

**PERANCANGAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA
MIKROHIDRO.**

**STUDI KASUS DI CURUG CIGEUNTIS, KECAMATAN
TEGALWARU, KABUPATEN KARAWANG, JAWA BARAT**



SKRIPSI

**Disajikan sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Sarjana Pendidikan
Program Studi S1 Pendidikan Vokasional Teknik Elektro**

Oleh:

Bayu Suryo Wiranto

5115125363

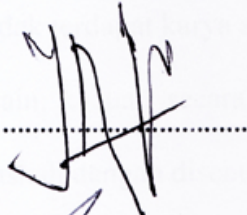
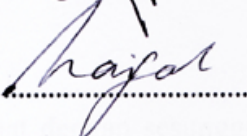
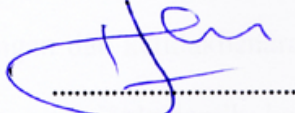


PROGRAM STUDI S1 PENDIDIKAN VOKASIONAL TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS NEGERI JAKARTA

2018

HALAMAN PENGESAHAN
PERANCANGAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO.
STUDI KASUS DI CURUG CIGEUNTIS, KECAMATAN TEGALWARU,
KABUPATEN KARAWANG, JAWA BARAT.
BAYU SURYO WIRANTO / 5115125363
PANITIA UJIAN SKRIPSI

NAMA DOSEN	TANDA TANGAN	TANGGAL
Drs. Irzan Zakir, M.Pd. (Ketua Penguji)		19/2 '18
Nur Hanifah Y., MT (Sekretaris)		19/2-18
Imam Arif R., MT. (Dosen Ahli)		20/2 -18
Dr. Muhammad Rif'an. (Dosen Pembimbing I)		20.2.18
Massus Subekti, M.T. (Dosen Pembimbing II)		19.02.2018

Tanggal Lulus: 19 Februari 2018

HALAMAN PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Karya tulis skripsi saya ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademi sarjana, baik di Universitas Negeri Jakarta maupun di perguruan tinggi lain.
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan dan penelitian saya sendiri dengan arahan dosen pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebut nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya tulis ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di Universitas Negeri Jakarta.

Jakarta, Februari 2018
Yang membuat pernyataan



Bayu Suryo Wiranto
5115125363

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayah serta karunia-Nya. Shalawat serta salam semoga selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW beserta keluarga, sahabat dan pengikutnya. Atas bantuan, rahmat dan kasih sayang dari Allah SWT, penulis dapat menyelesaikan penelitian skripsi yang berjudul “PERANCANGAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO. STUDI KASUS CURUG CIGEUNTIS, KECAMATAN TEGALWARU, KABUPATEN KARAWANG, JAWA BARAT” sebagai salah satu persyaratan kelulusan untuk menyelesaikan studi S1 Program Studi Pendidikan Vokasional Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta.

Pada kesempatan yang sangat baik ini, penulis juga tidak lupa untuk mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu kelancaran dalam menyelesaikan penelitian skripsi, lebih khusus kepada:

1. Bapak Dr. Muhammad Rif'an., MT, selaku Dosen Pembimbing I pada penulisan skripsi ini.
2. Bapak Massus Subekti, S.Pd., MT. selaku Kepala Program Studi Pendidikan Vokasional Teknik Elektro Universitas Negeri Jakarta dan juga sebagai Dosen Pembimbing II.
3. Seluruh dosen, staff tata usaha dan karyawan Prodi Pendidikan Vokasional Teknik Elektro, Universitas Negeri Jakarta yang saya hormati.
4. Segala pihak yang tidak dapat disebutkan satu-satu yang membantu penyusunan skripsi ini.

Penulis memahami sepenuhnya bahwa skripsi ini tidak luput dari kesalahan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi perbaikan di masa mendatang. Semoga skripsi ini dapat memberikan inspirasi bagi para pembaca untuk melakukan hal yang lebih baik lagi dan juga bermanfaat bagi pembaca. Terima kasih.

Jakarta, Februari 2018
Penulis

Bayu Suryo Wiranto
5115125363

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan model perancangan PLTMH, dan mengimplementasikannya pada lokasi tertentu, yang pada penelitian ini ditetapkan lokasinya adalah Curug Cigeuntis. Model perancangan ini nantinya bisa digunakan oleh para perancang PLTMH sebagai observasi awal, dan juga digunakan oleh para pemangku kebijakan dalam melihat potensi sumber daya alam di daerahnya. Curug Cigeuntis dipilih menjadi lokasi pengujian sebagai contoh implementasi yang dari model perancangan yang dibuat karena ketersediaan air di sana boleh dikatakan tinggi akibat curah hujan yang besar.

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif analisis melalui pendekatan kualitatif. Jenis penelitian yang dipilih ialah rekayasa teknik dengan mencakup pembuatan formulasi perancangan PLTMH, validasi formulasi perancangan PLTMH dengan acuan sistem PLTMH yang terpasang pada Laboratorium Tenaga Air Mini milik PLN, dan perancangan bagian PLTMH, yaitu saluran *intake*, bak penenang, pipa *penstock*, turbin, *pulley*, dan generator mempertimbangkan kondisi alam seperti debit air dan tinggi jatuh air pada Curug Cigeuntis.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa Curug Cigeuntis dengan debit andalan sebesar $0.55 \text{ m}^3/\text{s}$ dan tinggi jatuh air sebesar 25 m, diperoleh ukuran *intake* 2.97 m^2 , ukuran bak penenang 6.6 m x 0.83 m x 2.2 m, ukuran diameter *penstock* 48 cm dan ketebalannya 0.17 cm, ukuran diameter turbin 11.81 inch dengan panjang 3.8 inch, jarak antara pisau 2.1 inch, dan jumlah pisau turbin sebanyak 18 buah. Ukuran *pulley* besarnya pada bagian diameter terhubung turbin adalah 11.81 inch dan diameter terhubung generator 5.2 inch. Kapasitas generator yang digunakan sebesar 104.1 kw.

Formulasi perancangan yang dibuat menggunakan program Microsoft Excel, telah divalidasi dengan sistem PLTMH terpasang dan tidak didapati perbedaan yang substansial sehingga dapat disimpulkan perancangan PLTMH layak untuk diimplementasikan pada perancangan tertentu.

Kata kunci: PLTMH, Perancangan PLTMH, Mikrohidro

ABSTRACT

This research aims to create a design model of microhydro powerplant, and implement that design model to particular location, which decided location in this research is Cigeuntis Waterfall. Output of this research can be utilized by microhydro power plant practitioners as a tool, and stakeholders to valuing natural resources potential in their area. Cigeuntis Waterfall is selected because it has sufficient water in raining season, and more important, in dry season.

Analysis descriptive method is used in this research with qualitative approach. Technics of Engineering is type of this research, encompassing design formulation of microhydro power plant, formula validation by comparing design of microhydro power plant based on formula with existing microhydro power plant in PLN Laboratory, and designing microhydro power plant components like intake, settling basin, penstock pipe, turbine, pulley, and generator regarding water flow and net head of Cigeuntis Waterfall.

Results of this research are if microhydro power plant build at Cigeuntis Waterfall with $0.55 \text{ m}^3/\text{s}$ water flow and net head is 25 m, the size of components must be 2.97 m^2 for intake, $6.6 \text{ m} \times 0.83 \text{ m} \times 2.2 \text{ m}$ for settling basin, 48 cm for penstock diameter and 0.17 cm for its thickness, 11.81 inch for turbine diameter and 3.8 inch for its length, 2.1 inch for blade turbine space, 18 blades turbine needed, 11.81 inch for pulley diameter which connected to turbine and 5.2 inch diameter which connected to generator, and capacity of generator is 104.1 kW.

This formula created in Microsoft Excel format, and after validation with existing microhydro power plant, there is not any substantial difference as the result. Therefore, the conclusion is this design model of microhydro power plant able to be implemented.

Keywords: Microhydro power plant, Designing microhydro power plant, Microhydro

DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN PERNYATAAN.....	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
ABSTRAK.....	iv
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	4
1.3 Pembatasan Masalah.....	5
1.4 Perumusan Masalah.....	5
1.5 Tujuan Penelitian.....	5
1.6 Kegunaan Penelitian.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH).....	7
2.2 Debit Air.....	9
2.3 Tinggi Jatuh Air.....	10
2.4 Daya PLTMH.....	11
2.5 Perancangan <i>Intake</i>	12
2.6 Bak Penenang.....	15
2.7 Pipa <i>Penstock</i>	17
2.8 Bangunan Sentral.....	22
2.9 Turbin.....	24

2.10 Generator.....	29
2.11 <i>Pulley</i>	32

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	35
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	35
3.3 Diagram Alir Penelitian.....	37
3.4 Teknik dan Prosedur Pengumpulan Data.....	38
3.5 Teknik Analisis Data.....	40

BAB IV HASIL PENELITIAN

4.1 Deskripsi Hasil Penelitian.....	48
4.1.1 Formulasi Perancangan PLTMH.....	49
4.1.1.1. Data Input.....	49
4.1.1.2. Perhitungan Saluran <i>Intake</i>	50
4.1.1.3. Perhitungan Bak Penenang.....	51
4.1.1.4. Perhitungan Pipa <i>Penstock</i>	53
4.1.1.5. Data Input Perancangan Komponen Elektromekanik.....	56
4.1.1.6. Perhitungan Turbin.....	57
4.1.1.7. Perhitungan Pisau Turbin.....	59
4.1.1.8. Perhitungan <i>Pulley</i>	61
4.1.1.9. Perhitungan Generator.....	62
4.1.2. Hasil Pengamatan Di Laboratorium Tenaga Air Mini PLN.....	64
4.1.2.1. Deskripsi Hasil Pengamatan.....	64
4.1.2.2. Deskripsi Hasil Pengamatan Data Input.....	65
4.1.2.3. Deskripsi Hasil Pengamatan Ukuran <i>Intake</i>	66
4.1.2.4. Deskripsi Hasil Pengamatan Pipa <i>Penstock</i>	67
4.1.2.5. Deskripsi Hasil Pengamatan Turbin.....	69

4.1.2.6. Deskripsi Hasil Pengamatan <i>Pulley</i> dan Generator.....	70
4.1.3. Deskripsi Hasil Pengamatan Curug Cigeuntis.....	71
4.2. Analisis Data Penelitian.....	77
4.2.1.1. Validasi Formulasi Perancangan Komponen.....	77
4.2.1.2. Validasi Formulasi Perancangan Saluran <i>Intake</i>	78
4.2.1.3. Validasi Formulasi Perancangan Bak Penenang.....	79
4.2.1.4. Validasi Formulasi Perancangan Pipa <i>Penstock</i>	81
4.2.1.5. Validasi Formulasi Perancangan Turbin.....	83
4.2.1.6. Validasi Formulasi Perancangan Generator.....	86
4.2.1.7. Validasi Formulasi Perancangan <i>Pulley</i>	88
4.2.1.8. Keseluruhan Hasil Validasi Perancangan.....	90
4.2.2. Perancangan Komponen PLTMH Di Curug Cigeuntis.....	92

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan.....	108
5.2. Saran.....	110

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 <i>Intake</i> Pada PLTMH.....	12
Gambar 2.2 Bak Penenang Pada PLTMH.....	16
Gambar 2.3 Pipa <i>Penstock</i>	19
Gambar 2.4 Grafik Persamaan V_{opt}	21
Gambar 2.5 Turbin Crossflow.....	26
Gambar 2.6 Generator.....	29
Gambar 2.7 <i>Pulley</i> Yang Terhubung Dengan Generator Dan Turbin.....	34
Gambar 3.1 <i>Laser Distance Meter</i>	35
Gambar 3.2 Tongkat.....	36
Gambar 3.3 Jangka Sorong.....	36
Gambar 3.4 Meteran Bangunan.....	37
Gambar 3.5 Diagram Alur Penelitian.....	37
Gambar 3.6 Diagram Alur Perancangan.....	40
Gambar 3.7 Desain Rancangan <i>Intake</i>	41
Gambar 3.8 Desain Rancangan Bak Penenang.....	42
Gambar 3.9 Desain Rancangan Pipa <i>Penstock</i>	43
Gambar 3.10 Desain Rancangan Turbin Tampak Samping.....	44
Gambar 3.11 Desain Rancangan Turbin Tampak Depan.....	44
Gambar 3.12 Desain Rancangan Pisau Turbin.....	45
Gambar 3.13 Desain Rancangan <i>Pulley</i>	47

Gambar 4.1	Tampilan Bagian Data Input.....	50
Gambar 4.2	Tampilan Perhitungan Rancang Bangun Saluran <i>Intake</i>	51
Gambar 4.3	Tampilan Perhitungan Rancang Bangun Bak Penenang	52
Gambar 4.4	Tampilan Formulasi Rancang Bangun Pipa <i>Penstock</i>	55
Gambar 4.5	Tampilan Data Input Pada Rancang Komponen Elektromekanik.....	57
Gambar 4.6	Tampilan Formulasi Perancangan Diameter & Panjang Turbin	58
Gambar 4.7	Tampilan Formulasi Perancangan Pisau Turbin	60
Gambar 4.8	Tampilan Formulasi Perancangan <i>Pulley</i>	62
Gambar 4.9	Tampilan Perancangan Formulasi Generator	63
Gambar 4.10	Lokasi Laboratorium	65
Gambar 4.11	Saluran <i>Intake</i> Pada Laboratorium	67
Gambar 4.12	Pipa <i>Penstock</i> Pada Laboratorium	68
Gambar 4.13	Turbin dan <i>Pulley</i> Pada Laboratorium	69
Gambar 4.14	<i>Pulley</i> dan Generator Pada Laboratorium	71
Gambar 4.15	Curug Cigeuntis	72
Gambar 4.16	Tampilan Data Input Saat Perancangan	93
Gambar 4.17	Tampilan Data Saluran <i>Intake</i> Saat Perancangan	94
Gambar 4.18	Desain Intake Pada PLTMH Curug Cigeuntis	94
Gambar 4.19	Tampilan Data Bak Penenang Saat Perancangan	95
Gambar 4.20	Desain Bak Penenang Pada PLTMH Curug Cigeuntis	95
Gambar 4.21	Tampilan Data Pipa <i>Penstock</i> Saat Perancangan	97

Gambar 4.22	Desain Pipa <i>Penstock</i> Pada PLTMH Curug Cigeuntis	97
Gambar 4.23	Tampilan Data Diameter & Pajang Turbin Pada Perancangan	100
Gambar 4.24	Tampilan Data Pisau Turbin Pada Perancangan	101
Gambar 4.25	Desain Panjang Turbin Pada PLTMH Curug Cigeuntis	101
Gambar 4.26	Desain Turbin Tampak Samping Pada PLTMH Curug Cigeuntis ...	102
Gambar 4.27	Tampilan Data Kapasitas Generator Pada Perancangan	104
Gambar 4.28	Tampilan Data <i>Pulley</i> Pada Perancangan	106
Gambar 4.29	Desain <i>Pulley</i> Pada PLTMH Di Curug Cigeuntis	106

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1	Kategori PLTA berdasarkan hasil produksi listrik7
Tabel 4.1	Data Input Observasi Validasi66
Tabel 4.2	Data Ukuran <i>Intake</i> , Bak Penenang, Pipa <i>Penstock</i>68
Tabel 4.3	Data Ukuran Turbin Hasil Observasi70
Tabel 4.4	Data Ukuran <i>Pulley</i> dan Generator Hasil Observasi71
Tabel 4.5	Data Hasil Pengukuran Lebar Sungai73
Tabel 4.6	Data Hasil Pengukuran Kedalaman Sungai73
Tabel 4.7	Data Hasil Pengukuran Waktu Tempuh Aliran Air Di Bulan Agustus ..75
Tabel 4.8	Hasil Pengukuran Debit Sungai Curug Cigeuntis75
Tabel 4.9	Perbandingan Ukuran Saluran <i>Intake</i>78
Tabel 4.10	Perbandingan Ukuran Bak Penenang80
Tabel 4.11	Perbandingan Ukuran Pipa <i>Penstock</i>82
Tabel 4.12	Perbandingan Ukuran Diameter dan Panjang Turbin84
Tabel 4.13	Perbandingan Ukuran Perancangan Pisau Turbin86
Tabel 4.14	Perbandingan Kapasitas Perancangan Generator87
Tabel 4.15	Perbandingan Ukuran Perancangan <i>Pulley</i>89
Tabel 4.16	Data Rancang Bangun Hidrolik PLTMH Curug Cigeuntis107
Tabel 4.17	Data Rancang Komponen Elektromekanik PLTMH Curug107

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Glosarium
- Lampiran 2 Daftar Simbol
- Lampiran 3 Dokumentasi Penelitian di Laboratorium Tenaga Air Mini PLN
- Lampiran 4 Dokumentasi Peneltian di Curug Cigeuntis
- Lampiran 5 Dokumen Surat Ijin Penelitian

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Energi adalah kebutuhan sehari-hari manusia secara individu, dalam bentuk konsumsi pribadi, maupun manusia secara kelompok, dalam bentuk konsumsi untuk perusahaan dan pelayanan publik. Mengingat pertumbuhan jumlah manusia terus bertambah dengan presentasi 1% di setiap tahunnya (RUPTL 2016-2025, 2016: 121), tentu kebutuhan energi ikut bertambah. Kebutuhan tersebut belum termasuk 16% masyarakat yang belum mendapatkan listrik, karena saat ini rasio elektrifikasi baru menyentuh angka 84% (RUPTL 2015-2024, 2015 :29).

Pembahasan terkait energi, selain kebutuhan manusia dan cara memenuhinya, adalah dampak dari menghasilkan energi tersebut, dalam hal ini ialah energi listrik. Energi listrik dihasilkan oleh pembangkit listrik menggunakan sumber energi primer, seperti minyak bumi, gas alam, batu bara, sinar matahari, air, angin, dan panas bumi. Saat ini, terdapat banyak pembangkit listrik menggunakan minyak bumi, gas alam, dan batu bara sebagai sumber energi primer. Sayangnya, penggunaan ketiga sumber daya alam itu berbahaya bagi lingkungan karena menimbulkan emisi berupa CO₂ yang dapat merusak lapisan ozon di atmosfer.

Pemerintah berupaya menyelesaikan keseluruhan masalah bidang energi melalui Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral nomor 5899 K/20/MEM/2016, terkait Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) tahun 2016-2025. RUPTL ini menargetkan pembangunan pembangkit 35.000 MW demi memenuhi kebutuhan listrik saat ini dan di masa yang akan datang. Dari

35.000 MW pembangkit yang direncanakan, pemerintah berkomitmen 25% diantaranya disumbang dari pembangkit energi baru terbarukan (EBT).

Komitmen pemerintah membangun 25% pembangkit bersumber pada EBT ini, selain didasari itikat baik guna mengurangi dampak kerusakan lingkungan, juga sebagai bentuk implementasi komitmen pemerintah Indonesia pada pertemuan G20 di Pennsylvania, Amerika Serikat untuk mengurangi emisi CO₂. Selama proses pengimplementasian RUPTL berjalan, hingga Juni 2017, pemerintah sudah merealisasikan 12% pembangkit EBT.

Sebagai upaya membantu terwujudnya RUPTL, mikro hidro mempunyai peluang cukup baik karena di Indonesia banyak tersedia sumber air dalam bentuk air terjun, tidak menghasilkan polusi, dan produksi listriknya cukup untuk wilayah pedalaman. Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) boleh jadi pesaing dari mikro hidro dengan proses kerja sederhana dan pengadaannya lebih mudah. Hanya saja, untuk wilayah pelosok buruk kondisi infrastrukturnya, akan sulit mendapatkan bahan bakar dalam mengoperasikan PLTD ini.

PLTMH harus bertempatan pada salah satu provinsi yang memiliki banyak lokasi dengan ketersediaan air memumpuni, dan berdampak signifikan bagi wilayah tersebut. Provinsi Jawa Barat menjadi pilihan tepat untuk difokuskan pada proyek PLTMH dikarenakan provinsi Jawa Barat mempunyai curah hujan tahunan sebesar 2.199 per-mm (bps.go.id). Mempertimbangkan angka-angka tersebut, dapat ditarik kesimpulan bahwa banyak tempat untuk dijadikan PLTMH di Jawa Barat dan ketersediaan air pada tempat-tempat tersebut cukup.

Bagian dari provinsi Jawa Barat untuk dijadikan lokasi penelitian ini adalah Kabupaten Karawang, tepatnya di Curug Cigeuntis, Kecamatan Tegalwaru. Kabupaten Karawang dipilih dengan pertimbangan kondisi alam dan kesejahteraan masyarakatnya. Mengacu pada data BPS dari *karawangkab.bps.go.id*, curah hujan di Karawang tahun 2013 adalah 2.179 per-mm dengan rata-rata curah hujan per-bulan adalah 181,62 per-mm. rincian data curah hujan di tahun 2013.

Agar mengetahui seberapa bagus curah hujan Kabupaten Karawang, dapat mengacu pada kategori curah hujan Mohr. Pengkategorian yang diusulkan oleh E.C Morh pada tahun 1933 ini memuat 3 kelompok curah hujan, yakni bulan basah dengan curah hujan lebih dari 100 per-mm, bulan lembab dengan curah hujan 60-100 per-mm, dan bulan kering dengan curah hujan kurang dari 60 per-mm (Indayanti, 2009: 9).

Dengan curah hujan per-bulan Kabupaten Karawang sebesar 181,62 per-mm, dapat dikategorikan termasuk curah hujan besar karena intensitasnya lebih dari 100 per-mm. Curah hujan demikian tentu menjadi jaminan ketersediaan air untuk mengoperasikan PLTMH. Selanjutnya, hasil dari PLTMH bisa dimanfaatkan demi mengangkat kualitas hidup sumber daya manusia di sana.

Kondisi curug Cigeuntis pun juga menjadi pertimbangan mengapa penelitian diadakan di sana. Dengan ketinggian jatuh air sebesar 25 m, tentu tersimpan cukup energi dari jatuhnya air pada ketinggian tersebut untuk dikonversi menjadi energi listrik. Selain itu, pada pengamatan awal di bulan Agustus –Bulan ketika curah hujan Kabupaten Karawang berada pada nilai terkecil kedua, besarnya debit air di curug tersebut adalah 0,56 m³/s. Berdasarkan tinggi jatuh air dan debit curug

Cigeuntis pada penelitian awal, diprediksi mampu menghasilkan listrik sebesar 137,2 kwh.

Ihwal kondisi sumber daya manusia, Kabupaten Karawang mempunyai penduduk 2,73 juta jiwa di tahun 2015 (*karawangkab.bps.go.id*). Sayangnya, terdapat 270 ribu jiwa hidup pada garis kemiskinan dengan pendapatan 363 ribu rupiah per-bulan. Selain itu, indeks keparahan kemiskinan di Kabupaten Karawang menempati tiga terbesar di Jawa Barat dengan nominal sebesar 0.53 di tahun 2016, padahal pendapatan pemerintah Kabupaten Karawang terbesar ke-6 di provinsi Jawa Barat, yakni sebesar 3 triliun rupiah (*jabar.bps.go.id*).

Adanya PLTMH berpotensi meningkatkan kualitas hidup 270 ribu jiwa ini melalui penyediaan listrik secara cuma-cuma bagi mereka yang menetap di wilayah sekitar pembangkit, atau menjadikan pembangkit ini sebagai objek pembelajaran sehingga menarik perhatian khalayak ramai berkunjung yang nantinya menjadi objek wisata dan memberikan pemasukan tambahan bagi warga setempat.

Pihak Pemerintah Daerah Kabupaten Karawang pun mempunyai kemampuan mewujudkan pembangunan PLTMH. Dengan pendapatan di tahun 2015 sebesar 3 triliun rupiah, tentulah menjadi mudah untuk membangun sebuah PLTMH, terlebih jika PLTMH ini mampu memberikan kesejahteraan bagi penduduk miskin. Penelitian ini diharapkan dapat mengetahui potensi energi air pada curug tersebut sehingga dapat dirancang dan kemudian diterapkan hasil rancangannya.

1.2. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dipaparkan, diidentifikasi permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana model perancangan desain dan matematis pada pembangunan PLTMH?
2. Bagaimana mengimplementasikan model perancangan desain dan matematis pada daerah potensial pembangunan PLTMH?
3. Bagaimana pengaruh pembangunan PLTMH bagi elektrifikasi wilayah sekitar?
4. Bagaimana dampak baik dan buruk dalam pembangunan PLTMH?

1.3. Pembatasan Masalah

Mengacu pada latar belakang dan identifikasi masalah, masalah dibatasi pada ruang lingkup sebagai berikut:

1. Model perancangan desain dan matematis pada pembangunan PLTMH
2. Implementasi model perancangan desain dan matematis PLTMH pada Curug Cigeuntis Kecamatan Tegalwaru, Kabupaten Karawang.

1.4. Perumusan Masalah

1. Bagaimana merancang desain dan model matematis dalam pembangunan PLTMH?
2. Bagaimana mengimplementasikan desain dan model matematis PLTMH pada curug cigeuntis?

