawa sebagai air retensi dan selebihnya yang merupakan bagian yang besar, mengalir melalui palung sungai menuju ke laut. Pengetahuan banyaknya air yang mengalir (debit) dalam sungai ini adalah sangat penting, baik yang mengalir terus menerus maupun yang mengalir berkala (banjir-banjir tinggi).

Debit air sangat terkait dengan kuantitas air. Seringkali debit air ini dijadikan sebagai indikator untuk menentukan ketersediaan air yang ada di wilayah desanya. Fenomena umum yang biasanya terjadi adalah pada musim hujan debit air meningkat, sedangkan pada musim kemarau debit air akan berkurang. Untuk menguji apakah fenomena tersebut masih berlaku, masyarakat perlu melakukan monitoring debit air, sehingga dapat dilihat, apakah ketersediaan air untuk masyarakat masih akan mencukupi kebutuhan atau tidak.

## **2. Proses terbentuknya debit air**

Sungai itu terbentuk dengan adanya aliran air dari suatu atau beberapa sumber air yang berada di ketinggian, misalnya disebuah puncak bukit atau gunung yang tinggi, dimana air hujan sangat banyak jatuh di daerah ini, kemudian terkumpul dibagian yang cekung, lama kelamaan dikarenakan sudah terlalu cekung penuh, akhirnya mengalir keluar melalui bagian bibir cekungan yang paling mudah tergerus air, selanjutnya air itu akan mengalir di atas permukaan tanah yang paling rendah, mungkin mula-mula merata, namun karena ada bagian-bagian dipermukaan tanah yang tidak begitu keras, maka mudalah terkikis, sehingga menjadi alur yang tercipta makin hari makin panjang. Seiring dengan makin deras dan makin seringnya air mengalir dialur itu, maka semakin panjang dan semakin dalam alur itu akan berbelok, atau bercabang, apabila air yang mengalir disitu terhalang oleh batu sebesar alur itu, atau batu yang banyak, demikian juga dengan sungai di bawah permukaan tanah, terjadi dari air yang mengalir dari atas, kemudian menemukan bagian-bagian yang dapat ditembus ke bawah permukaan tanah dan mengalir ke arah dataran rendah yang rendah, lama kelamaan sungai itu akan semakin lebar. Berikut adalah Gambar ilustrasi terjadinya debit air :



Sumber : Mahmud Ahmad, Hidrologi Teknik (2010)

Gambar 2.2 Ilustrasi terjadinya debit air

### 3. Pengukuran dan perhitungan debit air sungai

Debit adalah laju aliran air (dalam bentuk volume air) yang melewati suatu penampang melintang sungai per satuan waktu. Rumus umum yang biasa digunakan adalah [4]:

$$Q = v \times A \quad (2)$$

Keterangan:  $Q$  = Debit aliran sungai ( $m^3/s$ )

$A$  = Luas bagian penampang basah ( $m^2$ )

$v$  = Kecepatan aliran ( $m/s$ )

Berbagai alat ukur kecepatan aliran adalah sebagai berikut:

1) Pengukuran kecepatan aliran dengan pelampung (*floating method*);

Pengukuran kecepatan aliran dengan pelampung bila kecepatan aliran diukur dengan pelampung, maka diperoleh persamaan debit sebagai berikut:

$$Q = A \times k \times u \quad (3)$$

Keterangan ; Q : debit (m<sup>3</sup>/s)  
A : luas penampang basah (m<sup>2</sup>)  
k : koefisien pelampung  
u : kecepatan pelampung

Nilai k tergantung dari jenis pelampung yang dipakai. Nilai tersebut dapat dihitung dengan persamaan (menurut YB Francis) adalah sebagai berikut:

$$k = 1 - 0,116 (\sqrt{1 - \lambda} - 0,1) \quad (4)$$

Dimana ; k : koefisien pelampung

$\lambda$  : kedalaman tangkai (h) per kedalaman air (d)

$\lambda$  : h/d

## 2) Pengukuran menggunakan alat ukur arus (*current meter*)

*Current meter* adalah alat untuk mengukur kecepatan aliran (kecepatan arus) air sungai atau aliran air lainnya. Ada dua tipe *current meter* yaitu tipe baling-baling (*propeller type*) dan tipe cangkir (*cup type*). Penggunaan alat tersebut dilakukan dengan tongkat berskala atau dengan menggunakan perahu. Bila menggunakan tongkat, ujung tongkat dipasang pada bagian alat yang telah tersedia lalu dimasukkan ke dalam air. Dan bila menggunakan perahu, alat dimasukkan ke dalam air dengan menggunakan tali berskala yang ujungnya diikatkan pada bagian alat pemberat yang tersedia. Skala pada tali atau tongkat ini berfungsi untuk menunjukkan kedalaman pengukuran yang dikehendaki.



Sumber : <http://currentmeter.com>, 2012

Gambar 2.3 Alat ukur current metert

## F. Perhitungan Daya Listrik

PLTM yang menghasilkan daya listrik bergantung sekali pada jumlah debit air sungai yang digunakan serta tinggi jatuh air yang didapatkan. Dalam perhitungan daya, nilai H dapat ditaksir dari peta topografi yang ada, atau untuk secara lebih akurat dapat diukur dengan alat ukur survei langsung ke lapangan. Alat ukur survei tersebut dapat berupa Total Station atau GPS Geodetik. H adalah perbedaan muka air, yang pada keadaan banjir muka airnya dapat lebih tinggi. Tetapi perbedaan tinggi dapat diambil tidak berubah karena pada daerah yang lebih rendah muka air juga naik (Patty, 1995).

Daya yang dihasilkan dalam sistem pembangkitan PLTA dibagi menjadi tiga yaitu :

1. Daya hidrolis :  $P_h = g \times H \times Q$  (kW) (5)

2. Daya poros turbin :  $P_t = g \times H \times Q \times \eta_t$  (kW) (6)

3. Daya generator :  $P_g = g \times H \times Q \times \eta_g \times \eta_t$  (kW) (7)

Keterangan ;	$P_t$	= daya turbin (kW),
	$g$	= percepatan gravitasi ( $m/s^2$ ),
	$H$	= jatuh efektif (m),
	$Q$	= debit ( $m^3/s$ ),
	$\eta_t$	= efisiensi turbin
	$\eta_g$	= efisiensi generator

Daya keluaran turbin yang merupakan daya mekanik yang mempunyai efisiensi  $\eta_T$ . Selanjutnya diubah menjadi daya listrik oleh generator pada tegangan rendah. Pada perubahan tersebut terjadi kehilangan daya sehingga generator juga memiliki efisiensi, yaitu  $\eta_g$ . Tegangan yang keluar dari generator perlu diubah menjadi tegangan transmisi melalui trafo.

Daya yang dibangkitkan generator ini yang akan disalurkan ke pengguna. Dalam perencanaan jumlah kebutuhan daya di pusat beban harus di bawah kapasitas daya terbangkit, sehingga tegangan listrik stabil dan sistem menjadi lebih handal (berumur panjang).

### **G. Perencanaan Pemilihan Turbin PLTM**

Turbin air berperan untuk mengubah energi air (energi potensial, tekanan dan energi kinetik) menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros. Putaran poros turbin ini akan diubah oleh generator menjadi tenaga listrik. Berdasarkan cara kerja turbin air mengubah energi air menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran, turbin air dibagi menjadi dua kelompok:

1. Turbin impuls adalah turbin air yang bekerja dengan mengubah seluruh energi air (yang terdiri dari energi potensial, tekanan, &

kecepatan) yang tersedia menjadi energi kinetik, akibat tumbukan air terhadap sudu turbin sehingga menghasilkan momen puntiran poros.

Jenis turbin air ini diantaranya ialah: *cross-flow*, pelton & turgo.

2. Turbin reaksi adalah turbin air yang mengubah seluruh energi air yang tersedia sepanjang alirannya di dalam turbin menjadi momenpuntiran.

Jenis turbin air ini diantaranya ialah: francis, Kaplan & propeller.

Daerah aplikasi berbagai jenis turbin air relatif spesifik, pada beberapa daerah operasi memungkinkan digunakan beberapa jenis turbin. Pemilihan jenis turbin pada daerah operasi yang *overlapping* ini memerlukan perhitungan yang lebih mendalam. Pada dasarnya daerah kerja operasi turbin menurut Keller dikelompokkan berdasarkan pada table dibawah ini.

Tabel 2.2. Daerah Operasi, batasan dan efisiensi Turbin

Jenis Turbin	Batasan daya operasai (kW)	Variasi head	Efisiensi
Kaplan dan Proppeller		$2 < H < 20$	80% - 90%
Francis	500 – 5000	$10 < H < 350$	80% - 90%
Pelton	100 – 5000	$50 < H < 1000$	80% - 85 %
Crossflow	50 - 1000	$6 < H < 100$	70% - 80%

Sumber : Apollo, Sistem pembangkit energy 3, Thn.2011

Tabel 2.3 Run-away speed Turbin, N maks/N

Jenis Turbin	Putaran Nominal, N (rpm)	Runaway speed
Semi Kaplan, single regulated	75-100	2-2.4
Kaplan, double regulated	75-150	2.8-3.2
Small-medium Kaplan	250-700	2.8-3.2
Francis (medium & high head)	500-1500	1.8-2.2
Francis (low head)	250-500	1.8-2.2
Pelton	500-1500	1.8-2
Crossflow	100-1000	1.8-2

Sumber : Apollo Dkk, Sistem pembangkit energy 3, Thn.2011

Pemilihan jenis turbin dapat ditentukan berdasarkan kelebihan dan kekurangan dari jenis-jenis turbin, khususnya untuk suatu desain yang sangat spesifik. Pada tahap awal, pemilihan jenis turbin dapat diperhitungkan dengan mempertimbangkan parameter-parameter khusus yang mempengaruhi sistem operasi turbin, yaitu :

1. Faktor tinggi jatuhnya air efektif (*net head*) dan debit yang akan dimanfaatkan untuk operasi turbin merupakan faktor utama yang mempengaruhi pemilihan jenis turbin, sebagai contoh : turbin pelton efektif untuk operasi pada *head* tinggi, sementara turbin propeller sangat efektif beroperasi pada *head* rendah.
2. Efisiensi turbin akan mempengaruhi daya poros turbin. Nilai efisiensi turbin biasanya telah ditentukan di *nameplate* atau dalam catalog pabrikan turbin.
3. Kecepatan (putaran) turbin yang akan ditransmisikan ke generator. Sebagai contoh untuk sistem transmisi *direct couple* antara generator dengan turbin pada *head* rendah, sebuah turbin reaksi (propeller) dapat mencapai putaran yang diinginkan, sementara turbin pelton dan *crossflow* berputar sangat lambat (*low speed*) yang akan menyebabkan sistem tidak beroperasi.

#### **H. Perencanaan Pemilihan Generator Pembangkit**

Generator adalah suatu peralatan yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Jenis generator yang digunakan pada perencanaan PLTM ini adalah:

1. Generator sinkron, sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*) dengan penggunaan dua tumpuan bantalan (*two bearing*), dan
2. Generator asinkron yakni *Induction Motor* sebagai Generator (IMAG) sumbu vertikal, pada perencanaan turbin *propeller open flume*.

Penentuan generator mempertimbangkan efisiensi Efisiensi generator secara umum adalah:

Tabel 2.4 Klasifikasi efisiensi generator

No	Kapasitas	Efisiensi
1.	< 10 KVA	0.7 - 0.8 ( 70%-80% )
2.	10 - 20 KVA	0.8 - 0.85 ( 80%;-85% )
3.	20 - 50 KVA	0.85 ( 85% )
4.	50 - 100 KVA	0.85 - 0.9 ( 85%-90% )
5.	100 – 5.000 KVA	0.9 - 0.98 ( 90%-98% )

Sumber : Aries Munandar, *Teknik Tenaga Listrik 2*, Thn 2000

### I. Optimalisasi Sistem Tenaga Listrik

Pada umumnya, sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu pembangkit tenaga listrik, penyaluran tenaga listrik, dan distribusi tenaga listrik. Ketiga bagian ini tidak dapat dipisahkan karena merupakan suatu sistem yang kompleks yang bekerja untuk menyalurkan daya dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban. Energi listrik yang dihasilkan pusat pembangkit listrik akan disalurkan melalui saluran transmisi kemudian melalui saluran distribusi akan sampai ke konsumen.

#### 1. Pusat Pembangkit Listrik (*Power Plant*)

Pusat pembangkit listrik merupakan tempat pertama kali energi listrik dibangkitkan atau dihasilkan. Di sini terdapat turbin penggerak awal dan juga generator yang mengubah tenaga turbin menjadi energi listrik. Terdapat beberapa jenis pusat pembangkit listrik yang biasanya dibagi ke

dalam dua bagian besar yaitu pembangkit *hydro* (PLTA) dan pembangkit *thermal* (PLTU, PLTG, PLTGU, PLTD, PLTP).

## 2. Transmisi Tenaga Listrik

Transmisi tenaga listrik merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari pusat pembangkitan listrik hingga saluran distribusi listrik sehingga nantinya sampai pada konsumen/pengguna listrik.

## 3. Sistem Distribusi

Sistem distribusi ini merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan/konsumen dan berfungsi dalam hal pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat. Sub sistem ini terdiri dari: pusat pengatur/gardu induk, gardu hubung, saluran tegangan menengah/jaringan primer (6 kV dan 20 kV) yang berupa saluran udara atau kabel bawah tanah, saluran tegangan rendah/jaringan sekunder (380 V dan 220 V), gardu distribusi tegangan yang terdiri dari panel-panel pengatur tegangan baik tegangan menengah ataupun tegangan rendah, dan trafo.

Telah dijelaskan sebelumnya bagaimana sistem dari tenaga listrik tersebut yang juga dapat dilihat dari gambar di atas sebagai gambaran singkat dari hubungan masing-masing sistem listrik. Pembangkit-pembangkit listrik memiliki lokasi yang saling berjauhan satu sama lain, dan terhubung satu sama lain melalui sistem transmisi yang luas. Ini dapat disebut sebagai sistem interkoneksi. Adanya sistem interkoneksi tersebut menyebabkan:

1. Keandalan sistem yang semakin tinggi.
2. Efisiensi pembangkitan tenaga listrik dalam sistem meningkat.
3. Mempermudah penjadwalan pembangkit.

Sebuah sistem tenaga listrik merupakan sebuah unit usaha dimana selain faktor teknis, juga harus diperhatikan faktor ekonomisnya. Kondisi keseimbangan antara pendapatan dan pengeluaran harus dijaga agar didapat keuntungan yang layak. Tujuan utama dari operasi sistem tenaga listrik ini adalah untuk memenuhi kebutuhan beban listrik secara efisien (beban terpenuhi dengan biaya yang minimum), dengan mempertimbangkan sasaran operasi tenaga listrik (sistem harus dapat memenuhi standar dalam keamanan lingkungan, memiliki keandalan yang baik, dan dapat melayani permintaan secara *continue* dari waktu ke waktu).

Ekonomi (*economy*) berarti listrik harus dioperasikan secara ekonomis, tanpa melanggar batasan keandalan dan mutunya. Keandalan (*security*) merupakan kemampuan sistem dalam menghadapi kejadian yang tidak direncanakan (gangguan). Apabila terjadi gangguan di pembangkit ataupun pada saluran transmisi diusahakan sebisa mungkin agar tidak terjadi pemadaman di sisi konsumen. Mutu (*quality*) merupakan kemampuan sistem untuk mengukur agar kualitas tegangan dan frekuensi dari tenaga listrik dapat dijaga agar tetap berada pada kisaran yang ditetapkan. Pada pelaksanaan pengendalian operasi sistem tenaga listrik, urutan prioritas dari sasaran di atas bisa berubah-ubah tergantung pada

kondisi *realtime*. Pada saat terjadi gangguan, maka keandalan/sekuriti merupakan prioritas utama sedangkan mutu dan ekonomi bukanlah yang utama. Kemudian apabila keamanan dan mutu sudah bagus, maka selanjutnya ekonomi yang harus diprioritaskan[12][14].

#### **J. *Ant Colony Optimization (ACO)***

*Algoritma Ant Colony Optimization* adalah sebuah algoritma *metaheuristic* yang digunakan untuk pencarian secara mendalam dengan kualitas solusi yang lebih baik dibandingkan dengan metode pencarian konvensional biasa. *Ant Colony* biasanya digunakan untuk mencari jalur terpendek. Menurut Lopez ACO adalah sebuah pendekatan *NP hard* yang mengkombinasikan masalah optimasi. Lopez mengatakan bahwa pada dasarnya ACO dibangun dari algoritma *Ant Colony System (ACS)* dan *MAX-MIN Ant System (MMAS)*. ACO merupakan algoritma pencarian *metaheuristic* yang terinspirasi dari kelompok semut dalam mencari makanan [20].

Lebih lanjut Sutariya dalam penelitiannya menjelaskan bahwa *Ant Colony Optimization* adalah sebuah rumpun ilmu yang tergabung dalam *swam intelligence*, dan merupakan bagian dari *artificial intelligence*. *Ant colony optimization (ACO)* merupakan sebuah model yang dikembangkan dengan melihat semut sebagai objek utama pembentuk algoritmanya [8].