1.5. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Menghasilkan model rancangan desain dan matematis dalam PLTMH

2. Mengimplementasikan model rancangan desain dan matematis pada curug cigeuntis

1.6. Kegunaan Penelitian

Kegunaan penelitian ini adalah:

1. Untuk dijadikan pertimbangan oleh pemerintah dalam penentuan pembangunan PLTMH secara umum dan Curug Cigeuntis pada khususnya.
2. Untuk membantu tim ahli melakukan perancangan PLTMH.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH)

Pembangkit listrik tenaga mikrohidro merupakan salah satu jenis dari pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Ada 6 (enam) jenis pembangkit listrik tenaga air, yaitu piko hidro; mikro hidro; mini hidro; PLTA skala kecil; PLTA skala sedang; PLTA skala besar (Bostan *et al*, 2013). Masing-masing kategori memiliki kapasitas daya, berikut dijabarkan pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Kategori PLTA berdasarkan hasil produksi listrik.

Kategori PLTA	Kemampuan Produksi Listrik
PLTA skala besar	> 100 Mega watt
PLTA skala sedang	15 – 100 Mega watt
PLTA skala kecil	1 – 15 Mega watt
Mini hidro	0,1 – 1 Mega watt
Mikro hidro	0,05 – 0,1 Mega watt
Piko hidro	< 0,05 Mega watt

Mengacu pada tabel 2.1, dapat diketahui bahwa mikro hidro adalah salah satu jenis PLTA dengan kemampuan produksi listrik antara 0,05 – 0,1 Mega watt (5 Kilo watt – 100 Kilo watt). Lebih mudahnya, PLTMH adalah sistem pembangkitan listrik dari tenaga air yang kecil (Davis, 2013:1). Walaupun kecil, tenaga air secara kontinu

menjadi memuaskan dan hemat biaya dalam menghasilkan listrik secara terbarukan (*renewable*). Dalam hal komponen, PLTMH memerlukan turbin, dan generator. Fungsi turbin sebagai alat konversi aliran air menjadi energi mekanis, sedangkan generator berfungsi untuk menghasilkan listrik sesuai hukum elektromagnetik dengan memanfaatkan energi mekanis dari turbin (Bostan *et al*, 2013).

Secara garis besar, tidak ada perbedaan komponen yang digunakan pada PLTMH dan kategori PLTA lainnya. Seandainya terdapat perbedaan, hal ini terletak pada ukurannya. Sebagai contoh, turbin yang digunakan pada PLTMH memiliki ukuran lebih kecil ketimbang ukuran turbin pada kategori PLTA yang lebih besar.

Dalam merancang PLTMH, perlu diketahui terlebih dahulu potensi di lokasi yang dituju. Dalam menaksir potensi ini, ada 2 (dua) hal yang wajib diketahui, yakni ketinggian jatuh air dan debit air tersebut (Sharma *et al*, 1979: 12). Interaksi antara kedua hal ini tergambar lewat formulasi sebagai berikut:

$$P = \rho \times g \times Q \times H \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan:

P = potensi keluaran daya (W)

ρ = masa jenis air (1000 kg/m³)

Q = debit air (m³/s)

H = tinggi jatuh air (m)

g = gravitasi (m/s²)

2.2. Debit Air

Air berasal dari hujan yang terjadi akibat proses penguapan air oleh energi surya, kemudian uap ini naik ke atmosfer untuk bergabung dengan partikel aerosol dan debu sehingga membentuk awan hujan, dan darinya hujan terjadi (Pudjanarsa *et al*, 2008: 153). Saat hujan, air akan jatuh ke tanah, membasahi permukaan, dan mengisi sungai dengan volume tertentu. Air di sungai ini kemudian dimanfaatkan debitnya untuk dikonversi menjadi energi listrik.

Debit air sendiri adalah jumlah air yang mengalir melalui suatu penampang sungai tertentu per satuan waktu (Arismunandar *et al*, 1974: 9). Terdapat dua kata kunci pada definisi tersebut, yakni penampang sungai dan satuan waktu. Maksud dari penampang sungai adalah volume, sedangkan maksud dari satuan waktu adalah kecepatannya.

Dengan demikian, satuan debit air yaitu $\frac{m^3}{s}$.

Debit air ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, misalnya curah hujan, keadaan geologi, flora, temperatur, di sebelah hulu sungai (Arismunandar *et al*, 1974: 9). Ketika curah hujan tinggi, maka nilai debit akan besar. Semakin tinggi temperatur di hulu sungai, maka semakin kecil nilai debitnya. Perihal flora, jika ada banyak flora di daerah pinggir sungai, maka nilai debit cenderung stabil.

Demi mengetahui debit air dalam perancangan PLTMH, ada dua metode yang dapat dilakukan. Kedua metode yang dimaksud yakni metode wadah atau penampang (*container method*), dan *weir method* (Davis, 2003: 34). Metode wadah, dalam penerapannya, memerlukan sebuah wadah seperti ember yang telah memiliki takaran presisi layaknya gelas ukur. Wadah ini kemudian menerima air dari sumber, lalu

diperhatikan seberapa lama kapasitas ember terpenuhi oleh aliran sumber air. Untuk metode kedua, yaitu *weir methode*, dengan mengukur sampel dari panjang sebuah sungai, kedalaman rata-rata di 10 (sepuluh) titik, dan kecepatan air saat melalui jarak yang ditentukan. Dalam *weir method*, dibutuhkan pengukur satuan panjang, dan pengukur satuan waktu.

Mengacu pada Wibowo (Wibowo *et al*: 2), kapasitas PLTMH didapatkan dari nilai debit air yang dapat diandalkan, singkatnya adalah debit andalan. Debit andalan adalah debit minimum (terkecil) yang masih dimungkinkan untuk keamanan operasional suatu bangunan air. Umumnya, debit andalan adalah debit yang terjadi sebanyak 80% dari serangkaian pengukuran.

2.3. Tinggi Jatuh Air

Tinggi jatuh air menjadi perhatian dalam merancang PLTMH setelah mengetahui debit air target lokasi. Dalam perhitungan, debit air dan tinggi jatuh air merupakan bagian dari formulasi untuk menentukan listrik yang dihasilkan (Dwivedi *et al*, 2006: 351). Tinggi jatuh air menjadi bagian dari formulasi tersebut dengan pertimbangan pada pergerakan air terdapat 3 (tiga) bentuk energi, yaitu energi kinetik, energi tekan, dan energi potensial. Pada energi potensial, ketinggian menjadi penentu besarnya energi, dan ketinggian dimaksud ialah tinggi jatuh air. Ketinggian ini diukur dari titik masuk air (*intake point*) dan penampungan atas (*headtank*) dengan metode sederhana, seperti menggunakan alat ukur meter pada umumnya (Department of Energy, 2009: 3-9).

Selain menentukan besar hasil energi listrik, tinggi jatuh air juga menjadi pertimbangan saat mengklasifikasikan pembangkit listrik tenaga air. Klasifikasi ini menentukan komponen apa saja yang diperlukan, dan kapasitas masing-masing komponen. Ada 3 (tiga) klasifikasi pembangkit listrik tenaga air berdasarkan tinggi jatuh air, yakni ketinggian tinggi, ketinggian menengah, dan ketinggian rendah (Dwivedi *et al*, 2006: 353). Ketinggian tinggi ini memiliki tinggi jatuh air lebih dari 100 m, sementara ketinggian menengah memiliki tinggi jatuh air sebesar 30 hingga 100 m, dan ketinggian rendah memiliki tinggi jatuh air lebih kecil dari 30 m. Dikarenakan PLTMH bukanlah pembangkit listrik dengan kapasitas besar, maka PLTMH termasuk pada bagian pembangkit listrik tenaga air dengan ketinggian rendah.

2.4. Daya PLTMH

Bryan Leyland (Leyland, 2014: 2) menjelaskan bahwa daya yang keluar dari PLTMH dapat dihitung dengan formulasi sebagai berikut:

$$P = \frac{p \times Q \times H \times 9,81 \times \eta_t \times \eta_g \times \eta_{tr}}{1000} \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan:

P	= daya keluar	(kW)
Q	= debit air	(m ³ /s)
H	= tinggi jatuh air	(m)
9,81	= gravitasi	(m ² /s)
η_t	= efisiensi turbin	(secara umum 0,6 – 0,92)
η_g	= efisiensi generator	(0,94 – 0,98)

η_{tr} = efisiensi transmisi (0.98)

p = masa jenis air (1000 kg/m³)

Seperti diungkapkan sebelumnya, besar debit dan tinggi jatuh air menjadi pertimbangan penting karena termasuk dalam formulasi keluaran daya PLTMH. Selain mengetahui debit dan tinggi jatuh air, efisiensi turbin dan generator juga perlu diperhatikan sesuai dengan kondisi yang ada demi terciptanya hasil daya secara maksimal.

2.5. Perancangan *Intake*

Bangunan ambil air, atau lebih dikenal dengan *intake building*, adalah fasilitas yang dipakai untuk mengambil air langsung dari sungai atau dari tempat penyimpanan (waduk) ke dalam saluran air (Arismunandar *et al*, 1974: 36). Mengacu pada pengertian tersebut, *intake* berperan sebagai penyalur air di bagian awal PLTMH. Air ini akan disalurkan menuju saluran penstock, seperti yang dikemukakan oleh Davis, setiap sistem mikrohidro mempunyai *intake*, tempat air mengalir menuju penstock dari sumber alami (Davis, 2003: 94)



Gambar 2.1. *Intake* pada PLTMH

Dalam pembangunan *intake*, seyogianya diperhatikan lokasi tempat *intake* akan dibangun. Perhatian khusus layak diberikan saat menentukan dan menganalisis tempat *intake* karena mempunyai pengaruh terhadap perkembangan proyeksi ekonomi (Department of Energy, 2009: 4-6). Perhatian diberikan kepada 8 (delapan) hal mengenai lokasi *intake*, yakni:

a) Bentuk Aliran Sungai

Aliran sungai yang hendak dimanfaatkan untuk PLTMH sebaiknya berbentuk garis lurus dengan maksud agar aliran air lancar dan konstan debitnya.

b) Stabilitas Kelandaian Bagian Hulu

Kelandaian saluran menuju *intake* yang tidak beraturan dapat menyebabkan terhambatnya saluran air oleh sedimen akibat erosi atau longsor. Oleh karenanya, pertimbangan yang cukup harus diberikan stabilitas kelandaian sisi hulu sebagai bagian dari proses seleksi lokasi *intake*.

c) Penggunaan Bangunan Yang Sudah Ada

Ketika ada fasilitas untuk irigasi atau jenis lain untuk pertanian pada tempat yang hendak dibangun saluran *intake*, tidak menjadi masalah jika di lokasi yang sama dibangun saluran *intake*, malahan hal demikian dapat mengurangi biaya.

d) Penggunaan Fitur Topografi Alami

Penggunaan tempat yang secara alamiah berbentuk kolam untuk dijadikan saluran *intake* dapat memangkas biaya pembangunan PLTMH, dan juga menjaga lingkungan di sekitarnya, termasuk lanskap dan ekosistem pinggir sungai. Penggunaan kolam alami ini perlu disiapkan solusi terkait 2 (dua) hal, yaitu:

- 1) Pemeliharaan kolam alami
- 2) Cara membersihkan sedimen-sedimen.

e) Volume *Intake* dan Ketinggian Air Banjir

Secara umum, lokasi *intake* yang dibuat dalam satu garis lurus dengan sungai demi mengurangi biaya konstruksi. Akan tetapi, tidak sepenuhnya pembangunan *intake* dengan cara demikian berdampak baik karena alasan ketinggian air banjir pada bagian itu dipastikan meningkat.

f) Kondisi Wilayah untuk Bak Penenang dan Saluran Pembawa

Dalam mempertimbangkan lokasi *intake*, pertimbangkan juga wilayah yang nantinya dibangun bak penenang dan saluran pembawa dengan aspek topografi dan geologi.

g) Pengurangan Keberadaan Air Sungai

Saluran *intake* yang akan dibangun harus mempertimbangkan saluran untuk pertanian, jika sudah terbuat sebelumnya. Saluran *intake* tidak boleh mempengaruhi keberadaan air sungai untuk pertanian, dalam artian tidak ada perubahan.

h) Fitur Yang Sudah Ada Pada Bagian Terpencil Sungai

Fitur yang sudah ada, seperti jalan, dan lahan pertanian di bagian lebih rendah harus diperhatikan saat menentukan lokasi *intake*. Jika ternyata *intake* mempengaruhi pada bagian tersebut, perlu perhitungan jelas mengenai aspek geografis pada bagian itu ditambah pembuatan drainase dalam rangka melindungi jalan atau lahan pertanian yang sudah ada.

Setelah memperhatikan lokasi, ada hal lain yang patut diperhatikan pada *intake*, mengingat *intake* adalah bagian rapuh dan acap kali menimbulkan masalah dalam proses pembangkitan listrik (Leyland, 2014: 13). *Intake* perlu dipastikan menyaring bebatuan, sampah, dan sedimen-sedimen agar tidak terbawa hingga menuju turbin. Jika bebatuan atau benda lainnya tidak tersaring dan terbawa sampai ke turbin, akan terjadi kerusakan pada turbin dan penurunan keluaran daya listrik pada PLTMH.

Ukuran *intake* perlu disesuaikan dengan besaran debit sungai yang dimanfaatkan menjadi pembangkit listrik. Untuk studi kasus kali ini, aliran air yang dimanfaatkan sebanyak 90%, sehingga ukuran saluran *intake* besarnya adalah 90% dari ukuran kedalaman sungai dikali dengan lebar sungai. Secara jelasnya dinyatakan dalam formulasi sebagai berikut:

$$\text{Ukuran Intake} = 90\% \times D_{th} \times \ell \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan :

D_{th} = kedalaman sungai (m)

ℓ = lebar sungai (m)

2.6. Bak Penenang

Bak penenang merupakan bagian dari PLTMH. Prinsip bak penenang ini didasarkan pada pengurangan kecepatan dan hambatan pada aliran air sehingga menjadikan penurunan tingkat sedimentasi pada air (*European Small Hydro Association, 2004: 120*). Kemampuan bak penenang dalam meperlambat aliran air menyesuaikan dengan ukuran dari sedimentasi dan berbagai benda kecil lainnya.

Untuk menghilangkan sedimentasi atau benda kecil berdiameter sebesar 0,5 mm, kecepatan pada bak penenang diatur agar tidak lebih dari 300 mm/s (Leyland, 2014: 35). Ketika asumsi kecepatan pada bak penenang ini dirubah satuannya menjadi m/s sesuai standar SI, maka kecepatan air saat melewati bak penenang tidak boleh lebih dari 0.3 m/s



Gambar 2.2. Bak penenang pada PLTMH

Supaya membuat bak penenang sesuai dengan keinginan, ada beberapa hal patut disoroti dalam perencanaannya. Mengacu pada *Department of Energy* (Department of Energy, 2009: 5-15), hal-hal tersebut terjabarkan dalam formulasi sebagai berikut:

$$L \geq \sqrt{\frac{q}{U \times 0.125}} \dots\dots\dots(2.4)$$

$$\ell \sim \frac{1}{8} L \dots\dots\dots(2.5)$$

$$D_{th} \sim \frac{L \times U}{V} \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan :

L = Panjang bak penenang	(m)
V = Kecepatan air melewati bak penenang	(m/s)
U = Kecepatan pengendapan	(0.1 m/s)
D_{th} = Kedalaman bak penenang	(m)
Q = Debit air	(m ³ /s)
ℓ = Lebar bak penenang	(m)

Mengacu pada rangkaian formulasi (2.4), (2.5), dan (2.6) dapat diketahui ukuran bak penenang (panjang, lebar, dan kedalaman) dipengaruhi oleh kecepatan air yang melewati bak penenang, kecepatan pengendapan, dan debit air. Perlu diketahui bahwa lebar bak penenang ini tidak boleh lebih dari 1/8 panjang bak penenang.

2.7. Pipa *Penstock*

Pipa *penstock* terbuat dari baja, batang kayu, polyethylene padat, PVC, atau serat kaca dengan fungsi membawa air bertekanan menuju rumah daya (Leyland, 2014: 16). Leyland lebih lanjut menjelaskan masing-masing bahan pembuat *penstock* sebagai berikut:

1. *Penstock* Baja

Penstock baja normalnya dibuat dengan panjang 10 hingga 20 meter. Pipa-pipa ini dapat digabung menjadi kesatuan dengan proses pengelasan atau dengan menggunakan alat pengait. Dalam kebanyakan kasus, kecenderungan penggunaan *penstock* dengan alat pengait lebih ekonomis. Keuntungan ekonomis ini disebabkan oleh waktu pembuatannya yang singkat. Pipa

penstock baja juga perlu memenuhi ketebalan tertentu agar mampu bertahan dari tekanan bagian dalam, termasuk *water hammer*, tekanan negatif, serta bertahan saat pengiriman dan pemasangan.

2. *Penstock* Batang Kayu

Penstock batang kayu seringkali menjadi pilihan karena mampu bertahan lama dan terhindar dari keusangan. *Penstock* jenis ini memiliki diameter 1 meter. Tipe ini menarik perhatian jika pipa perlu melewati kondisi lingkungan sensitif banyak pembatasan pada akses, atau boleh jadi pada tempat bersangkutan terdapat banyak kendala jika dipasang *penstock* pada umumnya.

3. *Penstock* Plastic dan Kaca Dengan Tambahan Plastik (GRP)

Penstock jenis ini biasanya lebih murah ketimbang *penstock* jenis lain pada penggunaan berukuran diameter 1 hingga 1,2 meter dan bertekanan sekitar 50 hingga 100 meter. Pemasangannya memakan biaya lebih rendah juga lebih mudah secara teknis. Untuk tekanan lebih tinggi dan diameter lebih dari 500 mm, *penstock* berjenis GRP (*Glass Reinforced Plastic*) atau kaca dengan tambahan plastik menjadi pilihan lebih layak ketimbang bahan lain seperti baja karena biaya pemasangannya lebih murah. Selain itu *penstock* GRP lebih ringan dan tahan terhadap karat.



Gambar 2.3. Pipa Penstock

Umumnya, biaya pembuatan *penstock* mengambil porsi besar dari total keseluruhan anggaran pembangunan PLTMH. Penyesuaian jenis *penstock* dengan anggaran pembangunan PLTM merupakan pilihan tepat. Bagian dari perencanaan *penstock*, selain menentukan jenis bahan, adalah merencanakan rute pemasangan. Mengacu pada *Department of Energy* (Department of Energy, 2009: 4-9), terdapat beberapa pertimbangan saat menentukan rute pemasangan *penstock*. Pertimbangan ini adalah:

1. Kelerengan hidrolis
2. Topografi
3. Stabilitas tanah
4. Penggunaan infrastruktur yang sudah ada, seperti jalan dan irigasi

Selanjutnya, diperlukan formulasi saat merancang *penstock* ini. Mengacu kembali pada *Department of Energy* (Department of Energy, 2009: 5-30) Formulasi perancangan pipa *penstock* meliputi dua hal, yakni ketebalan pipa dan diameter pipa.

Formulasi dalam menentukan seberapa tebal pipa yang diperlukan adalah sebagai berikut:

$$t_0 \geq \frac{P \times d}{2 \times \theta_a \times \eta} + \delta_t \dots\dots\dots(2.7)$$

Keterangan :

- t_0 = ketebalan pipa *penstock* (cm)
- P = kemungkinan tekanan air yang terjadi (1.1 x teknan hidrostatik) (kgf/cm²)
- d = diameter pipa *penstock* (cm)
- θ_a = tekanan air yang dapat diterima (1300 kgf/cm²)
- η = efisiensi pengelasan (0.85 ~ 0.9)
- δ_t = margin (0.15 cm)

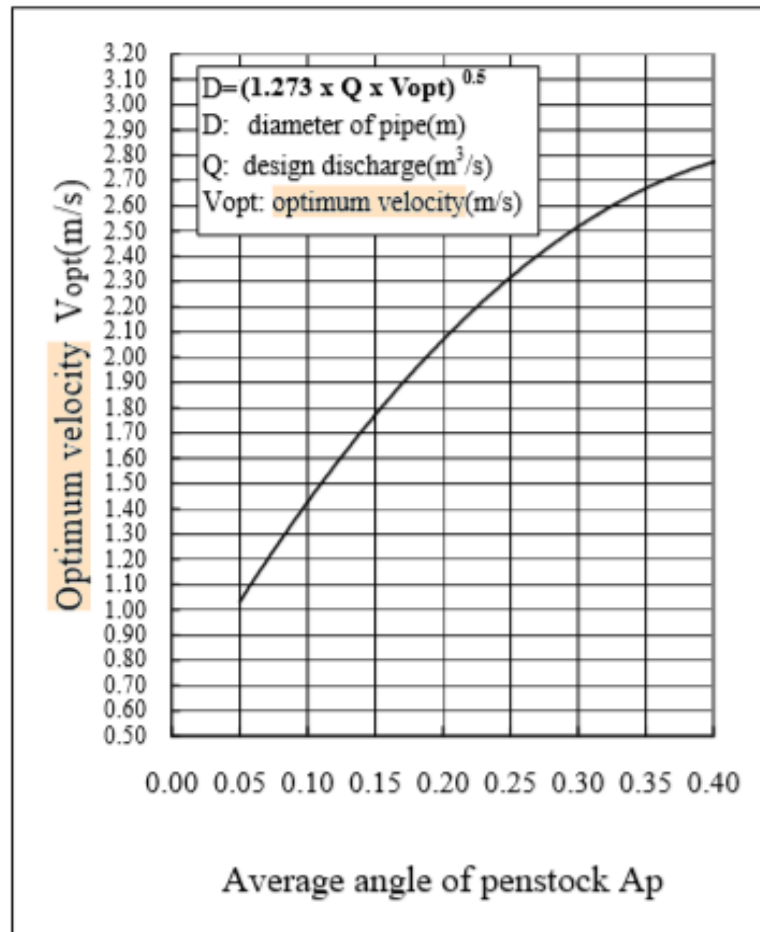
Karena diperlukan nominal diameter pipa untuk menghitung formulasi ketebalan pipa *penstock*, berikut adalah formulasi dari perhitungan diameter pipa *penstock* mengacu pada *Department of Energy* (Department of Energy, 2009: 5-31):

$$D \geq \left(\frac{4}{3.142} \times \frac{Q}{V_{opt}} \right)^{0.5} \dots\dots\dots(2.8)$$

Keterangan :

- D = diameter pipa *penstock* (m)
- Q = debit air (m³/s)
- V_{opt} = kecepatan optimum (m/s)

Nilai V_{opt} sendiri didapatkan dari persamaan *average angle of penstock* (rata-rata sudut *penstock*). Persamaan tersebut termaktub dalam grafik sebagai berikut:



Gambar 2.4. Grafik Persamaan V_{opt}

Nilai *average angle of penstock* ini pun didapat melalui perhitungan sebagai berikut:

$$A_p = \frac{L_p}{H} \dots\dots\dots(2.9)$$

Keterangan :

A_p = *Average angle of penstock*

L_p = Panjang pipa *Penstock* (m)

H = Ketinggian jatuh air (m)

2.8. Bangunan Sentral

Bangunan sentral, atau bisa juga disebut stasiun tenaga air dan *powerhouse* merupakan bagian dari PLTMH secara keseluruhan. Bangunan sentral adalah nama umum bagi fasilitas yang berisikan turbin air, generator, dan mesin-mesin pembantu lainnya (Arismunandar *et al*, 1974: 46). Bangunan sentral ini terbagi menjadi beberapa macam berdasarkan bagiannya yang terletak di tanah.



Gambar 2.4. Bangunan sentral

Kategori bangunan sentral berdasarkan letaknya di tanah dijabarkan sebagai berikut:

a) Bangunan Sentral Di Atas Tanah

Mengacu pada buku *Pembangkit Listrik Tenaga Air* (Sharma *et al*, 1979: 475), bangunan sentral di atas permukaan tanah pada umumnya mempunyai ruang yang tidak terbatas jika dibandingkan dengan stasiun tenaga air di bawah tanah. Bangunan sentral jenis ini memiliki ruang mesin, ruang pemasangan dan bongkar muat, serta ruangan pengontrol. Karena bangunan sentral memiliki 3

(tiga) jenis ruangan, maka ukurannya dipengaruhi oleh ukuran dari ke-tiga ruangan tersebut. Mengingat PLTMH bukanlah pembangkit listrik skala besar, maka ukuran bangunan sentral ini tidak memerlukan luas yang besar, setidaknya penambahan jarak sekitar 1-2 meter dari ukuran rotor dan generator.

b) Bangunan Sentral Di Bawah Tanah

Bangunan sentral di bawah tanah mungkin dibangun untuk situasi daerah sekeliling pegunungan (Sharma *et al*, 1979: 475). Secara spesifik, kondisi alam seperti jurang atau lembah dengan pertimbangan getaran gempa bumi, longsor bangunan, dan kondisi batu-batuan yang baik pada kedalaman tertentu adalah sarat atau situasi memungkinkan untuk dibangun bangunan sentral di bawah tanah. Ihwal perancangan ukuran dari bangunan sentral bawah tanah ini serupa dengan bangunan di atas tanah, yakni bergantung dari besarnya ruang mesin, ruang bongkar muat, dan ruang pengontrol. Kemudian, keuntungan bangunan tipe ini terletak pada aspek ekonomi; aspek operasional; konservasi alam; aspek keperluan pertahanan.

Selain berkenaan dengan pembagian berdasarkan letak pada tanah, bangunan sentral juga terbagi menjadi 2 (dua) jenis berdasarkan pondasi bangunan dari karakteristik turbin yang digunakan, yaitu karakteristik turbin impuls -turbin pelton, turbin turgo, turbin *crossflow*- dan turbin reaksi -turbin francis, turbin propeller- (Department of Energy, 2009: 5-34).

Untuk pondasi bangunan sentral yang menggunakan turbin berkarakteristik reaksi, jarak antara bagian pusat turbin dan ketinggian air dapat digunakan untuk pembangkitan daya. Kemudian, menjadi mungkin jika turbin dipasang dibawah

ketinggian air ketika banjir dengan penambahan komponen gerbang *tailrace* dan pompa.

2.9. Turbin

Turbin hidrolik, atau bisa juga disebut turbin air, digerakan oleh energi kinetik air (Pudjanarsa *et al*, 2008: 154). Turbin air dapat dikategorikan berdasarkan ketinggian air yang hendak dikonversi menjadi energi. Kategori yang dimaksud adalah turbin air untuk ketinggian kecil untuk dibawah 10 meter, ketinggian menengah untuk diatas 10 meter dan di bawah 50 meter, dan ketinggian besar diatas 100 meter (International Finance Corporation: 27).

Selain berdasarkan ketinggian air, terdapat kategori lainnya dari turbin air, yakni turbin impuls dan turbin reaksi (Castaldi *et al*, 2003: 25). Turbin impuls bekerja berkat adanya momentum dari gaya kinetik air dengan ketinggian besar dan debit kecil yang secara cepat menghantam pisau turbin, sedangkan turbin reaksi berputar berkat adanya reaksi dari gaya air mengenai pisau rotor dengan ketinggian hingga 0,6 meter dan debit lebih besar dari debit pada turbin impuls (Bostan *et al*, 2013: 195). Secara sederhana digambarkan turbin impuls digunakan bagi air dari ketinggian besar dan debit kecil, dan turbin reaksi digunakan bagi air dari ketinggian rendah dan debit besar.

Turbin *crossflow* merupakan jenis turbin yang direkomendasikan karena dapat didesain serta dibuat secara lokal berkat perencanaan paripurna dari turbin *crossflow* bisa diperoleh melalui pengujian sederhana dan biaya rendah (Department of Energy, 2009: 6-6). Turbin cross-flow merupakan turbin impuls dengan tipe aliran radial. Awal

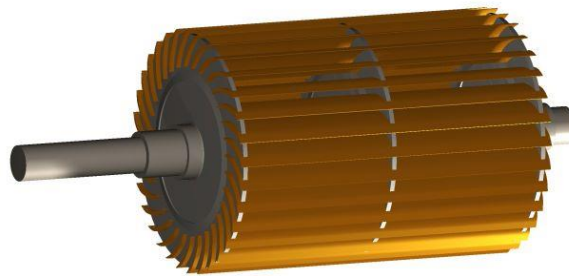
pengembangan turbin cross-flow (turbin banki) di Nepal didasarkan pada teori profesor Donat Banki yang mempatenkan konsepnya sekitar tahun 1920 (Susatyo, 2003: 2).

Turbin cross flow terdiri atas dua bagian utama, nozel dan runner. Tiga buah piringan sejajar disatukan pada lingkaran luarnya oleh sejumlah sudu membentuk konstruksi yang disebut runner. Nozel berpenampang persegi, mengeluarkan pancaran air ke selebar runner dan masuknya dengan sudu 16° terhadap garis singgung lingkaran luar runner (Yusri *et al*, 201: 2).

Mengacu pada buku terbitan *Department of Energy Utilization Management Bureau* dari Jepang, permodelan turbin *crossflow* perlu melewati serangkaian proses sebagai berikut:

- 1) Mendapatkan data awalan debit air, elevasi pada ketinggian air di *forebay* dan pusat turbin (atau saluran pembuangan air bagi model pada kondisi pengecualian) dari aspek teknik sipil.
- 2) Menghitung tinggi efektif dari ketinggian air normal melalui pengurangan akibat adanya gesekan serta turbulensi pada pipa *penstock*.
- 3) Mengestimasi daya hidrolik efektif juga putaran poros turbin akibat debit air, ketinggian efektif, juga efisiensi turbin.
- 4) Menghitung lebar *runner* turbin berdasarkan rekomendasi produsen.
- 5) Menghitung kekuatan mekanis yang menuju generator dari efisiensi pada transmisi daya.
- 6) Menghitung besaran maksimum daya keluaran generator.
- 7) Menghitung kecepatan rotasi turbin berdasarkan kecepatan spesifik poros turbin dan ketinggian efektif.

- 8) Memilih generator yang sesuai dengan daya keluaran, frekuensi, tegangan, faktor daya, kecepatan rotasi, mengacu pada katalog produsen di pasaran.
- 9) Menghitung rasio tingkat kecepatan rotasi turbin dan generator.
- 10) Memilih lebar dan panjang *belt* sesuai rekomendasi produsen.
- 11) Menghitung kapasitas *dummy load* dan ELC (*Electronic Load Controller*) atau IGC (*Induction Generator Control*) yang sesuai terhadap induksi generator.



Gambar 2.5. Turbin crossflow

Untuk mendesain turbin crossflow dengan baik, diperlukan serangkaian rumus yang mana rumus ini akan menentukan bagian-bagian dari turbin. Bagian turbin yang ditentukan melalui rumus adalah panjang turbin turbin, diameter *shaft*, diameter *pitch circle*, putaran turbin, jumlah pisau turbin, ketebalan pisau turbin, dan jarak antara pisau turbin. Sedangkan, untuk nilai diameter turbin ditetapkan sebesar 11.81 inchi.

Berdasarkan Mockmore (Mockmore *et al*, 1949: 15), rumus untuk menentukan ukuran panjang turbin adalah sebagai berikut:

$$L = \frac{144 \times Q}{C \times K \times D \times \sqrt{2gh}} \dots\dots\dots(2.10)$$

Keterangan :

D = diameter turbin (inch)

Q = debit air (cf / s)

h = tinggi jatuh air (ft)

C = koefisien nosel (0.98)

K = konstanta proporsionalitas (0.875)

g = gravitasi (32.15 ft/s²)

L = panjang diameter (inch)

Untuk diameter *shaft*, dan diameter *pitch circle*, formulasi yang digunakan mengacu pada Khan, yakni sebagai berikut (Khan *et al*, 2014: 3):

Diameter *shaft* :

$$D_s = 0.22 \times D \dots\dots\dots(2.11)$$

Keterangan :

D_s = diameter *shaft* (inch)

D = diameter (inch)

Diameter *pitch circle* :

$$D_p = 0.7532 \times D \dots\dots\dots(2.12)$$

Keterangan :

D_p = diameter *pitch circle* (inch)

D = diameter (inch)

Selanjutnya, dalam menghitung kecepatan putar turbin, ketebalan pisau turbin, jarak antara pisau turbin, dan jumlah pisau turbin kembali menggunakan rumusan yang dipublikasikan oleh Mockmore (Mockmore *et al*, 1949: 17), yakni sebagai berikut:

Kecepatan putar turbin:

$$N = \left(\frac{862}{D}\right) \times \sqrt{h} \dots\dots\dots(2.13)$$

Keterangan :

N = kecepatan putar turbin (rpm)

D = diameter turbin (inch)

h = tinggi jatuh air (ft)

Ketebalan pisau turbin:

$$t = k \times D \dots\dots\dots(2.14)$$

Keterangan :

t = ketebalan turbin (inch)

k = konstanta proporsionalitas (0.875)

D = diameter turbin (inch)

Jarak antara pisau turbin:

$$S = \frac{t}{\sin \beta} \dots\dots\dots(2.15)$$

Keterangan :

S = jarak antara pisau (inch)

t = ketebalan pisau turbin

β = sudu masuk air ke turbin (30°)

Jumlah pisau turbin :

$$n = \frac{\pi \times D}{S} \dots\dots\dots(2.16)$$

Keterangan :

n = jumlah pisau turbin (bilah)

D = diameter turbin (inch)

π = 3.14

S = jarak antara pisau (inch)

2.10. Generator

Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia, generator adalah sebuah kata benda dengan makna pembangkit tenaga (listrik, uap, dan sebagainya). Berdasarkan buku *Power Plant Engineering* (Dwivedi *et al*, 2006: 386), generator memproduksi e.m.f (*elektromotive force*, gaya gerak listrik) melalui pergerakan koil terhadap medan magnet, yang kemudian e.m.f ini menghasilkan arus listrik.



Gambar 2.6. Generator

Berdasarkan buku *Hydro Plant Electrical System* (Clemen, 1999: 2-1), generator untuk pembangkit listrik tenaga air dipasang pada *powerhouse* dengan

kapasitas tenaga beberapa kilo watt hingga ratusan mega watt. Generator ini merupakan *salient pole machines*, secara bahasa berarti mesin dengan kutub menonjol, yang memiliki kecepatan antara 80 – 100 rpm. Umumnya, generator pembangkit listrik tenaga air dirancang dengan 10 hingga 120 kutub medan rotor proyeksi dari poros rotor. Kebutuhan rancangan, pemasangan, serta perawatan berdasarkan keluaran tenaga, kecepatan rotasi, dan si pembuatnya.

Pada buku *Small-Scale Hydro-Power* (Strongman *et al*, 1985: 18), ada 2 (dua) tipe generator pada jaringan pembangkit listrik tenaga air, yakni generator sinkron, generator asinkron, dan motor induksi standar. Berikut penjelasan mengenai ketiga jenis generator tersebut:

a) Generator Sinkron

Generator sinkron umumnya digunakan dalam menghasilkan listrik pada sistem terisolasi (*off-grid*) dan sistem *on-grid*.

b) Generator Asinkron

Untuk generator asinkron, kecepatannya melebihi generator sinkron dengan sistem suplai tenaga dari generator bersangkutan untuk memberikan daya ke sistem eksitasi. Adanya suplai tenaga ke sistem eksitasi membuat generator asinkron tidak bisa bekerja secara terisolir, tanpa terkoneksi dengan jaringan lain. Momen inersia dari generator asinkron juga lebih rendah ketimbang generator sinkron. Walau demikian, generator ini cenderung bekerja secara stabil karena tidak menggunakan sistem eksitasi tambahan dan *generator circuit breaker*.

Pada penelitian ini, generator yang digunakan merupakan generator jenis sinkron dengan kecepatan operasi sebesar 1500 rpm. Ihwal kapasitas pemilihan generator, besarnya kapasitas yang digunakan bergantung pada besarnya keluaran listrik yang dihasilkan PLTMH bersangkutan, dan daya keluar dari turbin. Pertama-tama, kita perlu mengetahui daya keluar dari turbin melalui formulasi sebagai berikut:

$$P_t = \frac{\rho \times g \times h \times Q \times \eta_t}{1000} \dots\dots\dots(2.17)$$

Keterangan :

P_t = daya keluar dari turbin (kW)

ρ = masa jenis air (1000 kg/m³)

g = gravitasi (m/s²)

h = tinggi jatuh air (m)

Q = debit air (m³/s)

η_t = efisiensi turbin (70%)

Setelah mengetahui daya yang keluar dari turbin, kemudian perlu diketahui keluaran listrik dari PLTMH bersangkutan. Besarnya keluaran listrik ini ditentukan melalui formulasi sebagai berikut:

$$P_{el} = P_t \times \eta_g \times \eta_{tm} \dots\dots\dots(2.18)$$

Keterangan :

P_{el} = daya listrik yang keluar dari PLTMH (kW)

P_t = daya turbin yang keluar (kW)

η_g = efisiensi generator (90%)

η_{tm} = efisiensi transmisi (98%)

Ketika data besarnya daya keluar dari turbin, dan keluaran listrik dari PLTMH bersangkutan diperoleh, dapatlah kemudian ditentukan kapasitas generator yang hendak dipilih. Memperimbangkan keawetan dari generator, maka kapaistas generator harus lebih besar, paling tidak 20%, dari pembangkitan listrik yang dilakukan. Oleh karenanya, nilai kapasitas generator didapat melalui rumus sebagai berikut:

$$\text{Gen} = \frac{P_{el} \times \cos \varphi}{80\%} \dots\dots\dots(2.19)$$

Keterangan :

Gen = kapasitas generator (kW)

P_{el} = keluaran listrik dari PLTMH (kW)

$\text{Cos } \varphi = \text{Cos } \phi (0.8)$

2.11. Pulley

Menurut Mott dalam buku *Machine Element in Mechanical Design* (Mott, 2004: 265), *pulley* merupakan bagian dari penggerak sabuk (*belt drives*). *Pulley* merupakan komponen mekanik berbentuk bulat sebanyak dua buah yang terhubung melalui sebuah sabuk demi menghubungkan motor atau sumber gerakan dengan beban. Keterhubungan sumber gerakan dengan beban bertujuan mengirimkan gerakan dengan nilai torsi tertentu.

Terdapat dua jenis fungsi *pulley* dalam menghubungkan sumber gerakan dengan beban. Fungis pertama ialah menurunkan kecepatan putar namun meningkatkan nilai torsi. Perlu diketahui sebelumnya bahwa semakin cepat sebuah motor berputar, maka ia memiliki nilai torsi yang semakin kecil sehingga nilai torsi

yang kecil ini belum tentu memadai untuk menggerakkan beban. Demi terpenuhinya nilai torsi untuk menggerakkan beban, *pulley* memainkan peran untuk menurunkan kecepatan putar dari sumber gerakan dengan tujuan nilai torsinya meningkat sesuai dengan karakteristik beban.

Fungsi kedua dari *pulley* adalah menurunkan nilai torsi namun meningkatkan kecepatan putar. Umumnya, *pulley* digunakan dengan cara ini ketika yang diperlukan adalah kecepatan putarnya karena beban lebih memerlukan kecepatan putar ketimbang torsi. Selain torsi beban rendah, umumnya penggunaan *pulley* sesuai fungsi kedua ketika sumber gerakan mempunyai nilai torsi besar sekali sehingga tidak menjadi masalah ketika nilai torsinya dikurangi demi memenuhi kebutuhan kecepatan.

Dalam perancangan *pulley*, hal yang dirancang adalah diameternya dengan mempertimbangkan kecepatan dari masing-masing bagian. Kembali mengacu pada buku *Machine Element in Mechanical Design* (Mott, 2004: 270), formulasi yang digunakan untuk mengetahui besarnya diameter *pulley* yang dibutuhkan sebagai berikut:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{D_2}{D_1} \dots\dots\dots(2.19)$$

$$D_2 = \frac{D_1 \times \omega_2}{\omega_1} \dots\dots\dots(2.20)$$

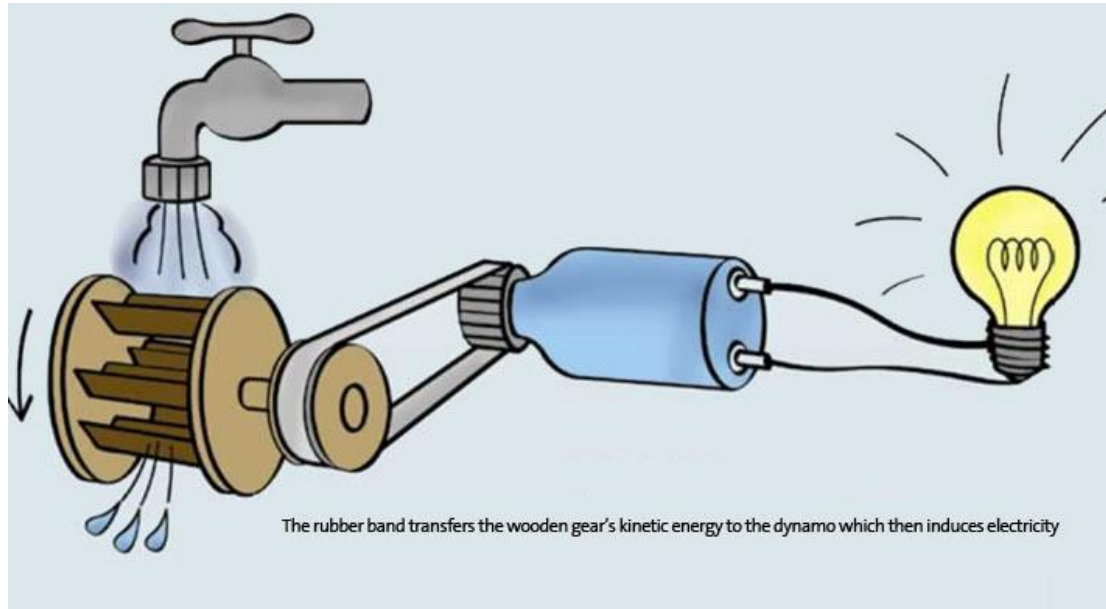
Keterangan :

D_1 = diameter *pulley* untuk turbin (inch)

D_2 = diameter *pulley* untuk generator (inch)

ω_1 = kecepatan putar turbin (rpm)

ω_2 = kecepatan putar generator (rpm)



Gambar 2.7. Pulley yang terhubung dengan generator dan turbin

Besarnya diameter *pulley* yang terhubung pada turbin mengikuti besarnya diameter turbin demi mempermudah merancang ukuran untuk diameter yang terhubung ke generator. Ihtwal kecepatan putar turbin, nilainya didapat melalui formulasi pada penjelasan bagian turbin dan umumnya hasil dari perhitungan tersebut di bawah kecepatan putar minimum untuk mengoperasikan generator, yakni sebesar 1500 rpm.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Curug Cigeuntis, Kecamatan Tegalwaru, Kabupaten Karawang, Jawa Barat, dengan objek adalah Curug Cigeuntis tersebut.

3.2. Alat dan Bahan Penelitian

Untuk penelitian ini, digunakan alat dan bahan sebagai berikut :

1) *Laser Distance Meter*

Laser distance meter ialah alat mengukur panjang dengan memanfaatkan sinar laser. Alat ukur dengan tenagai batere ini menggunakan satuan panjang meter (m). Fungsi dari alat ukur ini adalah mengukur lebar sungai dan tinggi jatuh air.



Gambar 3.1. *Laser Distance Meter*

2) Tongkat

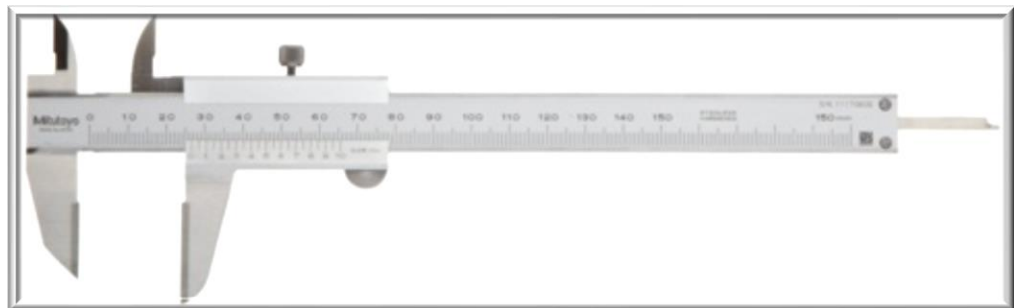
Tongkat, dalam penelitian ini, digunakan untuk mengukur kedalaman air sungai. Tongkat diperlukan dengan alasan sinar laser tidak mampu menembus air sungai hingga permukaan dasarnya, sehingga perlu digunakan tongkat sebagai pembantu.



Gambar 3.2. Tongkat

3) Jangka Sorong

Jangka sorong merupakan alat ukur dengan tingkat presisi hingga dua angka di belakang koma pada skala cm, dan tiga angka di belakang koma pada skala inch. Pada penelitian ini, jangka sorong digunakan untuk mengukur bagian secara presisi demi kebutuhan data observasi.



Gambar 3.3. Jangka Sorong

4) Meteran Bangunan

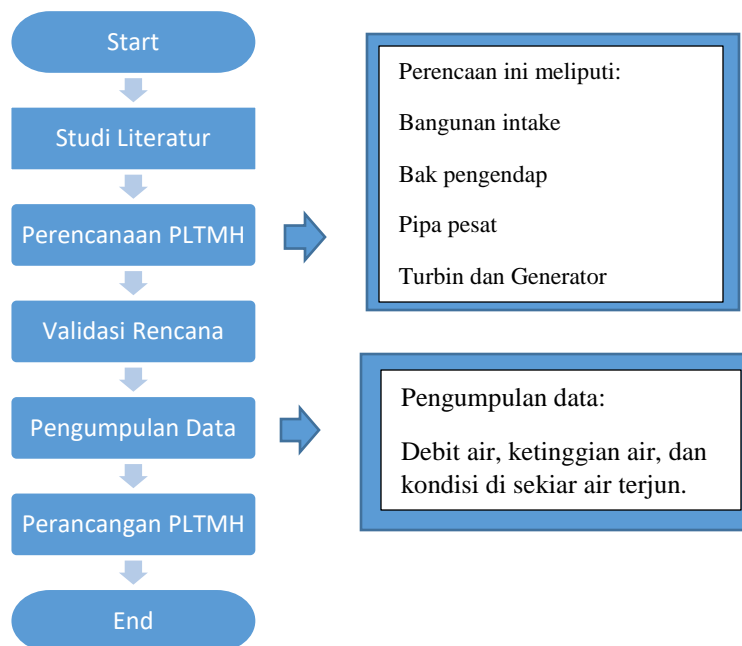
Meteran bangunan berfungsi untuk mengukur dalam skala meter maupun cm sebuah bangunan. Pada penelitian ini, meteran bangunan digunakan saat observasi melihat kondisi bangunan hidrolik.



Gambar 3.4. Meteran Bangunan

3.3 Diagram Alir Penelitian

Tahapan pada penelitian ini digambarkan pada diagram alir sebagai berikut:



Gambar 3.5. Diagram Alur Penelitian

Pada diagram di atas dapat digambarkan tahapan-tahapan dalam melaksanakan penelitian ini. Penelitian diawali dengan melakukan studi literatur demi mendapatkan serangkaian formulasi yang diperlukan dalam merancang PLTMH. Studi literatur ini bersumber dari buku dan jurnal penelitian. Hasil dari studi literatur dimanfaatkan untuk membuat model perencanaan PLTMH meliputi bangunan *intake*, bak pengendap, pipa pesat, turbin, pulley, dan generator dalam format *Microsoft Excel*.

Hasil model perancangan kemudian divalidasi kepada PLTMH yang sudah dibuat. Tujuan dari validasi ini adalah mengetahui adakah perbedaan antara perencanaan secara teoritis dengan kondisi realitanya. PLTMH yang berada di Leuwiliyang, Kabupaten Bogor akan menjadi acuan dalam validasi ini.

Ketika model perancangan sudah menempuh proses validasi, hal berikutnya yang dilakukan adalah survei lokasi curug cigeuntis sebagai objek pembangunan PLTMH demi pengumpulan data. Survei lokasi ini menyasar data debit air, ketinggian jatuh air, dan kondisi di sekitar air terjun. Setelah data lokasi didapatkan, kemudian dilakukan analisa terhadap data tersebut dengan hasil berupa desain PLTMH secara angka dan gambar. Desain ini kemudian dilihat seberapa besar mampu menghasilkan tenaga listrik, serta bagaimana kelayakannya dari sisi ekonomi.

3.4 Teknik dan Prosedur Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan data primer dan data sekunder. Masing-masing data mempunyai teknik pengumpulan yang berbeda dikarenakan data primer merupakan data yang diperoleh langsung di lapangan, sementara data sekunder merupakan data yang sudah diperoleh oleh pihak lain dan kemudian dipublikasi.

Penelitian ini menggunakan teknik pengumpulan data primer dan data sekunder sebagai berikut:

1) Teknik pengumpulan data primer

a. Observasi lapangan

Observasi lapangan adalah cara mengumpulkan data dengan melakukan pengamatan dilokasi penelitian demi memperoleh data yang diperlukan. Bagian dari pengamatan yang dilakukan adalah mengukur ketinggian jatuh air, debit air, dan ukuran sungai pada tempat bersangkutan. Selain itu, observasi lapangan juga dilakukan untuk melakukan pemeriksaan rumus perhitungan yang dibuat dengan kondisi PLTMH yang sudah ada. Pemeriksaan ini dilakukan dengan cara memasukan data input pada PLTMH tersebut, kemudian menyesuaikan ukuran dari hasil perhitungan formulasi rancangan dengan ukuran komponen-komponen yang digunakan pada PLTMH tersebut.