ACO merupakan pengembangan dari *Ant Colony*. Secara informal, ACO bekerja sebagai berikut: pertama kali, sejumlah  $m$  semut ditempatkan pada sejumlah  $n$  titik berdasarkan beberapa aturan

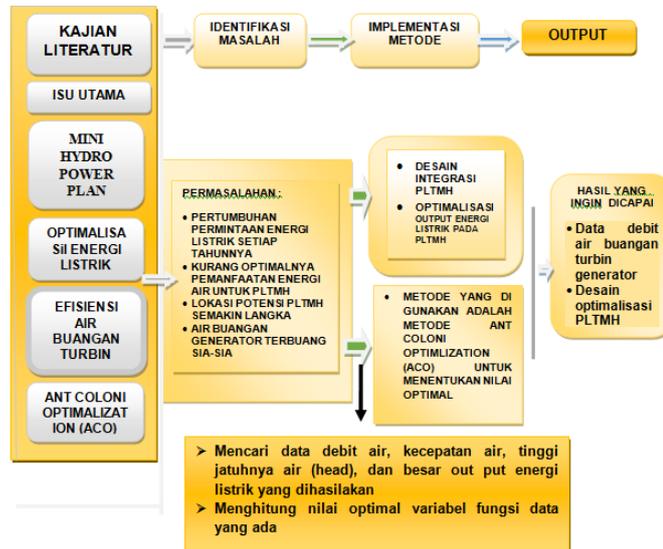
inisialisasi (misalnya, secara acak). Setiap semut membuat sebuah *tour* (yaitu, sebuah solusi jalur evakuasi yang mungkin) dengan menerapkan sebuah aturan transisi status secara berulang kali. Selagi membangun *tour*nya, setiap semut juga memodifikasi jumlah *pheromone* pada edge-edge yang dikunjunginya dengan menerapkan aturan pembaruan *pheromone* lokal yang telah disebutkan tadi. Setelah semua semut mengakhiri *tour* mereka, jumlah *pheromone* yang ada pada edge-edge dimodifikasi kembali (dengan menerapkan aturan pembaruan *pheromone* global).

Dalam membuat *tour*, semut 'dipandu' oleh informasi *heuristic* (mereka lebih memilih edge-edge yang pendek) dan oleh informasi *pheromone* sebuah edge dengan jumlah *pheromone* yang tinggi merupakan pilihan yang sangat diinginkan. Kedua aturan pembaruan *pheromone* itu dirancang agar semut cenderung untuk memberi lebih banyak *pheromone* pada edge-edge yang harus mereka lewati. Algoritma ACO memiliki simulasi yang baik dalam memecahkan masalah optimasi.

Algoritma ACO pada awalnya dikonstruksikan dengan kandidat konstruksi untuk mendapatkan kombinasi masalah optimasi dimulai dengan solusi yang masih kosong. Kemudian ditambahkan dengan komponen solusi untuk mendapatkan kandidat solusi yang lebih menyeluruh dan optimal [20].

## K. Kerangka Pikir

Berdasarkan latar belakang yang sudah dijelaskan di atas, berikut kerangka pikir yang menjadi acuan untuk penelitian ini :



Gambar 2.4 Kerangka Pikir Penelitian

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **A. Jenis Penelitian**

Penelitian yang dilakukan adalah jenis penelitian observatif analisis, sehingga dilakukan dengan metode observasi lapangan di PLTM Bungin 1, dan selanjutnya dianalisis dengan menggunakan bahan pustaka terkait, seperti buku, jurnal (nasional, maupun internasional), dan referensi kepustakaan lainnya yang menunjang penelitian tersebut.

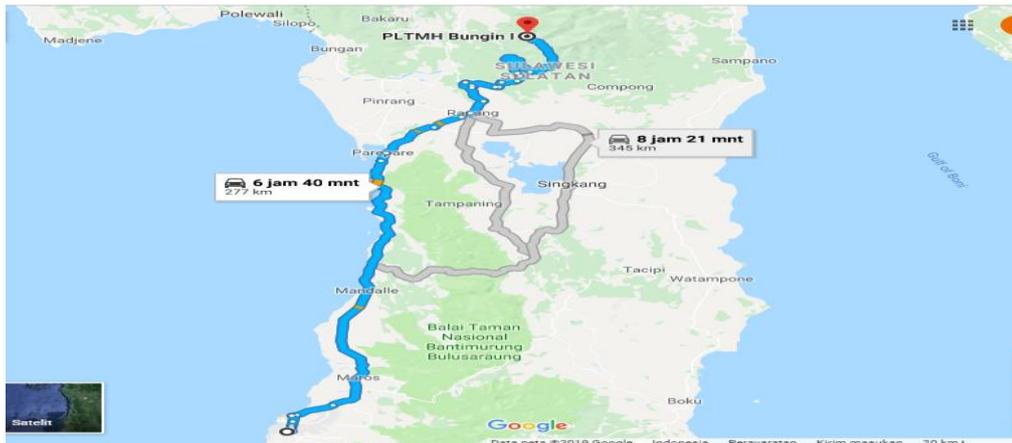
#### **B. Waktu dan Lokasi Penelitian**

##### 1. Waktu Penelitian

Waktu penelitian dilaksanakan selama tiga bulan, dimulai pada bulan Mei 2019 – Juli 2019.

##### 2. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di PLTM Bungin I dengan kapasitas 2 x 1,5 MW. Lokasi PLTM berada di sepanjang bantaran sungai Tabang, desa Sawitto kecamatan Bungin, Kabupaten Enrekang pada PLTM Bungin I dengan kapasitas 2 x 1,5 MW. Adapun peta topografi lokasi penelitian sebagai berikut :



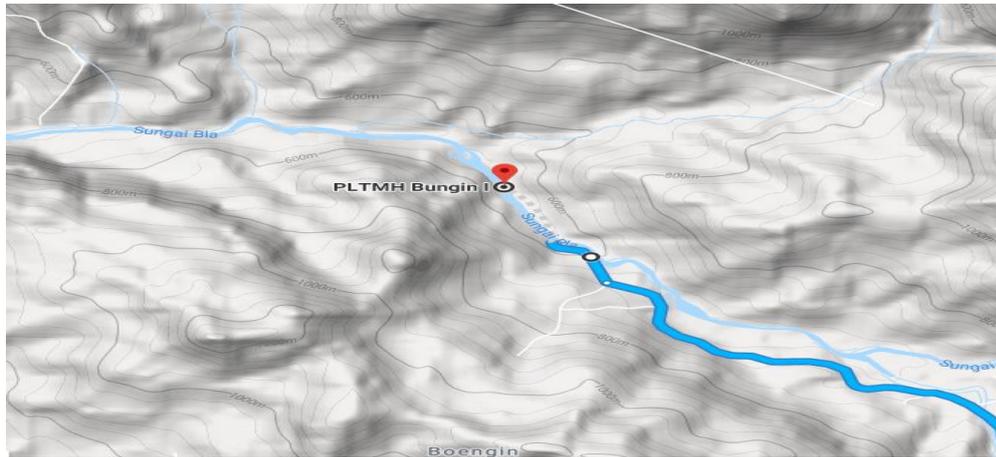
Gambar 3.1 Peta Lokasi PLTM (Makassar ke PLTM Bungin 1



Gambar 3.2 Peta Kabupaten Enrekang



Gambar 3.3 Peta Letak Lokasi PLTM



Gambar 3.4 Peta Aliran Sungai Tabang

### C. Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilaksanakan dalam beberapa tahapan sebagai berikut

#### 1. Observasi Langsung

Melalui teknik ini, data yang dibutuhkan terutama mengenai gambaran umum dari objek yang diteiti, didokumentasikan dan digunakan sebagai bahan untuk melakukan kajian dan analisis.

Data yang dikumpulkan dalam observasi langsung adalah peta dan jarak lokasi PLTM Bungin 1, kecepatan aliran sungai dan air buangan turbin generator ( $v$ ), debit aliran sungai dan debit air buangan turbin generator, tinggi jatuhnya air/*head* ( $h$ ), data kondisi topografis, dan geologi, serta data-data lain yang terkait dengan penelitian. Penelitian ini dilakukan dengan pengukuran sebanyak 10 titik kandidat lokasi *head* berbeda untuk perencanaan penempatan *powerhouse* kedua.

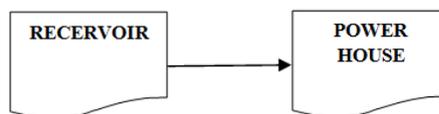
#### 2. Studi Kepustakaan

Rujukan konseptual dan teoritis bagi keseluruhan proses studi, mulai dari perencanaan, pengumpulan data, dan analisis data, diharapkan

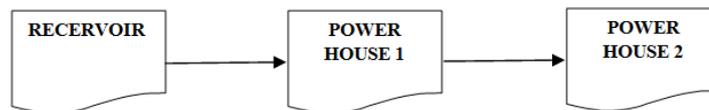
diperoleh melalui studi kepustakaan berupa jurnal (nasional/internasional), buku, artikel, dan jenis literatur lainnya yang berkaitan dengan penelitian agar kesahihan hasil studi dapat dipertanggung-jawabkan.

#### D. Metode Analisa Data

Model integrasi *powerhouse* merupakan model yang peneliti tawarkan untuk memanfaatkan air buangan turbin *powerhouse* 1, untuk dimasukkan ke pipa *penstock* kemudian dialirkan secara integrasi ke *powerhouse* kedua. Berikut adalah penggambaran bagan model yang diusulkan :



Gambar 3.5 Bagan PLTM dengan *powerhouse* tunggal



Gambar 3.6 Bagan PLTM dengan model integrasi dua *powerhouse*

Bagan di atas (Gambar 3.5) memperlihatkan bagan PLTM dengan *powerhouse* tunggal. Air buangan dari turbin yang telah terpakai dialirkan kembali ke sungai, dan di beberapa kondisi air buangan pembangkit digunakan untuk pengairan irigasi persawahan. Sedangkan bagan yang lainnya (Gambar 3.6) memperlihatkan bagan PLTM model integrasi dua *powerhouse*.

Fokus penelitian ini menganalisis penempatan letak optimal *powerhouse* kedua, sebagai rujukan dalam penentuan penjaluran pipa

penstock. Hal ini akan sangat menentukan kualitas sistem pembangkit yang akan dibangun, sehingga dapat menghasilkan energi listrik optimal dari segi kualitas dan keandalan..

Penentuan letak optimal *powerhouse* kedua, menggunakan metode *Ant Coloni Optimization*. *Ant Colony* merupakan sebuah algoritma dalam komputasi yang merupakan bagian dari cabang ilmu *Swam Intelligence*. *Ant colony optimization* merupakan sebuah model yang dikembangkan dengan melihat semut sebagai objek utama pembentuk algoritmanya. Untuk mendapatkan makanan, semut menggunakan cara tertentu untuk sampai pada tujuannya.

Secara informal, ACO bekerja sebagai berikut : pertama kali, sejumlah  $m$  semut ditempatkan pada sejumlah  $n$  titik berdasarkan beberapa aturan inisialisasi (misalnya, secara acak). Setiap semut membuat sebuah *tour* (yaitu, sebuah solusi jalur evakuasi yang mungkin) dengan menerapkan sebuah aturan transisi status secara berulang kali. Selagi membangun *tour*nya, setiap semut juga memodifikasi jumlah *pheromone* pada edge-edge yang dikunjunginya dengan menerapkan aturan pembaruan *pheromone local* yang telah disebutkan tadi. Setelah semua semut mengakhiri *tour* mereka, jumlah *pheromone* yang ada pada edge-edge dimodifikasi kembali (dengan menerapkan aturan pembaruan *pheromone global*). Dalam membuat *tour*, semut 'dipandu' oleh informasi *heuristic* (mereka lebih memilih edge-edge yang pendek) dan oleh informasi *pheromone*. Sebuah edge dengan jumlah *pheromone* yang tinggi

merupakan pilihan yang sangat diinginkan. Kedua aturan pembaruan *pheromone* itu dirancang agar semut cenderung untuk memberi lebih banyak *pheromone* pada edge-edge yang harus mereka lewati. (Verdianto, 2013). Algoritma ACO memiliki simulasi yang baik dalam memecahkan masalah optimasi [12][14]. Penentuan nilai propabilitas ACO dapat dilihat dengan formulasi sebagai berikut :

$$P_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}]^\alpha \cdot [\eta_{il}]^\beta}, \quad \text{if } j \in N_i^k \quad (8)$$

- $T_{ij}(t)$  = informasi *pheromone* pada iterasi sedang berjalan
- $N_{ij}$  = QAP spesifik pada informasi *heuristic*
- $\alpha$  dan  $\beta$  = dua parameter yang menentukan nilai *pheromone* relatif dan informasi *heuristic*
- $N_i^k$  = *ant* tetangga (*neighborhood*) dari *ant*  $k$
- $P_{ij}^k$  = persamaan solusi pada sebuah lokasi

Kerangka tahapan analisis dalam penelitian ini dilakukan dengan tahapan sebagai berikut :

### E.1 Tahapan Analisa Kebutuhan Beban

Penentuan daya untuk permintaan listrik disebut dengan kebutuhan beban. Perhitungan kebutuhan beban merupakan salah satu parameter perhitungan dalam desain perencanaan PLTM. Nilai beban menjadi rujukan besar kapasitas pembangkitan yang mesti dicapai oleh suatu PLTM. Perhitungan kebutuhan beban kecamatan Bungin dapat ditentukan dengan formulasi sebagai berikut :

## Jumlah Produsen x Kebutuhan Daya = Total Daya

Kebutuhan daya terpasang ditentukan berdasarkan asumsi kebutuhan daya pelanggan rumah tangga, pelanggan sosial, pelanggan bisnis dan pelanggan industri. Kebutuhan untuk masing-masing pelanggan disesuaikan dengan standarisasi daya terpasang yang ditentukan oleh PLN.

### E.2 Tahapan Analisa Parameter

Dalam tahapan analisa parameter, metode ACO akan menginisiasi fungsi objektif dari parameter yang menjadi dasar (basic) dalam penentuan fungsi *ant* (semut) untuk pencarian lokasi terbaik. Secara umum fungsi objektif yang menjadi dasar (basic) dalam analisa parameter dan *output* daya pada sistem pembangkitan PLTM adalah :

$$P_{\text{eff}} = \sum_{i=3}^n P_{\text{gi}} \quad (9)$$

$$P_{\text{gi}} = g \cdot h \cdot Q_{\text{out}} \cdot \eta \quad [\text{kW}] \quad (10)$$

Keterangan:  $P_{\text{eff}}$  = Daya Efektif

$n$  = Jumlah unit pembangkit hydro (PLTM) (unit)

$P_{\text{gi}}$  = Daya pembangkitan generator  $i$  (kW)

$g$  = Konstanta (9,8)

$h$  = Tinggi jatuh air/ *head* (m)

$Q_{\text{out}}$  = Debit aliran air unit  $i$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$\eta$  = Efisiensi

## 1. Formulasi Perhitungan Debit Air Andalan

Penentuan debit air buangan turbin dihitung dengan menggunakan parameter nilai kecepatan air harian, dan luas penampang basah kolam air buangan turbin. Formulasi fungsi objektif yang digunakan dalam menentukan besar debit air yaitu :

$$Q_n = V_n \cdot A \quad (11)$$

$$Q_a = \frac{\sum Q_n}{\Delta t} \quad (12)$$

$$\sum Q_n = \sum_{i=24}^n Q_n \quad (13)$$

$$V = \frac{s}{t} \quad (14)$$

$$A = p \times l \quad (15)$$

$$Q_2 \leq Q_1 \text{ (constraint)} \quad (16)$$

Keterangan :  $Q_n$  = Debit air ( $m^3/s$ )

$Q_a$  = Debit andalan ( $m^3/s$ )

$V_n$  = Kecepatan air ( $m/s$ )

$A$  = Luas penampang basah ( $m^2$ )

$\Delta t$  = Selang waktu pengukuran kecepatan (jam)

$t$  = Jarak pengukuran dalam waktu  $t$  (sekon)

$p$  = Panjang kolam

$l$  = Lebar kolam

## 2. Formulasi Penentuan *Head*

Potensi *head* diukur dengan menggunakan alat ukur *Geographic Position Sistem (GPS)*, bertujuan untuk menentukan titik koordinat lokasi

rencana *head*. Penentuan *head* dengan menggunakan objektif *function* sebagai berikut :

$$H_{ph} = EL_b - EL_{ph} \quad (17)$$

$$H_1 = EL_{ph} - EL_{h1} \quad (18)$$

$$H_n = EL_{(n-1)} - EL_{hn} \quad (19)$$

$$H_{eff} = H_{opt} (1, \dots, 10) \quad (20)$$

Keterangan :  $H_{ph}$  = *Head powerhouse*

$H_1$  = *Skenario head 1*

$H_n$  = *Skenario head (n)*

$EL_B$  = *Elevasi bendungan*

$EL_{ph}$  = *Elevasi powerhouse*

$EL_{h1}$  = *Elevasi skenario head 1*

$EL_{hn}$  = *Elevasi skenario head*

### 3. Analisa Aksestabilitas, Geologis Dan Topografis

Potensi *head* diukur dengan menggunakan alat ukur *GPS*, bertujuan untuk menentukan titik kordinat lokasi rencana *head*. *Google Eart* digunakan sebagai aplikasi penunjang dalam melihat peta topografis lokasi pengukuran, dan selanjutnya analisa topografis dan pemetaan hasil untuk lokasi optimal dilakukan dengan menggunakan metode *GIS*. Batasan jarak pengukuran adalah maksimum < 2 km dari *powerhouse*, sedangkan batasan jarak antara titik *head* adalah 100-200 m.

#### 4. Formulasi Perhitungan Daya

Daya listrik sangat bergantung pada jumlah debit air sungai yang digunakan serta tinggi jatuh air yang didapatkan. Daya yang dihasilkan dalam sistem pembangkitan PLTM dibagi menjadi tiga yaitu [16] :

$$1) \text{ Daya hidrolis sumber} : P_h = g \times h \times Q \text{ (kW)} \quad (21)$$

$$2) \text{ Daya poros turbin} : P_t = g \times h \times Q \times \eta_t \text{ (kW)} \quad (22)$$

$$3) \text{ Daya poros generator} : P_g = g \times h \times Q \times \eta_t \times \eta_g \text{ (kW)} \quad (23)$$

Keterangan ;  $P_h$  = Daya hidrolis (kW),

$P_t$  = Daya poros turbin (kW)

$P_g$  = Daya poros generator (kW)

$g$  = Percepatan gravitasi ( $m/s^2$ ),

$h$  = Jatuh efektif (m),

$Q$  = Debit ( $m^3/detik$ ),

$\eta_t$  = Efisiensi turbin

$\eta_g$  = Efisiensi generator

Daya keluaran turbin yang merupakan daya mekanik yang mempunyai efisiensi  $\eta_t$ . Selanjutnya diubah menjadi daya listrik oleh generator pada tegangan rendah. Pada perubahan tersebut terjadi kehilangan daya sehingga generator juga memiliki efisiensi, yaitu  $\eta_g$ [16].