2) Teknik pengumpulan data sekunder

a. Studi literatur

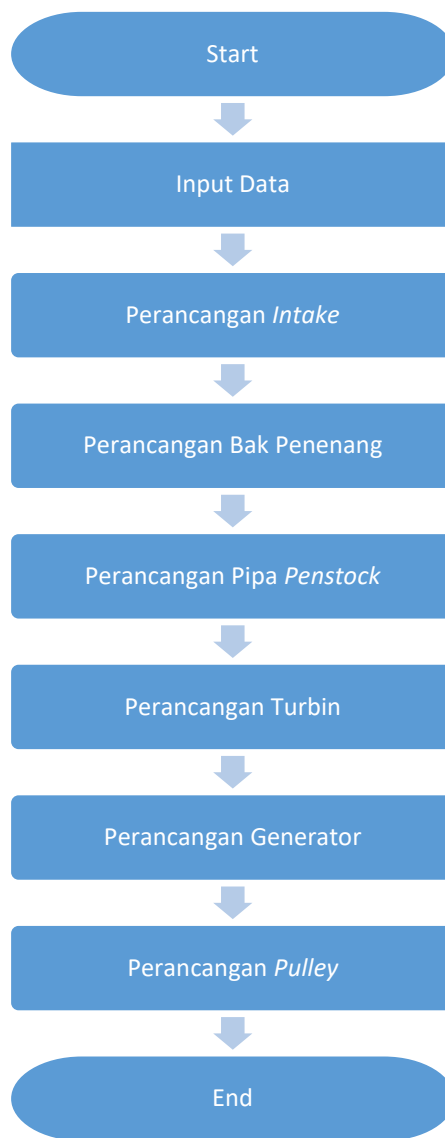
Studi literatur adalah cara mengumpulkan data dengan mempelajari teori-teori dan melihat hasil pengambilan data dari pihak melalui buku-buku atau dokumen lainnya. Data yang dicari menggunakan cara studi literatur adalah curah hujan tempat penelitian, teori-teori berkenaan dengan komponen PLTMH, dan teori-teori berkenaan dengan perancangan PLTMH.

3.5 Teknik Analisis Data

Penelitian ini menggunakan teknik analisis data sebagai berikut:

1) Tahapan perancangan

Dalam merancang PLTMH melalui model dari penelitian ini, dilakukan dalam tahapan sebagai berikut:



Gambar 3.6. Diagram Alur Perancangan

perancangan dimulai dengan memasukan data input, yakni debit air, tinggi jatuh air, lebar sungai, dan kedalaman sungai. Keempat data ini diperoleh melalui pengukuran terhadap sungai yang hendak dibangun PLTMH. Kemudian, data tersebut digunakan untuk melakukan perancangan, dan perancangan yang pertama kali dilakukan adalah saluran *intake*, kedua adalah bak penenang, ketiga adalah pipa *penstock*, keempat adalah turbin, kelima adalah generator, dan terakhir adalah *pulley*.

2) Merancang bagian PLTMH

Perancangan bagian PLTMH adalah proses analisis data berikutnya setelah menghitung potensi energi. Setiap komponen PLTMH: *intake*; bak penenang; pipa *penstock*; bangunan sentral; turbin; dan generator dirancang sesuai dengan keadaan debit air dan tinggi jatuh air yang tersedia.

a. Saluran *intake*

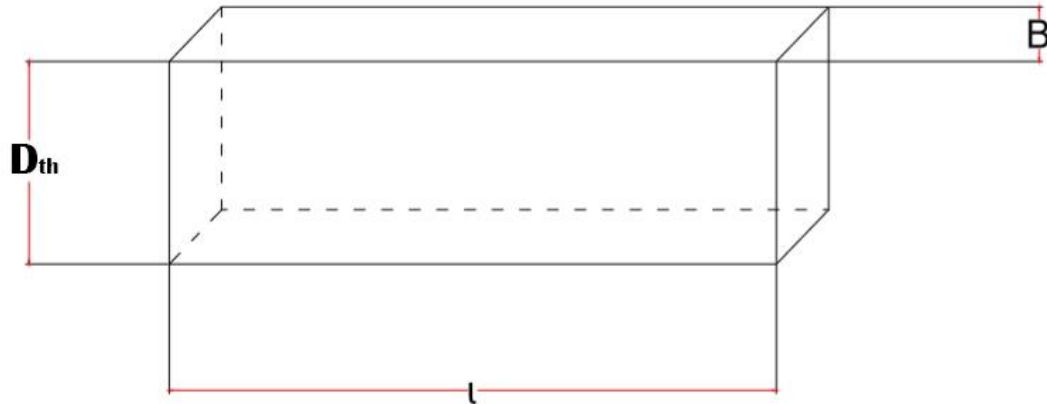


Gambar 3.7. Desain Rancangan *Intake*

Gambar di atas merupakan gambar *intake* pada aliran sungai, Tervisualisasi dengan jelas melalui gambar tersebut bahwa ukuran *intake* 90% dari ukuran aliran sungai. Untuk mendapatkan ukuran *intake* ini diperlukan perhitungan mengacu pada persamaan 2.3 sebagai berikut:

$$\text{Ukuran Intake} = 90\% \times D_{th} \times \ell$$

b. Bak penenang



Gambar 3.8. Desain Rancangan Bak Penenang

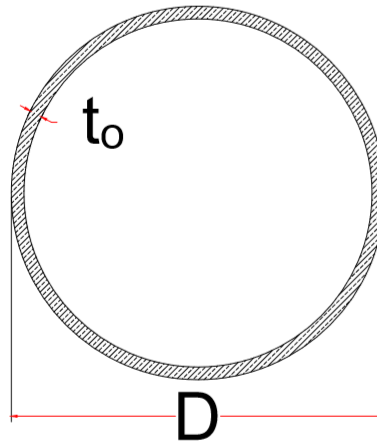
Desain dari bak penenang adalah seperti di atas. Untuk mengetahui ukuran L, D, dan B pada bak penenang digunakan rumusan mengacu pada rumusan 2.4, 2.5, dan 2.6 sebagai berikut:

$$L \geq \sqrt{\frac{Q}{U \times 0.125}}$$

$$\ell \sim \frac{1}{8} \times L$$

$$D_{th} \sim \frac{L \times U}{V}$$

c. Pipa penstock



Gambar 3.9. Desain Rancangan Pipa *Penstock*

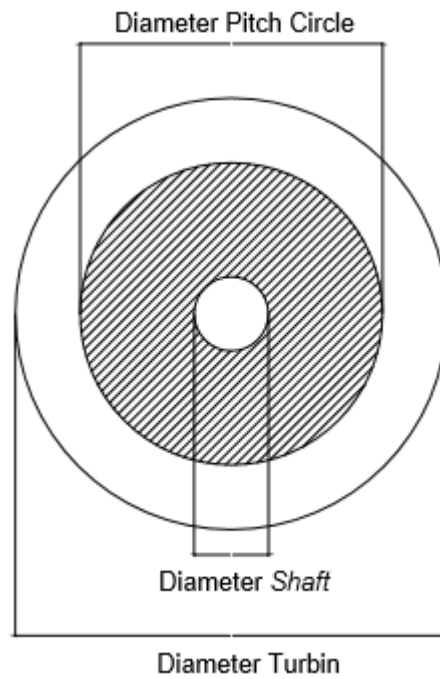
Desain pipa penstock digambarkan pada gambar di atas. Untuk mengetahui ukuran D dan t_o pada gambar tersebut, diperlukan rumus sesuai dengan persamaan 2.6 dan 2.7, yakni sebagai berikut:

$$D \geq \left(\frac{4}{3.142} \times \frac{Q}{V_{opt}} \right)^{0.5}$$

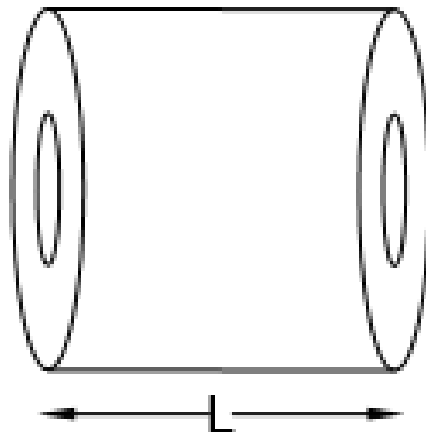
$$t_o \geq \frac{P \times d}{2 \times \theta_a \times \eta} + \delta_t$$

d. Turbin

Turbin yang digunakan pada perancangan PLTMH ini adalah turbin crossflow. Bagian turbin yang ditentukan melalui rumus adalah diameter turbin (D), diameter *shaft* (D_s), *pitch circle diameter* (D_p), panjang turbin (L), jumlah pisau turbin (n), ketebalan pisau turbin (t), dan jarak antara pisau turbin (s).



Gambar 3.10. Desain Rancangan Turbin Tampak Samping



Gambar 3.11. Desain Rancangan Turbin Tampak Depan

Untuk menentukan ukuran bagian turbin seperti gambar di atas, (D , d , D_p , L) digunakan formulasi sebagai berikut mengacu pada persamaan 2.10, 2.11, dan 2.12:

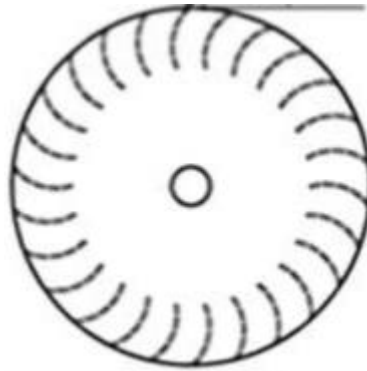
$$D = 11.81 \text{ inch}$$

$$D_s = 0.22 \times D$$

$$D_p = 0.7532 \times D$$

$$L = \frac{144 \times Q}{C \times K \times D \times \sqrt{2gh}}$$

Setelah mengetahui ukuran diameter, diameter *pitch circle*, dan diameter *shaft*, dan panjang turbin, langkah berikutnya adalah jumlah pisau turbin, ketebalan pisau turbin, dan jarak antara pisau turbin sebagaimana tergambar pada gambar di bawah ini



Gambar 3.12. Desain Rancang Pisau Turbin

Untuk menghitung ketebalan pisau turbin, digunakan rumus sebagai berikut sesuai dengan persamaan 2.14:

$$t = k \times D$$

Selanjutnya, mengetahui jarak antara pisau turbin, digunakan rumus mengacu pada persamaan 2.15, yaitu sebagai berikut:

$$S = \frac{t}{\sin \beta}$$

Lalu, untuk menghitung jumlah pisau turbin digunakan rumus sesuai dengan persamaan 2.16, adalah sebagai berikut:

$$n = \frac{\pi \times D}{S}$$

e. Perhitungan kapasitas generator

Besarnya kapasitas generator yang digunakan bergantung pada daya dari turbin (P_t) dan perkiraan keluaran listrik dari PLTMH bersangkutan (P_{el}). Oleh karenanya, perlu diketahui dahulu besarnya daya dari turbin dan perkiraan keluaran listrik melalui perhitungan sebagai berikut mengacu pada persamaan 2.17 dan 2.18:

$$P_t = \frac{p \times g \times h \times Q \times \eta_t}{1000}$$

$$P_{el} = P_t \times \eta_g \times \eta_{tm}$$

Pada saat nilai keluaran listrik dari PLTMH terhitung, maka kapasitas generator ditentukan berdasarkan hasil hitungan ini dengan memberbesar nilai sebesar 20% demi memperhatikan keawetan generator tersebut. Dengan demikian, kapasitas generator ditentukan melalui hitungan persamaan 2.19 sebagai berikut:

$$\text{Gen} = \frac{P_{el} \times \cos \phi}{80\%}$$

f. Perhitungan *pulley*

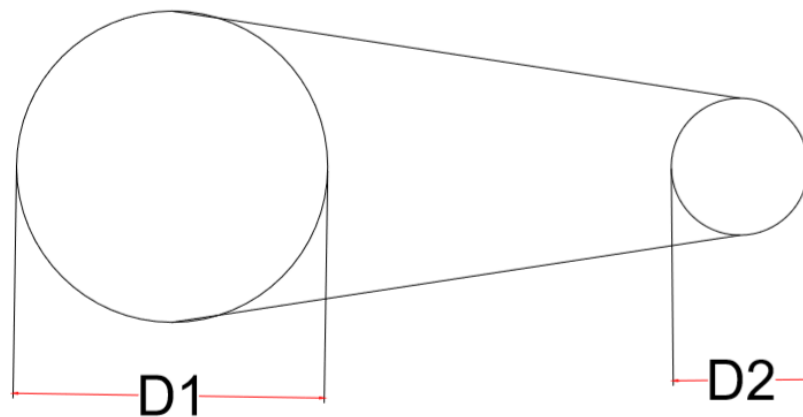
Pulley diperlukan kehadirannya jika kecepatan putar turbin tidak memenuhi standar minimum kecepatan putar untuk mengoperasikan generator. Pada perancangan ini dipilih generator dengan minimum kecepatan putaran sebesar 1500 rpm. Demi mengetahui apakah kecepatan putar turbin mampu memenuhi minimum kecepatan putar

generator, maka didapatlah nilai kecepatan putar turbin melalui formulasi persamaan 2.13 sebagai berikut:

$$N = \left(\frac{862}{D}\right) \times \sqrt{h}$$

Hasil perhitungan tersebut akan menentukan nilai kecepatan turbin. Ketika nilai kecepatan turbin lebih kecil ketimbang minimum kecepatan putar generator, saat itu kita memerlukan kehadiran *pulley*. Hal yang perlu ditentukan dari *pulley* adalah besarnya diameter *pulley* yang terhubung dengan turbin, dan diameter *pulley* yang terhubung dengan generator. Ihtwal ukuran diameter *pulley* yang terhubung dengan turbin mengikuti besarnya diameter turbin, sedangkan untuk ukuran diameter *pulley* yang terhubung dengan generator didapatkan melalui perhitungan persamaan 2.20 sebagai berikut:

$$D_2 = \frac{D_1 \times \omega_2}{\omega_1}$$



Gambar 3.13. Desain Rancang *Pulley*

BAB IV

HASIL PENELITIAN

4.1. Deskripsi Hasil Penelitian

Studi literatur yang telah dilakukan menghasilkan serangkaian formulasi perancangan PLTMH pada setiap bagiannya, mulai dari saluran *intake* tempat air masuk hingga generator selaku komponen penghasil listrik hasil konversi putaran turbin. Formulasi tersebut tertuang dalam format microsoft excel.

Terdapat dua bagian perhitungan pada dokumen microsoft excel yang dibuat, yakni perhitungan rancang bangun hidrolis dan perhitungan rancang komponen elektromekanik. Bagian perhitungan rancang bangun hidrolis terdiri dari perhitungan rancang bangun saluran *intake*, perhitungan rancang bangun saluran pipa *penstock*, dan perhitungan rancang bangun bak penenang. Sementara, bagian perhitungan rancang komponen elektromekanik terdiri dari perhitungan rancang diameter dan lebar turbin, perhitungan rancang pisau turbin, perhitungan rancang *pulley*, dan perhitungan rancang generator.

Data yang diinput kepada formulasi di microsoft excel ini dalam format satuan SI, hanya saja dalam proses perhitungan, ada fase dimana data ini dirubah menjadi satuan Inggris dalam upaya menyesuaikan dengan formulasi yang ada. Satuan dari hasil perhitungan menyesuaikan dengan satuan unsur rumusnya. Jika terdapat rumus dengan unsur-unsurnya menggunakan satuan SI, maka hasil perhitungannya dalam satuan SI. Namun, jika sebuah rumus dengan unsur-unsurnya menggunakan satuan Inggris, maka hasil perhitungannya dalam satuan Inggris.

Perubahan satuan tersebut dilakukan, salah satunya, pada konstanta umum pada perhitungan. Ada beberapa perhitungan yang dilakukan dalam perancangan menggunakan konstanta umum. Konstanta umum ini adalah sebuah ketetapan, berlaku secara universal. Pada perancangan PLTMH ini menggunakan gravitasi sebagai bagian dari konstanta umum. Besarnya gravitasi, mengacu pada satuan SI, adalah 9.81 m/s^2 . Nilai gravitasi demikian digunakan dalam menentukan kapasitas generator terpasang. Selain dalam satuan SI, gravitasi juga perlu ditampilkan dalam satuan Inggris, yakni ft/s^2 , dalam pemakaian ketika menentukan panjang diameter dan pajang turbin. Nilai gravitasi dengan satuan Inggris adalah 32.15 ft/s^2 .

4.1.1. Formulasi Perancangan PLTMH

4.1.1.1. Data Input

Runutan kerja dari keseluruhan formulasi perancangan PLTMH ini bermula dari input data. Pada bagian input data, terdapat empat data yang perlu diisi berdasarkan observasi lapangan dari sumber air tertentu. Ke-empat data ini ialah debit air, lebar sungai, kedalaman sungai, dan tinggi jatuh sungai. Data debit air didapat dari serangkaian pengukuran yang dilakukan. Nominal debit air berlandaskan pada besarnya debit air yang terjadi dengan presentase 80%. Nominal debit yang diambil disebut dengan istilah debit andalan. Ihwal lebar sungai, kedalaman sungai, dan tinggi jatuh sungai, besarnya didapat dengan cara diukur langsung menggunakan *laser distance meter*.

Saat ke-empat data tersebut telah didapat, data kemudian diinput ke dalam perhitungan. Setelah diinput, seluruh sistem perhitungan komponen PLTMH akan memproses data tersebut untuk menghasilkan ukuran dari masing-masing

komponen yang diperlukan. Data yang diinput menggunakan satuan SI (Standar Internasional), yakni meter dan sekon.

Data Input		
Debit air	:	m^3 / s
Lebar sungai	:	meter
Kedalaman sungai	:	meter
Tinggi jatuh air	:	meter

Gambar 4.1. Tampilan Bagian Data Input

4.1.1.2. Perhitungan Saluran *Intake*

Perhitungan rancang bangun saluran *intake* mendapat perhatian pertama kali setelah melakukan input data. Sesuai dengan formulasi yang dicantumkan pada bagian tinjauan pustaka, saluran *intake* adalah hasil perhitungan 90% dikali kedalaman sungai (d) dikali lebar sungai (ℓ). Satuan dari ukuran saluran *intake* adalah meter². Formulasi *intake* terdapat dikali 90% dengan alasan tidak 100% aliran air yang tersedia digunakan demi pembangkitan listrik mempertimbangkan meminimalisir perubahan lingkungan akibat adanya pembangkit listrik.

Formulasi *intake* mengacu pada kedalaman dan lebar sungai karena *intake* merupakan komponen PLTMH yang langsung berinteraksi dengan sungai, sehingga jika tidak menyesuaikan dengan keadaan sungai akan menjadi tidak maksimal. Satuan saluran *intake* adalah m² karena bentuknya bukanlah bangun ruang, melainkan sebuah area masuknya air dari sungai menuju keseluruhan sistem PLTMH. Kolom formulasi rancang bangun saluran *intake* dapat dilihat pada gambar 4.2.

Rancang Bangun Saluran Intake			
Rumus	:	$intake = 90\% \times D_{th} \times \ell$	
Keterangan	:		
Intake	=	Ukuran intake	[meter ²]
D_{th}	=	Kedalaman sungai	[meter]
ℓ	=	Lebar sungai	[meter]
Ukuran Intake	=		[meter ²]

Gambar 4.2. Tampilan Perhitungan Rancang Bangun Saluran *Intake*

4.1.1.3. Perhitungan Bak Penenang

Hasil input data juga diproses untuk mengetahui ukuran dari rancang bangun bak penenang. Mengacu pada bagian tinjauan pustaka, ukuran dari bak penenang terdiri dari lebar bak penenang, panjang bak penenang, dan kedalaman bak penenang. Untuk mengetahui ketiga ukuran tersebut, selain memerhatikan data input, juga perlu memerhatikan kecepatan air dan kecepatan pengendapan.

Mengacu pada buku *Small Hydroelectric Engineering Practice* (Leyland, 2014: 35), kecepatan air ditentukan sebesar 300 mm/s ketika melewati bak penenang. Kecepatan air perlu diperlambat hingga sedemikian rupa dengan alasan membuat air memiliki waktu untuk membuang partikel-partikel kecil yang terbawa. Sedangkan, untuk kecepatan pengendapan diperoleh melalui perhitungan dengan bersumber pada ukuran diameter endapan. Diameter endapan ini diasumsikan sebesar 0.5 mm, atau 0.0005 meter, berdasarkan buku *Small Hydroelectric Engineering Practice* (Leyland, 2014: 35).

Ketika sudah diketahui kecepatan air ideal saat melalui bak penenang dan diameter endapan telah diasumsikan, dapatlah ditentukan lebar dan panjang bak

penenang. Lebar bak penenang ditentukan oleh panjang bak penenang agar kecepatan air saat melalui bak penenang bisa diprediksi sesuai kebutuhan. Besarnya lebar bak penenang ini adalah nilai panjang dari bak penenang dikalikan dengan $\frac{1}{8}$. Nilai panjang dari bak penenang itu sendiri ditentukan oleh kecepatan endapan terjatuh hingga ke dasar bak penenang dan debit air yang mengarah pada bak penenang. Mengacu pada *Department of Energy* (Department of Energy, 2009: 5-15), kecepatan pengendapan diasumsikan sebesar 0.1 m/s. Secara spesifik, panjang bak penenang nilainya lebih besar sama dengan dari perhitungan akar kuadrat debit air dibagi perkalian kecepatan pengendapan dan bilangan 0.125.

Rancang Bangun Bak Penenang		
Rumus	:	$B = \frac{1}{8} L$ $L \geq \sqrt{\frac{Q}{U \times 0.125}}$ $D_{th} = \frac{L \times U}{V}$
Keterangan	:	
B	=	Lebar bak penenang [meter]
L	=	Panjang bak penenang [meter]
Q	=	Debit air [m^3/s]
U	=	Kecepatan pengendapan [0.1 m/s]
D_{th}	=	Kadalaman bak penenang [meter]
V	=	Kecepatan air [0.3 m/s]
L	=	[meter]
B	=	[meter]
D_{th}	=	[meter]

Gambar 4.3. Tampilan Perhitungan Rancang Bangun Bak Penenang

Kedalaman bak penenang adalah bagian terakhir yang ditentukan dari bak penenang setelah didapat ukuran panjang dan lebarnya. Kedalaman perlu mempertimbangkan kemungkinan kecetapan air saat melalui bak penenang dan lebarnya. Ketika air mengalir dengan kecepatan rendah, tentu ada banyak partikel terendap di dasar bak penenang. Permasalahannya, ketika bak penenang tidak memiliki cukup kedalaman akan sedikit daya tampung endapannya. Selain itu, kedalaman juga ditentukan oleh nilai kecepatan endapan. Karena nilai ini diasumsikan, maka besarnya tetap pada kondisi apapun. Oleh karenanya, besar kedalaman dari suatu bak penenang dihasilkan dari perhitungan panjang bak penenang dikalikan dengan kecepatan pengendapan dibagi dengan kecepatan air yang melaluinya. Kolom formulasi rancang bangun bak penenang dapat dilihat pada gambar 4.3.

4.1.1.4. Perhitungan Pipa *Penstock*

Bagian terakhir yang dirancang pada rancang bangun hidrolis adalah pipa *penstock*. Mempertimbangkan fungsinya sebagai penyalur air menuju tempat turbin. Maka bagian dari pipa *penstock* yang dirancang adalah diameter pipa dan ketebalannya.

Panjang pipa *penstock* tidak ditentukan berdasarkan formulasi tertentu karena ukurannya mengacu pada kondisi lapangan. Ketika kondisi lapangan memungkinkan untuk membangun pipa *penstock* yang pendek, maka panjang pipa *penstock* menjadi pendek. Ketika kondisi lapangan mengharuskan pipa *penstock* dibangun panjang, maka ukuran panjang pipa *penstock* menyesuaikan.

Dalam formulasi diameter pipa *penstock*, besarnya diameter pipa *penstock* bergantung dari kecepatan optimum air saat melewati pipa *penstock*, yang nilainya diketahui melalui persamaan kecepatan optimum dan *average angle of penstock* mengacu pada gambar grafik 2.4 Besarnya *average angle of penstock* sendiri pun didapat melalui tinggi jatuh air dibagi perkiraan panjang *penstock* yang hendak dibuat berdasarkan perhitungan (2.9). Pada tabel formulasi, data kecepatan optimum pun merupakan data input tambahan khusus bagi perhitungan dalam merancang pipa *penstock* saja.

Semakin besar kecepatan yang mengalir pada pipa *penstock*, akan semakin kecil ukuran diameternya. Hal demikian dikarenakan ketika air cepat mengalir, maka beban pipa untuk menampung air berkurang disebabkan oleh tidak ada air yang menetap terlalu lama. Jika kecepatan air saat melewati pipa lambat, beban pipa untuk menampung air bertambah disebabkan oleh air terlalu lama berpindah dari pipa *penstock*.

Setelah mengetahui besarnya diameter, bagian pipa *penstock* berikutnya yang perlu diketahui adalah ketebalan pipa. Sebelum perhitungan ketebalan pipa dimulai, perlu ada perubahan satuan dari besaran diameter yang telah ditemukan, yakni perubahan dari meter ke cm, mengingat nilai ketebalan pipa *penstock* memiliki satuan cm.