Daya yang dibangkitkan generator ini yang akan disalurkan ke pengguna. Dalam perencanaan jumlah kebutuhan daya di pusat beban harus di bawah kapasitas daya terbangkit, sehingga tegangan listrik stabil dan sistem menjadi lebih handal (berumur panjang).

## 5. Formulasi Perhitungan Rugi Daya

Rugi daya merupakan salah satu variabel penting dalam desain letak optimal *powerhouse*. Parameter yang mempengaruhi terjadinya rugi daya adalah panjang saluran (L), dan impedansi jenis kabel (Z). Formulasi fungsi objektif untuk perhitungan rugi daya adalah sebagai berikut :

$$P_{\text{loss}} = I^2 \cdot R \cdot Z \cdot L \quad (\text{KVA}) \quad (24)$$

$$I_g = \frac{S_g}{\sqrt{3} \cdot V_g} \quad (\text{A}) \quad (25)$$

$$S_g = \frac{P_g(\text{KW})}{\text{Cos}\phi_g} \quad (\text{KVA}) \quad (26)$$

Keterangan :  $P_{\text{loss}}$  = Rugi daya pada saluran

$I_g$  = Arus

$P_g$  = Daya aktif generator (kW)

$S_g$  = Daya output generator (KVA)

$V_g$  = Tegangan

R = Tahanan (Ohm)

Cos  $\theta$  = Faktor daya (0,8)

Z = Impedansi penghantar saluran ( $\Omega/\text{km}$ )

L = Panjang saluran (m)

## 6. Formulasi *Output Daya Total Dua Powerhouse* Terintegrasi

Daya total dari dua *powerhouse* pembangkit listrik tenaga Mini-hydro yang terintegrasi dapat diformulasikan fungsi sebagai berikut :

$$P_{\max} = \sum_{i=2}^n P_{\text{tot}} \quad (27)$$

$$P_{\text{tot}} = (P1 + P2) \quad (28)$$

$$P_{\max} \geq P_{\text{load}} \quad (29)$$

### E3. Tahapan Ketiga *Skoring* Parameter Oleh ACO

Tahapan ini adalah tahapan *skoring* yakni dengan memberikan nilai pembobotan terhadap hasil analisa parameter yang menjadi variable dalam penentuan lokasi optimal penempatan *powerhouse* kedua. Metode ini diperlukan sebagai langkah awal dan mendasar dalam penggunaan metode ACO, sehingga menghasilkan *output* yang maksimal dengan waktu yang cepat. Hal ini juga akan mendukung proses kinerja optimasi ACO yang mudah dan efektif. Nilai *skoring* diberikan didasarkan pada kondisi objektik di lapangan.

#### 1. Penentuan skor potensi head

Penentuan nilai skor untuk *head* potensial, didasarkan pada kondisi objektif lapangan. Kategorisasi yang digunakan adalah sangat baik, baik, cukup, sedang, kurang dengan nilai rating berdasarkan rentang penentuan nilai *head* maksimum ( $H_{\max}$ ) dan head minimum ( $h_{\min}$ ). Penentuan nilai  $H_{\max} = > 50$  m, berdasar pada nilai head *powerhouse* pertama sebesar 70,2 m, diasumsikan bahwa ketika nilai head  $> 50$  m,

maka *output* daya listrik *powerhouse* kedua akan sama atau lebih besar dari *output* daya listrik *powerhouse* pertama. Sedangkan untuk nilai *head* minimum < 16 didasarkan pada analisis bahwa ketika *head* < 16 m, akan menghasilkan *output* daya listrik lebih kecil, dan tidak optimal untuk dilakukan pembangunan *powerhouse* kedua. Berikut adalah Tabel skor untuk parameter *head* potensial yang digunakan dalam perhitungan :

Tabel 3.1 Nilai skor potensi head

Kategori	Range	Skor
<b>Sangat baik</b>	> 50 m	5
<b>Baik</b>	46- 50 m	4
<b>Cukup</b>	36 – 45 m	3
<b>Sedang</b>	26 – 35 m	2
<b>Kurang</b>	16 – 25 m	1

## 2. Penentuan skor untuk jarak ke *powerhouse* utama

Jarak setiap titik skenario head menuju *powerhouse* pertama, merupakan salah satu parameter penting yang menjadi pertimbangan dalam penempatan *powerhouse* kedua. Kedekatan dengan *powerhouse* utama akan mempermudah dalam koordinasi manajemen operasi antar *powerhouse*. Faktor yang lain adalah faktor ekonomis, dimana semakin dekat jarak antar *powerhouse*, akan semakin baik, karena akan mengurangi biaya operasional, khususnya material seperti pipa *penstock*.

Penentuan kategori dan rentang, serta nilai skor untuk parameter ini dengan nilai < 500 m, didasarkan pada kondisi medan secara objektif dilokasi, sehingga nilai ini dianggap sangat layak dengan pertimbangan kedekatan dengan *powerhouse* utama. Terkait hal ini peneliti tidak

menemukan referensi atau rujukan untuk konteks parameter ini, dikarenakan penelitian ini, adalah penelitian yang baru, sehingga peneliti mencoba mengambil nilai rentang jarak terdekat dengan melihat kondisi objektif lokasi penelitian. Namun peneliti tetap berdasar pada prinsip dasar teori bahwa semakin dekat jarak penempatan *powerhouse* maka kondisinya semakin layak dan baik, sehingga nilai skornya juga akan lebih tinggi.

Tabel 3.2 Nilai *skoring* Jarak dari *powerhouse*

Kategori	Range	Skor
<b>Sangat Dekat</b>	< 500 m	5
<b>Cukup Dekat</b>	1000 - 500 m	4
<b>Dekat</b>	1500 - 1000 m	3
<b>Jauh</b>	2000 - 1500 m	2
<b>Sangat jauh</b>	> 2000 m	1

### 3. Penentuan skor jarak ke pusat beban / jaringan PLN

Jarak suatu pembangkit dengan jaringan PLN merupakan salah satu parameter penting dalam perencanaan suatu pembangkit listrik. Jarak pembangkit dengan jaringan PLN yang sangat jauh akan menyebabkan terjadinya rugi daya yang besar pula, karena akan banyak tegangan listrik (*drop voltage*) yang hilang, ini diakibatkan karena kabel penghantar memiliki hambatan atau tahanan. Ketika jarak penghantar terlalu jauh dari pembangkit, maka nilai hambatan kawat penghantar akan mengurangi tegangan yang mengalir pada kabel penghantar tersebut [7].

Dalam tinjauan ekonomis, ketika jarak pembangkit sangat jauh dari jaringan PLN, maka akan berdampak pada besarnya biaya material yang harus dikeluarkan dalam penyambungan jaringan, seperti biaya pembelian material kabel, dan peralatan lain yang digunakan dalam menstabilkan

tegangan untuk memperbaiki faktor daya akibat rugi-rugi daya yang terlalu besar.

Berdasarkan pertimbangan di atas, maka parameter jarak rencana *powerhouse* kedua ke jaringan PLN, dimasukkan sebagai parameter dalam pemilihan lokasi yang optimal. Standar lokasi optimal terkait jarak dengan lokasi jaringan PLN adalah semakin dekat suatu pembangkit dengan jaringan PLN, maka akan semakin baik, karena nilai rugi-rugi daya rendah dan akan berdampak pula pada rendahnya biaya operasional material fisik untuk pembangunan jaringan.

Dari standar di atas maka dari itu rating penilaian akses pembangkit menuju jaringan PLN diplot berada pada jarak minimum < 500 meter dan jarak maksimum > 2000 meter. Semakin dekat jarak dengan jaringan PLN, maka semakin besar nilai skor yang di berikan pada lokasi tersebut [8].

Tabel 3.3 Nilai skoring Jarak ke jaringa PLN

Kategori	Range	Skor
<b>Sangat Dekat</b>	< 500 m	5
<b>Cukup Dekat</b>	500 - 1000 m	4
<b>Dekat</b>	1000 - 1500 m	3
<b>Jauh</b>	1600 - 2000 m	2
<b>Sangat jauh</b>	> 2000 m	1

#### 4. Penentuan skor kondisi hutan

Kawasan lahan/penggunaan lahan menjadi faktor penting yang harus diperhatikan sebagai konsekuensi keberadaan PLTM. Di mana terdapat beberapa jenis kawasan hutan/penggunaan lahan, diantaranya; kawasan arahan penggunaan lain, hutan lindung, hutan produksi, hutan

produksi terbatas, taman buru. Berikut ini penjelasan terkait penggunaan lahan tersebut.

**a. Kawasan arahan penggunaan lain**

Kawasan arahan penggunaan lain merupakan penggunaan lahan dengan mempertimbangkan potensi lahan dan fungsi utamanya.

**b. Kawasan hutan lindung**

Kawasan hutan lindung merupakan kawasan hutan yang memiliki sifat khas yang mampu melindungi kepada kawasan sekitar maupun bawahannya sebagai pegatur tata air, pencegah banjir, dan erosi, serta memelihara kesuburan tanah [16].

**c. Kawasan hutan produksi**

Hutan produksi merupakan kawasan hutan yang memiliki kegunaan memproduksi hasil hutan untuk memenuhi kebutuhan atau keinginan masyarakat. Misalnya, pembangunan, industri dan ekspor [16].

**d. Kawasan hutan produksi terbatas**

Hutan produksi terbatas merupakan hutan yang hanya dapat dieksploitasi dengan cara tebang pilih. Hutan produksi terbatas merupakan hutan yang dialokasikan untuk produksi kayu dengan intensitas rendah. Hutan produksi terbatas ini umumnya berada di wilayah pegunungan di mana lereng - lereng yang curam mempersulit kegiatan pembalakan. Dengan melihat hal ini membuat potensi untuk pembangunan pembangkit listrik tenaga angin tidak layak disebabkan pada kawasan hutan produksi yang terbatas dengan kemiringan lereng

yang tinggi dapat membuat akses untuk proses pembangunan menjadi lebih sulit.

**e. Kawasan Taman Buru**

Taman buru adalah kawasan hutan konservasi yang bisa dimanfaatkan untuk mengakomodir wisata berburu. Pengertian taman buru dalam Undang-Undang No.41 Tahun 1999 Tentang Kehutanan adalah, kawasan hutan yang ditetapkan sebagai tempat wisata berburu. Taman buru termasuk dalam kawasan hutan konservasi, yaitu kawasan hutan yang berfungsi untuk mengawetkan keanekaragaman tumbuhan dan satwa serta ekosistemnya. Segala pemanfaatan dan aktivitas yang dilakukan di dalamnya harus mengikuti ketentuan konservasi. Dengan adanya kawasan taman buru maka potensi untuk pembangunan pembangkit listrik tenaga angin sangat tidak cocok karena dapat mengganggu ekosistem satwa hewan liar yang dilindungi oleh pemerintah setempat.

Tabel 3.4 Nilai *skoring* Kondisi hutan

<b>Kategori</b>	<b>Range</b>	<b>Skor</b>
<b>Sangat Baik</b>	Arahan penggunaan lain	5
<b>Baik</b>	Hutan produksi	4
<b>Cukup</b>	Produksi terbatas	3
<b>Tidak Baik</b>	Kawasan taman buru	2
<b>Buruk</b>	Hutan lindung	1

*Sumber : Hardjowigeno (1993)*

**5. Penentuan skor aksestabilitas jalan raya**

Aksestabilitas jalan raya adalah salah satu parameter yang mempengaruhi kelayakan optimal dari PLTM. Kondisi jarak akses yang

dekat akan berpengaruh pada proses pembangunan pembangkit, distribusi material konstruksi, serta pada pemeliharaan pembangkit kedepannya. Semua aspek tersebut tentunya berpengaruh juga pada besarnya biaya pembangkitan yang akan dikeluarkan, semakin dekat dengan akses jalan raya, maka biaya operasional bisa dikurangi.

Berdasarkan alasan di atas, maka standar kelayakan akses jalan raya merupakan hal yang sangat penting dalam desain perancangan pembangkit PLTM. Berikut adalah standar umum berdasarkan referensi/jurnal terkait :

Tabel 3.5 Nilai *skoring* Akseptabilitas jalan raya

<b>Kategori</b>	<b>Range</b>	<b>Skor</b>
<b>Sangat Dekat</b>	< 500 m	5
<b>Cukup Dekat</b>	600 - 500 m	4
<b>Dekat</b>	700 - 599 m	3
<b>Jauh</b>	800 - 699 m	2
<b>Sangat jauh</b>	>800 m	1

Sumber : BBSDLP (2009)

## 6. Penentuan skor kemiringan lereng

Lereng merupakan sudut kemiringan tertentu dengan bidang horizontal yang dibentuk oleh permukaan bumi. Secara bentuk lereng dapat dibentuk menjadi dua kategori, yaitu lereng buatan, dan lereng alamiah. Lereng buatan yang dibuat oleh manusia antara lain dalam bentuk galian dan timbunan untuk jalan raya dan jalan kereta api, bendungan, tanggul sungai, tanggul penahan air, tebing kanal dan saluran air lainnya, serta galian sementara. Untuk lereng alamiah yaitu lereng yang terbentuk

secara alami yang ditimbulkan oleh adanya reaksi alam, seperti pada bukit, atau tebing sungai [17]

Dalam setiap kasus tanah yang tidak datar akan menghasilkan komponen gravitasi dari berat yang cenderung menggerakkan massa tanah dari elevasi yang lebih tinggi ke elevasi yang lebih rendah. Rembesan dapat menjadi pertimbangan yang penting dalam Bergeraknya tanah apabila terdapat air. gaya-gaya gempa juga akan menjadi faktor penting dalam analisis stabilitas .

Beberapa gaya ini akan menghasilkan tegangan geser pada seluruh massa tanah, dan suatu gerakan akan terjadi ketika struktur tanah tidak stabil. Beberapa akibat yang akan ditimbulkan adalah terjadinya longsor, adanya retakan tanah pada daerah kelerengan, sehingga akan mempengaruhi kondisi bangunan, serta akan berpengaruh pada pembawaan konstruksi material ke lokasi hingga pemeliharaan pembangkitnya.

Berdasarkan beberapa hal tersebut di atas, maka standar penempatan lokasi pembangunan *powerhouse* perlu memperhatikan derajat kemiringan lereng. Semakin kecil derajat kemiringan lereng, maka akan semakin baik daerah lokasi pembangunan *powerhouse*, dan sebaliknya semakin besar derajat kemiringan lereng, maka akan semakin kurang baik lokasi tersebut untuk penempatan pembangunan *powerhouse*. Berdasarkan standar tersebut, kemiringan lereng diberikan pembobotan skor, untuk melihat kelayakan posisi penempatan *powerhouse*.

Melihat hal ini, maka standar pada potensi untuk pembangunan PLTM yaitu semakin kecil derajat pada kemiringan lereng di lokasi nantinya membuat semakin mudah dalam proses pembawaan material konstruksi maupun pemeliharaan pada PLTM tersebut. Begitupun sebaliknya, ketika semakin besar tingkat derajat lereng tersebut semakin susah dalam proses pembangunan pembangkit listrik. Tabel 3.6 menunjukkan tingkat kemiringan lereng dan kelasnya untuk potensi pembangunan.

Tabel 3.6 Skor kemiringan tanah

No	Kriteria	Rating kemiringan ( $^{\circ}$ )	Skor
1	Sangat baik	0-8	5
2	Baik	9-16	4
3	Cukup	17-25	3
4	Buruk	26-40	2
5	Sangat buruk	>40	1

Sumber : BBSDLP (2009)

## 7. Penentuan skor tekstur tanah

Tekstur tanah merupakan bagian dari porsi pasir, liat, dan debu. Tekstur tanah akan menentukan kemudahan pengolahan, menentukan penataan air, penataan udara, dan termasuk penentuan pada struktur tanah. Sifat tanah mengandung tiga unsur yaitu unsure fisika, kimia, dan mineralogi, dimana seluruhnya sangat tergantung pada unsur partikelnya [8][9]. Semakin kecil ukuran partikel maka luas penampangnya akan semakin besar. Oleh karena itu maka luas permukaan fraksi liat > fraksi debu > fraksi pasir. Tanah bertekstur sama misal geluh berdebu mempunyai sifat fisika dan kimia yang hampir sama dengan syarat mineralogi liat. Tekstur tanah partikel ukuran lebih dari 2 mm, bahan

organik dan agen perekat seperti kalsium karbonat harus dihilangkan sebelum menentukan tekstur. Tekstur tanah ditentukan di lapangan dengan cara melihat gejala konsistensi dan rasa perabaan menurut bagian alir dan di laboratorium dengan metode pipet atau metode hydrometer [9].

Tanah-tanah yang mengandung lempung dalam jumlah tinggi dapat tersuspensi oleh butiran hujan yang menyimpannya, dan pori-pori tanah permukaan akan tersumbat oleh butir-butir halus lempung tersebut. Hal ini menyebabkan terjadinya aliran permukaan dan potensi tanah longsor semakin besar. Apabila tanah tersebut padat dan tidak mudah terdispersi, infiltrasi masih besar, sehingga aliran permukaan dan potensi tanah longsor tidak besar.

Dari Gambaran terkait tekstur tanah di atas, maka untuk penentuan lokasi optimal pembangunan *powerhouse* kedua PLTM, berdasarkan standar tekstur tanah yang baik, untuk menghindari resiko terjadinya bencana, seperti longsor, dan genangan air. Pengangkutan material pembangunan pembangkit, akan sangat dipengaruhi juga oleh tekstur tanah dilokasi pembangkitan. Ketika tekstur tanah baik, maka akan berdampak pada berkurangnya biaya yang akan dikeluarkan, dan sebaliknya tekstur tanah yang tidak baik akan berdampak pada besarnya pengeluaran biaya untuk proses pengangkutan material, akibat adanya resiko tanah becek, dan tergenang air. Berikut adalah Tabel klasifikasi dan skor dari setiap tekstur tanah.

Tabel 3.7 Nilai *skoring* tekstur tanah [10]

Kategori	Tekstur Tanah	Skor
Sangat Layak	Clay (liat)	5
Layak	Silt (debu)	3
Tidak Layak	Sand (pasir)	1

Sumber : BBSDLP (2009)

## 8. Penentuan skor untul rugi-rugi daya

Parameter rugi-rugi daya adalah parameter yang berkaitan langsung dengan *output* energi listrik dari *powerhouse* menuju pusat beban. Rugi-rugi daya dipengaruhi oleh jarak lokasi antar pembangkit dengan pusat beban. Semakin jauh jarak pembangkit menuju pusat beban maka rugi-rugi daya akan semakin tinggi, dan begitupun sebaliknya. Terjadinya rugi-rugi daya diakibatkan adanya jatuh tegangan pada kawat penghantar, sehingga berefek pada menurunnya daya listrik yang sampai ke pusat beban.

Olehnya itu sangat perlu mempertimbangkan parameter rugi-rugi daya, sebagai bagian dari mengurangi resiko kerugian, baik pada kerugian daya, maupun pada kerugian biaya yang harus dikeluarkan, untuk memperbaiki faktor daya listrik akibat, besarnya nilai rugi-rugi daya. Penentuan skor nilai rugi-rugi daya pada penelitian ini merujuk kepada batas toleransi nilai rugi-rugi daya yang menjadi standar umum, dalam perencanaan pembangkit listrik tenaga *mini-hydro*. Berikut adalah Tabel skor nilai rugi-rugi daya :

Tabel 3.8 Nilai *skoring* untuk rugi-rugi daya

Kategori	Range	Skor
Sangat rendah	< 20 kW	5
Rendah	30– 20 kW	4

<b>Cukup</b>	40 - 31 kW	3
<b>Tinggi</b>	50 - 41 kW	2
<b>Sangat tinggi</b>	>50 kW	1

#### E.4 Pencarian letak optimal untuk penempatan *powerhouse* kedua dengan algoritma ACO

Tahap terakhir dalam analisis ACO adalah tahapan simulasi pencarian lokasi terbaik. Dalam penentuan tetapan nilai ACO, di transformasikan dari fungsi objektif daya PLTM sebagai berikut :

$$P_{gi} = g \cdot H \cdot Q_{out} \cdot \eta \quad (30)$$

Formulasi di atas fungsi **H** akan menjadi parameter jumlah titik yang akan dikunjungi oleh semut. Tetapan jumlah semut **m** didasarkan pada jumlah parameter yang menjadi dasar penentuan lokasi terbaik. Adapun yang menjadi batasan (constrain) dari fungsi ini adalah debit air (Q) dimana  $Q2 \leq Q1$ .

Setiap semut akan menghasilkan *pheramon* (**p**), *pheramon* ini berdasar pada nilai skor pada setiap parameter yang telah ditetapkan, sehingga semut akan membangun matriks sebagai berikut :

$$\text{Head potensial} = [K1, K2, K3, K4, K5, k6, K7, K8, K9, k10] \quad (31)$$

$$\text{Rugi-rugi daya} = [K1, K2, K3, K4, K5, k6, K7, K8, K9, k10] \quad (32)$$

$$\text{Jarak ke powerhouse 1} = [K1, K2, K3, K4, K5, k6, K7, K8, K9, k10] \quad (33)$$

$$\text{Jarak ke jaringan PLN} = [K1, K2, K3, K4, K5, k6, K7, K8, K9, k10] \quad (34)$$

$$\text{Jarak ke jalan raya} = [K1, K2, K3, K4, K5, k6, K7, K8, K9, k10] \quad (35)$$

$$\text{Kemiringan lereng} = [K1, K2, K3, K4, K5, k6, K7, K8, K9, k10] \quad (36)$$

$$\text{Tekstur tanah} = [K1, K2, K3, K4, K5, k6, K7, K8, K9, k10] \quad (37)$$

$$\text{Kondisi hutan} = [K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7, K8, K9, K10] \quad (38)$$

Ketika semut meninggalkan jejak, maka semut memberikan nilai skor dari setiap jejak (pheramon) yang telah dilaluinya. Dalam prosesnya *pheramon* dengan skor yang rendah akan mengalami penguapan, sehingga semut akan menyeleksi lokasi terbaik dengan algoritma pencarian lokasi terdekat dengan nilai *probabilitas* (skor) yang tinggi. Berikut adalah tahapan proses algoritma pencarian rute terbaik oleh ACO :

- 1) Inisialisasi harga parameter algoritma yang terdiri dari:
  - a. Jumlah kandidat (n) beserta koordinatnya (x dan y) atau jarak antar kandidat (dij).
  - b. Tetapan siklus Semut (Q).
  - c. Tetapan pengendalian intensitas jejak Semut ( $\alpha$ ), dimana  $\alpha > 0$ .
  - d. Tetapan pengendali visibilitas ( $\beta$ ).
  - e. Jumlah Semut (m).
  - f. Tetapan penguapan jejak Semut ( $\rho$ ), dimana  $0 < \rho < 1$ .
  - g. Jumlah siklus maksimum (NCmaks).
  - h. Intensitas jejak Semut antar ( $\tau_{ij}$ ).
- 2) Mengisi titik pertama ke dalam *tabu list*.
- 3) Penyusunan rute kunjungan setiap semut ke setiap titik yang dilewati.

Untuk menentukan probabilitas titik untuk dikunjungi digunakan rumus berikut :

$$P_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}]^\alpha \cdot [\eta_{il}]^\beta}, \quad \text{if } j \in N_i^k \quad (39)$$

4) Perhitungan intensitas jejak Semut antar titik dengan rumus:

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_g^k \quad (40)$$

Dengan adalah perubahan harga intensitas jejak kaki Semut antar lokasi yang dihitung dengan rumus :

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{LQ}{L_k} & \text{if } (i,j) \in \tau_k \\ 0 & \text{if } (i,j) \notin \tau_k \end{cases} \quad (41)$$

5) Menghitung probabilitas pada tabulist dengan rumus :

$$L_k = \sum P_{ij}^k(t) \quad (42)$$

dan menghitung pheromone dengan rumus :

$$\Delta\tau_{ij}^k = \frac{Q}{L_k} \quad (43)$$

Kemudian tentukan tabulist dengan nilai terbaik yaitu tabulist dengan nilai probabilitas tertinggi :

$$\Delta\tau_{ij}^k = \frac{Q}{L_k} \quad (44)$$

6) Melakukan iterasi. Jika iterasi dilakukan maka lakukan tahap 7 kemudian lakukan perhitungan kembali ke tahap 1 dengan nilai pheromone yang telah diperbaharui. Jika iterasi tidak dilakukan maka lakukan tahap 8.

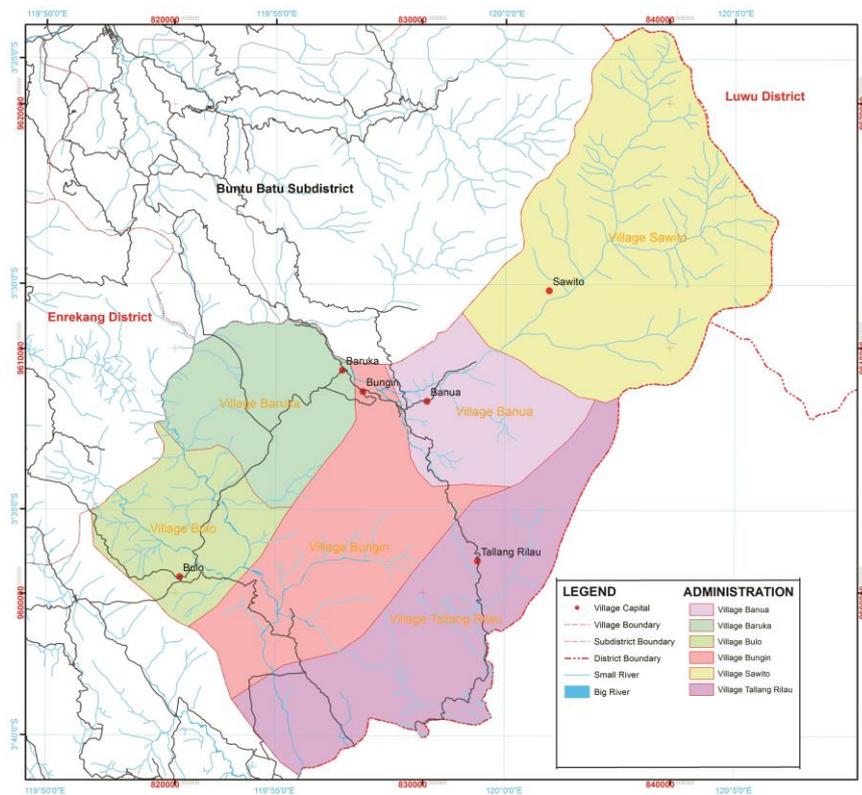
7) *Update pheromone*. Tahap menambahkan *pheromone* untuk perhitungan pada iterasi selanjutnya, dengan rumus :

$$\tau_{ii}(t+n) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (45)$$

8) Menampilkan hasil terbaik berdasarkan hasil tahap ke-5.

## E.5 Tahapan kelima pemetaan rute terbaik dengan GIS

Pemetaan lokasi optimal menggunakan sistem informasi geografis (GIS), untuk mengetahui kepastian letak secara geografis, dan pemetaan terhadap variabel yang berkaitan dengan desain rancangan; serta letak penjaluran pipa *penstock* untuk aliran air buangan turbin pembangkit listrik tenaga *Mini-hydro* dari *powerhouse* pertama ke *powerhouse* kedua. Berikut adalah peta Kecamatan Bungin secara umum, sebagai basis awal penelitian :

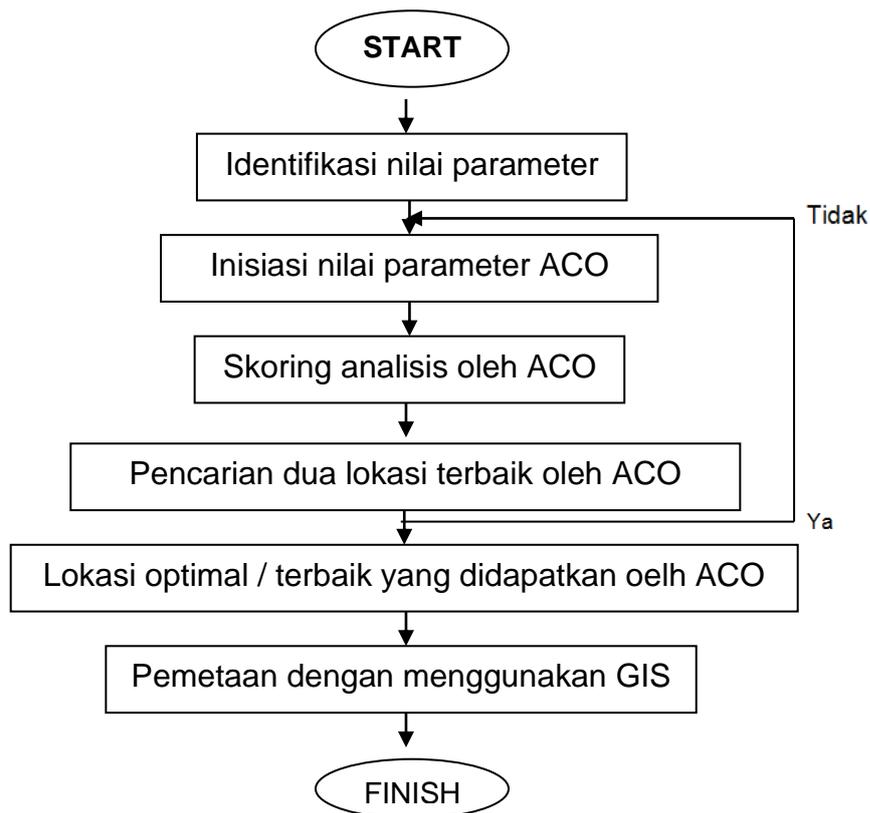


Sumber : BPS Enrekang 2018

Gambar 3.7 Peta Kecamatan Bungin (15)

## E. Desain Rancangan Sistem

Desain perancangan sistem adalah serangkaian tahapan penelitian yang akan dilaksanakan. Data yang akan digunakan adalah data hasil observasi lapangan berupa data kecepatan air ( $v$ ), debit air ( $Q$ ), tinggi jatuhnya air/*head* ( $h$ ), efisiensi generator ( $\eta$ ), dan konstanta ( $k$ ). Untuk menentukan nilai *output* digunakan optimasi *Ant Colony Optimization* (ACO) dengan menggunakan Matlab 2014, sehingga didapatkan hasil optimal. Nilai dari jalur optimal yang didapatkan digunakan untuk desain integrasi PLTM untuk menentukan letak PLTM yang optimal. Berikut adalah bagan desain perancangan sistem :



Gambar 3.8 Desain Rancangan Sistem

## **F. Sumber Data**

Sumber data penelitian ini menggunakan data lapangan (*observation data*), dan data dari kepustakaan seperti jurnal ilmiah (nasional /internasional), artikel, buku terkait dengan penelitian yang dilakukan.

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada penelitian ini, objek observasi melingkupi kebutuhan data yang terkait penelitian, seperti profil lokasi penelitian, profil PLTM Bungin, dan data pengukuran lapangan. Pada bagian ini, memuat analisa dan pembahasan dari data–data yang telah dikumpulkan. Proses analisa dilakukan secara bertahap berdasarkan metode penelitian yang diterapkan.

#### **A. Profil Kecamatan Bungin**

Profil lokasi penelitian menggambarkan keadaan lokasi penelitian secara objektif. Profil tersebut mendeskripsikan gambaran umum wilayah, kondisi topografi, geologi, dan morfologi lokasi, serata kondisi sosial ekonomi masyarakat setempat.

##### **1. Gambaran umum wilayah**

Letak geografis kabupaten Enrekang berada di jantung jazirah Sulawesi yang dalam peta batas wilayah memang bentuknya seperti jantung. Pegunungan Latimojong yang memanjang dari Utara ke Selatan rata-rata ketinggian + 3000 meter di atas permukaan laut, memagari kabupaten Enrekang di sebelah Timur, sedang di sebelah barat membentang sungai Saddang dari utara ke selatan yang pengendalian airnya menentukan pengairan Saddang yang berada dalam wilayah kabupaten Pinrang dengan aliran pengairan sampai ke kabupaten Sidenreng rappang.

Kabupaten Enrekang terletak antara 3<sup>0</sup>14'36" LS 119<sup>0</sup>40'53". Jarak dari ibu kota provinsi Sulawesi Selatan (Makassar) ke kota Enrekang dengan jalan darat sepanjang 235 Km.

Batas-batas daerah kabupaten Enrekang, sebagai berikut ;

1. Sebelah Utara : Kabupaten Tanah Toraja
2. Sebelah Selatan : Kabupaten Sidenreng Rappang
3. Sebelah Barat : Kabupaten Pinrang
4. Sebelah Timur : Kabupaten Luwu dan Sidenreng Rappang.

Luas wilayah Kabupaten ini adalah 1.786,01 km<sup>2</sup> Atau sebesar 2,83 % dari luas wilayah Provinsi Sulawesi Selatan. Wilayah ini terbagi menjadi 12 kecamatan dan secara keseluruhan terbagi lagi dalam satu wilayah yang lebih kecil yaitu terdiri dari 129 wlayah desa/kelurahan. Berikut adalah rincian luas lokasi setiap Kecamatan di Kabupaten Enrekang :

Tabel 4.1 Luas lokasi Kecamatan di Kabupaten Enrekang

No	Kecamatan	Luas Wilayah(Km <sup>2</sup> )
1	Maiwa	393
2	<b>Bungin</b>	<b>236,84</b>
3	Enrekang	291
4	Cendana	91
5	Baraka	159
6	Buntu Batu	127
7	Anggeraja	125
8	Malua	40
9	Alla	35
10	Curio	179
11	Masalle	68
12	Baroko	41

Sumber : BPS Kab.Enrekang (2018)

Untuk Kecamatan Bungin sendiri, secara geografis wilayah Kecamatan Bungin terletak di sebelah Timur ibu kota Kabupaten Enrekang dengan

luas wilayah sebesar 236,84 km<sup>2</sup> dan berjarak ± 65 km dari ibu kota Kabupaten Enrekang dengan ketinggian bervariasi antara 600 m sampai dengan 1.800 meter di atas permukaan laut, hal tersebut merupakan salah satu tantangan tersendiri dalam pelaksanaan tugas pembinaan pemerintahan, perencanaan pembangunan dan pembinaan kemasyarakatan terutama akses menuju desa harus ditempuh melalui medan yang tidak mudah. Kecamatan Bungin berbatasan dengan :

1. Sebelah Utara : Kec. Buntu Batu
2. Sebelah Timur : Kabupaten Luwu
3. Sebelah Selatan : Kabupaten Sidrap
4. Sebelah Barat : Kecamatan Bungin

Kecamatan Bungin memiliki topografi daerah pegunungan dan perbukitan dengan curah hujan yang tinggi dan suhu rata-rata berkisar antara 18<sup>0</sup>C sampai dengan 25<sup>0</sup>C . Kecamatan Bungin memiliki luas areal persawahan dan perladangan yaitu ± 1309.22 ha, sedangkan untuk perkebunan rakyat ± 6.431.28 ha.

Selain itu, kecamatan Bungin memiliki sumber air yang mencukupi, sehingga memiliki potensi pengembangan berbagai macam komoditi pertanian dan perkebunan. Potensi sumber energi terbarukan juga dimanfaatkan untuk menciptakan sumber listrik melalui Pembangkit Listrik *Mini-hydro* (PLTM). Oleh karena jaringan listrik dari PLN belum menjangkau wilayah Kecamatan Bungin sehingga satu-satunya sumber listrik bagi warga adalah PLTM tersebut. Hal inilah yang mendasari

sehingga Kecamatan Bungin disebut sebagai **Kecamatan Mandiri Energi**.