Jika pipa *penstock* ini hendak menerima tekanan air dalam jumlah besar, maka nilai ketebalan pipa harus besar. Sebaliknya, jika pipa hendak menerima tekanan air dalam jumlah kecil, maka nilai ketebalan pipa bisa menjadi rendah. Nominal teknan air ini mempunyai nilai toleransi sebesar 1300 kgf/cm^2 . Ketebalan pipa akan

bertambah jika tekanan air melebihi nilai tersebut, dan tekanan air pada pipa didapat melalui rumusan $1.1 \times$ tekanan hidrostatik.

Rancang Bangun Pipa Penstock			
Rumus	:	$D = \sqrt{\frac{4}{3.142} \times \frac{Q}{V_{opt}}}$	[meter]
		$d = D \times 100$	[cm]
		$t_0 \geq \frac{P \times d}{2 \times \theta_a \times \eta} + \delta t$	[cm]
Keterangan	:		
V_{opt}	=	Kecepatan optimum	[m/s]
Q	=	Debit air	[m ³ /s]
h	=	Kedalaman sungai	[meter]
l	=	Lebar sungai	[meter]
D	=	Diameter penstock	[meter]
d	=	Diameter penstock	[cm]
t_0	=	Ketebalan pipa	[cm]
P	=	Tekanan air	[kgf/cm ²]
θ_a	=	Tekanan ditolerir	[1300 kgf/cm ²]
η	=	Efisiensi pengelasan	[0.85~0.9]
δt	=	Batas	[0.15 cm umumnya]
V_{opt}	:		[m/s]
D	:		[meter]
d	:		[cm]
t_0	:		[cm]

Gambar 4.4. Tampilan Formulasi Rancang Bangun Pipa Penstock

Tekanan hidrostatik diperoleh dari perkalian antara massa jenis zat cair, ketinggian jatuh air, dan gravitasi. Masing-masing besaran termuat menggunakan satuan SI, sehingga nilai massa jenis zat cair adalah 1000 kg/m³, satuan dari ketinggian jatuh air adalah m, dan nilai gravitasi adalah 9.81 m/s². Hasil dari perhitungan ini adalah nilai tekanan hidrostatik dengan satuan N/m². Satuan N/m²

ini kemudian dikonversi menjadi satuan tekanan dalam sistem Inggris, yakni kgf/cm^2 . Konversi ini dilakukan dengan mengalikan nilai tekanan hidrostatis awal dengan 0.102 untuk konversi N ke kgf, dan kemudian dibagi 10000 untuk konversi m^2 ke cm^2 .

Selain dipengaruhi oleh tekanan air, ketebalan pipa juga dipengaruhi oleh pengelasan pipa. Pengaruh pengelasan pipa ini menjadikan ukuran perlu ditambah 10% - 15% melalui pembangian dengan efisiensi pengelasan yang besarnya adalah 0.85-0.9. Untuk mengetahui tampilan dari formulasi pipa *penstock*, dapat dilihat pada gambar 4.4.

4.1.1.5. Data Input Perancangan Komponen Elektromekanik

Setelah formulasi yang dibuat menyelesaikan rancang bangun hidrologi, mulai dari saluran *intake* hingga pipa *penstock*, perancangan PLTMH beralih ke bagian lain, yakni rancang komponen elektromekanik. Ketika pada rancang bangun hidrologi memerlukan empat data, yakni debit air, tinggi jatuh air, lebar sungai, dan kedalaman sungai, pada rancang bangun elektromekanik hanya memerlukan data debit air dan ketinggian jatuh air.

Data debit air dan ketinggian air pada rancang komponen elektromekanik mengacu pada data pada rancang bangun hidrolik, sehingga tidak perlu melakukan input data kembali. Hanya saja, ada perubahan satuan dari SI menjadi sistem satuan Inggris, sehingga satuan debit air yang semula m^3/s menjadi cf/s , dan tinggi jatuh air yang semula meter (m) menjadi foot (ft). Untuk perubahan dari m^3/s menjadi cf/s , besaran dikalikan 35.3147, sedangkan untuk perubahan m menjadi ft, besaran

dikalikan dengan 3.28084. Tampilan untuk data input pada rancang komponen elektromekanik dapat dilihat pada gambar 4.5.

Data Input		
Debit air	:	0 cf / s
Tinggi jatuh air	:	0 ft

Gambar 4.5. Tampilan Data Input Pada Rancang Komponen Elektromekanik

4.1.1.6. Perhitungan Turbin

Setelah data debit air dan tinggi jatuh air terkonversi dari satuan SI menjadi satuan sistem Inggris, berikutnya kedua data tersebut diolah untuk mendapatkan ukuran diameter dan panjang turbin. Untuk diameter ditetapkan sebesar 11.81 inci demi memudahkan perhitungan, dan kebanyakan turbin memiliki diameter serupa. Panjang turbin didapatkan dari formulasi (2.9), yang mana nilai dari panjang turbin berbanding terbalik dengan besarnya diameter (D) dan tinggi jatuh air (h), namun berbanding lurus dengan debit air (Q). Melihat formulasi dari panjang turbin, dapat dipahami semakin besar debit air yang diterima oleh turbin, maka semakin panjang turbin tersebut. Semakin besar tinggi jatuh air yang mengarah ke turbin, semakin kecil panjang turbin tersebut.

Selain dipengaruhi debit air dan tinggi jatuh air, panjang turbin juga dipengaruhi oleh koefisien nosel (C), konstanta proporsionalitas (k), dan gravitasi (g). Walaupun ketiga faktor ini sama-sama mempengaruhi panjang turbin seperti halnya dengan debit dan tinggi jatuh air, hanya saja c , k , dan g memiliki nilai

konstan. Pada kondisi apapun, pengaruh mereka terhadap panjang turbin adalah sama.

Setelah mendapatkan data panjang turbin, selanjutnya bagian formulasi ini juga menghitung diameter *pitch circle* dan diameter *shaft* yang ukurannya mengacu pada ukuran diameter turbin. Diameter *pitch circle* adalah diameter dari area yang hendak ditemplei oleh pisau turbin. Bentuknya yang bulat mengikuti bentuk turbin mengharuskan besarnya bergantung pada besar diameter turbinnya. Kurang lebih diameter *pitch circle* $\frac{3}{4}$ dari diameter turbin, yang secara spesifik adalah perkalian nilai diameter turbin dengan nominal 0.7532.

Perancangan Diameter & Panjang Turbin		
Rumus	:	$L = \frac{144 \times Q}{C \times K \times D \times \sqrt{2gh}}$
		$D_p = 0.7532 \times D$
		$D_s = 0.22 \times D$
Keterangan :		
L	=	Panjang turbin [inch]
Q	=	Debit air [cf/s]
C	=	Koefisien nosel 0.98
K	=	Konstanta proporsionalitas 0.875
D	=	Diameter turbin [11.81 inch]
g	=	Gravitasi [32.15 ft/s ²]
h	=	Tinggi jatuh air [ft]
D_p	=	Diameter <i>pitch circle</i> [inch]
D_s	=	Diameter <i>shaft</i> [inch]
L	=	[] [inch]
D_p	=	[] [inch]
D_s	=	[] [inch]

Gambar 4.6. Tampilan Formulasi Perancangan Diameter & Panjang Turbin

Selanjutnya, bagian turbin yang perlu diketahui nilainya adalah diameter *shaft*. Diameter *shaft* adalah bagian turbin yang dilubangi untuk dimasukan poros dengan tujuan mendistribusikan putaran turbin ke generator untuk menghasilkan listrik. Karena bentuk lubang ini adalah lingkaran, maka mengetahui ukurannya lewat diameternya. Besarnya diameter *shaft* 22% dari besarnya diameter turbin. Dengan secara spesifik dijelaskan bahwa nilai diameter *shaft* adalah hasil dari perkalian antara nilai diameter turbin dengan bilangan 0.22. Tampilan untuk data diameter dan lebar turbin dapat dilihat pada gambar 4.6.

4.1.1.7. Perhitungan Pisau Turbin

Bagian turbin berikutnya yang perlu diketahui setelah diameter dan lebar turbin adalah komponen pisau turbin. Perancangan komponen pisau ini meliputi ketebalan pisau, jarak antara pisau, dan jumlah pisau. Hasil perhitungan ketebalan pisau, jarak antara pisau, *menggunakan* satuan inchi, sementara hasil perhitungan jumlah pisau menggunakan satuan bilah (banyaknya pisau).

Ketebalan pisau turbin bergantung pada nilai diameter. Karena mempertimbangkan kemudahan perhitungan, nilai diameter ditetapkan 11.81 inch tanpa mempertimbangkan kondisi yang terjadi. Tetapnya nilai diameter ini membuat tetap juga nilai ketebalan pisau turbin, yakni 8.75% dari nilai diameter turbin. Penjelasan lebih detilnya, nilai dari ketebalan pisau turbin merupakan hasil perkalian antara diameter turbin dengan nominal 0.0875.

Perhitungan berikutnya sesuai perhitungan ketebalan pisau turbin adalah perhitungan jarak antara pisau turbin. Jarak antara pisau turbin bergantung pada ketebalan turbin dan sudu masuknya air ke turbin. Mengacu pada publikasi

penelitian Mockmore, besarnya sudut ini adalah 30° , sehingga nilai dari $\sin \beta$ adalah $\sin 30^\circ$, yakni 0.5. Nilai 0.5 ini kemudian menjadi pembagi terhadap nilai ketebalan turbin demi mendapatkan nilai jarak antara pisau turbin. Sehingga, semakin tebal pisau turbin, semakin besar pula jarak antara pisanya.

Perancangan Pisau Turbin		
Rumus	:	$t = kD$ $s = \frac{t}{\sin \beta}$ $n = \frac{\pi \times D}{s}$
Keterangan	:	
t	=	Ketebalan pisau [inch]
K	=	Konstanta proporsionalitas 0.0875
D	=	Diameter turbin [11.81 inch]
s	=	Jarak antar pisau [inch]
β	=	30°
n	=	Jumlah pisau turbin [bilah]
π	=	3.14
t	=	[redacted] [inch]
s	=	[redacted] [inch]
n	=	[redacted] [bilah]

Gambar 4.7. Tampilan Formulasi Perancangan Pisau Turbin

Bagian terakhir yang perlu diketahui dari perancangan pisau turbin adalah banyaknya jumlah bilah dari pisau turbin tersebut. Karena bilah ini akan dipasang pada bagian terluar turbin, maka jumlah bilah ini mempertimbangkan keliling dari turbin tersebut. Mengingat turbin yang digunakan berbentuk bulat, maka kelilingnya didapat dari perkalian antara π (3.14) dengan diameter turbin. Setelah

didapat keliling dari turbin tersebut, langkah berikutnya adalah membagi panjang keliling dengan jarak antara setiap pisau untuk mendapatkan jumlah pisau dari turbin tersebut. Tampilan formulasi perancangan pisau dan badan turbin dapat dilihat pada gambar 4.7.

4.1.1.8. Perhitungan *Pulley*

Setelah merancang bagian-bagian turbin, komponen elektromekanik lainnya yang perlu dirancang adalah *pulley*. Dengan mempertimbangkan fungsinya sebagai transmisi yang menghubungkan putaran turbin dengan putaran generator, maka bagian dari *pulley* yang perlu diperhatikan adalah diameter dan kecepatan putarnya. *Pulley* yang terhubung pada turbin memiliki diameter sebesar diameter turbin dengan kecepatan putar sesuai dengan kecepatan putar turbin.

Ihwal kecepatan putar turbin, besarnya bergantung pada tinggi jatuh air dan diameter bersangkutan. Semakin besar tinggi jatuh air, maka semakin besar pula kecepatan putar turbin bersangkutan. Semakin besar diameter turbin, maka semakin kecil besarnya kecepatan putar turbin. Oleh karenanya dapat dikatakan kecepatan putar turbin berbanding lurus dengan tinggi jatuh air, namun berbanding terbalik dengan diameter turbin.

Untuk *pulley* yang terhubung pada generator, kecepatannya mengikuti spesifikasi kecepatan generator dalam proses menghasilkan listrik. Sementara, ukuran diameter *pulley* yang terhubung dengan generator ditentukan melalui hasil perhitungan kecepatan putar *pulley* yang terhubung dengan turbin dikalikan dengan diameter *pulley* tersebut, kemudian dibagi dengan kecepatan putar *pulley* yang

terhubung dengan generator. Untuk melihat tampilan formulasi perancangan *pulley*, dapat dilihat pada gambar 4.8.

Perancangan Pulley	
Rumus	$N = \frac{862 \times \sqrt{h}}{D}$ $D_2 = \frac{\omega_1 \times D_1}{\omega_2}$
Keterangan :	
N / ω_1	= Kecepatan putar turbin [rpm]
D / D_1	= Diameter turbin [inch]
h	= tinggi jatuh air [ft]
D_2	= Diameter Pulley untuk generator [inch]
ω_2	= Kecepatan putar generator [1500 rpm]
N	= [rpm]
D_2	= [inch]

Gambar 4.8. Tampilan Formulasi Perancangan *Pulley*

4.1.1.9. Perhitungan Generator

Komponen elektromekanikal terakhir yang perlu dirancang adalah generator. Dengan fungsinya sebagai penghasil listrik, maka perlu ditentukan seberapa besar kapasitas generator untuk menghasilkan listrik, menyesuaikan dengan keluaran listrik hasil dari turbin. Kapasitas generator ini haruslah 20% lebih besar ketimbang keluaran listrik dari turbin agar generator tidak bekerja terlalu berat dan memiliki umur penggunaan yang panjang.

Secara spesifik, besar kapasitas generator ditentukan oleh daya listrik yang keluar dari PLTMH bersangkutan. Besarnya daya listrik ini bergantung pada daya yang dihasilkan oleh turbin, oleh karenanya saat hendak mengetahui kapasitas

generator bagi sebuah PLTMH, seyogianya diketahui terlebih dahulu daya yang dihasilkan turbin.

Daya yang dihasilkan turbin mengacu pada gravitasi, tinggi jatuh air, debit air, dan efisiensi turbin. Ihwal efisiensi turbin, nilainya bergantung pada jenis turbin. Karena perhitungan pada model perancangan ini menggunakan turbin *crossflow*, maka nilai efisiensinya adalah 70%. Selanjutnya, karena gravitasi dan efisiensi turbin bernilai tetap, maka daya dari turbin berubah ketika debit air dan tinggi jatuh air berubah. Ketika kedua hal tersebut nilainya bertambah, bertambah pula daya dari turbin.

Perancangan Generator	
Rumus	$P_t = \frac{\rho \times g \times h \times Q \times n_t}{1000}$ $P_{el} = P_t \times n_g \times n_{tm}$ $Gen = \frac{P_{el} \times \cos \varphi}{80\%}$
Keterangan	<p>:</p> <p>P_t = Daya yang keluar dari turbin [kW]</p> <p>ρ = Masa jenis air [1000 kg/m³]</p> <p>g = Gravitasi [9.81 m/s²]</p> <p>h = Tinggi jatuh air [meter]</p> <p>Q = Debit air [m³ / s]</p> <p>n_t = Efisiensi turbin [70%]</p> <p>P_{el} = Daya listrik yang keluar [kW]</p> <p>n_g = Efisiensi generator [90%]</p> <p>n_{tm} = Efisiensi transmisi [98%]</p> <p>Gen = Kapasitas generator [kW]</p> <p>$\cos \varphi$ = 0.8</p> <p>Gen = [] [kW]</p>

Gambar 4.9. Tampilan Perancangan Formulasi Generator

Hasil perhitungan daya dari turbin kemudian dikalikan dengan efisiensi transmisi dan efisiensi generator untuk menemukan berapa keluaran listrik dari PLTMH tersebut. Besarnya efisiensi transmisi diasumsikan sebesar 98% dan besarnya efisiensi generator diasumsikan sebesar 90%.

Hasil perhitungan ini kemudian digunakan untuk memilih kapasitas generator. Mempertimbangkan daya tahan generator selama penggunaan, maka kapasitas generator yang dipilih harus 20% lebih besar dari keluaran listrik. Alhasil, kapasitas generator ditentukan melalui perhitungan keluaran listrik PLTMH dibagi 80%. Untuk melihat tampilan formulasi perancangan generator, dapat dilihat pada gambar 4.9.

4.1.2. Hasil Pengamatan Di Laboratorium Tenaga Air Mini PLN

4.1.2.1. Deskripsi Hasil Pengamatan

Perhitungan-perhitungan yang tertuang dalam formulasi rancangan seperti yang dijelaskan sebelum-sebelumnya merupakan perhitungan teoritis bersumber dari jurnal dan buku. Karena sifatnya teoritis, ada kemungkinan terjadinya distorsi atau perbedaan saat perhitungan ini diaplikasikan. Demi mengetahui apakah terjadi perbedaan ketika formulasi tersebut diaplikasikan, dan jika terjadi, seberapa besar perbedaan itu, dilakukan lah validasi formulasi.

Validasi formulasi dilakukan dengan mengobservasi PLTMH yang sudah ada. Tahapan validasi ini dilakukan pertama dengan mencatat data input pada PLTMH tersebut, yakni besarnya debit air, tinggi jatuh air, ukuran sungai, dan bagaimana nilai V_{opt} -nya. Data input ini kemudian dimasukkan ke dalam formulasi perancangan yang telah dibuat demi mengetahui ukuran-ukuran setiap komponen pada PLTMH

tersebut. Hasil perhitungan itu kemudian diperbandingkan dengan ukuran komponen-komponen PLTMH yang didapat dari hasil pengukuran. Hasil dari perbandingan ini lah menjadi penentu apakah formulasi perancangan tersebut valid atau tidaknya.

Laboratorium Tenaga Air Mini milik PLN yang berlokasi di Cipayung, Bogor, menjadi tujuan validasi ini dilakukan. Pertimbangan dipilihnya lokasi tersebut dikarenakan lokasinya mudah untuk diakses, dan tempat itu dikelola oleh PLN sehingga setiap hal yang terdapat di sana tentu sudah melalui pertimbangan yang matang, alhasil menjadikannya layak sebagai acuan dalam melakukan validasi formulasi.



Gambar 4.10. Lokasi Laboratorium

4.1.2.2. Deskripsi Hasil Pengamatan Data Input

Data pertama yang diambil pada lokasi Laboratorium adalah data input. Berdasarkan keterangan penjaga Laboratorium, debit air yang masuk ke dalam

sistem pembangkit adalah $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$, tetapi debit yang masuk ke *intake* dan bak penenang adalah $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Perbedaan ini terjadi karena debit air dialirkan ke dua lokasi pembangkitan di laboratorium tersebut.

Ihwal tinggi jatuh air, tinggi jatuh air yang diterima oleh sistem pembangkit sebesar 10 meter dengan ukuran panjang dan lebar sungai adalah 2 meter x 2 meter. Dengan panjang pipa *penstock* dari bak penenang hingga sistem pembangkitan sebesar 25 meter dan tinggi jatuh air sebesar 10 meter, maka nilai V_{opt} -nya adalah 2.78. Keseluruhan data input ini dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1. Data Input Observasi Validasi

Jenis Data Input Validasi	Nilai
Debit air	$0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ($1 \text{ m}^3/\text{s}$)
Tinggi jatuh air	10 meter
Lebar sungai	2 meter
Panjang sungai	2 meter
V_{opt}	2.78

4.1.2.3. Deskripsi Hasil Pengamatan Ukuran *Intake*

Setelah mendapatkan data input, langkah berikutnya saat observasi adalah mendapatkan ukuran dari masing-masing komponen PLTMH. Untuk ukuran saluran *intake*, besarnya pada PLTMH di Laboratorium tersebut adalah 4 m^2 , yakni meliputi 100% dari luas permukaan sungai yang masuk. Hal demikian terjadi karena sungai yang masuk ke PLTMH tidak memiliki fungsi selain membangkitkan listrik, sehingga memungkinkan membangun *intake* dengan ukuran 100% dari luas permukaan sungai.



Gambar 4.11. Saluran *Intake* Pada Laboratorium

Ihwal bak penenang, di Laboratorium tersebut terdapat bak penenang dengan ukuran panjang sebesar 25 meter, lebar sebesar 10 meter, dan kedalaman sebesar 5 meter. Bak penenang dibuat dengan ukuran tersebut karena berfungsi menampung air untuk dua sistem pembangkit. Selain itu, dikarenakan area Laboratorium juga berfungsi sebagai pengendali banjir dari sungai Cikatih, yakni sebuah sungai yang mengalir di tengah masyarakat dan sungai sumber air masuk ke area Laboratorium, sehingga ukurannya harus besar untuk menampung air jika sewaktu-waktu sungai Cikatih meluap.

4.1.2.4. Deskripsi Hasil Pengamatan Pipa *Penstock*

Untuk ukuran pipa *Penstock*, digunakan pipa besi dengan ukuran diameter sebesar 85.53 cm, dan ketebalan sebesar 1.27 cm. Data ukuran *intake*, bak penenang, dan pipa *penstock* ditampilkan pada tabel 4.2.



Gambar 4.12. Pipa *Penstock* Pada Laboratorium

Tabel 4.2. Data Ukuran *Intake*, Bak Penenang, Pipa *Penstock*

Jenis Data	Nilai
Ukuran saluran <i>intake</i>	4 m ²
Panjang bak penenang	25 meter
Lebar bak penenang	10 meter
Kedalaman bak penenang	5 meter
Diameter pipa <i>penstock</i>	85.53 cm
Ketebalan pipa <i>penstock</i>	1,27 cm

4.1.2.5. Deskripsi Hasil Pengamatan Turbin

Setelah semua ukuran komponen bangunan hidrolik terukur, berikutnya adalah mengetahui ukuran dari komponen elektromekanik. Ukuran komponen elektromekanik yang diketahui pertama kali adalah ukuran turbin. Ukuran turbin ini didapat lewat wawancara kepada pihak petugas Laboratorium, bukan didapatkan melalui pengukuran langsung. Hal demikian dilakukan karena turbin terbungkus pada cangkang besinya, dan melakukan pembongkaran untuk mengukur ukuran turbin secara langsung tidak diijinkan oleh pihak Laboratorium. Berdasarkan keterangan petugas, diameter turbin yang digunakan pada Laboratorium adalah 11.8 inch, sementara panjang turbinnya sebesar 6 inch. Selain ukuran diameter dan panjang turbin, petugas laboratorium juga memberitahu bahwa ketebalan pisau turbin yang digunakan sebesar 1 inch, dengan jarak antara pisau turbin sebesar 2 inch, dan jumlah pisau sebanyak 18 bilah. Tabel 4.3 menampilkan ukuran turbin hasil observasi di Laboratorium.



Gambar 4.13. Turbin dan *Pulley* Pada Laboratorium

Tabel 4.3. Data Ukuran Turbin Hasil Observasi

Jenis Data	Nilai
Diameter turbin	11.8 inch
Panjang turbin	6 inch
Ketebalan pisau	1 inch
Jarak antara pisau	2 inch
Jumlah pisau	18 bilah

4.1.2.6. Deskripsi Hasil Pengamatan *Pulley* dan Generator

Ukuran selanjutnya yang perlu dicari tahu dari komponen elektromekanik adalah *pulley* dan generator. Ukuran *pulley* terbagi menjadi dua jenis, yakni ukuran *pulley* yang terhubung dengan turbin, dan ukuran *pulley* yang terhubung dengan generator. Pada saat observasi, didapati *pulley* yang terhubung pada turbin lebih besar ketimbang *pulley* yang terhubung pada generator. Hal demikian bertujuan untuk membagi putaran yang dihasilkan oleh turbin kepada generator, dan putaran tersebut ditingkatkan demi memenuhi putaran minimum untuk mengoperasikan generator, yakni sebesar 1500 rpm. Ukuran diameter *pulley* yang terhubung turbin adalah 28.5 inch, sementara ukuran diameter *pulley* yang terhubung pada generator ialah 8.5 inch. Kapasitas generator yang dipilih sebesar 30 kW dengan minimum putaran untuk pengoperasian sebesar 1500 rpm. Tabel 4.4 menampilkan ukuran *pulley* dan generator hasil observasi pada Laboratorium.



Gambar 4.14. Pulley dan Generator Pada Laboratorium

Tabel 4.4. Data Ukuran Pulley dan Generator Hasil Observasi

Jenis Data	Nilai
D_{pulley} turbin	28.5 inch
D_{pulley} generator	8.5 inch
Kapasitas Generator	30 kW

4.1.3. Deskripsi Hasil Pengamatan Curug Cigeuntis

Curug Cigeuntis adalah sebuah air terjun yang berlokasi di Jawa Barat, tepatnya pada Desa Mekar Buana, Kecamatan Tegalwaru, Kabupaten Karawang. Curug ini berada di kawasan Gunung Sanggabuana pada ketinggian 1000 meter di atas permukaan laut. Lokasi curug ini berjarak 44 km dari pusat kota Karawang.

Dewasa ini, Curug Cigeuntis dengan ketinggiannya sebesar 25 meter merupakan tujuan wisata cukup menjajikan bagi masyarakat di sekitarnya. Pendapatan daerah mendapatkan pengaruh dari Curug ini, mulai dari retribusi pengunjung yang hendak memasuki desa lokasi Curug, dan pembayaran tiket masuk ke lokasi Curug.