## 2. Data kependudukan

Secara administratif pemerintahan terbagi menjadi 6 desa dan 23 dusun yang kesemuanya berada pada wilayah gugusan pegunungan Latimojong. Adapun keadaan penduduk di Kecamatan Bungin berjumlah 4.464 jiwa dengan 1.046 kepala keluarga yang terdiri dari 2.271 jiwa penduduk laki-laki, dan 2.193 jiwa penduduk perempuan. Karakteristik masyarakatnya merupakan masyarakat yang homogen, dengan mata pencaharian sebagian besar bertani dan bercocok tanam. Profil singkat kecamatan Bungin dapat dilihat pada tabel berikut ;

Tabel 4.2 Profil Singkat Kecamatan Bungin

NO	URAIAN	Keterangan
1.	Luas Wilayah	236.84 Km <sup>2</sup>
2.	Jarak Orbitrasi dari :	
	Ibu Kota Propinsi	298 Km
	Ibu Kota Kabupaten	65 Km
3.	Jumlah Desa / kelurahan	
	Desa	6
	Kelurahan	-
4.	Jumlah Penduduk	
	Laki-laki	2.271 Jiwa
	Perempuan	2.193 Jiwa
	Total	4.464 Jiwa

Sumber : BPS kab.Enrekang,2018

Tabel 4.3 Data Jumlah KK per Desa

No	Nama Desa	Jumlah KK / Desa
1	Desa Bungin	329
2	Desa Sawitto	213
3	Desa Bulu	135
4	Desa Baruka	127
5	Desa Tallang Rilau	114
6	Banua	128
Total		1.046

Sumber : BPS Kabupaten Enrekang, 2018

### 3. Infrastrktur Kecamatan Bungin

Infrastruktur adalah bagian dari kebutuhan masyarakat Kecamatan Bungin, yang fungsi pokoknya adalah mendorong proses kesejahteraan dan proses sosial ekonomi daerah tersebut. Infrastruktur di Kecamatan Bungin 1 yaitu, Kantor Kecamatan yang terletak di Ibu Kota Kecamatan Bungin yang berada di Desa Bungin dan beberapa infrastruktur lainnya yang tersebar di setiap Desa di Kecamatan Bungin. Berikut adalah data infrastruktur yang ada di Kecamatan Bungin :

Tabel 4.4 Data Infrastruktur Kecamatan Bungin di setiap Desa

No	Desa	Infrastruktur					
		SD	SMP	SMA	Masjid	Kantor	Balai
1	Bungin	3	1	1	3	1	1
2	Tallang Rilau	2	2	-	3	1	1
3	Baruka	1	1	-	2	1	1
4	Bulu	1	1	-	1	1	1
5	Banua	2	1	-	2	1	1
6	Sawitto	2	-	-	3	1	1
Total		11	6	1	14	6	6

Sumber : BPS Kabupaten Enrekang, 2018

#### 4. Potensi sumber daya air (DAS)

Kabupaten Enrekang mempunyai banyak potensi sumber daya alam. Potensi-potensi itu terdiri dari berbagai lingkup. Pada bidang energi Kabupaten Enrekang merupakan salah satu kabupaten dengan potensi sumber daya air yang bisa digunakan dalam hal pembangkitan energi kelistrikan, misalnya pada pengembangan PLTA, PLTM, PLTM, dan Pembangkit listrik yang menggunakan air sebagai bahan dasarnya. Alasannya adalah kabupaten Enrekang terdiri dari beberapa aliran sungai yang tingkat ketinggiannya antara 100-1000 meter di atas permukaan laut, dengan panjang rata-rata sungai antara 35-39 Km. Kondisi lokasi geografis Kabupaten Enrekang yang rata-rata terdiri dari pegunungan menambah kelayakan potensi pembangkitan energi air (hydro).

Berikut adalah daftar panjang dan ketinggian sungai dikabupaten Enrekang :

Tabel 4.5 Tabel Ketinggian Sungai

No	Nama Sungai	Kecamatan	Panjang Sungai (km)	Ketinggian (m)
1	Saddang	Maiwa Cendan Maiwa	39,107	100-500
2	Tabang	Bungin Malua	68,609	500-1000
3	Mata Allo	Alla Anggeraja Enrekang	35,211	500-1000
4	Malua	Curio Baroko Malua Baraka	39,366	500-1000

Sumber : BPS Kab.Enrekang (2018)

## B. Profil PLTM Bungin 1

PLTM Bungin 1 berdiri sejak tahun 2016, di Desa Baruka, Kecamatan Bungin, Kabupaten Enrekang, dengan kapasitas daya sebesar 2 x 1,5 MW. Debit air terpasang sebesar 5,5 m<sup>3</sup>/s, dan *head* sebesar 70,9 meter. Profil PLTM Bungin 1 dapat dilihat pada Tabel berikut:

Tabel 4.6 Profil PLTM Bungin 1

No	Parameter	Data
1	Pemilik	PT Haji La Tunrung L & K
2	Kapasitas	2 x 1,5 MW
3	Lokasi	Ds. Baruka Kec. Bungin Kab. Enrekang
4	Panjang Sungai	139,25 Km <sup>2</sup> , Sungai Narran-Bungin
5	Volume Waduk	a. Bak penampungan 12 x 25 x 350 (p x l x t) b. Bak Penenang 14 x 6 x 6 (p x l x t)
6	Debit	- /+ 5,5 m <sup>3</sup> /s
7	Suhu Air	45° C
8	Head	70,9
9	Penstock	a. Material : Steel Pipe b. Diameter : 1800 mm , T. 16 mm c. Length : +/- 1300 m
10	Generator	<i>Manufacture : Toyo Denki Power System</i> <i>T9ype/Jenis : TD 110 / Generator Synchron</i> <i>9c. Rated Power : 1,875 Kva</i>
11	Turbin	a. <i>Type : Horizontal Prancis Hydro Turbine</i> b. <i>Manufacture : Andritz Hydro</i> c. <i>Engine Output : 1500 kW per unit</i> d. <i>Speed : 1000 rpm</i>
12	<i>Control Panel</i>	<i>Manufacture : Sanelex Excitation System</i> <i>Rating/Voltage/Freq : 1500kW/3300kV/50Hz</i>
13	Ketinggian Waduk	611,61 mdpl
14	Ketinggian PH	540,71 mdpl

Sumber : Dokumen PLTM Bungin 1 (2017)

### C. Analisa Beban Kecamatan Bungin

Kebutuhan beban kecamatan Bungin dihitung dengan menggunakan data kependudukan dan infrastruktur kecamatan Bungin dari Badan Pusat Statistik (BPS) kabupaten Enrekang tahun 2018. Kebutuhan listrik dihitung dengan membagi tiga kebutuhan listrik, yakni kebutuhan rumah tangga, penerangan infrastruktur kecamatan, dan penerangan lainnya.

Penerangan listrik lainnya meliputi prediksi kawasan perencanaan industri di Kecamatan bungin. Menurut data pemerintah kecamatan Bungin diprediksi akan dikembangkan beberapa daerah industri diantaranya industri air minum alami di Desa Nating, industri kopi di Desa Bungin, dan penginapan untuk industri pariwisata di tiga desa yaitu Desa Nating, Desa Tallang Rilau, dan Desa Sawitto. Berikut adalah Tabel hasil perhitungan kebutuhan daya listrik masyarakat Kecamatan Bungin :

Tabel 4.7 Kebutuhan listrik rumah tangga kecamatan Bungin

No	Desa	Jumlah KK	Kebutuhan Daya (VA)	Total Daya (VA)
1	Desa Bungin	329	1300	427200
2	Desa Sawitto	213	1300	276900
3	Desa Bulo	135	1300	175500
4	Desa Baruka	127	1300	165100
5	Desa Tallang Rilau	114	1300	148200
6	Banua	128	1300	166400
<b>TOTAL</b>				<b>1359300</b>

Tabel 4.8 Penerangan infrastruktur kecamatan Bungin

No	Infrastruktur	Jumlah unit	Kebutuhan Daya (VA)	Total Daya (VA)
1	Sekolah	17	2200	37400
2	Kantor Desa	6	2200	13200
3	Masjid	14	2200	30800
4	Balai Desa	6	2200	13200
5	Puskesmas	2	2200	4400
6	Kantor Camat	1	2200	2200
7	Lampu Jalan	300	200	60000
<b>TOTAL</b>				<b>148000</b>

Tabel 4.9 Penerangan listrik lainnya

No	Infrastruktur	Jumlah unit	Kebutuhan Daya (VA)	Total Daya (VA)
1	Pabrik industri air	1	20000	20000
2	Pabrik kopi	3	20000	60000
3	Penginapan	4	6600	26400
<b>TOTAL</b>				<b>106400</b>

Tabel 4.10 Total kebutuhan listrik Kecamatan Bungin

No	Kebutuhan listrik	Total Daya (VA)
1	Kebutuhan listrik / KK	1359300
2	Penerangan infrastruktur	148000
3	Penerangan lainnya	106400
<b>TOTAL</b>		<b>1613700</b>

Berdasarkan Tabel di atas terlihat bahwa total kebutuhan daya rumah tangga kecamatan Bungin sebesar 1359300 VA, untuk penerangan infrastruktur sebesar 148000 VA, dan untuk penerangan lainnya sebesar 106400 VA. Total kebutuhan daya kecamatan Bungin adalah 1613700 VA, atau sama dengan 1,3 MW. Kebutuhan daya kecamatan Bungin menjadi dasar dalam perencanaan pembangunan pembangkit listrik

tenaga *mini-hydro*, dimana energi *output* pembangkit listrik tenaga *Mini-hydro* harus lebih besar atau sama dengan kebutuhan daya pada permintaan beban, dalam hal ini kebutuhan daya kecamatan Bungin.

#### D. Analisa Debit Air

Analisa debit air dilakukan dengan menganalisis debit banjir pada sungai Narang, debit *inflow* ( $Q_{in}$ ) *powerhouse* terpasang, dan debit *outflow* (debit air buangan) *powerhouse* terpasang.

##### 1. Analisa debit banjir

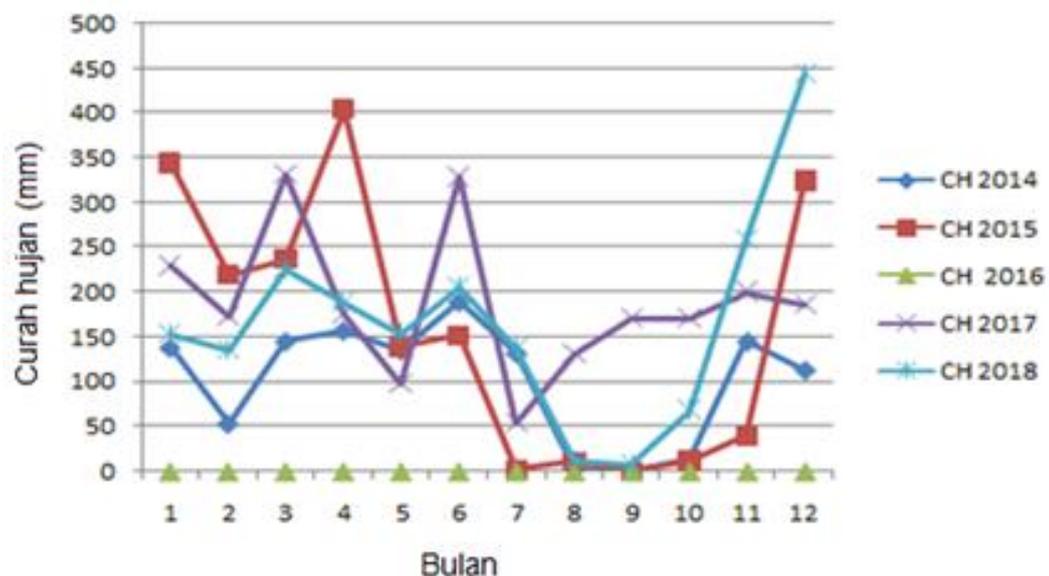
Curah hujan merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi besaran debit air dari DAS yang ada. Untuk curah hujan di daerah aliran sungai Narang, terdapat stasiun pencatatan curah hujan kecamatan Bungin, no. 4001, dari tahun 2014 sampai 2018. Berdasarkan data curah hujan dari pos-pos penakar curah hujan yang berada stasiun Bungin didapatkan hasil perhitungan curah hujan tahunan dan bulanan sebagai berikut :

Tabel 4.11 Curah hujan di sekitar area sungai Tabang

Bulan	Rata-rata Curah Hujan (mm)				
	2014	2015	2016	2017	2018
Januari	138	344	-	229	153
Februari	53	219	-	172	136
Maret	145	237	-	331	226
April	157	404	-	175	188
Mei	135	139	-	97	154
Juni	189	152	-	328	206
Juli	132	2	-	54	138
Agustus	3	10	-	131	12
September	0	0	-	170	8
Oktober	14	12	-	171	68
Nopember	145	39	-	200	259
Desember	113	324	-	186	444

Sumber : (Badan Pusat Statistik Kabupaten Enrekang 2019)

Berdasarkan Tabel di atas, terlihat bahwa curah hujan rata-rata tahun 2014 sebesar 102 mm, mengalami kenaikan pada tahun 2015 sebesar 156,833 mm, dan pada tahun 2016 tidak dilakukan pencatatan. Tahun 2017 curah hujan mengalami kenaikan sebesar 187 mm, dan di tahun 2018 curah hujan rata-rata mengalami penurunan sebesar 166 mm. Perbandingan curah hujan rata-rata setiap tahun digambarkan dalam grafik berikut :



Sumber : (Badan Pusat Statistik Kabupaten Enrekang 2019)

Gambar 4.1 Grafik curah hujan tahunan kecamatan Bungin

Penentuan debit banjir dilakukan dengan menggunakan metode rasional jepang, dalam hal ini besarnya debit banjir merupakan fungsi dari luasnya daerah permukaan DAS, Intensitas curah hujan, keadaan permukaan tanah yang dinyatakan dalam koefisien limpasan dan

kemiringan sungai. Koefisien limpasan dapat diketahui dengan menggunakan Tabel berikut :

Tabel 4.12 Nilai Koefisien Limpasan

No	Kondisi Daerah pengaliran dam sungai	Koefisien Limpasan
1.	Daerah pegunungan yang curam	0,75 – 0,90
2.	Daerah pegunungan tersier	0,70 – 0,80
3.	Tanah bergelombang dan hutan	0,50 – 0,75
4.	Tanah dataran yang ditanami	0,45 – 0,60
5.	Persawahan yang diairi	0,70 – 0,79
6.	Sungai di daerah pegunungan	0,75 – 0,80
7.	Sungai kecil di dataran	0,45 – 0,75
8.	Sungai besar yang lebih dari setengah daerah pengalirannya terdiri dari daratan	0,50 – 0,75

Sumber : Dr. Ir Aprisal , *Prediksi Aliran permukaan DAS (2011)*

Penentuan nilai debit banjir dihitung dalam setiap tahun dengan menggunakan parameter intensitas curah hujan maksimum pada setiap tahunnya. Berikut adalah tabel hasil perhitungan debit banjir ( $Q_b$ ) selama lima tahun terakhir :

Tabel 4.13 Debit banjir maksimum selama lima tahun

No	Tahun	K	A ( $m^2$ )	C 80% . 0,75	I (jam)	$Q_b$ ( $m^3/s$ )
1	2014	0,278	358,5	0,6	0,26	15,54
2	2015	0,278	358,5	0,6	0,56	33,48
3	2016	0,278	358,5	0,6	-	-
4	2017	0,278	358,5	0,6	0,44	26,31
5	2018	0,278	358,5	0,6	0,61	36,47

Tabel di atas memperlihatkan debit banjir terbesar terjadi pada tahun 2018, yaitu 36,47  $m^3/s$  dimana intensitas curah hujan maksimum sebesar 444 mm.

Berdasarkan data curah hujan dari stasiun tersebut, perlu dicatat bahwa stasiun terletak pada lembah dan ditingkat elevasi yang lebih rendah (EL 500-EL 600). Wilayah cukup atau daerah tangkapan air untuk PLT memiliki ketinggian 1100 m EL samapai 3000 m. Oleh karena itu nilai hujan akan lebih besar dan lebat.

## 2. Analisa debit *inflow* ( $Q_{in}$ )

Debit *inflow* adalah debit yang masuk ke pipa penstock menuju *powerhouse*. Pada PLTM Bungin 1 dilakukan pencatatan secara berkala untuk mengetahui debit *inflow* bulanan dalam setiap periode. Berikut adalah data laporan bulanan debit *inflow* PLTM Bungin 1, dalam kurung tiga tahun terakhir, yakni tahun 2016, 2017, dan 2018.

Tabel 4.14 Data histori debit *inflow* PLTM Bungin 1

No	Bulan	Debit inflow ( $Q_{in}$ ) PLTM Bungin 1 ( $m^3/s$ )		
		2016	2017	2018
1	Januari	5,60	5,62	5,53
2	Februari	5,53	5,52	5,51
3	Maret	5,73	5,74	5,68
4	April	5,51	5,46	5,55
5	Mei	5,56	5,37	5,49
6	Juni	5,59	5,70	5,60
7	Juli	5,42	5,33	5,58
8	Agustus	5,30	5,54	5,39
9	September	5,21	5,53	5,37
10	Oktober	5,39	5,54	5,40
11	Nopember	5,57	5,63	5,65
12	Desember	5,69	5,58	5,77

Sumber : Dokumen Laporan PLTM Bungin 1(2018)

Tabel 4.14 memeperlihatkan debit *inflow* pada recevoir PLTM Bungin 1. Setiap bulan debit *inflow* mengalami perubahan, disebabkan pengaruh musim, sehingga volume air pada waduk mengalami kenaikan, yang

berpengaruh terhadap debit air. Tabel di atas memperlihatkan debit *inflow* minimum ( $Q_{\min}$ ) adalah 5,21 m<sup>3</sup>/s, dan debit *inflow* maksimum ( $Q_{\max}$ ) adalah 5,77 m<sup>3</sup>/s.

### 3. Analisa debit *outflow* (debit air buangan) *powerhouse* terpasang ( $Q_{\text{out}}$ )

Penentuan debit *outflow powerhouse* dihitung dengan menggunakan parameter nilai kecepatan air harian, dan luas penampang basah kolam air buangan turbin. Berikut adalah pembahasan dan hasil perhitungan debit air :

#### a. Pengukuran luas penampang basah

Pengukuran dilakukan selama 5 hari, pada tanggal 17 Mei–21 Mei 2019. Besar hasil pengukuran luas penampang basah pada kolam air buangan adalah 3,995 m<sup>2</sup>, dengan panjang saluran 8,5 m, dan lebar (kedalaman air) 46 cm. Kondisi kedalaman air disetiap interval waktu konstan dengan kedalaman 46 cm atau 0,46 m. Penggambaran pengukuran luas penampang basah dapat dilihat melalui Gambar berikut.:



Gambar 4.2 Luas penampang kolam air buangan turbin

## b. Pengukuran kecepatan air

Nilai kecepatan air ditentukan dengan cara melaksanakan pengukuran menggunakan *current meter*, adapun interval waktu pengukuran selama 1 jam disetiap harinya dalam 5 hari, sehingga total jumlah waktu pengukuran adalah 24 jam. Pengukuran dimulai pada pukul 08.00 WITA – 16.00 WITA. Berikut adalah Tabel hasil pengukuran kecepatan air

Tabel 4.15 Hasil pengukuran kecepatan air

No	Hari / Tanggal	Waktu (Jam)	A (m <sup>2</sup> )	V (m/s)
1	17 Mei 2019	08.00-09.00	3,995	1,153
		10.00-11.00	3,995	1,158
		12.00-13.00	3,995	1,149
		12.00-13.00	3,995	1,168
		16.00-17.00	3,995	1,164
2	18 Mei 2019	08.00-09.00	3,995	1,157
		10.00-11.00	3,995	1,142
		12.00-13.00	3,995	1,151
		12.00-13.00	3,995	1,157
		16.00-17.00	3,995	1,154
3	19 Mei 2019	08.00-09.00	3,995	1,149
		10.00-11.00	3,995	1,162
		12.00-13.00	3,995	1,168
		12.00-13.00	3,995	1,148
		16.00-17.00	3,995	1,146
4	21 Mei 2019	08.00-09.00	3,995	1,155
		10.00-11.00	3,995	1,132
		12.00-13.00	3,995	1,156
		12.00-13.00	3,995	1,157
		16.00-17.00	3,995	1,153
5	22 Mei 2019	08.00-09.00	3,995	1,169
		10.00-11.00	3,995	1,144
		12.00-13.00	3,995	1,165
		12.00-13.00	3,995	1,158

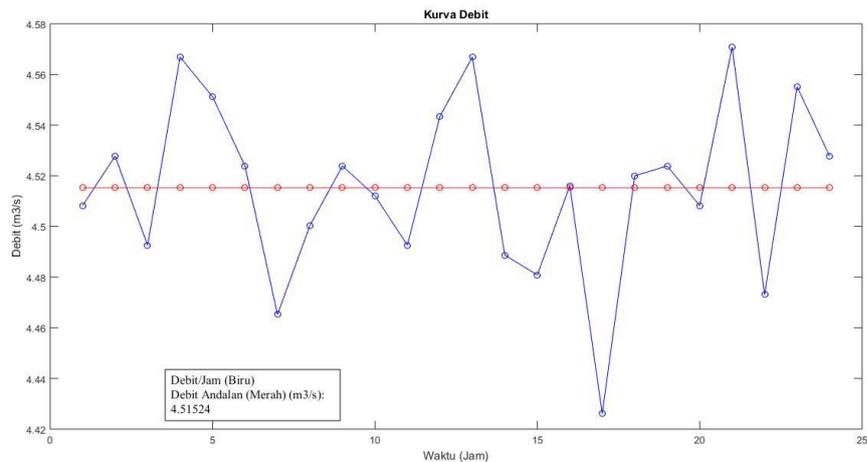
Sumber : Data primer (2019)

**c. Hasil Perhitungan debit *outflow powerhouse* terpasang**

Fungsi objektif penentuan debit air buangan diimplementasikan dalam formulasi ACO. Hasil perhitungan debit air harian dan debit air andalan sebagai berikut :

Tabel 4.16 hasil perhitungan debit air dengan optimasi ACO

No	V m/s	A m <sup>2</sup>	Q
			Q = V. A (m <sup>3</sup> /s)
1	1,153	3,995	4,606
2	1,158	3,995	4,626
3	1,149	3,995	4,590
4	1,168	3,995	4,666
5	1,164	3,995	4,650
6	1,157	3,995	4,622
7	1,142	3,995	4,562
8	1,151	3,995	4,598
9	1,157	3,995	4,622
10	1,154	3,995	4,610
11	1,149	3,995	4,590
12	1,162	3,995	4,642
13	1,168	3,995	4,666
14	1,148	3,995	4,586
15	1,146	3,995	4,578
16	1,155	3,995	4,614
17	1,132	3,995	4,522
18	1,156	3,995	4,618
19	1,157	3,995	4,622
20	1,153	3,995	4,606
21	1,169	3,995	4,670
22	1,144	3,995	4,570
23	1,165	3,995	4,654
24	1,158	3,995	4,626
<b>Debit total ( <math>\sum Q_n = \sum_{i=24}^n Q_n</math> )</b>			<b>110,720</b>
<b>Debit andalan ( <math>Q_a = \frac{\sum Q_n}{\Delta t}</math> )</b>			<b>4,515</b>



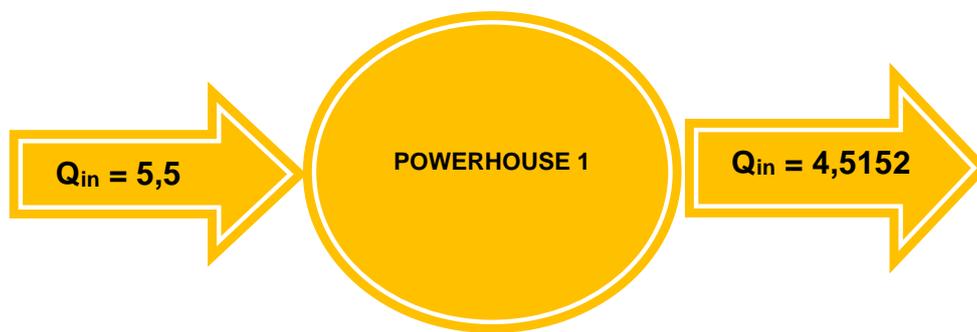
Gambar 4.3 Grafik Hubungan kecepatan air dengan debit air

Berdasarkan Tabel 4.16 dan gambar 4.3 hasil perhitungan, dapat dilihat bahwa debit air terendah sebesar  $4,522 \text{ m}^3/\text{s}$  pada kecepatan air  $1,132 \text{ m/s}$ , sedangkan debit air tertinggi sebesar  $4,670 \text{ m}^3/\text{s}$  pada kecepatan  $1,169 \text{ m/s}$ . Dari pengukuran yang dilakukan sebanyak 24 jam, maka didapat debit rata-rata yang juga disebut sebagai debit andalan ( $Q_a$ ) sebesar  $4,515 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 4. Perbandingan debit inflow dan outflow PLTM Bungin 1

Dari data Profil PLTM Bungin 1, debit andalan *inflow* yang masuk ke *powerhouse* adalah  $5,50 \text{ m}^3/\text{s}$ , dan debit *outflow* (air buangan turbin) hasil perhitungan adalah  $4,5152 \text{ m}^3/\text{s}$ , sehingga selisih antara debit *inflow* dan debit *outflow* tidak terlalu jauh, yaitu sebesar  $0,985 \text{ m}^3/\text{s}$ . Debit air buangan turbin PLTM mengalami pengurangan diindikasikan oleh adanya beberapa faktor yaitu proses tekanan air pada turbin, sehingga air buangan mengalami perlambatan terhadap kecepatan air ( $V$ ), yang

mempengaruhi besar debit air buangan turbin, dan faktor yang kedua adalah adanya proses penguapan air dalam pipa *penstock*, sehingga volume air berkurang, yang berimplikasi terhadap besarnya debit air buangan ( $Q_{out}$ ). Selisih debit *inflow* dan *outflow* ini akan menjadi rujukan dalam proses analisa operasi pembangkit. Perbandingannya dapat dilihat dalam grafik berikut :



Gambar 4.4 Perbandingan debit *inflow* dan *outflow*

### E. Head Potensial

Potensi *head* diukur dengan menggunakan alat ukur *Geographic Position Sistem (GPS)*, bertujuan untuk menentukan titik koordinat lokasi rencana *head*. *Google Eart* dan *GIS* digunakan sebagai aplikasi penunjang dalam melihat posisi topografis titik skenario *head*. Berikut adalah data hasil pengukuran :

Tabel 4.17 Hasil pengukuran elevasi dan *head*

No	LETAK	KORDINAT		ELEVASI HEAD	
		X	Y	Mdpl	M
1	Bendungan	3°31'44.03"S	119°56'30.76"E	614	0
2	PH terpasang	3°31'15.32"S	119°56'06.58"E	543	71
1	H 1	3°30'50.87"S	119°55'31.36"E	519	24
2	H 2	3°30'48.24"S	119°55'13.08"E	505	38

3	H 3	3°30'51.30"S	119°54'54.19"E	500	43
4	H 4	3°30'51.54"S	119°54'35.27"E	499	44
5	H 5	3°30'46.09"S	119°54'16.78"E	507	36
6	H 6	3°30'55.46"S	119°53'59.43"E	486	57
7	H 7	3°31'14.51"S	119°53'40.55"E	501	42
8	H 8	3°31'33.27"S	119°53'22.62"E	490	53
9	H 9	3°31'03.64"S	119°56'01.27"E	481	62
10	H 10	3°30'53.67"S	119°55'45.60"E	476	67

Hasil pengukuran lokasi skenario *head* untuk penempatan *powerhouse* kedua terlihat pada Tabel 4.17. *Head* paling tinggi adalah berada dititik H10 dengan besar *head* adalah 67 m berada di ketinggian 476 mdpl, sedangkan *head* paling rendah berada pada titik H1 yaitu 24 m berada di ketinggian 519 mdpl. Adapun penentuan *head* optimal ( $H_{eff}$ ), akan disimulasikan dengan menggunakan metode ACO.

#### F. Kondisi Geologi dan Aksestabilitas

Jarak aksestabilitas ditentukan melalui perhitungan menggunakan alat *Geographic Position Sistem (GPS)*. Keadaan geologis dan topografis didapatkan melalui hasil observasi langsung, dengan melakukan pencatatan terhadap tekstur tanah, kemiringan lereng, dan kondisi hutan. Hal ini sangat mempengaruhi posisi optimal *powerhouse*, dalam rangka perencanaan suatu pembangkit. Keadaan geologi, topografis, dan aksestabilitas tentunya mempunyai pengaruh dari segi ketahanan dan keadalan bangunan pembangkit, dan biaya. Berikut hasil pencatatan kondisi geologi, topografis, dan aksestabilitas di setiap skenario *head* :

Tabel 4.18 Jarak titik *head* ke *powerhouse* terpasang, jalan raya, dan ke jaringan PLN

No	Head	Jarak ke <i>powerhouse</i> utama	Jarak ke jaringan PLN	Jarak ke jalan raya
1	H 1	583 m	646	534 m
2	H 2	706 m	769	320 m
3	H 3	872 m	935	288 m
4	H 4	1064 m	1127	750 m
5	H 5	1291 m	1354	436 m
6	H 6	1643 m	1706	359 m
7	H 7	1759 m	1822	456 m
8	H 8	1830 m	1893	612 m
9	H 9	1912 m	1979	391 m
10	H 10	1960 m	2023	217 m

Berdasarkan Tabel 4.18 di atas, terlihat bahwa jarak setiap titik skenario *head* ke *powerhouse* utama dan ke pusat beban berbanding lurus, dimana semakin menjauh titik skenario *head*, jaraknya mengalami peningkatan. Jarak ke *powerhouse* berada di jarak 583 m–1960 m, sedangkan jarak ke pusat beban berada di jarak 1783 m–3160 m. Sedangkan untuk aksesibilitas ke pusat jalan raya jaraknya bervariasi. Dalam grafik terlihat skenario H10 mempunyai jarak terdekat dengan akses jalan raya dengan panjang 217 meter, dan jarak terjauh berada di titik skenario H4 dengan panjang 750 m. Jarak setiap skenario *head* ke akses jalan raya berada di jarak 534 m dan 217 m. Adapun penentuan lokasi optimal akan mempertimbangkan jarak terdekat dari *powerhouse* utama, pusat beban, dan akses jalan raya, dengan pertimbangan besaran *head* efektif.

Tabel 4.19 Kondisi Topografis di sekitar titik *head*

No	Head	Tekstur Tanah	Hutan	Kemiringan lereng
1	H 1	Pasir	Arahan penggunaan lain	22 <sup>0</sup>
2	H 2	Pasir	Arahan penggunaan lain	47 <sup>0</sup>
3	H 3	Liat	Arahan penggunaan lain	40 <sup>0</sup>
4	H 4	Liat	Hutan produksi terbatas	37 <sup>0</sup>
5	H 5	Pasir	Hutan produksi terbatas	50 <sup>0</sup>
6	H 6	Liat	Hutan produksi	30 <sup>0</sup>
7	H 7	Liat	Hutan produksi	40 <sup>0</sup>
8	H 8	Debu	Hutan produksi	35 <sup>0</sup>
9	H 9	Debu	Hutan lindung	40 <sup>0</sup>
10	H 10	Debu	Hutan lindung	36 <sup>0</sup>

Kondisi tekstur tanah, kondisi hutan dan kemiringan lereng ditunjukkan dalam Tabel 4.19 di atas. Tekstur tanah secara objektif di lapangan ditemukan kondisi tanah dengan tekstur berpasir berada dititik skenario H1, H2, dan H5. Tekstur tanah berdebu berada dititik skenario H8, H9,dan H10. Sedangkan tekstur tanah liat berada di titik skenario H3, H4, H6, H7. Perbedaan tekstur tanah terjadi karena ada bebarapa titik yang berada disekitar persawahan, perbukitan, dan daerah pegunungan, dimana tekstur tanah dipengaruhi oleh keadaan disekitarnya.

Beberapa titik *head* berada dalam daerah hutan produksi yakni di titik skenario H6, H7, dan H8. Adapun hutan produksi terbatas berada dititik H4, dan H5. Sedangkan lokasi lainnya adalah kondisi hutan arahan lainnya seperti persawahan dan perkebunan berada dititik H1, H2, dan H3. Terakhir, Hutan lindung berada dititik H9, dan H10. Kategorisasi keadaan hutan didasarkan pada data kehutanan yang dapat dilihat dalam *Geographic Information Sistem (Gis)*.

Kemiringan lereng dari setiap skenario titik *head* berada yaitu berada di kemiringan antara 22° – 45°. Kemiringan terendah berada dititik skenario H1 dan tertinggi dititik skerio H5. Kemiringan lereng area lokasi rata-rata masuk dalam kategori curam, dan sangat curam.

### G. Daya Rancangan

Daya listrik sangat bergantung pada jumlah debit air sungai yang digunakan serta tinggi jatuh air yang didapatkan. *Output* daya dikelompokkan menjadi tiga, yaitu daya hidrolis, daya efisiensi turbin, daya generator. Formulasi fungsi masing daya kemudian dihitung berdasarkan parameter debit air andalan ( $Q_a$ ), *head* potensial ( $h$ ), *konstanta* (9,8), efisiensi turbin ( 95%), dan efisiensi generator (98%). Berikut adalah hasil perhitungan *output* daya :

4.20 Tabel hasil perhitungan daya *output* disetiap titik *head*

No	Head	$P_h$ (KW)	$P_t$ (KW)	$P_g$ (KW)
1	H 1	1061	1008	988
2	H 2	1681	1597	1565
3	H 3	1902	1807	1771
4	H 4	1946	1849	1812
5	H 5	1592	1513	1483
6	H 6	2522	2396	2348
7	H 7	1858	1765	1730
8	H 8	2345	2227	2183
9	H 9	2743	2606	2554
10	H 10	2964	2816	2760

Berdasarkan Tabel 4.20, dapat dijelaskan bahwa untuk masing-masing daya setiap skenario *head* mengalami perbedaan *output* daya. H10 merupakan skenario *head* yang memiliki *output* daya paling tinggi

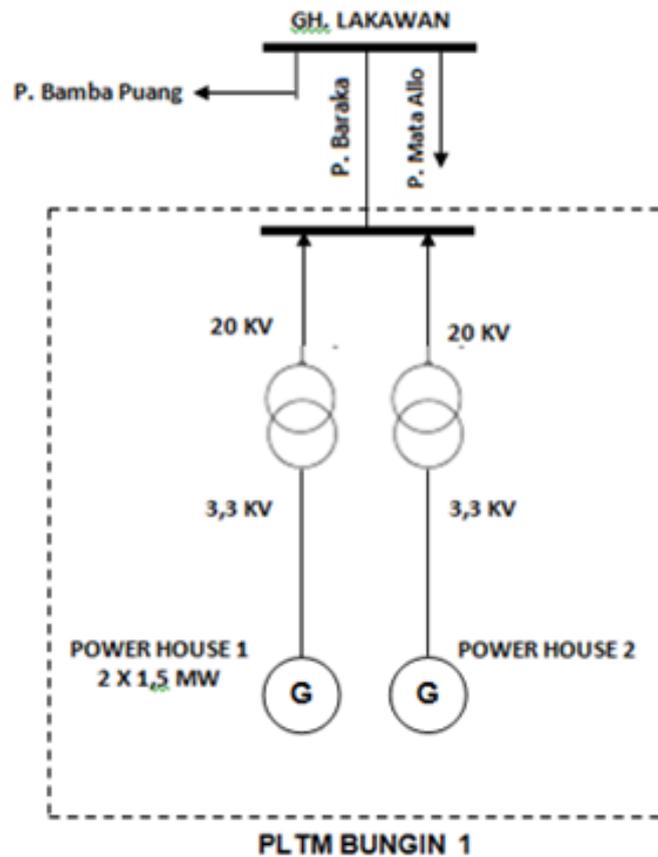
dengan daya hidrolis ( $P_h$ ) sebesar 2964 KW, daya poros turbin ( $P_t$ ) sebesar 2816 KW, dan daya generator ( $P_g$ ) sebesar 2760 KW. Perbedaan *output* daya untuk masing-masing titik skenario dipengaruhi oleh besaran *head*. Semakin tinggi *head* maka *output* daya semakin tinggi.