Selain aktifitas perekonomian di sana, bagian menarik lain dari Curug Cigeuntis adalah debit airnya. Debit air inilah menjadi pertimbangan kenapa dipilih menjadi lokasi contoh pembangunan PLTMH. Debit air di Curug Cigeuntis boleh dikatakan baik besarnya dikarenakan wilayah tersebut memiliki intensitas hujan yang besar, yakni sebesar 181.62 per-mm dalam satu bulan. Nilai tersebut dapat dikategorikan basah oleh E.C Mohr karena diatas 100 per-mm.



Gambar 4.15. Curug Cigeuntis

Untuk mengetahui lebih spesifik debit air dari curug tersebut, perlu diketahui terlebih dahulu ukuran sungai yang menyuplai air kepadanya. Ukuran sungai ini meliputi lebar sungai dan kedalaman sungai. Cara mengetahui lebar dan kedalaman ini diperoleh dari serangkaian pengukuran pada area sampel dari sungai tersebut. Masing-masing ukuran, yakni lebar dan kedalaman, diukur sebanyak lima kali. Dalam pengukuran demi mendapatkan data lebar sungai, dilakukan lima kali pada area sungai sepanjang satu meter. Hasil data tersebut ditampilkan pada tabel 4.5.

Tabel 4.5. Data Hasil Pengukuran Lebar Sungai

No	Hasil Pengukuran
1	1.1 meter
2	2.8 meter
3	3.5 meter
4	3.9 meter
5	3.7 meter

Berdasarkan tabel 4.5, ditampilkan hasil lima kali lebar sungai. Dari kelima data tersebut, dihitung rata-rata nilainya demi ditetapkan sebagai lebar sungai dari Curug Cigeuntis ini. Setelah dirata-ratakan, didapatkan hasil sebesar 3 meter, sehingga untuk mencari nilai debit dan perhitungan komponen-komponen PLTMH digunakan asumsi lebar sungai sebesar 3 meter.

Pengambilan data selanjutnya adalah data kedalaman sungai. Seperti mendapatkan data lebar sungai, data kedalaman sungai didapatkan melalui metode sampling. Sampling dilakukan pada panjang 5 meter di 5 titik berbeda. Cara pengukurannya dimulai dari titik pojok kiri, dan kemudian perlahan maju dan bergerak ke kanan. Hasil pengukuran data kedalaman sungai ini ditampilkan pada tabel 4.6.

Tabel 4.6. Data Hasil Pengukuran Kedalaman Sungai

No	Hasil Pengukuran
1	1.1 meter
2	1.2 meter
3	1.3 meter

No	Hasil Pengukuran
4	1 meter
5	0.9 meter

Berdasarkan tabel 4.6, kita didapatkan hasil lima kali pengukuran kedalaman sungai pada Curug Cigeuntis. Kedalaman sungai pada Curug Cigeuntis ditentukan dari rata-rata kelima data tersebut. Hasil rata-rata dari kelima data tersebut adalah 1.1 meter. Alhasil, dalam penentuan besarnya nilai debit air dan komponen PLTMH yang mengacu pada ukuran kedalaman sungai, diasumsikan kedalamannya adalah 1.1 meter.

Setelah mengetahui besarnya lebar dan kedalaman sungai, barulah dapat menentukan debit. Debit ini ditentukan melalui pengukuran sebanyak dua belas kali dalam sampling sungai sepanjang 1 meter. Pengukuran ini dilakukan dengan menghanyutkan sebuah benda di atas sungai untuk dilihat berapa waktu dari benda tersebut dalam melalui sampling panjang sungai yang ditentukan. Selanjutnya, besarnya waktu ini menjadi pembagi terhadap volume sungai sampling tersebut. Karena sampling panjang sungai ditetapkan sebesar 1 meter, dan lebar serta kedalamannya adalah 3 meter dan 1.1 meter, maka volume sungai yang digunakan dalam mengukur debit sebesar 3.3 m^3 .

Pengukuran debit pertama kali dilakukan pada bulan Agustus dengan alasan bulan Agustus merupakan musim kemarau, sehingga kita dapat mengetahui debit minimum air yang ada pada Curug Cigeuntis ini. Data hasil pengukuran ini dapat dilihat pada tabel 4.7.

Tabel 4.7. Data Hasil Pengukuran Waktu Tempuh Aliran Air Di Bulan

Agustus

No	Waktu Aliran (s)
1	5.9
2	6
3	5.9
4	6.1
5	5.8
6	5.6
7	5.7
8	5.8
9	5.9
10	6
11	6.1
12	6

Data waktu aliran air pada tabel 4.7 diambil sebanyak 12 kali, dengan masing-masing jarak waktu di setiap pengambilan ialah 10 menit. Jika waktu tempuh aliran air ini dikalikan dengan volume sungai demi mendapatkan data debit air secara jelas, maka hasilnya seperti yang ditampilkan pada tabel 4.8.

Tabel 4.8. Hasil Pengukuran Debit Sungai Curug Cigeuntis

No	Debit (m^3 / s)
1	0.56
2	0.55

No	Debit (m^3 / s)
3	0.56
4	0.54
5	0.57
6	0.59
7	0.58
8	0.57
9	0.56
10	0.55
11	0.54
12	0.55

Mengacu pada data debit air dari tabel 4.8, dirata-ratakan hasil pengukuran tersebut dan didapat nilai debit rata-rata sebesar $0.56 \text{ m}^3/\text{s}$. Jumlah ini hampir menyerupai dengan jumlah debit air pada Laboratorium Tenaga Air Mini kepunyaan PLN. Hanya saja, untuk perancangan sistem PLTMH yang diperlukan adalah debit andalan, yakni nilai debit yang sering terjadi, paling tidak terjadi sebanyak 80%. Berdasarkan data tersebut, data debit andalan pada bulan Agustus ialah $0.55 \text{ m}^3/\text{s}$.

Data debit inilah yang digunakan dalam perhitungan merancang komponen-komponen PLTMH dengan anggapan nilai $0.55 \text{ m}^3/\text{s}$ menjadi nilai andalan dan hampir terjadi di setiap bulan dalam satu tahun. Jika data debit air diambil saat musim hujan, ada kemungkinan nilainya lebih besar, akan tetapi belum tentu nilai besar ini mampu mengakomodir debit air kala musim kemarau. Tentu PLTMH hasil rancangan dapat beroperasi, tidak hanya saat musim hujan, tetapi juga bias

beroperasi saat musim kemarau, sehingga sudah sepatutnya data perhitungan dalam merancang komponen PLTMH mengacu pada debit air saat musim kemarau.

4.2. Analisis Data Penelitian

4.2.1.1. Validasi Formulasi Perancangan Komponen PLTMH

Serangkaian formulasi perancangan yang diperoleh pada penelitian ini melalui studi pustaka dari sumber beberapa buku dan jurnal penelitian, perlu diperiksa melalui diperbandingkan dengan kondisi PLTMH yang sudah ada. Hal demikian berlandaskan pada adanya penyesuaian dalam implementasi teori mengingat teori berpijak pada kondisi ideal, sementara realita tidak selamanya ideal.

Formulasi perancangan yang ada diperbandingkan dengan PLTMH di Laboratorium Tenaga Air Mini kepunyaan PLN berlokasi di Cipayung, Bogor. Perbandingan ini dilakukan dengan cara memasukan angka data input (debit air, tinggi jatuh air, dan ukuran sungai) sesuai dengan kondisi Laboratorium pada formulasi perancangan yang telah didapatkan melalui studi pustaka. Kemudian, hasil perhitungan dari formulasi perancangan ini diperbandingkan dengan ukuran masing-masing komponen PLTMH yang ada di laboratorium tersebut hasil dari observasi.

Nilai dari data input pada PLTMH di Laboratorium PLN ini adalah debit sebesar $1 \text{ m}^3/\text{s}$ dari *intake* hingga bak penenang dan $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ dari pipa *penstock* hingga menuju turbin (perbedaan nilai debit ini dikarenakan ada pembagian aliran air setelah keluar dari bak penenang). Tinggi jatuhnya air pada PLTMH di Laboratorium ini sebesar 10 meter dengan lebar sungai 2 meter dan kedalaman sungai 2 meter.

4.2.1.2. Validasi Formulasi Perancangan Saluran *Intake*

Mengacu pada data observasi lapangan, ukuran luas permukaan saluran *intake* dengan ukuran sungai 2 meter x 2 meter adalah 4 m². Sementara, mengacu pada formulasi perancangan saluran *intake* yang didapat melalui studi pustaka, besarnya luas permukaan saluran *intake* sebesar 90% dari ukuran sungai. Sehingga, dengan ukuran sungai 2 meter x 2 meter, didapatkan ukuran luar permukaan saluran *intake* berdasarkan persamaan 2.3 sebagai berikut:

$$Intake = 90\% \times D_{th} \times \ell$$

$$Intake = 90\% \times 2 \times 2$$

$$Intake = 3.6 \text{ m}^2$$

Perbandingan data hasil observasi dengan perhitungan melalui formulasi perancangan adalah sebagai berikut:

Tabel 4.9. Perbandingan Ukuran Saluran *Intake*

Hasil Data Observasi	Hasil Perhitungan
4 m ²	3.6 m ²

Dari tabel di atas dipahami terdapat perbedaan antara hasil data observasi dengan hasil perhitungan. Perbedaan ini terjadi karena pada PLTMH di Laboratorium menggunakan 100% dari ukuran sungai untuk dijadikan saluran *intake*, karena sungai yang berada di sana memang difokuskan untuk PLTMH tersebut saja. Sementara, pada formulasi perancangan, saluran *intake* menggunakan 90% dari ukuran sungai dengan asumsi sungai yang digunakan sebagai PLTMH memiliki fungsi lain, seperti pariwisata atau irigasi sehingga tidak dapat digunakan 100%. Walaupun terjadi perbedaan antara hasil observasi dengan hasil perhitungan,

perbedaan tersebut masih dikatakan wajar, karena presentasi perbedaan hanya 10% dan terdapat alasan logis serta dapat diterima mengenai sebab perbedaan akibat jumlah fungsi dari saluran bersangkutan. Oleh karenanya, dalam merancang saluran *intake* perlu diketahui terlebih dahulu, apakah sungai tersebut hanya difungsikan untuk PLTMH saja atau mempunyai fungsi lain.

4.2.1.3. Validasi Formulasi Perancangan Bak Penenang

Seperti dijelaskan sebelumnya, debit air, sebagai data input dari bak penenang, pada PLTMH di Laboratorium sebesar $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Dengan nilai debit tersebut, ukuran bak penenang pada PLTMH di Laboratorium adalah $25 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 5 \text{ m}$. 25 meter adalah nilai dari panjang bak penenang, 10 meter adalah nilai dari lebar bak penenang, dan 5 meter adalah nilai dari kedalaman bak penenang.

Ihwal hasil perancangan bak penenang melalui formulasi dengan debit $1 \text{ m}^3/\text{s}$, diperoleh ukuran berdasarkan permaan 2.4, 2.5, dan 2.6 adalah sebagai berikut:

$$L \geq \frac{Q}{\sqrt{U \times 0.125}}$$

$$L \geq \frac{1}{\sqrt{0.1 \times 0.125}}$$

$$L \geq 8.94 \text{ m}$$

$$\ell \sim \frac{1}{8} L$$

$$\ell \sim \frac{1}{8} \times 8.94$$

$$\ell \sim 1.118 \text{ m} \sim 1.12 \text{ m}$$

$$D_{\text{th}} \sim \frac{L \times U}{V}$$

$$D_{\text{th}} \sim \frac{8.94 \times 0.1}{0.3}$$

$$D_{th} \sim 2.9814 \text{ m} \sim 2.98 \text{ m}$$

Perbandingan data hasil observasi dengan perhitungan melalui formulasi perancangan adalah sebagai berikut:

Tabel 4.10. Perbandingan Ukuran Bak Penenang

Bagian Bak	Hasil Data	Hasil
Penenang	Observasi	Perhitungan
L	25 m	8.93 m
B	10 m	1.12 m
D_{th}	5 m	2.98 m

Mengacu pada tabel di atas, didapatkan perbedaan antara panjang bak penenang hasil observasi dengan hasil perhitungan menggunakan formulasi perancangan. Perbedaan ini juga terjadi ukuran lebar bak penenang dan kedalaman bak penenang. Jika diselisihkan, perbedaan ukuran panjang pada bak penenang adalah 16.07 meter, perbedaan ukuran lebar adalah 8.88 meter, dan perbedaan pada ukuran kedalaman adalah 2.02 meter.

Didapati perbedaan demikian antara hasil observasi dengan hasil perhitungan karena kalau diperhatikan dari formulasi menghitung panjang bak penenang, tidak merujuk kepada jumlah spesifik sehingga menggunakan tanda \geq untuk mendeskripsikan hasil, bukan tanpa $=$. Selain itu, berdasarkan keterangan dari petugas di Laboratorium, sistem aliran air pada PLTMH di sana memiliki peran selain membangkitkan listrik, yakni sebagai pengendali aliran air ketika sungai di daerah sekitarnya meluap dan mengganggu masyarakat. Oleh karenanya, wajar

apabila bak penenang dibuat sedemikian besar. Selain berfungsi mengendapkan endapan pada air, juga sebagai penampung jikalau terjadi luapan air sungai.

Mempertimbangkan hal demikian, dapat dipahami bahwa dalam membangun bak penang perlu juga menyesuaikan dengan kondisi sekitar dan kemungkinan yang hendak terjadi. Hasil perhitungan melalui formulasi perancangan hanya menetapkan nilai minimum dari ukuran bak penang. Namun, jika bak penenang dibebankan fungsi lain selain mengendapkan endapan pada air pada pelaksanaannya kelak, maka ukuran bak penenang dapat dibuat lebih besar, hanya saja menyesuaikan dengan ketersediaan ruang.

4.2.1.4 Validasi Formulasi Perancangan Pipa *Penstock*

Nilai debit air saat memasuki pipa *penstock* pada PLTMH d Laboratorium mengalami pengurangan karena terjadi pembagian aliran air, sehingga besarnya debit air saat mengalir pada pipa *penstock* adalah 0.5 m³/s. Dengan ukuran sungai 2 meter x 2 meter, tinggi jatuh air sebesar 10 meter, panjang pipa *penstock* sebesar 25 meter sehingga menghasilkan V_{opt} sebesar 2.78 m/s, ukuran *penstock* yang digunakan di Laboratorium sebesar 85.53 cm untuk diameternya, dan 1.27 cm untuk ketebalannya.

Sedangkan, ukuran pipa *penstock* berdasarkan formulasi perancangan dengan kondisi yang sama sesuai dengan persamaan 2.7 dan 2.8 adalah sebagai berikut:

$$D \geq \sqrt{\frac{4}{3.142} \times \frac{Q}{V_{opt}}}$$

$$D \geq \sqrt{\frac{4}{3.142} \times \frac{0.5}{2.78}}$$

$$D \geq 0.4787 \text{ m} \sim 0.48 \text{ m (48 cm)}$$

$$t_0 \geq \frac{P \times d}{2 \times \theta_a \times \eta} + \delta t$$

$$t_0 \geq \frac{1.1007 \times 48}{2 \times 1300 \times 0.85} + 0.15$$

$$t_0 \geq 0.1738 \text{ cm} \sim 0.17 \text{ cm}$$

Perbandingan data hasil observasi dengan perhitungan melalui formulasi perancangan adalah sebagai berikut:

Tabel 4.11. Perbandingan Ukuran Pipa *Penstock*

Bagian Pipa	Hasil Data	Hasil Data
<i>Penstock</i>	Observasi	Perhitungan
Diameter	85.53 cm	48 cm
Ketebalan	1.27 cm	0.17 cm

Melihat tabel di atas, terdapat perbedaan karakteristik pipa *penstock* antara data observasi dengan data hasil perhitungan. Data observasi menggunakan pipa dengan diameter lebih besar hampir dua kalinya terhadap data diameter hasil perhitungan. Lebih besarnya diameter pipa pada data hasil observasi boleh dikatakan wajar karena pihak pengelola perlu memperhatikan kemampuan pipa dalam menahan *water hammer* jika sewaktu-waktu terjadi. Ukuran yang lebih besar juga memungkinkan menampung air jika sewaktu-waktu meluap.

Nilai hasil perhitungan yang lebih kecil tetap menjadi relevan karena dapat dijadikan standar minimum dalam pembuatan pipa *penstock*, dan memberikan pilihan akan kemungkinan dibuat dengan ukuran lebih kecil karena bisa menghemat biaya dan penggunaan ruang. Dijadikannya nilai hasil perhitungan sebagai standar

minimum juga menjadi batas terkecil. Dengan debit air $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$, diameter pipa tidak boleh kurang dari 48 cm.

Perbandingan data pada bagian ketebalan pipa juga mengalami perbedaan yang signifikan. Dengan ketebalan pipa sesuai data hasil observasi, yakni 1.27 cm, tentu menjadikan pipa lebih kuat dalam menampung air, bahkan mungkin tidak hanya menampung air, tetapi juga tahan jika terjadi kondisi yang diinginkan dari lingkungan sekitar, seperti longsor misalnya. Akan tetapi, walaupun data ketebalan pipa berdasarkan hasil perhitungan jauh lebih kecil, yakni sebesar 0.17 cm, bukan berarti data tersebut tidak valid atau tidak bisa digunakan.

Berdasarkan rumus perhitungan mencari ketebalan pipa, digunakan tanda \geq dengan artian angka hasil perhitungan tersebut merupakan angka minimum dari ketebalan sebuah pipa yang diperlukan. Tentu akan menjadi lebih baik jika memilih pipa yang lebih tebal dengan berlandaskan berbagai pertimbangan, misalnya pertimbangan ketahanan ketika terjadi bencana. Oleh karenanya, meskipun terjadi perbedaan signifikan, formulasi yang dibuat tetap dikatakan valid karena data yang dihasilkan bersifat batas minimum ukuran ketebalan pipa.

4.2.1.5. Validasi Formulasi Perancangan Turbin

Ihwal perancangan turbin, bagian yang diperhatikan adalah diameter, panjang, ketebalan pisau, jarak antara pisau, dan jumlah pisau turbin. Ketika melakukan observasi di Laboratorium, dengan debit masuk sebesar $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ dan tinggi jatuh air sebesar 10 m, diameter turbin yang mereka gunakan sebesar 11.8 inch dan panjangnya sebesar 6 inch.

Berdasarkan perhitungan dari formulasi perancangan, besarnya diameter dan panjang turbin sesuai dengan persamaan 2.10 sebagai berikut:

$$D = 11.81 \text{ inch (ditetapkan)}$$

$$L = \frac{144 \times Q}{C \times K \times D \times \sqrt{2gh}}$$

$$L = \frac{144 \times 17.65}{0.98 \times 0.875 \times 11.81 \times \sqrt{2 \times 32.15 \times 32.8}}$$

$$L = \frac{2541.6}{10.13 \times 45.924}$$

$$L = 5.463 \text{ inch}$$

Perbandingan data hasil observasi dengan perhitungan melalui formulasi perancangan adalah sebagai berikut:

Tabel 4.12. Perbandingan Ukuran Diameter dan Panjang Turbin

Bagian Turbin	Hasil Data	Hasil Data
	Observasi	Perhitungan
Diameter	11.8 inch	11.81 inch
Panjang	6 inch	5.463 inch

Dari data data pada tabel, tidak ada perbedaan nilai signifikan pada diameter turbin berdasarkan hasil observasi dan hasil perhitungan data. Perbedaan nilai terjadi dalam penentuan panjang turbin, dengan panjang turbin hasil perhitungan adalah 5.463 inch, sementara data hasil observasi adalah 6 inch. Beda nilai panjang pada turbin mempengaruhi daya tampung air pada turbin tersebut. Semakin banyak air yang masuk, semakin panjang turbin yang diperlukan. Hanya saja, jika panjang turbin ini berlebihan, nilai dari tekanan air menurun akibat tidak terkonsentrasinya tekanan.

Bisa ditarik kesimpulan kalau nilai turbin dari hasil perhitungan dapat dikatakan valid karena perbedaannya tidak signifikan dengan ukuran turbin hasil observasi, yakni hanya 0.537 inch.

Setelah melakukan validasi terhadap diameter dan panjang turbin, langkah berikutnya adalah memvalidasi formulasi perancangan pisau turbin. Perancangan pisau turbin ini meliputi ketebalan pisau, jarak antara pisau, dan jumlah pisau. Berdasarkan hasil observasi, dengan diameter turbin sebesar 11.8 inch, didapatkan ketebalan pisau sebesar 1 inch, jarak antar pisau sebesar 2 inch, dan jumlah pisau adalah 18 bilah. Sementara itu, berdasarkan formulasi perancangan pada persamaan 2.14, 2.15, 2.16, didapatkan data perancangan pisau sebagai berikut:

$$t = k \times D$$

$$t = 0.0875 \times 11.8$$

$$t = 1.033 \text{ inch}$$

$$S = \frac{t}{\sin \beta}$$

$$S = \frac{1.033}{0.5}$$

$$S = 2.066 \text{ inch}$$

$$n = \frac{\pi \times D}{s}$$

$$n = \frac{3.14 \times 11.8}{2.066}$$

$$n = 17.94 \text{ bilah} \sim 18 \text{ bilah}$$

Perbandingan data hasil observasi dengan perhitungan melalui formulasi perancangan adalah sebagai berikut:

Tabel 4.13. Perbandingan Ukuran Perancangan Pisau Turbin

Bagian Pisau	Hasil Data	Hasil Data
Turbin	Observasi	Perhitungan
Ketebalan Pisau	1 inch	1.033 inch
Jarak Antar Pisau	2 inch	2.066 inch
Jumlah Pisau	18 bilah	18 bilah

Mengacu pada tabel, dapat disimpulkan tidak ada perbedaan berarti antara data pisau turbin hasil observasi dengan data pisau turbin hasil perhitungan. Hal ini disebabkan nilai diameter turbin dari data hasil observasi hanya berbeda 0.01 inch dari data hasil perhitungan menggunakan formulasi perancangan. Oleh karenanya, dalam melakukan perancangan, bagian pisau turbin patut mengikuti hasil perhitungan melalui formulasi perancangan tanpa perlu melakukan penyesuaian.

4.2.1.6. Validasi Formulasi Perancangan Generator

Komponen generator agak berbeda dibanding komponen PLTMH lainnya dalam perancangan. Perbedaan ini terletak dari ketersediaan jenis generator di pasaran dan sehingga karakteristiknya tidak dibuat mengikuti sesuai kondisi PLTMH. Hal demikian terjadi pada bagian kecepatan rotasi untuk pengoperasian generator. Kecepatan operasi standar dari generator di pasaran adalah 1500 rpm. Asumsi perancangan dan hasil observasi pun berpijak pada hal sama. Hanya saja, yang perlu diperhatikan pada bagian generator ini adalah kapasitasnya. Dengan kondisi PLTMH yang demikian, kapasitas generator hasil observasi adalah 30 kW.

Sementara itu, berdasarkan formulasi perancangan pada persamaan 2.17, 2.18, 2.19, didapatkan kapasitas generator sebagai berikut:

$$P_t = \frac{p \times g \times h \times Q \times \eta_t}{1000}$$

$$P_t = \frac{1000 \times 9.81 \times 10 \times 0.5 \times 70\%}{1000}$$

$$P_t = 34.335 \text{ kW}$$

$$P_{el} = P_t \times n_g \times n_{tm}$$

$$P_{el} = 34.335 \times 90\% \times 98\%$$

$$P_{el} = 30.28 \text{ kW}$$

$$\text{Gen} = \frac{P_{el} \times \cos \varphi}{80\%}$$

$$\text{Gen} = \frac{30.28 \times 0.8}{80\%}$$

$$\text{Gen} = 30.28 \text{ kW}$$

Perbandingan data hasil observasi dengan perhitungan melalui formulasi perancangan adalah sebagai berikut:

Tabel 4.14. Perbandingan Kapasitas Perancangan Generator

Hasil Data Observasi	Hasil Data Perhitungan
30 kW	30.28 kW

Tabel di atas menginformasikan kita terdapat sedikit perbedaan dalam kapasitas generator, yakni 30.28 kW, sementara data kapasitas generator hasil observasi adalah 30 kW. Perbedaan 0.28 kW ini terjadi karena boleh jadi tidak adanya generator berkapasitas 30.28 kW di pasaran, sehingga dipilihlah bilangan terdekat hasil pembulatan, yakni 30 kW.

Dengan perbedaan 0.28 kW antara hasil perhitungan dalam penentuan kapasitas generator dengan generator riilnya, dengan mempertimbangkan keawetan generator, ada baiknya memilih kapasitas generator lebih besar dari kemungkinan listrik yang dihasilkan. Karena nilai perhitungan lebih besar ketimbang kapasitas generator riilnya, nilai ini patut dipertimbangkan dan wajar jika dianggap valid. Saat perancang memilih kapasitas generator berdasarkan hasil hitungan, tentu umur generator tersebut bias lebih lama karena tidak terlalu terbebani dengan kerja yang dilakukan.