#### H. Rugi-rugi daya

Rugi daya merupakan salah satu variabel penting dalam desain letak optimal *powerhouse*. Parameter yang mempengaruhi terjadinya rugi daya adalah panjang saluran, dan impedansi jenis saluran penghantar ( $Z$ ). Penyaluran energi listrik PLTM Bungin 1, dilakukan dengan penyambungan interkoneksi pada jaringan tegangan menengah (JTM) PLN terdekat. Kemudian disambung melalui gardu pembangkit tepat di depan pintu gerbang PLTM Bungin 1, dengan jarak dari *powerhouse* utama 62 meter. Pada penyambungan di gardu pembangkit tegangan generator dinaikkan dari 3,3 KV menjadi tegangan 20 KV, dengan menggunakan *trafo step up*. Jalur JTM PLN sebesar 20 KV berada di sepanjang jalur jalan raya yang terbentang di GH Panyulang Baraka, dengan jarak 20 km dengan PLTM Bungin 1. JTM PLN juga telah masuk ke beberapa desa di kecamatan Bungin, diantaranya Desa Baruka, Desa Sawitto, Desa Nating, Desa Tallang Rilau dan Desa Bungin sebagai ibu kota kecamatan Bungin.

Melihat kondisi penyaluran di atas, maka perhitungan rugi-rugi daya untuk setiap titik skenario penempatan *powerhouse* kedua didasarkan pada jarak masing-masing titik skenario dengan jaringan JTM PLN yang

berada di depan pintu gerbang PLTM Bungin 1. Berikut adalah diagram satu garis interkoneksi jaringan PLN dengan PLTM Bungin 1 :



Gambar 4.6 Diagram satu garis skenario penyambungan ke PLN

Perhitungan rugi daya dilakukan dengan terlebih dahulu menentukan jenis generator yang digunakan. Perencanaan jenis generator yang digunakan disesuaikan dengan jenis generator yang digunakan pada *powerhouse* terpasang PLTM Bungin 1, dengan tegangan ( $V_g$ ) sebesar 3,3 KV, dan *power factor* sebesar 0,8. Kapasitas perencanaan daya generator sesuai dengan hasil perhitungan daya rancangan. Untuk perencanaan saluran penghantar digunakan saluran kabel berjenis AAAC

dengan diameter 70 mm<sup>2</sup>, dengan nilai impedansi (Z) sesuai dengan catalog SPLN sebesar 0,4608 Ω/km.

Formulasi fungsi objektif perhitungan rugi daya dapat dilihat pada persamaan (24), (25), dan (26) di Bab III Berikut adalah hasil perhitungan rugi daya pada setiap titik skenario :

Tabel 4.21 Rugi daya disetiap titik skenario

No	Head	$P_g$ (KW)	$S_g$ (KVA)	$V_g$ (KV)	Pf	L (m)	Z Ω/km	I (A)	$P_{loss}$ (KVA)
1	H1	988	1235	3,3	0,8	646	0,4608	216,068	13,90
2	H2	1565	1956.25	3,3	0,8	769	0,4608	342,254	41,51
3	H3	1771	2213.75	3,3	0,8	935	0,4608	387,305	64,63
4	H4	1812	2265	3,3	0,8	1127	0,4608	396,272	81,55
5	H5	1483	1853.75	3,3	0,8	1354	0,4608	324,322	65,63
6	H6	2348	2935	3,3	0,8	1706	0,4608	513,491	207,28
7	H7	1730	2162.5	3,3	0,8	1822	0,4608	378,339	120,18
8	H8	2183	2728.75	3,3	0,8	1893	0,4608	477,407	198,81
9	H9	2554	3192.5	3,3	0,8	1979	0,4608	558,542	284,49
10	H10	2760	3450	3,3	0,8	2023	0,4608	603,593	339,62

Berdasarkan Tabel 4.21, menunjukkan rugi daya berbanding lurus dengan jarak saluran, dan berbanding terbalik dengan besar daya yang tersalurkan. Rugi daya terkecil berada di titik skenario H1 sebesar 13,90 KVA, dan rugi daya terbesar berada dititik skenario *head* H10 dengan nilai 339,62 KVA daya.

#### I. **Output Daya Total Dengan Model Dua *Powerhouse***

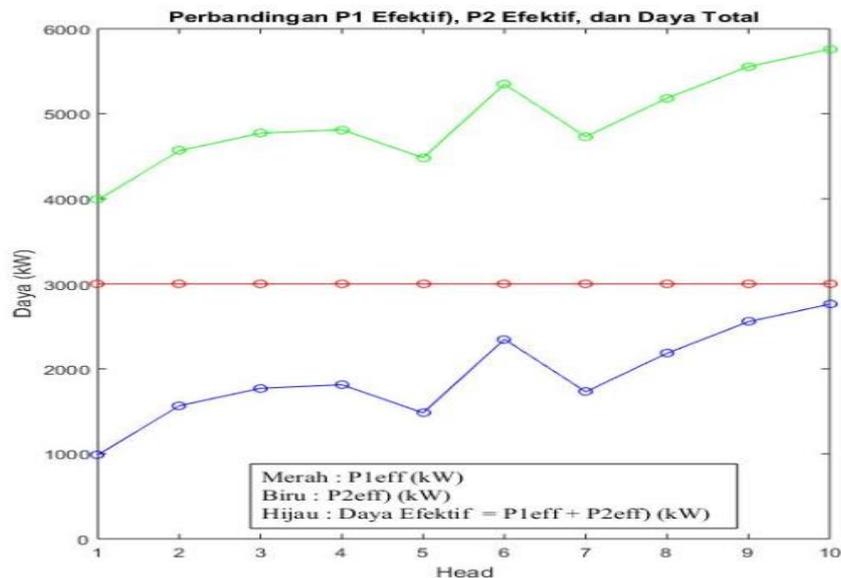
Daya total dengan desain model integrasi *powerhouse* kedua ditentukan dengan jumlah antara *output* daya pada *powerhouse* utama dengan *output* daya pada *powerhouse* kedua. Penentuan daya

*powerhouse* kedua diskenariokan dengan daya *output* pada setiap skenario titik *head*. Berikut adalah Tabel *output* daya total untuk integrasi dua *powerhouse*.

Tabel 4.22. *Output* daya total

No	Skenario Head	Integrasi Dua <i>Powerhouse</i>		Ptot (KW)	Ptot (MW)
		(P1) KW	P2(KW)		
1	H1	3000	988	3988	3,988
2	H2	3000	1565	4565	4,565
3	H3	3000	1771	4771	4,771
4	H4	3000	1812	4812	4,812
5	H5	3000	1483	4483	4,483
6	H6	3000	2348	5348	5,348
7	H7	3000	1730	4730	4,730
8	H8	3000	2183	5183	5,183
9	H9	3000	2554	5554	5,554
10	H10	3000	2760	5760	5,760

Berdasarkan Tabel 4.22 di atas terlihat bahwa daya total efektif ( $P_{tot\text{eff}}$ ) untuk setiap titik skenario *head* berada pada besaran 3988 KW - 5760 KW.

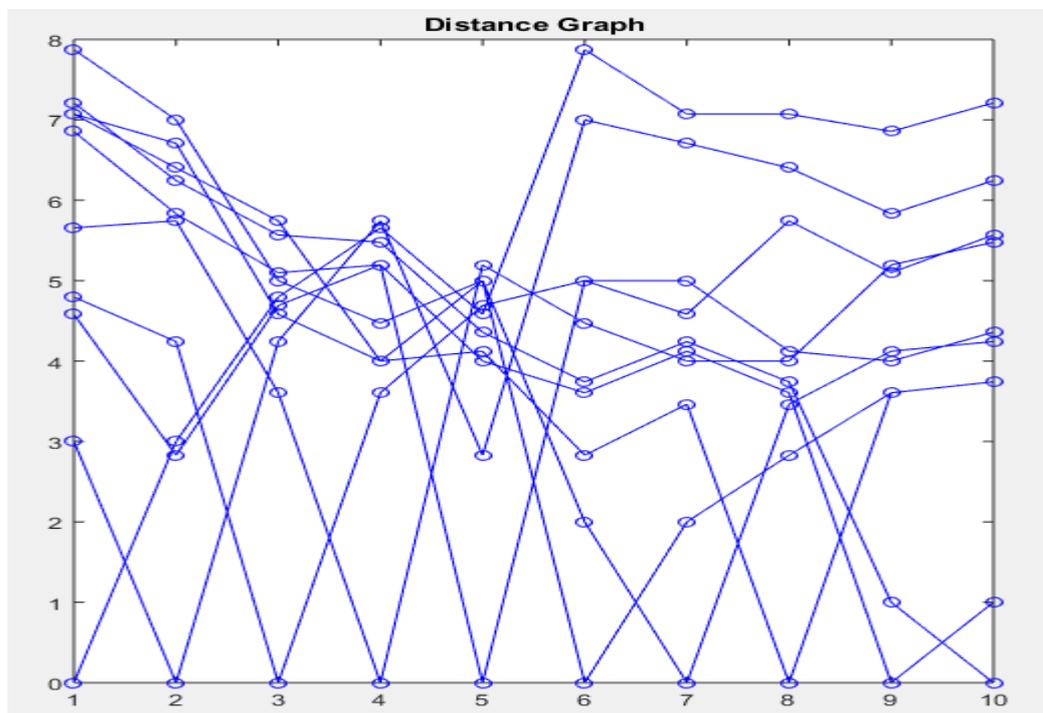


Gambar 4.7 Grafik *output* daya total integrasi *powerhouse*

Terlihat dalam gambar 4.7, perbandingan daya P1, P2, serta *output* daya total efektif  $P_{tot\text{eff}}$ . Nilai daya P2 yang memanfaatkan air buangan menghasilkan daya lebih kecil dari P1. Untuk setiap titik skenario *head* menghasilkan daya yang variatif dengan nilai daya antara 988 KW sampai 2,760 MW. Hasil integrasi *powerhouse* mampu menghasilkan *output* daya listrik lebih tinggi dari pada dengan menggunakan satu *powerhouse*.

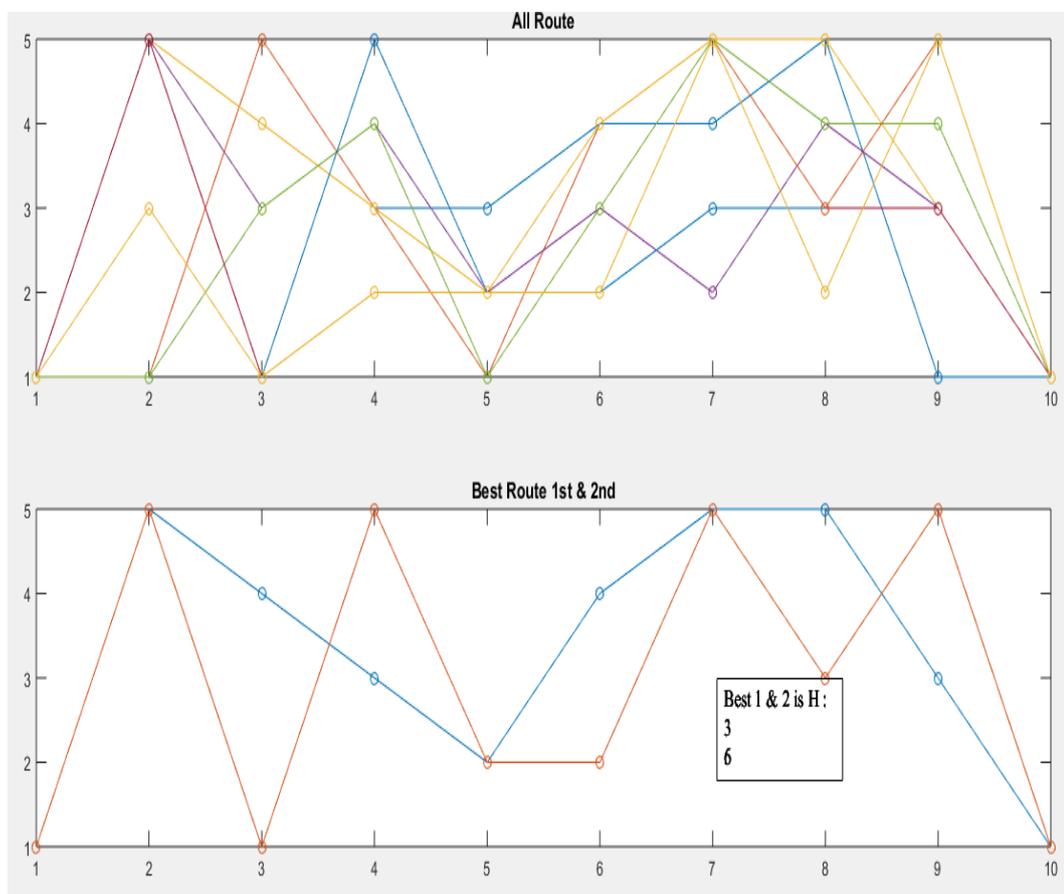
### J. Letak Optimal *Powerhouse*

Penentuan letak optimal *powerhouse* kedua disimulasikan menggunakan metode ACO, yang akan memilih jalur terbaik, dengan algoritma jarak terpendek dan propabilitas tertinggi. Berikut adalah hasil pencarian rute oleh ACO :



Gambar 4.8 *Distance Graph Pheramon*

Gambar 4.8 di atas memperlihatkan *distance graph pheramon* semut dalam pencarian lokasi terbaik. Dalam prosesnya setiap semut meninggalkan *pheramon* (jejak), dan setiap semut saling berinteraksi melalui *pheramon*, dalam prosesnya semut akan menyeleksi *pheramon* terbaik dengan algoritma jarak terpendek dengan propabilitas yang tinggi, yang selanjutnya akan membuat rute dan menentukan titik terbaik. Berikut adalah rute untuk setiap titik terbaik dari delapan semut, dengan 10 titik :



Gambar 4.9 Grafik *all rute* dan *best rute*

Tabel 4.23 Tabulasi nilai skor setiap titik skenario

Parameter	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10
Tekstur tanah	1	1	5	5	1	5	5	3	3	3
Rugi-rugi daya	5	5	4	3	3	1	1	1	1	1
Kondisi hutan	3	3	3	4	4	5	5	5	2	2
Kemiringan	3	1	2	2	1	2	2	2	2	2
Jarak ke PHU	4	4	4	3	3	2	2	2	2	2
Jarak ke JR	4	5	5	2	5	5	5	3	5	5
Jarak ke PLN	5	5	5	4	4	3	3	3	3	2
Head Potensial	1	3	3	3	4	5	3	5	5	5
<b>Total</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>31</b>	<b>26</b>	<b>25</b>	<b>28</b>	<b>26</b>	<b>24</b>	<b>23</b>	<b>22</b>

Dari grafik rute dan Tabel hasil simulasi ACO di atas terlihat *best route* 1 berada pada titik H3 dengan nilai skor 30, dan *best route* 2 berada pada titik H6 dengan nilai skor 28. Berikut adalah profil untuk setiap *best route* untuk H3 dan H6 :

Tabel 4.24 Profil lokasi optimal

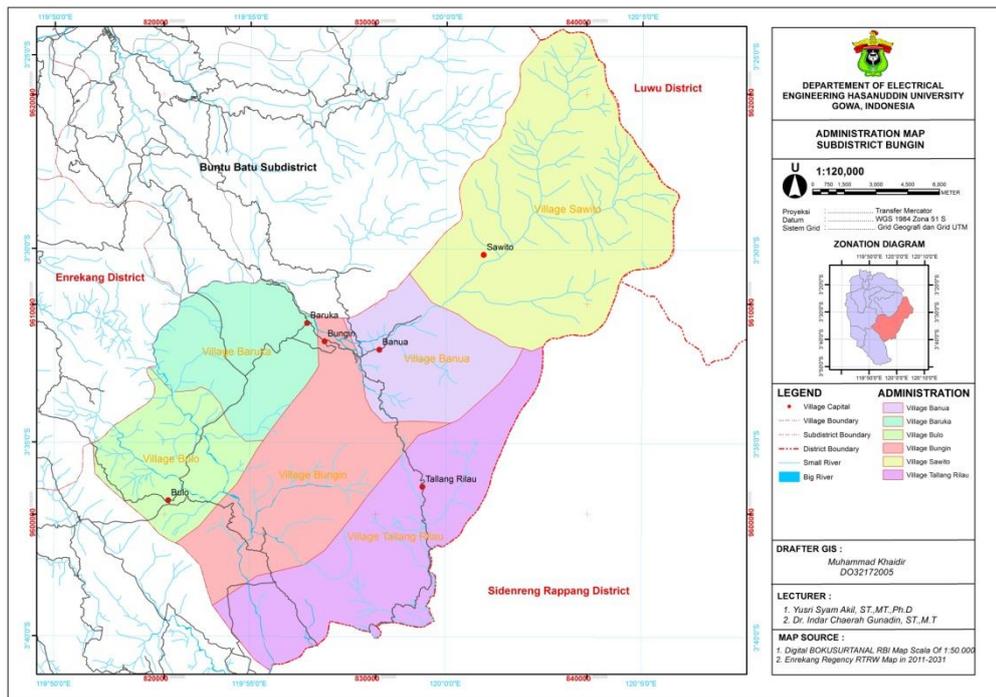
No	Parameter	Letak Optimal	
		Skenario H6	Skenario H3
1	Head	57	43
2	Jarak ke <i>powerhouse</i>	1643 m	872 m
3	Jarak ke jaringan PLN	1706 m	935 m
4	Aksestabilitas jalan raya	359 m	288 m
5	Tekstur tanah	Kering	Kering
6	Kemiringan lereng:	30°	40°
7	Kondisi hutan	Produksi	Arahan Penggunaan L
8	Rugi-rugi daya (KVA)	207.28	64.63
9	P2 (MW)	2,348	1,771
10	Ptot (MW)	5,348	4,771

Terlihat pada Tabel 4.24, untuk titik H3 mempunyai daya efektif sebesar 1,771 MW, dan untuk titik H6 sebesar 2,348 MW. Adapun *output* total dengan model dua *powerhouse* terintegrasi, ketika *powerhouse*

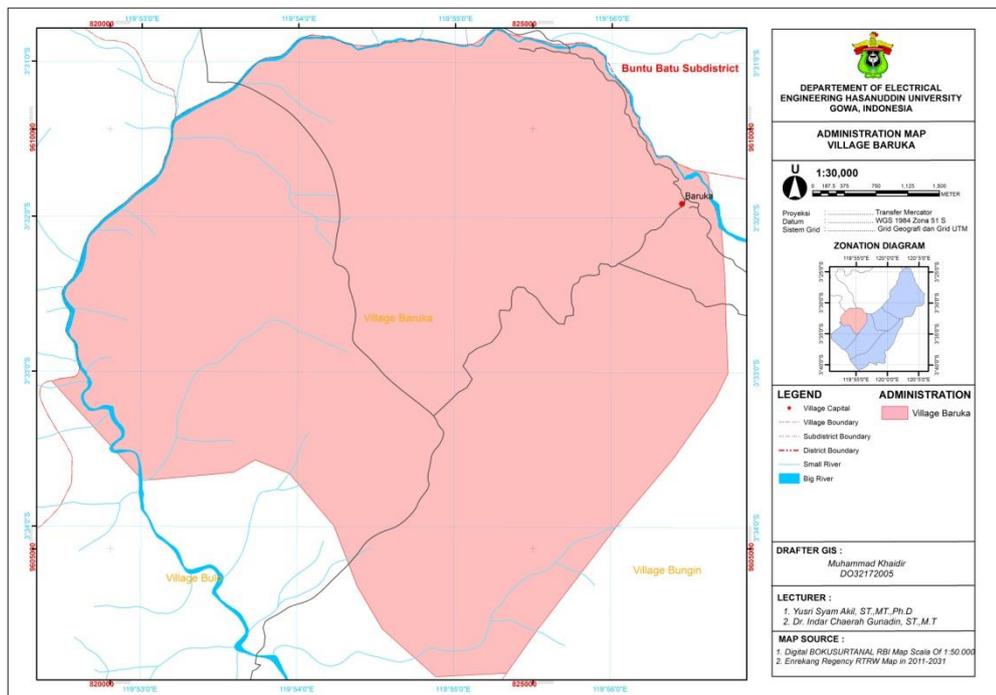
kedua berada di titik H3 sebesar 4,771 MW, dan ketika di titik H6 sebesar 5,348 MW.