4.2.1.7. Validasi Formulasi Perancangan *Pulley*

Komponen PLTMH terakhir yang dirancang adalah *pulley*. *Pulley* dirancang terakhir mempertimbangkan kondisi turbin dan generator. Seperti dijelaskan sebelumnya, kondisi generator tidak bias disesuaikan 100% sesuai dengan kondisi PLTMH, khususnya dalam minimum kecepatan putar dalam operasional. Dengan kecenderungan minimum kecepatan putar dalam operasional generator di pasaran sebesar 1500 rpm, maka kecepatan turbin harus mampu sebesar itu juga agar generator menghasilkan listrik. Kecepatan putar turbin diketahui melalui perhitungan sesuai persamaan 2.13 sebagai berikut:

$$N = \frac{862 \times \sqrt{h}}{D}$$

$$N = \frac{862 \times \sqrt{32.8}}{11.81}$$

$$N = 418 \text{ rpm}$$

Melalui perhitungan tersebut diketahui jumlah putaran turbin sebesar 418 rpm. Karena nilai tersebut belum memenuhi minimum putaran generator untuk

operasional, maka diperlukanlah *pulley*. Berdasarkan hasil observasi, besarnya diameter *pulley* yang terhubung dengan turbin adalah 28.5 inch, sedangkan besarnya diameter *pulley* yang terhubung dengan generator adalah 8.5 inch. Sementara itu, berdasarkan hasil perhitungan menggunakan formulasi perancangan sesuai dengan persamaan 2.20, didapat ukuran *pulley* sebagai berikut:

$$D_1 = D_{\text{turbin}}$$

$$D_1 = 11.81 \text{ inch}$$

$$D_2 = \frac{\omega_1 \times D_1}{\omega_2}$$

$$D_2 = \frac{418 \times 11.81}{1500}$$

$$D_2 = 3.29 \text{ inch}$$

Perbandingan data hasil observasi dengan perhitungan melalui formulasi perancangan adalah sebagai berikut:

Tabel 4.15. Perbandingan Ukuran Perancangan *Pulley*

Jenis Data	D_{turbin}	$D_{\text{generator}}$	$D_{\text{turbin}}/D_{\text{generator}}$
Observasi	28.5 inch	8.5 inch	3.353
Perhitungan	11.81 inch	3.29 inch	3.59

Tabel tersebut menginformasikan bahwa ada perbedaan cukup signifikan antara besarnya diameter *pulley* yang terhubung pada turbin berdasarkan hasil observasi, dengan besarnya diameter *pulley* yang terhubung pada turbin berdasarkan hasil perhitungan. Besarnya masing-masing yakni 28.5 inch dengan 11.81 inch. Sedangkan, untuk perbedaan ukuran antara diameter *pulley* yang terhubung dengan generator berdasarkan hasil observasi dan ukuran diameter *pulley* yang terhubung

dengan generator berdasarkan hasil perhitungan tidak terjadi perubahan mencolok. Besar keduanya yakni 8.5 inch dan 3.29 inch.

Walaupun ada bagian yang terlihat berbeda jauh, secara perbandingan antara besarnya diameter *pulley* yang terhubung turbin dengan besarnya diameter *pulley* yang terhubung generator, data hasil observasi memberikan hasil dengan perbedaan sedikit dari data hasil perhitungan. Besarnya perbandingan diameter hasil observasi adalah 3.352, sedangkan besarnya perbandingan diameter hasil perhitungan adalah 3.59.

Mengingatnya tidak terjadi perbedaan signifikan antara perbandingan diameter *pulley* terhubung turbin dan generator hasil observasi dengan perbandingan diameter *pulley* terhubung turbin dan generator hasil perhitungan, tidak menjadi masalah seandainya di kemudian hari besarnya ukuran *pulley* mengacu pada data perhitungan hasil dari formulasi perancangan ini. Ada pun perbedaan mencolok antara besarnya diameter *pulley* terhubung turbin hasil observasi dengan diameter *pulley* terhubung hasil perhitungan, hal demikian terjadi karena pertimbangan prinsip dari pihak terkait.

4.2.1.8. Keseluruhan Hasil Validasi Perancangan

Sudah dijelaskan juga sebelumnya bagaimana perbandingan hasil dari formulasi perancangan tersebut terhadap PLTMH yang sudah ada, yakni PLTMH di Laboratorium Tenaga Air Mini milik PLN. Dalam perbandingan antara data hasil observasi dengan data hasil perhitungan, terjadi perbedaan pada beberapa komponen, khususnya pada bagian rancang bangun hidrolik. Akan tetapi, besarnya

perbedaan ini dapat diterima secara logis sehingga tidak dapat dijadikan alasan untuk menilai formulasi perancangan yang digunakan invalid.

Jika diperhatikan pada penjabaran di bagian sebelumnya, ukuran pada bak penang, ukuran pada pipa *penstock*, dan ukuran pada *pulley* terjadi perbedaan signifikan. Ihwal ukuran bak penenang, ukurannya tidak bisa dibakukan mengingat bagian ini bisa memiliki fungsi tambahan selain mengendapkan endapan yang hendak masuk ke sistem pembangkit. Untuk kasus pada PLTMH di Laboratorium Tenaga Air Mini kepunyaan PLN, bak penenang juga berfungsi untuk pengendali volume air jika Sungai Cikatim yang berada di sekitat PLTMH sedang meluap airnya.

Ihwal pipa *penstock*, hasil perhitungan dari formulasi perancangan merupakan nilai minimum mempertimbangkan debit air. Tentu boleh nantinya memilih ukuran pipa *penstock* yang lebih besar, akan tetapi ukuran ini pun nantinya mesti disesuaikan dengan ukuran yang disediakan di pasaran.

Terakhir, yakni perbedaan pada ukuran *pulley*, memang ada perbedaan signifikan antara ukuran *pulley* hasil perhitungan melalui formulasi perancangan dengan *pulley* yang ada di Laboratorium. Hanya saja, ketika dilihat perbandingan antara ukuran *pulley* terhubung turbin dan *pulley* terhubung generator, perbedaan antara hasil perhitungan melalui formulasi perancangan dengan hasil observasi pada Laboratorium berada tidak signifikan. Perbandingan ukuran *pulley* hasil perhitungan adalah 3.59, sedangkan perbandingan ukuran *pulley* hasil observasi adalah 3.353.

4.2.2. Perancangan Komponen PLTMH Di Curug Cigeuntis

Model perancangan berisikan formulasi bagian PLTMH ini diterapkan untuk merancang kemungkinan desain PLTMH di Curug Cigeuntis. Dengan curah hujan 181.62 per-mm dan tinggi jatuh air sebesar 25 meter, Curug Cigeuntis menjadi tempat menjanjikan untuk dibangun PLTMH. Walaupun belum tentu benar akan dibangun PLTMH nantinya, setidaknya melalui model perancangan ini kita dapat mengetahui gambaran dari setiap bagian PLTMH yang diperlukan sesuai kondisi Curug Cigeuntis.

Berdasarkan pada penjelasan di bagian sebelumnya, Curug Cigeuntis mempunyai sungai di atasnya dengan lebar 3 meter dan kedalaman 1.1 meter, serta debit andalan pada *rate* 80% sebesar 0.55 m³/s. Setiap karakteristik dari Curug Cigeuntis ini kemudian dimasukkan pada formulasi perhitungan sebagai data input.

Pada tabel data input, maka akan terlihat tampilan pada gambar 4.16.

Data Input			
Debit air	:	0.55	m ³ / s
Lebar sungai	:	3	meter
Kedalaman sungai	:	1.1	meter
Tinggi jatuh air	:	25	meter

Gambar 4.16. Tampilan Data Input Saat Perancangan

Setelah melakukan data input, kemudian data diolah, dan pengolahan pertama untuk menentukan ukuran dari rancang bangun saluran *intake*. Perhitungan dalam menentukan ukuran *intake* dijabarkan mengacu pada persamaan 2.3 adalah sebagai berikut:

$$Intake = 90\% \times D_{th} \times \ell$$

$$Intake = 90\% \times 1.1 \times 3$$

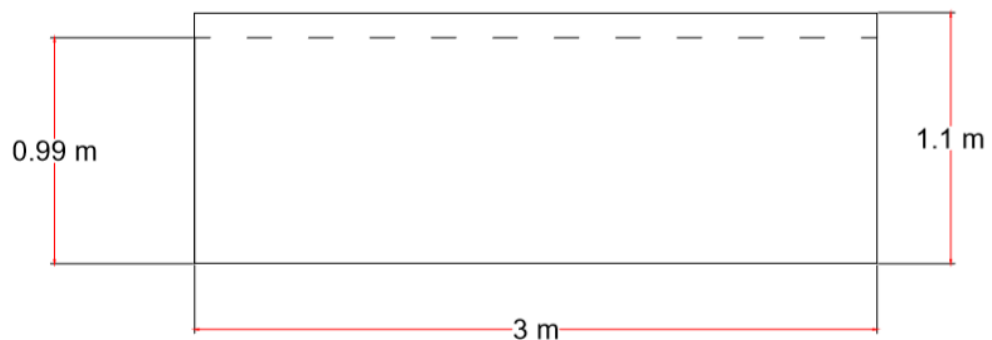
$$Intake = 2.97 \text{ m}^2$$

seperti terlihat pada penjabaran perhitungan tersebut, ukuran *intake* pada perancangan adalah 2.97 m^2 . Saat pengimplementasiannya, nilai ini bisa dibulatkan ke atas menjadi 3 m^2 demi kemudahan pengerjaan. Pada formulasi perancangan, perhitungan *intake* akan ditampilkan seperti gambar 4.17 dan tervisualisasikan pada gambar 4.18.

Rancang Bangun Saluran Intake			
Rumus	:	$intake = 90\% \times D_{th} \times l$	
Keterangan	:		
Intake	=	Ukuran intake	[meter ²]
D_{th}	=	Kedalaman sungai	[meter]
l	=	Lebar sungai	[meter]
Ukuran Intake	=	2.97	[meter ²]

Gambar 4.17. Tampilan Data Saluran *Intake* Saat Perancangan

Ukuran saluran *intake* demikian tervisualisasikan pada gambar 4.18.



Gambar 4.18. Desain Intake Pada PLTMH Curug Cigeuntis

Komponen berikutnya untuk dirancang setelah saluran *intake* adalah bak penenang. Besarnya bak penenang ini bergantung pada debit air. Ada tiga bagian dari bak penenang yang didapatkan nilai melalui perhitungan, yakni panjang bak

penenang, lebar bak penenang, dan kedalaman bak penenang. Perhitungan perancangan dari ketiga bagian bak penenang dijabarkan sesuai dengan persamaan 2.4, 2.5, 2.6 adalah sebagai berikut:

$$L \geq \frac{Q}{\sqrt{U \times 0.125}}$$

$$L \geq \frac{0.55}{\sqrt{0.1 \times 0.125}}$$

$$L \geq 6.63 \text{ m}$$

$$\ell \sim \frac{1}{8} L$$

$$\ell \sim \frac{1}{8} \times 6.64$$

$$\ell \sim 0.829 \text{ m} \sim 0.83 \text{ m}$$

$$D_{th} \sim \frac{L \times U}{V}$$

$$D_{th} \sim \frac{6.63 \times 0.1}{0.3}$$

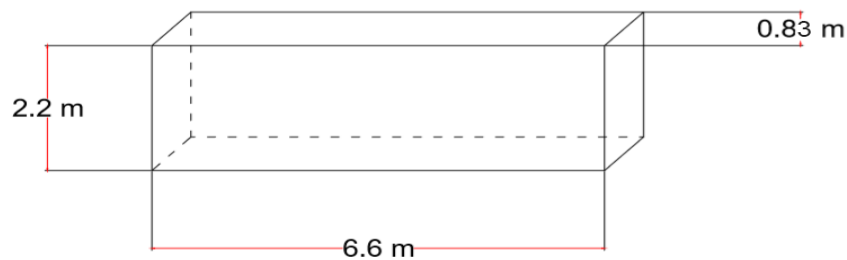
$$D_{th} \sim 2.21 \text{ m} \sim 2.2 \text{ m}$$

seperti terlihat pada penjabaran perhitungan tersebut, ukuran panjang bak penenang pada perancangan adalah lebih besar sama dengan 6.63 meter, ukuran lebar bak penenang adalah 0.83 meter, dan ukuran kedalaman bak penenang adalah 2.2 meter. Nilai ini nantinya bisa digenapkan menjadi 7 meter, 1 meter, dan 2.5 meter agar menjadi mudah pengerjaan pembangunan bak penenang ini. Pada formulasi perancangan, perhitungan bak penenang akan ditampilkan seperti gambar 4.19.

Rancang Bangun Bak Penenang		
Rumus	:	$B = \frac{1}{3} L$ $L \geq \sqrt{\frac{Q}{U \times 0.125}}$ $D_{th} = \frac{L \times U}{v}$
Keterangan	:	
B	=	Lebar bak penenang [meter]
L	=	Panjang bak penenang [meter]
Q	=	Debit air [m^3/s]
U	=	Kecepatan pengendapan [0.1 m/s]
D_{th}	=	Kadalaman bak penenang [meter]
V	=	Kecepatan air [0.3 m/s]
L	=	6.6332 [meter]
B	=	0.8292 [meter]
D_{th}	=	2.2111 [meter]

Gambar 4.19. Tampilan Data Bak Penenang Saat Perancangan

Ukuran bak penenang tervisualisasikan pada gambar 4.20.



Gambar 4.20. Desain Bak Penenang Pada PLTMH Curug Cigeutis

Komponen berikutnya, dan menjadi komponen terakhir dalam perancangan bangun hidrolis adalah perancangan ukuran pipa *penstock*. Ukuran dari pipa *penstock* yang ditentukan melalui perhitungan formulasi perancangan adalah diameter dan ketebalan pipa. Besar keduanya bergantung pada debit air, sama

seperti menentukan ukuran bak penenang, hanya saja dalam perhitungan pipa *penstock* dibutuhkan nilai V_{opt} yang didapatkan dari perbandingan dengan *average angle of penstock*.

Nilai *average angle of penstock* sendiri pun bergantung pada tinggi jatuh air dan panjang pipa *penstock*. Hanya saja, dengan kondisi alam sekitar Curug Cigeuntis yang perlu diperhatikan lebih lagi secara matang, belum dapat ditentukan berapa panjang pipa *penstock*nya. Oleh karenanya, nilai V_{opt} pada perancangan mengikuti nilai V_{opt} pada Laboratorium saat validasi, yaitu sebesar 2.78. Perhitungan untuk menentukan nilai diameter dan ketebalan pipa dijabarkan mengacu pada persamaan 2.7 dan 2.8 adalah sebagai berikut:

$$D \geq \sqrt{\frac{4}{3.142} \times \frac{Q}{V_{opt}}}$$

$$D \geq \sqrt{\frac{4}{3.142} \times \frac{0.55}{2.78}}$$

$$D \geq 0.502 \text{ m} \sim 0.5 \text{ m (50 cm)}$$

$$t_0 \geq \frac{P \times d}{2 \times \theta_a \times \eta} + \delta t$$

$$t_0 \geq \frac{1.1007 \times 50}{2 \times 1300 \times 0.85} + 0.15$$

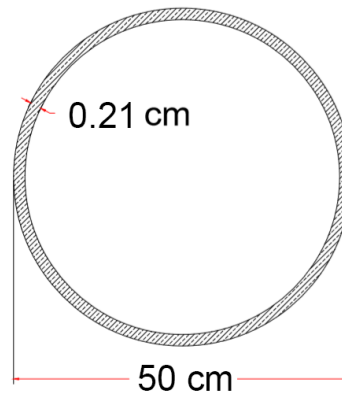
$$t_0 \geq 0.2125 \text{ cm} \sim 0.21 \text{ cm}$$

seperti pada perhitungan di atas, didapatkan besarnya diameter pipa *penstock* adalah 50 cm, dan besarnya ketebalan pipa lebih besar sama dengan 0.21 cm. Hanya saja, pemilihan ukuran ini menyesuaikan dengan ukuran yang ada di pasaran, dan ukuran ini tentu tidak boleh di bawah nilai hasil perancangan yang dibuat. Pada formulasi perancangan, perhitungan pipa *penstock* ditampilkan pada gambar 4.21.

Rancang Bangun Pipa Penstock			
Rumus	:	$D = \sqrt[3]{\frac{4}{3.142} \times \frac{Q}{V_{opt}}}$	[meter]
		$d = D \times 100$	[cm]
		$t_0 \geq \frac{P \times d}{2 \times \theta_a \times \eta} + \delta t$	[cm]
Keterangan	:		
V_{opt}	=	Kecepatan optimum	[m/s]
Q	=	Debit air	[m ³ /s]
h	=	Kedalaman sungai	[meter]
l	=	Lebar sungai	[meter]
D	=	Diameter penstock	[meter]
d	=	Diameter penstock	[cm]
t_0	=	Ketebalan pipa	[cm]
P	=	Tekanan air	[kgf/cm ²]
θ_a	=	Tekanan ditolerir	[1300 kgf/cm ²]
η	=	Efisiensi pengelasan	[0.85~0.9]
δt	=	Batas	[0.15 cm umumnya]
V_{opt}	:	2.78	[m/s]
D	:	0.5018638	[meter]
d	:	50.186378	[cm]
t_0	:	0.2124878	[cm]

Gambar 4.21. Tampilan Data Pipa *Penstock* Saat Perancangan

Ukuran pipa *penstock* tervisualisasikan pada gambar 4.22.



Gambar 4.22. Desain Pipa *Penstock* Pada PLTMH Curug Cigeuntis

Ketika selesai merancang keseluruhan bangun hidrolis, agenda perancangan beralih kepada perancangan komponen elektromekanik. Komponen elektromekanik pertama yang dirancang adalah turbin. Turbin pada formulasi perancangan

ini menggunakan jenis turbin *crossflow*. Untuk merancang turbin *crossflow*, bagian yang perlu diperhatikan adalah diameter turbin, panjang turbin, ketebalan pisau, jarak antara pisau, dan jumlah pisau.

Pertama-tama ditentukan terlebih dahulu besarnya diameter dan panjang turbin. Demi mempermudah perancangan, diameter turbin ditentukan sebesar 11,81 inch. Akan tetapi, perancangan diameter turbin tidak berhenti sampai di situ. Diameter *shaft* dan diameter *pitch circle* juga perlu diperhatikan dalam perancangan dan besarnya mengikuti nilai diameter. Kemudian, untuk panjang turbin sendiri besarnya bergantung pada nilai debit air dan tinggi jatuh air. Semakin besar debit air, semakin besar panjang turbinnya, sementara, semakin besar tinggi jatuh air, semakin kecil panjang turbinnya. Perhitungan panjang turbin dan diameter ini dijabarkan sesuai dengan persamaan 2.10, 2.11, 2.12 pada perhitungan sebagai berikut:

$$D = 11.81 \text{ inch (ditetapkan)}$$

$$D_p = 0.7532 \times D$$

$$D_p = 0.7532 \times 11.81$$

$$D_p = 8.895 \text{ inch} \sim 8.9 \text{ inch}$$

$$D_s = 0.22 \times D$$

$$D_s = 0.22 \times 11.81$$

$$D_s = 2.598 \text{ inch} \sim 2.6 \text{ inch}$$

$$L = \frac{144 \times Q}{C \times K \times D \times \sqrt{2gh}}$$

$$L = \frac{144 \times 19.42}{0.98 \times 0.875 \times 11.81 \times \sqrt{2 \times 32.15 \times 82}}$$

$$L = 3.802 \text{ inch} \sim 3.8 \text{ inch}$$

dari perhitungan tersebut, dengan diameter turbin sebesar 11.81 inch, debit air sebesar 0.55 m³/s (19.42 cf/s), dan tinggi jatuh air sebesar 25 meter (82 ft), didapatkan diameter *pitch circle* sebesar 8.9 inch, diameter *shaft* sebesar 2.6 inch, dan panjang turbin sebesar 3.8 inch.

Setelah mendapati ukuran diameter dan panjang turbin, langkah perancangan turbin selanjutnya adalah menentukan ketebalan pisau, jarak antara pisau, dan jumlah pisau. Besar ketiganya didapatkan dari perhitungan mengacu pada persamaan 2.14, 2.15, 2.16 adalah sebagai berikut:

$$t = k \times D$$

$$t = 0.0875 \times 11.81$$

$$t = 1.033 \text{ inch}$$

$$S = \frac{t}{\sin \beta}$$

$$S = \frac{1.033}{0.5}$$

$$S = 2.067 \text{ inch}$$

$$n = \frac{\pi \times D}{s}$$

$$n = \frac{3.14 \times 11.8}{2.067}$$

$$n = 17.94 \text{ bilah} \sim 18 \text{ bilah}$$

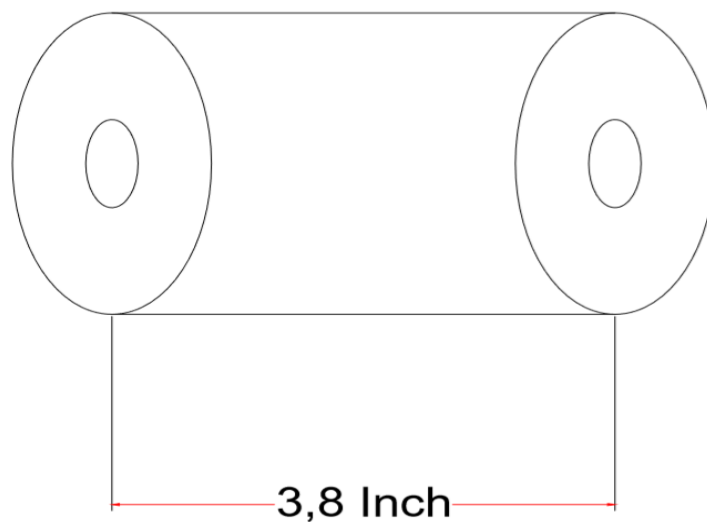
berdasarkan perhitungan di atas, dengan ukuran diameter turbin sebesar 11.81 inch, didapati besarnya ketebalan pisau senilai 1.033 inch, jarak antara pisau sebesar 2.067 inch, dan jumlah pisau sebanyak 18 bilah. Tampilan perhitungan perancangan turbin pada formulasi perancangan dapat dilihat pada gambar 4.23 dan gambar 4.24, sedangkan rancangan turbinnya tervisualisasikan pada gambar 4.25 dan 4.26.

Perancangan Diameter & Panjang Turbin		
Rumus	:	$L = \frac{144 \times Q}{C \times K \times D \times \sqrt{2gh}}$
		$D_p = 0.7532 \times D$
		$D_s = 0.22 \times D$
Keterangan :		
L	=	Panjang turbin [inch]
Q	=	Debit air [cf/s]
C	=	Koefisien nosel 0.98
K	=	Konstanta proporsionalitas 0.875
D	=	Diameter turbin [11.81 inch]
g	=	Gravitasi [32.15 ft/ s ²]
h	=	Tinggi jatuh air [ft]
D _p	=	Diameter <i>pitch circle</i> [inch]
D _s	=	Diameter <i>shaft</i> [inch]
L	=	3.802 [inch]
D _p	=	8.895 [inch]
D _s	=	2.598 [inch]

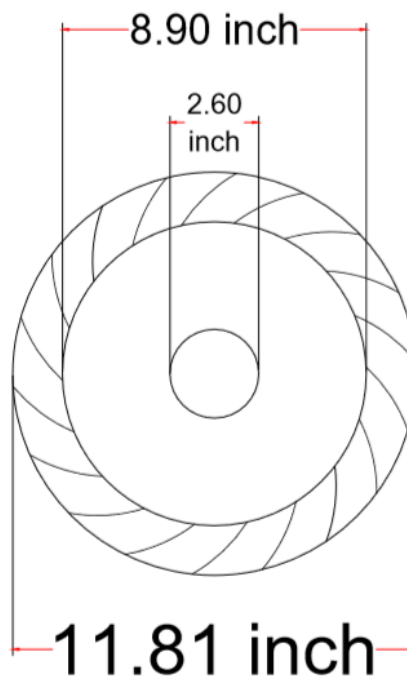
Gambar 4.23. Tampilan Data Diameter & Pajang Turbin Pada Perancangan

Perancangan Pisau Turbin		
Rumus	:	$t = kD$ $s = \frac{t}{\sin \beta}$ $n = \frac{\pi \times D}{s}$
Keterangan	:	
t	=	Ketebalan pisau [inch]
K	=	Konstanta proporsionalitas 0.0875
D	=	Diameter turbin [11.81 inch]
s	=	Jarak antar pisau [inch]
β	=	30°
n	=	Jumlah pisau turbin [bilah]
π	=	3.14
t	=	1.033 [inch]
s	=	2.067 [inch]
n	=	17.94 [bilah]

Gambar 4.24. Tampilan Data Pisau Turbin Pada Perancangan



Gambar 4.25. Desain Panjang Turbin Pada PLTMH Curug Cigeuntis



Gambar 4.26. Desain Turbin Tampak Samping Pada PLTMH Curug Cigeuntis

Setelah mengetahui ukuran turbin, bagian komponen elektromekanikal berikutnya yang dirancang adalah generator, tepatnya kapasitas generator. Generator yang akan dipilih memiliki minimum kecepatan untuk operasional sebesar 1500 rpm, dan besarnya kapasitas generator bergantung dari keluaran daya pada turbin dan kemungkinan daya listrik yang dihasilkan setelah dipengaruhi oleh efisiensi generator dan efisiensi transmisi. Penjabaran dari setiap perhitungan yang dilakukan dalam merancang kapasitas generator mengacu pada persamaan 2.17, 2.18, dan 2.19 adalah sebagai berikut:

$$P_t = \frac{p \times g \times h \times Q \times \eta_t}{1000}$$

$$P_t = \frac{1000 \times 9.81 \times 25 \times 0.55 \times 70\%}{1000}$$

$$P_t = 94.42125 \text{ kW}$$

$$P_{el} = P_t \times n_g \times n_{tm}$$

$$P_{el} = 94.42125 \times 90\% \times 98\%$$

$$P_{el} = 83.28 \text{ kW}$$

$$\text{Gen} = \frac{P_{el} \times \cos \varphi}{80\%}$$

$$\text{Gen} = \frac{83.28 \times 0.8}{80\%}$$

$$\text{Gen} = 83.28 \text{ kW}$$

berdasarkan perhitungan di atas, didapati nilai kapasitas generator yang hendak dipilih ialah 83.28 kW. Besarnya nilai generator ini bergantung pada nilai listrik yang kemungkinan dihasilkan, yakni sebesar 83.28 kW, yang bersumber dari daya yang dihasilkan turbin, yaitu sebesar 94.42125 kW.