### **K. Peta Topografis Letak Optimal Menggunakan GIS**

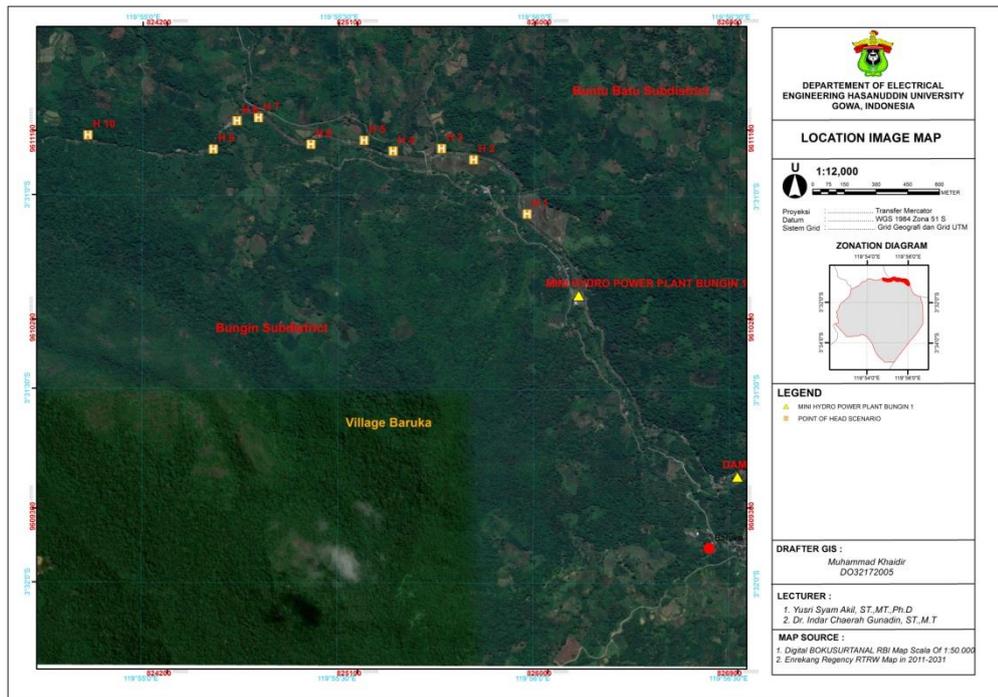
Pemetaan lokasi menggunakan sistem informasi geografik menunjukkan lokasi perencanaan pengembangan pembangkit listrik tenaga *Mini-hydro* Bungin 1, dengan model desain integrasi *powerhouse*. Pemetaan terdiri dari gambar 3 menunjukkan peta Kecamatan Bungin, gambar 4 menunjukkan peta desa Baruka, gambar 5 menunjukkan peta citra satelit lokasi skenario *head*, gambar 6 menunjukkan peta lokasi skenario *head*, gambar 7 menunjukkan peta tekstur tanah, gambar 8 menunjukkan peta kemiringan lereng, gambar 9 menunjukkan peta tutupan lahan, dan gambar 10 menunjukkan peta lokasi optimal penempatan *powerhouse* kedua. Berikut adalah hasil pemetaan dengan menggunakan GIS :



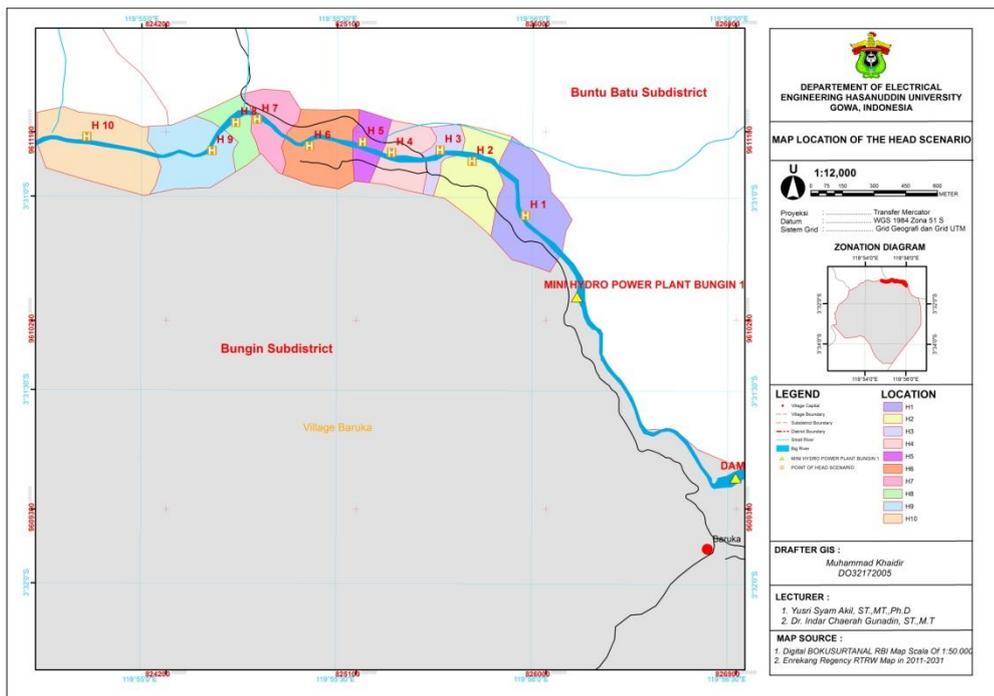
Gambar 4.10 Peta Kecamatan Bungin



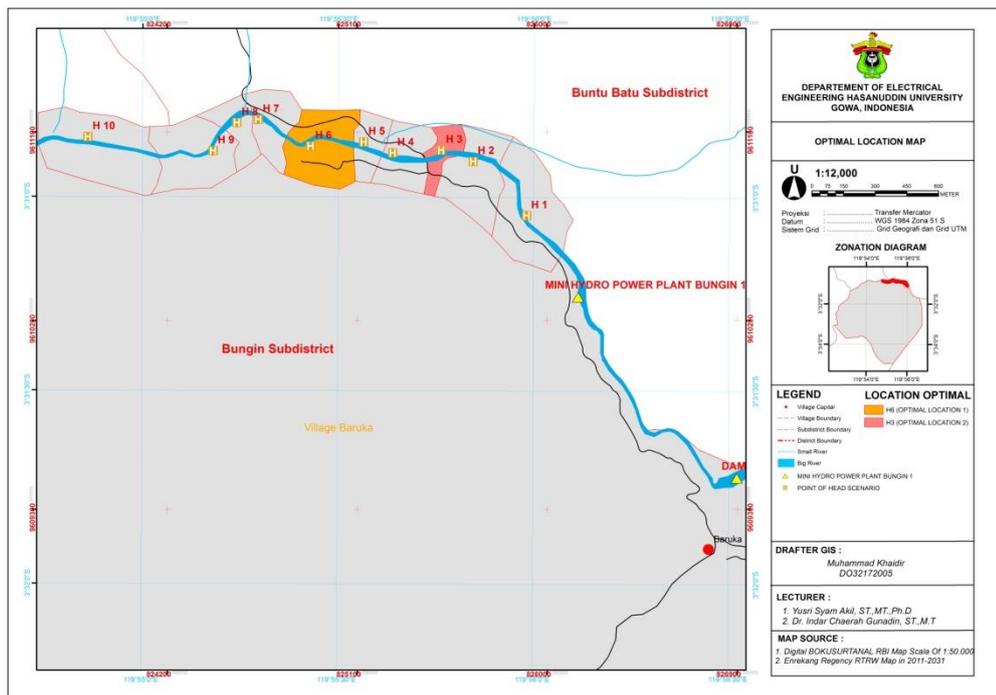
Gambar 4.11 Peta desa Baruka



Gambar 4.12 Lokasi citra lokasi



Gambar 4.13 Lokasi kandidat penempatan powerhouse kedua



Gambar 4.14 Lokasi optimal penempatan *powerhouse* kedua

## BAB V

### PENUTUP

#### A. Kesimpulan

1. Debit air buangan (*outflow*) turbin PLTM Bungin 1 sebesar 4,515 m<sup>3</sup>/s.
2. Letak optimal *powerhouse* kedua berada di titik skenario H3, dengan nilai *head* 43 m, berada pada ketinggian 500 mdpl, di titik koordinat 3°30'50.87"S dan 119°55'31.36"E. Letak optimal ditentukan dengan menggunakan metode ACO..
3. *Output* daya *powerhouse* 1 (P1) adalah 3 MW, dan *output* daya *powerhouse* 2 (P2) adalah 1,771 MW, sehingga *output* daya total (P<sub>tot</sub>) dari dua *powerhouse* adalah 4,771 MW. Nilai ini lebih besar, jika dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga *Mini-hydro* dengan model satu *powerhouse*.

#### B. Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini terdapat beberapa saran yang dapat penulis sampaikan, yaitu:

1. Dalam penerapan PLTM di sungai Tabang agar memperhatikan kondisi sekitar, sehingga tidak merusak ekosistem alam.
2. Dengan adanya ketersediaan energi yang cukup di Sungai Tabang agar pemerintah setempat mempertimbangkan potensi yang dimiliki oleh daerah tersebut.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] ESDM Kementerian, "Panduan Singkat Pengembangan PLTM dan Dutch-German Partnership Energising Development Mini Hydro Power Project – MHPP Indonesia", ESDM, 2016.
- [2] Badan Koordinasi Penanaman Modal, "Buku Panduan Investasi Ketenagalistrikan", Jakarta. 2015.
- [3] Japan International Korporation Asosation, "Panduan Perencanaan Mikro Hydro", 2003.
- [4] ESDM, Kementrian, "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik(RUPTL) (PT. PLN (Persero)", Jakarta, 2015.
- [5] Marsudi, djiteng, "Pembangkitan Energi Listrik", Jakarta: Erlangga, 2005.
- [6] Kundur, Prabaha, "Power System Stability And Control", London: New York Prancisco Washington, 1993.
- [7] Badan Pusat Statistik Kabupaten Enrekang, "Enrekang Regency in Figure", Kabupaten Enrekang, Sulawesi Selatan, 2018.
- [8] Apollo, "Sistem Pembangkit Energi 3.Makassar", Politeknik U.P, 2011.
- [9] Arismunandar, Kuwahara, "Teknik Tenaga Listrik", Jakarta: Pradnya Paramita, 2000.
- [10] L. Rohaeni, D. Saepudin, A. A, Rohmawati, "Penerapan Algoritma Genetik Untuk Optimalisasi Debit Air Pada Pembangkit Listrik Tenaga Air. Studi Kasus Waduk Sito Cileunca, Jawa Barat. *Jurnal E-Prociding Of Engineering*, vol. 3. No. 2, hal. 3961- 3971, 2016.
- [11] S. Guo, X. Lie, P. Liu, F. Guo, "Optimal Operation Of Cascade Hydro Power Plant", *Jurnal Internasional Since Direct. APPEEC*, vol. 8, hal. 491-8570, 2009.

- [12] Sebastian, Braun, "Intraday Optimization of Pumped Hydro Power Plants in The Jerman Electricity Market", *Jurnal Elsevier*, vol. 8, hal. 321-116, 2015.
- [13] Mahmud Akhmad, "Hidrologi Teknik", Makassar: Universitas Hasanuddin, 2011.
- [14] Zuhail, "Dasar-dasar Tenaga Listrik", ITB Bandung, 1991.
- [15] W. Winasis, H. Prasetijo, G. A. Setia, "Optimasi Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Menggunakan Linear Programming Dengan Batasan Ketersediaan Air", *Jurnal Dinamika Rekayasa*, vol. 9, no. 2, hal. 1-6, 2016.
- [16] Hardjowigeno, "Klasifikasi Tanah dan Pedogenesis", Jakarta: Akademika Pressindo Hardjowigeno, 1993.
- [17] Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Alam (BBSDLA), "Data Topografis dan Geologi Sulawesi Selatan", 2017.
- [18] S. M. Said, Y. S. Akil, M. H. Muzakir, "GIS Approach for Wind Power Plant Development in South Sulawesi, Indonesia: A Location Suitability Analysis", *Prosiding The 4<sup>th</sup> International Conference on Industrial, Mechanical, Electrical, And Chemical Engineering (ICIMECE)*, hal. 030085-1 – 030085-6, 2019.
- [19] C. S. Samosir, W. Soetopo, E. Yuliani, "Optimasi Pola Operasi Waduk Untuk Memenuhi Kebutuhan Energi Pembangkit Listrik Tenaga Air (Studi Kasus Waduk Wonogiri)", *Jurnal Teknik Elektro UNIBRAW*. Vol. 6, no. 1, hal. 108-115, 2015.
- [20] W. Ridhani, H. Hermawan, S. Handoko, "Optimasi Biaya Pembangkit Pada Sistem 500 KV Jawa-Bali Menggunakan Metode Ant Colony Optimization (ACO)", *Jurnal Teknik Elektro UNDIP*. Vol. 3, no. 3, hal. 400-407, 2017.

- [21] E Bowles, Joseph. 1984. "Physical and geotechnical properties of soil", McGraw-Hill College; Subsequent edition.
- [22] Werland, Gheir, "Stochastic Optimization Model For The Tailor Long-Term Hydro Thermal Scheduling Using Scenario-Tree Simulation. Journal Elsevier", *Energy Procedia*, vol 87, hal. 165 - 172, 2016.

# LAMPIRAN

## A. Foto Penelitian



1. Powerhouse PLTM Bungin 1



2. Turbin PLTM Bungin 1



3. Air buangan PLTM Bungin 1



4. Waduk (*Reservoir*)



5. Pipa penstock



6. Pintu masuk air dari sungai ke bendungan PLTM



7. Pencatatan kondisi geologi, topografis,, dan aksestabilitas



8. kondisi jalan raya menuju lokasi PLTM Bungin 1

## RIWAYAT HIDUP



**MUHAMMAD KHAIDIR**, lahir di Maroangin, 14 Oktober 1987. Penulis adalah anak kelima dari lima bersaudara, yang merupakan buah hati dari pasangan Muh. Useng (Almarhum), dan Kunu.

Penulis menempuh pendidikan formal pertama pada tahun 1994 di SD Negeri 126 Sarassang, Kab. Enrekang Provinsi Sulawesi Selatan yang merupakan daerah penulis dibesarkan, di sekolah tersebut penulis menempuh pendidikan selama enam tahun dan selesai pada tahun 2000. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan di MTS Negeri 1 Maiwa, Kab. Enrekang dan selesai pada tahun 2003. Setelah selesai penulis melanjutkan lagi pendidikannya di SMK Negeri 2 Parepare, Kota Madya Parepare dan akhirnya selesai pada tahun 2006.

Setelah berhasil menyelesaikan ujian di SMK Negeri 2 Parepare, Kota Madya Parepare, penulis memutuskan untuk tidak berhenti sampai di situ dan memilih melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi yang ada di kota Makassar pada tahun 2007, yang merupakan pilihan penulis sendiri untuk melabuhkan cita-cita yakni Politeknik Negeri Ujung Pandang. Di kampus almamater hitam itulah penulis mengambil program Diploma Tiga Jurusan Teknik Elektro Program Studi Teknik Listrik, dan selesai pada tahun 2011. Kemudian pada tahun 2012, penulis melanjutkan studi untuk program strata satu (S1), di Fakultas Teknik Program Studi Teknik Elektro Universitas Islam Makassar (UIM), dan selesai pada tahun 2014. Selanjutnya pada tahun 2017, penulis mengikuti test untuk program magister dan Alhamdulillah Penulis di terima di Universitas Hasanuddin pada Program Studi Teknik Elektro konsentrasi Teknik Energi. Hingga akhirnya di tahun 2020 ini penulis dapat menyelesaikan studi dengan tugas akhir yaitu Tesis yang berjudul :” **Pemanfaatan Air Buangan Turbin Pembangkit Listrik Tenaga Mini-Hydro Dengan Model Desain Integrasi Powerhouse Berbasis Ant Coloni Optimization**”, yang merupakan salah satu syarat untuk meraih gelar magister.