Dalam memilih kapasitas generator nantinya, kapasitas hasil perhitungan disesuaikan dengan kapasitas yang tersedia di pasaran, namun disarankan untuk memilih kapasitas generator di atas hasil perhitungan dengan pertimbangan keawetan dari generator tersebut. Tampilan perancangan kapasitas generator pada formulasi perancangan dapat dilihat pada gambar 4.27.

Perancangan Generator	
Rumus	$P_t = \frac{\rho \times g \times h \times Q \times n_t}{1000}$ $P_{el} = P_t \times n_g \times n_{tm}$ $Gen = \frac{P_{el} \times \cos \varphi}{80\%}$
Keterangan	:
P_t	= Daya yang keluar dari turbin [kW]
ρ	= Masa jenis air [1000 kg/m ³]
g	= Gravitasi [9.81 m/s ²]
h	= Tinggi jatuh air [meter]
Q	= Debit air [m ³ / s]
n_t	= Efisiensi turbin [70%]
P_{el}	= Daya listrik yang keluar [kW]
n_g	= Efisiensi generator [90%]
n_{tm}	= Efisiensi transmisi [98%]
Gen	= Kapasitas generator [kW]
$\cos \varphi$	= 0.8
Gen	= 83.28 [kW]

Gambar 4.27. Tampilan Data Kapasitas Generator Pada Perancangan

Komponen terakhir pada bagian elektromekanik adalah *pulley*. *Pulley* hadir untuk mendistribusikan putaran yang dihasilkan turbin kepada generator, dan meningkatkan putaran turbin akan sesuai dengan kecepatan putar minimum generator untuk beroperasi. Seperti sudah dijelaskan sebelumnya, kecepatan putar minimum generator untuk beroperasi ialah 1500 rpm. Untuk mengetahui kecepatan putar yang dihasilkan turbin, dilakukanlah perhitungan sesuai dengan persamaan 2.13 adalah sebagai berikut:

$$N = \frac{862 \times \sqrt{h}}{D}$$

$$N = \frac{862 \times \sqrt{82}}{11.81}$$

$$N = 660.9 \text{ rpm}$$

berdasarkan perhitungan di atas, didapatkan kecepatan putar turbin adalah 660.9 rpm.

Besarnya diameter *pulley* akan bergantung pada nilai kecepatan putar tersebut. Ada dua ukuran *pulley* yang perlu ditentukan, yakni *pulley* yang terhubung dengan turbin dan *pulley* yang terhubung dengan generator. Ukuran *pulley* yang terhubung dengan turbin disamakan dengan nilai diameter turbin tersebut, sehingga perhitungan hanya dilakukan demi mencari ukuran *pulley* yang terhubung pada generator. Perhitungan yang dilakukan dijabarkan mengacu pada persamaan 2.20 adalah sebagai berikut:

$$D_1 = D_{\text{turbin}}$$

$$D_1 = 11.81 \text{ inch}$$

$$D_2 = \frac{\omega_1 \times D_1}{\omega_2}$$

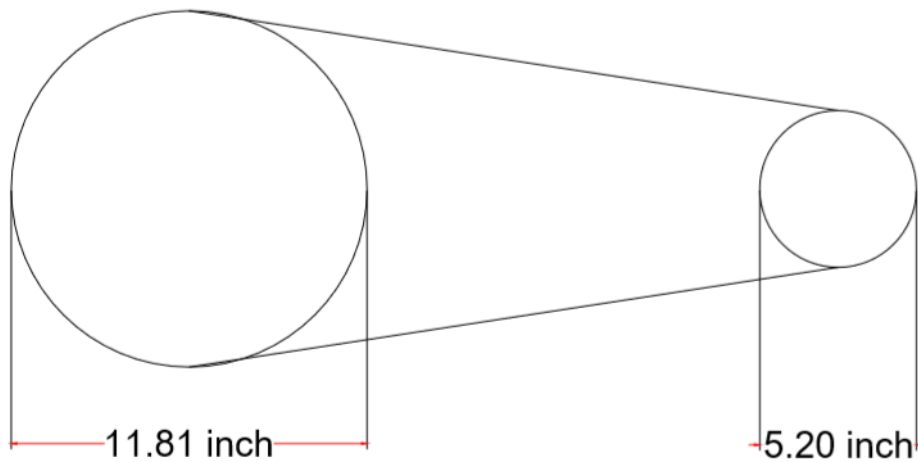
$$D_2 = \frac{660.9 \times 11.81}{1500}$$

$$D_2 = 5.204 \text{ inch}$$

hasil dari perhitungan di atas dapat dilihat bahwa nilai diameter yang terhubung pada generator ialah 5.204 inch. Dengan nilai diameter *pulley* yang terhubung generator lebih kecil disbanding nilai diameter *pulley* yang terhubung turbin, jumlah putaran yang diterima *pulley* terhubung generator akan lebih besar, namun memiliki torsi lebih kecil ketimbang *pulley* terhubung turbin. Namun ini tidak menjadi masalah karena generator tidak memerlukan nilai torsi yang besar. Tampilan perhitungan perancangan *pulley* pada formulasi perancangan dapat dilihat pada gambar 4.28, dan visualisasi dari *pulley* dapat dilihat pada gambar 4.29.

Perancangan Pulley	
Rumus	: $N = \frac{862 \times \sqrt{h}}{D}$ $D_2 = \frac{\omega_1 \times D_1}{\omega_2}$
Keterangan :	
N / ω_1	= Kecepatan putar turbin [rpm]
D / D_1	= Diameter turbin [inch]
h	= tinggi jatuh air [ft]
D_2	= Diameter Pulley untuk generator [inch]
ω_2	= Kecepatan putar generator [1500 rpm]
N	= 660.9 [rpm]
D_2	= 5.204 [inch]

Gambar 4.28. Tampilan Data *Pulley* Pada Perancangan



Gambar 4.29. Desain *Pulley* Pada PLTMH Di Curug Cigeuntis

Nilai ukuran yang didapatkan dari serangkaian perancangan menyesuaikan dengan kondisi Curug Cigeuntis ditampilkan pada tabel 4.16 dan 4.17.

Tabel 4.16. Data Rancang Bangun Hidrolik PLTMH Curug Cigeuntis

Nama Bagian	Ukuran
<i>Intake</i>	2.97 meter ²
Lebar Bak Penenang	0.83 meter
Panjang Bak Penenang	6.6 meter
Kedalaman Bak Penenang	2.2 meter
Diameter <i>Penstock</i>	50.2 cm
Ketebalan <i>Penstock</i>	0.405 cm

Tabel 4.17. Data Rancang Komponen Elektromekanik PLTMH Curug Cigeuntis

Nama Bagian	Ukuran
Diameter Turbin	11.81 inchi
Panjang Turbin	3.8 inchi
Ketebalan Pisau	1.03 inchi
Jarak Antar Pisau	2.067 inchi
Jumlah Pisau	18 buah
Diameter <i>Pitch Circle</i>	8.9 inchi
Diameter <i>Shaft</i>	2.6 inchi
Diameter <i>Pulley</i> Turbin	11.81 inchi
Diameter <i>Pulley</i> Generator	5.204 inchi
Kapasitas Generator	83.28 kW

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Pada penelitian perancangan PLTMH ini dengan Curug Cigeuntis sebagai tempat untuk studi kasus, terdapat dua pertanyaan yang perlu dijawab pada bagian kesimpulan ini. Pertanyaan pertama ialah bagaimana merancang desain dan matematis dalam membangun sebuah PLTMH, sedangkan pertanyaan kedua adalah bagaimana penerapan desain dan matematis PLTMH pada Curug Cigeuntis sebagai lokasi studi kasus. Ihwal pertanyaan pertama, jawabannya dipaparkan sebagai berikut:

1. Model perancangan PLTMH meliputi bangun hidrolis dan komponen elektromekanik. Bangun hidrolis ini terdiri dari saluran *intake*, bak penenang, dan pipa *penstock*. Komponen elektromekanik terdiri dari turbin, generator, dan *pulley*.
2. Ukuran bak penenang terbagi atas tiga jenis, yaitu ukuran panjang, lebar, dan kedalaman. Semakin besar nilai debit air (Q), semakin besar panjang bak penenang.
3. Dalam merancang pipa *penstock*, terdapat dua ukuran yang diperhatikan, yakni diameter pipa dan ketebalan pipa. Semakin besar ukuran diameter pipa, semakin besar ketebalan pipa tersebut.
4. Turbin pada PLTMH memiliki beberapa bagian untuk dirancang. Bagian tersebut adalah diameter turbin, panjang turbin, diameter *pitch circle*, diameter

diameter *shaft*, ketebalan pisau turbin, jarak antara pisau turbin, dan jumlah pisau turbin. Diameter turbin ditetapkan sebesar 11.81 inch. Dari perhitungan didapatkan panjang turbin dipengaruhi oleh besarnya debit air dan tinggi jatuh air. Nilai ketebalan pisau, jarak antara pisau, dan jumlah pisau, besarnya bergantung pada nilai diameter.

5. Besarnya kapasitas generator ini mengacu pada kemungkinan besarnya listrik yang dihasilkan, dan nilai tersebut mengacu daya yang dihasilkan turbin. Untuk itu, pertama-tama ditentukan besarnya daya yang dihasilkan. Kemudian, hasilnya digunakan untuk menghitung kemungkinan besarnya listrik yang dihasilkan. Hasil dari perhitungan besarnya listrik yang dihasilkan kemudian digunakan untuk menentukan kapasitas generator yang hendak digunakan.
6. *Pulley* merupakan komponen terakhir dari PLTMH yang ditentukan ukurannya. Ukuran *pulley* terbagi atas dua jenis, yakni ukuran diameter *pulley* terhubung turbin, dan ukuran diameter *pulley* terhubung generator. Besar keduanya ditentukan melalui nominal putaran turbin dan putaran generator. Ihwal putaran generator, nominalnya mengacu pada karakteristik barangnya yang diasumsikan sebesar 1500 rpm. Untuk ukuran diameter *pulley* sendiri, demi mempermudah hitungan, ukuran diameter *pulley* terhubung turbin besarnya disamakan dengan turbinnya, sehingga hanya perlu mencari nilai dari diameter *pulley* terhubung generator.
7. Dengan debit air di Curug Cigeuntis sebesar $0.55 \text{ m}^3/\text{s}$, tinggi jatuh air sebesar 25 meter, dan lebar serta kedalaman sungai sebesar 3 meter dan 1.1 meter, didapati ukuran saluran *intake* sebesar 2.97 m^2 , ukuran bak penenang dengan

panjang 6.6 meter; lebar 0.83 meter; kedalaman 2.2 meter, ukuran pipa *penstock* dengan diameter sebesar 50.2 cm dan ketebalan pipa sebesar 0.21 cm. Selanjutnya, ukuran turbin dengan diameter sebesar 11.81 inch; panjang 3.8 inch; diameter *pitch circle* 8.9 inch; diameter *shaft* 2.6 inch; ketebalan pisau 1.033 inch; jarak antar pisau 2.067 inch; jumlah pisau 18 bilah. Untuk kapasitas generator yang digunakan adalah 104.1 kW, dengan diameter *pulley* sebesar 11.81 inch dan 5.204 inch.

5.2. Saran

Saran pada penelitian perancangan PLTMH ini, yaitu sebagai berikut:

1. Perlu dilakukannya pengamatan menyeluruh pada wilayah yang ingin dibangun PLTMH demi penentuan lokasi masing-masing komponen PLTMH yang diperlukan.
2. Perlu dipelajari terlebih dahulu peran PLTMH bagi lingkungan sekitar selain membangkitkan listrik, agar nantinya peran ini menyesuaikan masing-masing ukuran komponen PLTMH.

DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar, Artono & Kuwahara, Susumu. (1974). Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik 1. Jakarta: Pradnya Paramita.
- [BPS] Badan Pusat Statistik. Jumlah Curah Hujan dan Jumlah Hari Hujan di Stasiun Pengamatan BMKG, 2011-2015, akses online 18 Agustus 2017, URL: <https://www.bps.go.id/linkTabelStatis/view/id/1959>.
- [BPS] Badan Pusat Statistik Kabupaten Karawang. Keadaan Curah Hujan Tiap Bulan Menurut Kecamatan (mm) Kabupaten Karawang Tahun 2013, akses online 9 September 2017, URL: <https://karawangkab.bps.go.id/linkTabelStatis/view/id/10>.
- Bostan, I., et al. (2013). Resilient Energy Systems. London: Springer.
- Castaldi, D., Chastain, E., Windram, M., & Ziatyk, L. (2003). A Study of Hydroelectric Power: From a Global Perspective to a Local Application. Pennsylvania: The Pennsylvania State University.
- Clemen, M.D. (1999). Hydro Plant Electrical Systems. Kansas City: HCI Publications.
- Dandekar, M.M & Sharma, K.N. (1979). Water Power Engineering. Noida: Vikas Publishing House.
- Davis, Scott. (2003). Microhydro, Clean Power Form Water. Gabriola Island: New Society Publishers.
- Department of Energy, Energy Utilization Management Bureau. (2009). Manuals and Guidelines for Mirco-hydropower Development in Rural Electrification.
- Dwivedi, M., Srivastava, A.P., & Raja, A.K. (2006). Power Plant Engineering. New Delhi: New Age International.
- [ESHA] European Small Hydro Association. (2004). Guide on How To Develop a Small Hydropower Plant.
- [IFC] International Finance Corporation. Hydroelectric Power, A Guide for Developers and Investors. Stuttgart: Fichtner.
- Indayanti, D. (2009). *Skripsi: Perbandingan Hasil Penentuan Curah Hujan Bulanan Menurut Teori Mohr Dan Oldeman Dengan Pendekatan Sistem Informasi Geografis*, Program Studi Sistem Informasi Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah, Jakarta.

- Ismail, & Supriono. 2013. Analisis Ekonomi Energi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Meragun (Desa Meragun, Kec. Nanga Taman, Kab. Sekadau), *Jurnal ELKHA Vol. 5, No.1 hal 31-40*.
- Khan, A. M., & Badshah, S. (2014) Design and Analysis of Cross Flow Turbine for Micro Hydro Power Application using Sewerage Water, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, Vol 8 pp. 821-828*.
- Leyland, B. (2014). Small Hydroelectric Engineering. Leiden: CRC Press.
- [PLN] Perusahaan Listrik Negara. (2015). Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL).
- Mockmore, C, A. & Merryfield, F. (1949). The Banki Water Turbine. Oregon: Oregon State College.
- Mott, L, R. (2004). Machine Elements in Mechanical Design. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Pudjanarsa, A & Nursuhud, D. (2008). Mesin Konversi Energi. Yogyakarta: Penerbit ANDI.
- Putro, Y, S, S., Juwono, P, T., & Wicaksono, P, H. Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Di Sungai Atei Desa Tumbang Atei Kecamatan Sanamang Mantikai Kabupaten Katingan Provinsi Kalimantan Tengah.
- Purwanto. 2011. Analisis Finansial Dan Ekonomi Pembangkit Listrik Mikrohidro Di Beberapa Lokasi, Propinsi Jawa Tengah, Indonesia, *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan Vol. 8 hal 251-264*.
- Ramos, H. (2000). Guideline For Design Of Small Hydropower Plants. Belfast: WREAN & DED
- Susatyo, A. (2003). Pengembangan Turbin Air Type Cross-Flow Diameter Runner 400 mm, *Pemaparan Hasil Litbang hal 1-20*.
- Wibowo, N, A., Dermawan, V., Harisuseno., D. Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Wamena Di Kabupaten Jayawijaya Provinsi Papua.
- Yusri., Roswaldi., Alwys, Munafri., Asmed. 2011. Rekayasa Turbin Air Jenis Cross Flow Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Jorong Lubuk Salasih, Kecamatan Gunung Talang, Kabupaten Solok, *Jurnal Teknik Mesin Vol. 8 hal 72-77*.

Zuliari, E, A., Khomsah, A. (2014). Perencanaan Turbin Cross Flow Sudu Bambu Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Pico Hidro Kapasitas 200 Watt, *Seminar Internasional Teknologi Terapan* hal. 449-458.

LAMPIRAN

Glosarium

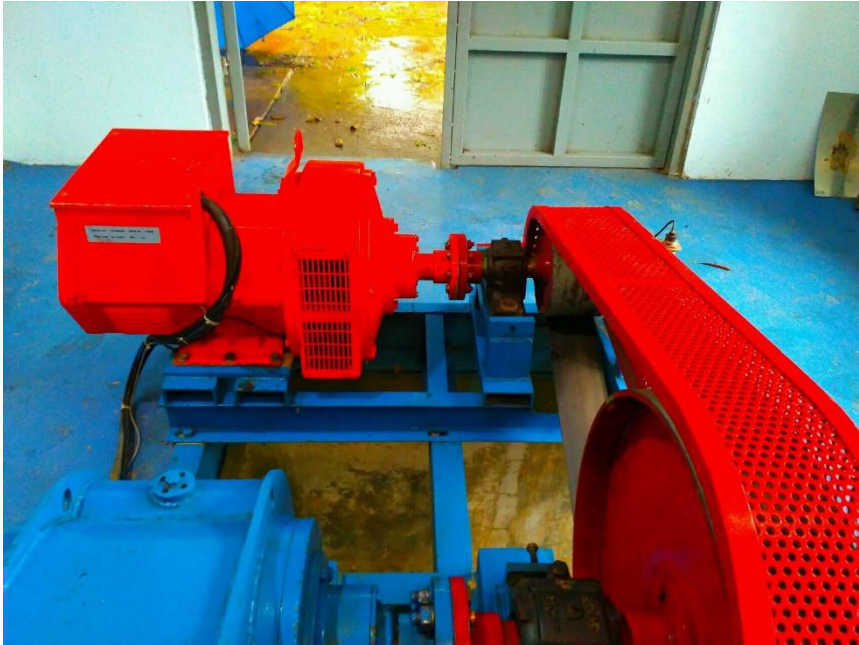
Bak penenang	:	Tempat memperlambat aliran air agar sedimen yang terkandung mengendap
Curah hujan	:	Banyaknya hujan yang turun di suatu daerah dalam jangka waktu tertentu
Debit air	:	Volume air yang mengalir dalam satuan waktu
Efisiensi	:	Nilai yang bisa dimanfaatkan, kedayagunaan
Endapan	:	Sesuatu yang bercampur dengan barang cair yang turun ke bawah dan tertimbun di dasar
Intake	:	Tempat aliran air memasuki suatu sistem
Nosel	:	Pipa atau saluran yang ujungnya menyempit untuk mengarahkan aliran zat cair atau gas
Pipa penstock	:	Pipa yang membawa, mengarahkan, dan mengatur aliran air Lingkaran imajiner pada bangun roda dengan pusat lingkaran
Pitch Circle	:	sama dengan roda tersebut yang bertujuan untuk menempatkan gigi roda, atau sejenisnya
Potensi energi	:	Kemungkinan nilai energi yang dapat dikembangkan Sebuah roda, atau satu set roda yang menggunakan rantai, sabuk,
Pulley	:	atau tali untuk mengangkat benda berat atau memutar sebuah benda yang terhubung dengannya Sebuah batang besi pada mesin untuk menopang sebuah
Shaft	:	komponen atau memutar komponen yang tidak mendapat pengaruh untuk berputar
Turbin	:	Mesin atau motor yang roda penggeraknya berporos dengan sudu yang digerakkan oleh aliran air, uap, atau udara

Daftar Simbol

D_{th}	: Kedalaman (meter)
ℓ	: Lebar (meter)
L	: Panjang (meter)
Q	: Debit air (m^3/s)
U	: Kecepatan pengendapan (m/s)
V	: Kecepatan air (m/s)
D	: Diameter (meter)
V_{opt}	: Kecepatan optimum (m/s)
t_0	: Ketebalan pipa (cm)
P	: Tekanan air (kgf/cm^2)
θ_a	: Tekanan ditolerir ($1300 kgf/cm^2$)
η	: Efisiensi pengelasan (0.85~0.9)
δt	: Batas (0.15 cm umumnya)
C	: Koefisien nosel (0.98)
K	: Konstanta proporsionalitas (0.875)
G	: Gravitasi ($9.81 m/s^2$ atau $32.15 ft/s^2$)
h	: Tinggi jatuh air (meter atau ft)
D	: Diameter (inch)
D_p	: Diameter <i>pitch circle</i> (inch)
D_s	: Diameter <i>shaft</i> (inch)
S	: Jarak antar pisau (inch)
T	: Ketebalan pisau (inch)
N	: Jumlah pisau (bilah)
P_t	: Daya keluar turbin (kW)
P	: Masa jenis air ($1000 kg/m^3$)
η_t	: Efisiensi turbin (70%)
P_{el}	: Daya listrik yang keluar (kW)
η_g	: Efisiensi generator (90%)

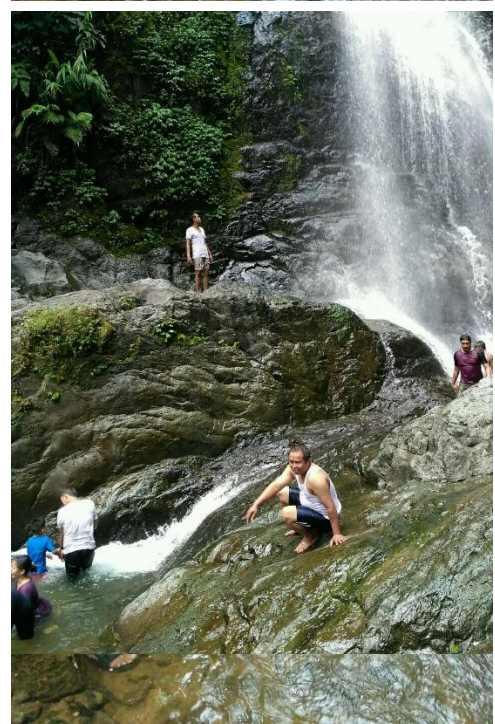
η_{tm} : Efisiensi transmisi (98%)
Gen : Kapasitas generator (kW)
Cos φ : Cos phi (0.8)
 N : Kecepatan putar turbin (rpm)

Dokumentasi Penelitian Di Laboratorium Tenaga Air Mini PLN





Dokumentasi Penelitian Di Curug Cigeuntis





DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Bayu Suryo Wiranto, lahir di Jakarta tanggal 26 Oktober 1994. Merupakan anak pertama dari tiga bersaudara, dan merupakan putra dari Bapak Benjamin Gondo Wibowo dan Ibu Idawati. Penulis menyelesaikan pendidikan sekolah dasar di SDN Rawamangun 01 Pagi dan lulus pada tahun 2005. Penulis kemudian melanjutkan ke jenjang sekolah menengah pertama di SMPN 92 Jakarta dan lulus di tahun 2008, kemudian lanjut ke sekolah menengah akhir di SMAN 31 Jakarta dan lulus di tahun 2011. Pria yang akrab disapa Bayu ini memulai pendidikan di Universitas Negeri Jakarta pada tahun 2012 dengan program S1 Pendidikan Vokasi Teknik Elektro.

Penulis sangat berminat untuk aktif pada dunia organisasi, dimulai dari organisasi tingkat jurusan seperti Himpunan Mahasiswa Jurusan (HMJ), hingga organisasi tingkat nasional, yakni Ikatan Lembaga Penalaran dan Penelitian Mahasiswa Indonesia (ILP2MI). Penulis juga aktif berkarya melalui tulisannya pada konferensi tingkat nasional dan internasional. Pengalaman kerja penulis adalah saat melakukan praktek kerja lapangan (PKL) di PT. KAI dalam urusan Listrik Aliran Atas untuk kereta rel listrik. Selanjutnya, penulis juga pernah merasakan mengajar di SMKN 55 Jakarta pada saat melakukan program keterampilan mengajar (PKM), dan mengajar di Labschool Rawamangun untuk ekstrakurikuler jurnalistik.